

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería



**APROVECHAMIENTO DE DESECHOS ORGÁNICOS
SELECCIONADOS DEL ZOOLOGICO “LA AURORA”**

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por: Melanie Marie Castillo Mazariegos, Rodolfo José Galdámez Falla y Oscar Samuel Duarte Salguero para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química; por Karla María Salguero Salguero para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería en Ciencias de la Administración; y por Anna Yunuen Soto Fernández para optar al grado académico de Licenciada en Bioquímica y Microbiología

Guatemala,

2014

**APROVECHAMIENTO DE DESECHOS ORGÁNICOS
SELECCIONADOS DEL ZOOLOGICO “LA AURORA”**

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería



**APROVECHAMIENTO DE DESECHOS ORGÁNICOS
SELECCIONADOS DEL ZOOLOGICO “LA AURORA”**

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por: Melanie Marie Castillo Mazariegos, Rodolfo José Galdámez Falla y Oscar Samuel Duarte Salguero para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química; por Karla María Salguero Salguero para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería en Ciencias de la Administración; y por Anna Yunuen Soto Fernández para optar al grado académico de Licenciada en Bioquímica y Microbiología

Guatemala,


2014

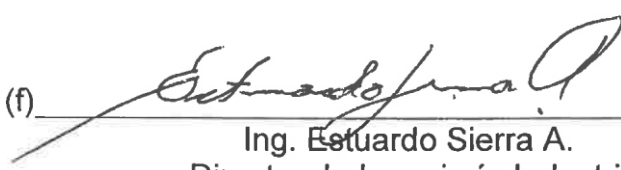
Vo.Bo.

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano (Coordinador)

Tribunal examinador:

(f) 
Ing. Celso Cerezo
Director de Ingeniería en Ciencia de la Administración

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano
Director de Ingeniería Química

(f) 
Ing. Estuardo Sierra A.
Director de Ingeniería Industrial

(f) 
Licda. Lucía Nitsch
Director de Licenciatura en Bioquímica y Microbiología

Fecha de aprobación: Guatemala, 11 de noviembre de 2014

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS.....	ii
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE ECUACIONES.....	vii
RESUMEN.....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	4
III. JUSTIFICACIÓN.....	8
IV. MARCO TEÓRICO.....	10
V. METODOLOGÍA.....	64
VI. ANTECEDENTES:.....	79
VII. RESULTADOS.....	86
VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	120
IX. CONCLUSIONES.....	151
X. RECOMENDACIONES.....	155
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	158
XII. APÉNDICE.....	166
XIII. GLOSARIO.....	228

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales componentes del biogás	10
Tabla 2. Producción de estiércol, contenido de sólidos y producción de biogás de distintos animales.	19
Tabla 3. Cinética de reacción para reacciones de diferentes órdenes	30
Tabla 4. Límite de aceptación de composición del biogás	40
Tabla 5. Consumo y rendimiento de biogás en artefactos	40
Tabla 6. Empresas generadoras de energía eléctrica en Guatemala.....	54
Tabla 7. Diferentes proporciones de estiércol de elefante, jirafa y agua para crear las mezclas a evaluar.	64
Tabla 8. Descripción de las cinco mezclas de estiércol de jirafa y elefante probadas (porcentaje v/v) y volumen inicial de la mezcla.	86
Tabla 9. Resultados del análisis de número más probable para la estimación de la población bacteriana en las cinco mezclas (Primer muestreo).	89
Tabla 10. Resultados del análisis de número más probable para la estimación de la población bacteriana en las cinco mezclas (Segundo muestreo).	90
Tabla 11. Resultados del análisis de número más probable para la estimación de la población bacteriana en las cinco mezclas (Tercer muestreo).....	90
Tabla 12. Datos para la prueba de Kruskal-Wallis de la carga microbiológica de las cinco mezclas (datos obtenidos del programa IBM SPSS Statistics versión 21).	91
Tabla 13. Estadísticos de contraste obtenidos para realizar la interpretación de resultados de la prueba de Kruskal-Wallis (datos obtenidos del programa IBM SPSS Statistics versión 21).	91
Tabla 14. Datos para la prueba de Mann-Whitney de la carga microbiológica de las mezclas 2 y 3 (datos obtenidos del programa IBM SPSS Statistics versión 21).....	92
Tabla 15. Estadísticos de contraste obtenidos para realizar la interpretación de resultados de la prueba de Mann-Whitney (datos obtenidos del programa IBM SPSS Statistics versión 21).	92
Tabla 16. Resumen de los resultados del análisis microbiológico y caracterización química del biogás generado por las diferentes mezclas analizadas.	94
Tabla 17. Resultados del análisis de número más probable para la estimación de la población bacteriana del biodigestor a escala normal.	95
Tabla 18. Caracterización física de desechos sólidos seleccionados en Zoológico "La Aurora" a través de diferentes métodos analíticos estandarizados.	96
Tabla 19. Caracterización bioquímica para determinación de proteína y grasas de desechos orgánicos seleccionados en Zoológico "La Aurora" a través de métodos Kjeldahl y Soxhlet.....	96
Tabla 20. Parámetros de ecuación y ecuación final de velocidad de reacción de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" con base en modelo de cinética de reacción tipo Michaelis-Menten	97
Tabla 21. Tasa de generación de biogás a partir de los desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" a través de su fermentación anaeróbica en biodigestor piloto.	98
Tabla 22. Dimensiones y parámetros de funcionamiento de bioreactor STR de tanque agitado seleccionado para la fermentación anaeróbica de la totalidad de desechos orgánicos de Zoológico "La Aurora".	98
Tabla 23. Contenido de H ₂ S en biogás en el diez mediciones realizadas en la primera	

carga de desechos seleccionados de elefante y jirafa	100
Tabla 24. Contenido de CO ₂ en biogás en el diez mediciones realizadas en la primera carga de desechos seleccionados de elefante y jirafa	101
Tabla 25. Comparativo de poder calorífico de gas con tratamiento y sin tratamiento de limpieza de reducción de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono	103
Tabla 26. Especificaciones técnicas de filtros de óxido de hierro e hidróxido de calcio para biogás generado en el biodigestor a partir de desechos orgánicos de Zoológico la Aurora	103
Tabla 27. Resultados Estudio de Tiempos Actual.....	106
Tabla 28. Resultado Estudio de Tiempos Situación Propuesta	108
Tabla 29. Salario de Cuidador.....	109
Tabla 30. Mano de Obra Directa	109
Tabla 31. Costos Indirectos de Fabricación	110
Tabla 32. Estado de Costos Totales	110
Tabla 33. Especificación de Biodigestor.....	111
Tabla 34. Capacidades de Biodigestor.....	111
Tabla 35. Costos por unidad de medida.....	112
Tabla 36. Cálculo de la TMAR.....	112
Tabla 37. Inversión Inicial	112
Tabla 38. Resumen Factibilidad Financiera	113
Tabla 39. Cuadro comparativo proyectos mutuamente excluyentes	115
Tabla 40. Estado de Resultados Modelo de Negocios	116
Tabla 41. Flujo de efectivo "Modelo de Negocios"	117
Tabla 42. Análisis de sensibilidad volumen m ³ de biogás para alternativa de generación de energía eléctrica.....	147
Tabla 43. Análisis de sensibilidad capacidad de producción Kwh mensual	148
Tabla 44. Periodo de recuperación inversión en "Estufas de biogás"	149
Tabla 45. Avance de la producción de biogás medido en litros de las cinco mezclas de estiércol de elefante y jirafa y temperatura de la incubadora	166
Tabla 46. Tabla de Número Más Probable (NMP) utilizada para el resultado del análisis microbiológico (Obtenida de USDA, 2014).....	194
Tabla 47. Cotizaciones para inversión	210
Tabla 48. Porcentaje de variación en precio energía eléctrica:	211
Tabla 49. Amortización préstamo.....	212
Tabla 50. Cálculo de potencia máxima para iluminación externa	213

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ecuación química de hidrólisis de hidratos de carbono	18
Ilustración 2: Ecuación química de hidrólisis de proteínas	18
Ilustración 3: Ecuación química de hidrólisis de lípidos.....	19
Ilustración 4: Constitución de biomasa y degradación de componentes.....	21
Ilustración 5: Tipos de biodigestores	23
Ilustración 6: Mecanismo de reacción enzimática	31
Ilustración 7: Dependencia de velocidad de reacción hacia concentración de sustrato	32
Ilustración 8: Ecuación química para reacción enzimática	33
Ilustración 9: Correlación número de potencia y número de reynolds a diferentes relaciones de diámetro agitador tanque.....	72
Ilustración 10: Cálculo de número de potencia.....	72
Ilustración 11: Gráfica de mediciones de pH durante monitoreo de biodigestor piloto a lo largo de fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora".	96
Ilustración 12: Mediciones de temperatura durante monitoreo de biodigestor piloto a lo largo de fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora".	97
Ilustración 13: Esquema y dimensiones de reactor STR diseñado para la fermentación anaeróbica de la totalidad de desechos orgánicos de Zoológico "La Aurora".	99
Ilustración 14: Vista isométrica de bioreactor STR diseñado para la fermentación anaeróbica de la totalidad de desechos orgánicos generados en Zoológico "La Aurora"	99
Ilustración 15: Vista isométrica visible sobre el terreno de bioreactor STR diseñado para la fermentación anaeróbica de la totalidad de desechos orgánicos generados en Zoológico "La Aurora"	100
Ilustración 16: Gráfica de relación de datos experimentales de prueba piloto de fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" para determinación de parámetros de ecuación de Michaelis Menten.	174
Ilustración 17: Gráfica de resultados de generación de ácido sulfídrico (H ₂ S) a lo largo del tiempo durante digestión anaerobia de desechos orgánicos seleccionados de Zoológicos "La Aurora" durante prueba piloto.....	175
Ilustración 18: Resultados de generación de metano (CH ₄) a lo largo del tiempo durante digestión anaerobia de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" durante prueba piloto.	175
Ilustración 19: Gráfica de comportamiento de velocidad de reacción de fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" a lo largo del tiempo.....	176
Ilustración 20: Gráfica de ecuación final de velocidad de reacción para la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" con base en modelo de cinética de reacción enzimático Michaelis-Menten	176
Ilustración 21: Copia de resultados de pruebas de absorción de gases de biogás obtenido durante fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora"	195
Ilustración 22: Resultados integrados de pruebas de absorción de gases de biogás obtenido durante fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora".	196
Ilustración 23: Biodigestor utilizado durante prueba piloto de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora"	197

Ilustración 24: Diagrama de equipos utilizados durante pruebas piloto de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" 197

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso generalizado de digestión anaeróbica desde la materia prima (biomasa) hasta el uso directo y sub-productos.	13
Figura 2. Descomposición de compuestos orgánicos para la producción de biogás.	15
Figura 3. Diagrama de flujo neto	44
Figura 4. Conjunto de símbolos estándar de diagramas de procesos	50
Figura 5. Símbolos no estándares de los diagramas de procesos	51
Figura 7. Requisitos para ser participante en el sector eléctrico	58
Figura 8. Ubicación panorámica Zoológico "La Aurora"	83
Figura 9 Patrocinadores Zoológico "La Aurora"	84
Figura 10. Volumen de biogás producido por cinco mezclas diferentes de estiércol de elefante y jirafa durante 57 días de incubación (la medición del volumen de biogás se realizó cada 2 ó 3 días).	86
Figura 11. Volumen de biogás producido por las mezclas dos y tres originales y con inóculo bacteriano añadido (con asterisco) durante 35 días de incubación (la medición del volumen de biogás se realizó cada 2 ó 3 días).	87
Figura 12. Representación gráfica del porcentaje de área del pico característico de metano en biogás, obtenido mediante GC-FID.	87
Figura 13. Representación gráfica del porcentaje del área del pico característico de dióxido de carbono en biogás, obtenido mediante GC-FID.	88
Figura 14. Representación gráfica del porcentaje del área del pico característico de ácido sulfhídrico en biogás, obtenido mediante GC-FID.	88
Figura 15. Comparación de los porcentajes de las áreas de picos característicos del cromatograma de gases de metano (CH ₄), dióxido de carbono (CO ₂) y ácido sulfhídrico (H ₂ S) del biogás producido por las cinco mezclas de estiércol.	89
Figura 16. Comparación de la carga microbiológica y área del pico de metano de las cinco mezclas.	93
Figura 18. Comparación de la carga microbiológica y área del pico de ácido sulfhídrico de las cinco mezclas.	94
Figura 19. Comportamiento de la carga bacteriana en el biodigestor a escala normal durante seis días luego de una carga con estiércol de jirafa y elefante (las muestras se tomaron cada tres días).	95
Figura 20. Gráfica análisis de sensibilidad volumen de biogás	147
Figura 21. Gráfica análisis de sensibilidad producción mensual Kwh	148
Figura 22. Periodo de recuperación inversión de capital	150
Figura 23. Representación gráfica de la variación de temperatura de la incubadora (entre 40 -45°C) durante los 57 días de incubación.	167
Figura 24. Caja de anaerobiosis utilizada en el análisis microbiológica. Están cerrada herméticamente, los tubos con las muestras en el interior, el GasPak (paquete de aluminio) y el indicador que no se observa en esta imagen. La caja se colocaba dentro de la incubadora a 42°C durante 48 horas.	198
Figura 25. Color del indicador antes y después de la incubación en ambiente anaerobio.	199
Figura 26. Biodigestores a escala de laboratorio dentro de la incubadora a temperatura constante.	199
Figura 27. Variación histórica de tarifas Q/Kwh	212
Figura 28. Precio energía eléctrica Tarifa Social	214
Figura 29. Proyecciones de población guatemalteca	214
Figura 30. Población guatemalteca por grupo de edad y sexo	214

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Estimación de producción de biogás	20
Ecuación 2: Tiempo de retención hidráulica.....	27
Ecuación 3: Tiempo de retención de sólidos.....	28
Ecuación 4: Carga de materia orgánica (Zhou, I. 2007)	28
Ecuación 5: Ecuación de diseño para reactor continuo	29
Ecuación 6: Ecuación de Michaelis Menten	33
Ecuación 7: Flujo de efectivo.....	43
Ecuación 8: Cálculo de DQO.....	67
Ecuación 9: Cálculo de porcentaje de grasa.....	70
Ecuación 10: Determinación de retención de sólidos (SRT).....	71

RESUMEN

El objetivo general del presente trabajo fue el aprovechamiento de residuos orgánicos del Zoológico “La Aurora”. Esto se realizó a partir de la selección de excretas de animales para la producción biogás, a partir de su digestión anaerobia, así como la evaluación de los procesos involucrados y el modelo de negocio para hacer viable la implementación del proyecto en el Zoológico.

El desarrollo del proyecto propuesto abarca la caracterización de los desechos orgánicos generados en el Zoológico “La Aurora” así como la identificación de la mezcla adecuada de los mismos a la cual se logra producir la mayor cantidad de gas metano en un biodigestor. A lo largo del proyecto se operó un biodigestor piloto en la Universidad del Valle de Guatemala con desechos orgánicos producidos en el Zoológico “La Aurora”. A partir de estos resultados se escaló la operación a un biodigestor piloto que permitió el monitoreo de la reacción y sus productos para la determinación de la cinética de la reacción, cantidad de biogás a generar y filtros necesarios para su uso. Por último se determinaron los procesos necesarios para su operación, costos de los mismos, viabilidad económica y el modelo de negocio que maximizaría la rentabilidad del proyecto. Los proyectos propuestos como alternativas para el uso del biogás a generar son: Generación de energía eléctrica, iluminación por lámparas de biogás y uso de metano en estufas de biogás para “Comiplaza chapina”.

Los resultados de los distintos módulos trabajados en el megaproyecto permiten concluir que la mezcla de estiércol de elefante (50%) y jirafa (50%) sin agua produce el mayor porcentaje de metano. Fue posible determinar que el reactor necesario para la biodigestión anaeróbica de los desechos orgánicos totales generados en Zoológico “La Aurora” es un reactor de tanque agitado, intermitente, cilíndrico, de un volumen de 7 m³, 1.65 m diámetro y 3.30 m de alto que operará a con un tiempo de residencia de 15 días a una alimentación diaria de 0.22 m³ de desechos orgánicos al día a una relación desechos orgánicos - agua 1:1. Por otro lado a través de absorción, utilizando 14.09kg de óxido de hierro es posible filtrar durante seis meses 1567 m³ de biogás reduciendo un 86.03% su contenido de sulfuro de hidrógeno llevándolo a 13.7ppm, concentración óptima para su utilización en equipos.

El proceso propuesto con el biodigestor instalado consta con una distribución de 80.86% de valor agregado y 19.15% de valor no agregado para el tiempo de proceso de recolección de los desechos orgánicos del Zoológico “La Aurora”. Los costos de operación anuales del biodigestor son de GTQ 6,751.75 anuales, con un costo unitario de metro cúbico de GTQ 2.15. El costo de operación es básicamente la inversión inicial donde ya viene incluida la instalación del biodigestor con un valor inicial de GTQ 76,600.00. El proyecto es económicamente viable debido a los ahorros por recolección que por el ingreso de venta de biogás. Se determinó una tasa interna de retorno de 56.24% y con el costo de oportunidad de la TMAR de 8.06% es factible económicamente. El valor presente neto es de GTQ 107,152.36.

La recuperación de capital del proyecto de “Estufas de biogás” se logra a partir del primer año, siendo la mejor alternativa económicamente.

El mercado meta para la venta de bonos de carbono es el mercado voluntario dado a que al regulado ya solo pertenece Europa y dicho continente tiene hasta el próximo año para dar respuesta si reitera o no su compromiso

Los módulos desarrollados proponen como recomendación general poder abarcar una mayor cantidad de desechos orgánicos generados en el Zoológico y sus alrededores para poder validar las diferentes variables involucradas. Además, se recomienda realizar las mismas pruebas microbiológicas y químicas (análisis del biogás) con mezclas de estiércol de otros animales del Zoológico, junto con desechos orgánicos vegetales y de cocina. Así como análisis poblacional (ecológico) de las bacterias anaerobias presentes en la materia prima. Se recomienda considerar un diseño de filtros de reducción de CO₂ y de sulfuro de hidrógeno acorde como se indica en las dimensiones y material recomendado para obtener mayor eficiencia de los filtros y aprovechar hasta su agotamiento y obtener un mejor poder calorífico del biogás y por ende mejor rendimiento al utilizarlo. En el análisis de los procesos de recolección, la recomendación más significativa para el proyecto fue realizar más corridas de estudios de tiempos en diferentes recintos de animales, debido a que el área del recinto depende del tipo de animal, cambiando así el tiempo de recolección. Debido al alto costo de inversión para la generación de energía eléctrica se recomienda al Zoológico mejorar su recolección de desechos orgánicos, buscar una alianza con el hipódromo para la captación de los desechos de equinos en el mismo, aumentando la cantidad de biogás a producir, así como buscar patrocinadores externos con responsabilidad ambiental para la inversión en el proyecto.

I. INTRODUCCIÓN

El manejo de residuos sólidos es uno de los problemas ambientales más complejos para cualquier país. La existencia de botaderos no controlados en países en vías de desarrollo como Guatemala y la composición de los desechos sólidos, en su mayoría orgánicos, requieren de tecnologías que permitan un tratamiento adecuado de cada una de las corrientes de desechos sólidos que se generan en el país. El tratamiento de desechos orgánicos a través de la fermentación anaeróbica presenta una solución tanto para el tratamiento de desechos sólidos como para la producción de biogás para la generación de energía. Ésta es a su vez una fuente de energía de bajo impacto en el medio ambiente. El biogás es un gas combustible que puede ser aprovechado en procesos industriales o domésticos y representa una posibilidad de ahorro para las entidades con generación sostenida de este tipo de residuos. Debido al surgimiento de la responsabilidad social y ambiental, muchas empresas buscan mejorar sus acciones, promoviendo la investigación y financiando proyectos tendentes a la implementación de prácticas sociales y ambientalmente responsables, como respuesta a la demanda y competitividad del mercado actual.

El Zoológico “La Aurora” genera diariamente desechos orgánicos los cuales son en su mayoría provenientes de las excretas generadas de los distintos animales que esta institución alberga. El Zoológico descarta sus desechos orgánicos a través de camiones municipales los cuales recogen dichos residuos una vez por semana a cambio de abono orgánico. Consta de un inventario de 1930 animales, de estos animales 610 son aves, 308 son mamíferos, 296 son reptiles y 716 son animales acuáticos. La cantidad de desecho del Zoológico “La Aurora” es de 3,744 kg de excretas sólidas mensuales, de los cuales se escogieron las excretas de jirafa y elefante para realizar las pruebas debido a que son los animales que generan mayor volumen de excremento en el Zoológico (aproximadamente 85%). Con base en esta cantidad y el potencial de generación de biogás se propuso la realización de un biodigestor o bioreactor de 7 m³ de tanque agitado.

El megaproyecto consistió en el aprovechamiento de desechos orgánicos seleccionados del Zoológico “La Aurora” (específicamente excremento del elefante y jirafa). Para esto se dividió en diferentes módulos, los cuales consistieron en la caracterización química (composición del biogás) y microbiológica (estimación de la densidad poblacional de bacterias anaerobias) de cinco mezclas de estiércol de jirafa y elefante; así como agregar un inóculo bacteriano a dos mezclas iniciales para determinar si contribuía con la eficiencia de producción de biogás. También en la caracterización de los desechos orgánicos seleccionados y la identificación de las variables básicas para el diseño de un reactor para el tratamiento de dichos desechos. El primer objetivo busca, a través de análisis estandarizados de densidad, pH, DQO, humedad, nitrógeno, grasas, entre otros, confirmar la posibilidad de generación de biogás a partir de los desechos orgánicos seleccionados. Por otro lado, a través de un segundo objetivo se pretende identificar las variables básicas para el diseño de un bioreactor para la fermentación anaeróbica de la totalidad de los desechos orgánicos del Zoológico “La Aurora”. La incorporación de un diseño de filtros óptimos para disminuir la concentración de gases contaminantes como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y dióxido de carbono (CO_2). En el estudio económico, se compararon los métodos de trabajo actuales con los métodos de trabajo propuesto, por medio de estudio de tiempos y análisis de trabajo. Se determinó factibilidad financiera por medio de flujos económicos analizando diferentes indicadores financieros, el alcance del estudio desde la instalación del biodigestor hasta la venta del biogás. Por último la presentación de un Modelo de Negocios al Zoológico que le permita transformar sus desechos orgánicos en biomasa, como fuente de energía limpia y renovable. La razón principal para dicho proyecto es producir energía para uso propio a partir de los desechos orgánicos existentes.

Los principales resultados y conclusiones fueron que la mezcla de estiércol de jirafa con agua (1:1) produce el mayor volumen de biogás con mayor porcentaje de metano y menor porcentaje de ácido sulfhídrico. También se determinó que luego de tres meses de incubación el porcentaje de área de metano es mayor en todas las mezclas y la del dióxido de carbono es insignificante. Se determinó que es necesario realizar alimentaciones cada tres días (máximo) en el biodigestor a escala normal para mantener una alta carga microbiológica y así garantizar que el ambiente sea adecuado para la producción de biogás. Bajo las condiciones detalladas en el presente informe se estableció que la capacidad de producción de biogás en el reactor seleccionado para el tratamiento de la totalidad de desechos orgánicos del Zoológico “La Aurora” es de $261.55m^3$ de biogás al mes. También se determinó que a través de absorción, utilizando $14.09kg$ de óxido de hierro es posible filtrar durante seis meses $1567 m^3$ de biogás reduciendo un

86.03% su contenido de sulfuro de hidrógeno llevándolo a 13.7 ppm, concentración óptima para su utilización en equipos. Se encontró que el proyecto es económicamente factible y se logró estandarizar los procesos de recolección de desechos orgánicos del Zoológico "La Aurora". Este proyecto presenta un mejor funcionamiento técnico, así como el adecuado aprovechamiento de recursos renovables, disminuyendo sus costos de energía utilizados en su operación diaria.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general del megaproyecto

- Aprovechar los desechos orgánicos generados en el Zoológico “La Aurora”.

B. Objetivos generales de cada módulo

- Determinar las propiedades de desechos orgánico seleccionados generados en Zoológico “La Aurora”, por medio de métodos analíticos estandarizados.
- Determinar las variables básicas de un reactor diseñado para la biodigestión de desechos orgánicos seleccionados generados en Zoológico “La Aurora” de acuerdo con las pruebas realizadas en un biodigestor piloto.
- Identificar la mezcla adecuada de estiércol de elefante y jirafas acumulados en .el Zoológico “La Aurora” que produce mayor cantidad de gas metano en un biodigestor en el año 2014.
- Analizar y proponer la mejora en los procesos de recolección de los desechos orgánicos y factibilidad financiera de la instalación y uso de un biodigestor en el Zoológico “La Aurora”.
- Diseño y selección del modelo de negocios más rentable para la producción y venta de energía para el Zoológico “La Aurora”, por medio del estudio de factibilidad, análisis técnico, financiero y potencial.
- Lavar el biogás generado en el biodigestor para su limpieza y reducir el grado de contaminación.
- Remover del biogás generado el olor característico del sulfuro de hidrógeno a niveles aceptables.

C. Objetivos específicos de módulo

- Determinar la densidad de los desechos orgánicos generados en Zoológico “La Aurora” seleccionados a través de técnicas analíticas para determinar el volumen y peso de desechos orgánicos disponibles para su biodigestión anaerobia.
- Cuantificar proteínas y grasas y determinación de sólidos volátiles y totales así como DQO de los desechos orgánicos generados en Zoológico “La Aurora” seleccionados a través de las técnicas Kjeldahl y Soxhlet, secado y calcinación y técnicas analíticas estandarizadas para estimar la cantidad de metano a generar a partir de dichos desechos.
- Monitorear la producción de biogás a lo largo del tiempo en reactor batch a escala piloto a través de mediciones periódicas con analizador de metano hasta el cese de la producción de dicho gas para modelar la cinética de reacción y estimar el volumen necesario del biodigestor del proceso.
- Monitorear el comportamiento de pH y temperatura a lo largo del proceso de digestión anaeróbica de desechos sólidos de Zoológico “La Aurora” seleccionados durante pruebas piloto, a través de mediciones analíticas periódicas de ambas variables para determinar su influencia en el modelo de reacción de biodigestión anaerobia.
- Construir un modelo cinético que permita describir el comportamiento de la velocidad de reacción de la fermentación anaeróbica de los desechos orgánicos seleccionados del Zoológico “La Aurora” a través de la caracterización de los desechos y resultados de pruebas piloto.
- Determinar el tipo y las dimensiones de un reactor diseñado para la biodigestión de desechos orgánicos totales generados en Zoológico “La Aurora” a través del modelo cinético de reacción enzimática determinado para la reacción de fermentación anaeróbica de los desechos orgánicos seleccionados del Zoológico.
- Determinar la carga microbiológica de diferentes mezclas de estiércol de elefante y jirafas del Zoológico “La Aurora” mediante el recuento de bacterias anaerobias por el Número Más Probable.

- Determinar la composición del biogás producido en un biodigestor por diferentes mezclas de estiércol de elefante y jirafas.
- Adicionar un inóculo bacteriano, obtenido del análisis microbiológico preliminar, a las mezclas de estiércol de elefante y jirafa para aumentar la eficiencia de producción de biogás.
- Analizar la situación actual de los procesos de recolección de los desechos orgánicos obteniendo un tiempo estándar.
- Realizar propuesta de estandarización del proceso de recolección por medio de un diagrama de operaciones de procesos.
- Obtener costos de operación y de instalación así como los ahorros del uso del biodigestor.
- Analizar la viabilidad financiera utilizando la tasa interna de retorno, valor presente neto y el periodo de retorno de la inversión.
- Determinar el egreso por iluminación externa a través del cálculo de potencia de luminarias actuales.
- Determinar el monto de la factura energética mensual total (iluminación externa, interna y consumo energético equipos).
- Investigar la situación actual del uso de gas propano en Comiplaza.
- Proponer y comparar alternativas de mejora para el aprovechamiento del biogás en el Zoológico.
- Comparar económicamente las alternativas propuestas.
- Realizar propuesta de patrocinadores potenciales.
- Elaborar las finanzas de Estados de Resultados y Flujos de efecto para financiamiento propio y externo.

- Calcular el periodo de recuperación para proyecto excluyente seleccionado.
- Implementar una metodología para remover el Sulfuro de Hidrógeno y optimizar la remoción de Dióxido de Carbono del biogás para su utilización a través de técnicas fisicoquímicas.
- Reducir los compuestos causantes de malos olores y contaminación ambiental a través de un método fácil de emplear y económicamente viable.

III. JUSTIFICACIÓN

A. Contaminación por desechos sólidos en Guatemala y uso energético

La gestión inadecuada de los desechos sólidos es uno de los problemas ambientales urbanos más severos que enfrenta Guatemala. Según el Primer Informe sobre desechos sólidos domiciliarios el 88.38% de los basureros del país, no están autorizados se pueden considerar clandestinos; además el 40.72% de éstos vierten los desechos sólidos sobre mantos acuíferos. Según el mismo informe, la técnica de disposición final de residuos y desecho sólidos más utilizada a nivel nacional es el botadero a cielo abierto, en los cuales no se toman medidas para evitar la contaminación de suelos, del ambiente en general y los riesgos que esto genera para las poblaciones acentuadas alrededor de estos lugares.

La mayoría de residuos generados en Guatemala se obtienen a nivel agrícola y domiciliar que, a su vez, están compuestos, en su mayoría, por residuos orgánicos. Según el Primer Informe sobre Desechos sólidos Domiciliarios (2007) el 44% de los desechos sólidos que se generan en el país son desechos orgánicos.

Para las diferentes corrientes o tipos de desechos sólidos que se generan en el país existen tecnologías adecuadas que permiten su correcta gestión, un mínimo impacto ambiental y permiten darle sostenibilidad a dicha gestión. Para la corriente de desechos sólidos la digestión anaeróbica representa una opción viable para su gestión y creación de valor a partir de la generación de gases combustibles y bioabono.

A esto se suman actividades energéticamente poco eficaces que prevalecen en el país como lo es cocinar a partir del uso de leña. Esta práctica además promueve la devastación de bosques. En el caso de Guatemala, según el informe estadístico 2012 de la Dirección de Energía del Ministerio de Energía y Minas, el 56.85% del consumo energético del país proviene del uso de leña. A pesar que países, como Guatemala, se desarrollan rápidamente una gran parte de la población aún vive sin servicios como la electricidad, lo que los deja con la leña como su única alternativa hasta ahora.

B. Zoológico “La Aurora”

El Zoológico “La Aurora” es una institución con alta generación de desechos sólidos orgánicos. Diariamente se generan aproximadamente 0.22 metros cúbicos de excretas de animales con altos contenido de grasas y proteínas. El volumen generado en este mismo lugar permite que pueda instalarse equipos de tratamiento sin necesidad que éstos sean trasladados a otro lugar.

Por otro lado dentro del Zoológico existe una demanda para gases combustibles para utilizarse en cocinas y restaurantes del lugar. La fermentación anaeróbica de los desechos orgánicos del Zoológico permitiría la generación de biogás combustible que al trasladarlo a las cocinas y restaurantes del lugar puede ser aprovechado.

Por último, el Zoológico requiere de varias inversiones a través de las cuales busca atraer más visitantes. Los ahorros que pueden generarse a partir del uso del biogás producido a través del tratamiento de los desechos orgánicos generados pueden luego ser invertidos en mejoras dentro de la propia institución que permitan atraer a más visitantes y generar aún más ingresos.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Biogás

1. ¿Qué es? El biogás es un gas combustible que usualmente está compuesto por una mezcla de gases que se producen por la descomposición de materia orgánica. El proceso ocurre por la acción metabólica de una diversa población heterogénea de microorganismos (Mesa de Biogás, 2010). Los principales componentes del biogás son el metano y dióxido de carbono, los cuales se producen en una relación 2:1. Mediante la descomposición anaeróbica de compuestos orgánicos se generan compuestos altamente energéticos que pueden ser usados para la obtención de energía calorífica y eléctrica. Entre estos componentes se encuentran el etanol, metanol y el gas metano (Magaña *et al.*, 2006).

2. ¿Cómo se produce? El biogás se produce a partir de biodigestión anaeróbica (en ausencia de oxígeno) de materia orgánica que se descompone para dar lugar a agua, dióxido de carbono y metano, entre otros (Magaña *et al.*, 2006). Para esto se debe tener un ambiente cerrado (biodigestor) y se deben tener controladas condiciones como temperatura, pH y humedad. El proceso se lleva a cabo por la actividad metabólica de bacterias anaerobias y metanógenas que mediante la fermentación anaerobia generan el producto esperado (biogás) más residuos ricos en nutrientes (Gruber *et al.*, 2010).

3. Componentes. El biogás está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono (Magaña *et al.*, 2006). En la Tabla 1 se presentan los principales componentes presentes en el biogás.

Tabla 1. Principales componentes del biogás

Nombre	Porcentaje (%)
Metano CH ₄	50-75
Dióxido de carbono CO ₂	25-45
Vapor de agua H ₂ O	1-2
Monóxido de carbono CO	0-0.3
Nitrógeno N ₂	1-5
Hidrógeno H ₂	0-3
Sulfuro de hidrógeno H ₂ S	0.1-0.5
Oxígeno O ₂	0.1 - 1

4. Aplicaciones del biogás. El biogás que se produce por la digestión anaerobia puede ser usado directamente en quemadores para hornos, estufas, alimentación de motores de combustión interna o indirectamente para la producción de electricidad (Magaña *et al.*, 2006). El principal componente, metano, genera un poder calorífico entre 5,500 – 6000 Kcal (Gruber *et al.*, 2010). La capacidad de producción de energía a partir de biomasa puede incrementar mediante procesos biotecnológicos de materias prima de origen vegetal para dar origen a nuevos agentes biocatalizadores como enzimas, levaduras y bacterias (Magaña *et al.*, 2006). Los residuos de la fermentación anaeróbica son ricos en nutrientes y materia orgánica, no presentan mal olor y pueden ser usados como abono orgánico-mineral para cultivos (Mesa de Biogás, 2010). Además microorganismos patógenos, como *E. coli* y *Salmonella spp.*, que podían estar al inicio del proceso son eliminados por el tratamiento a altas temperaturas (Tsavkelova y Netrusov, 2012).

B. Energías renovables

Se consideran energías renovables la energía hidráulica, eólica, solar y biomasa. La energía hidráulica es el aprovechamiento de la energía potencial y cinética del agua, que mediante máquinas se transforma en energía mecánica para ser utilizada en otro dispositivo. La energía solar es la energía radiante emitida por el sol, la cual la captamos por medio de concentradores solares y paneles fotovoltaicos, para poderla aprovechar en sistemas térmicos o eléctricos (Pongutá Hurtado, 2005).

La energía eólica es el aprovechamiento de la energía cinética del viento, ocasionado por la diferencia de temperatura en la atmósfera. Se ha aprovechado para navegación, bombeo, molienda y electricidad (Pongutá Hurtado, 2005).

Para el caso de la biomasa, se pueden considerar la leña, los residuos agrícolas y animales, carbón vegetal y otros combustibles derivados de fuentes biológicas; a partir de ésta se puede producir biocombustibles como: biodiesel, bioetanol y biogás (Deutsche Gesellschaft Sonnenenergie & ECOFYS, 2005).

El biodiesel se produce a partir de la transesterificación de los ácidos grasos de los aceites vegetales. Se estima que con una tonelada de este bioenergético se evitaría tener que producir 2.5 Ton de anhídrido carbónico, ya que éste se puede obtener a partir de cultivos oleaginosos, de grasas animales y de aceites

vegetales, incluso reciclados (Montiel Montoya, 2010). Dentro de los cultivos oleaginosos se encuentran: la canola, el girasol, *Jatropha*, palma, semilla de colza, semilla de *Moringa oleifera* y la soya, principalmente (Montiel Montoya, 2010).

El bioetanol se obtiene por la fermentación de los carbohidratos presentes en los granos y plantas vegetales; estos carbohidratos se pueden encontrar en forma de sacarosa, almidón, celulosa y hemicelulosa. El bioetanol se produce a partir de residuos agroindustriales o de cultivos de maíz, caña de azúcar, cebada, trigo, centeno, sorgo, papa, yuca, algarrobo negro, eucalipto, pino, pastos, álamo, etc (Montiel Montoya, 2010).

El biogás se produce por la fermentación anaeróbica materia orgánica, de desechos agroindustriales y forestales, tales como: heces fecales, estiércol de vaca, de cochino, de caballo, de pollo, etc. Dado que el metano es un gas con efecto invernadero significativo, la digestión anaeróbica tiene mayor control sobre la producción de metano, y contribuye a reducir la huella de carbono de la gestión de residuos, dado que las emisiones fugitivas son más bajas que en las emisiones en los casos de la descarga en vertedero y compostaje aeróbico (Montiel Montoya, 2010).

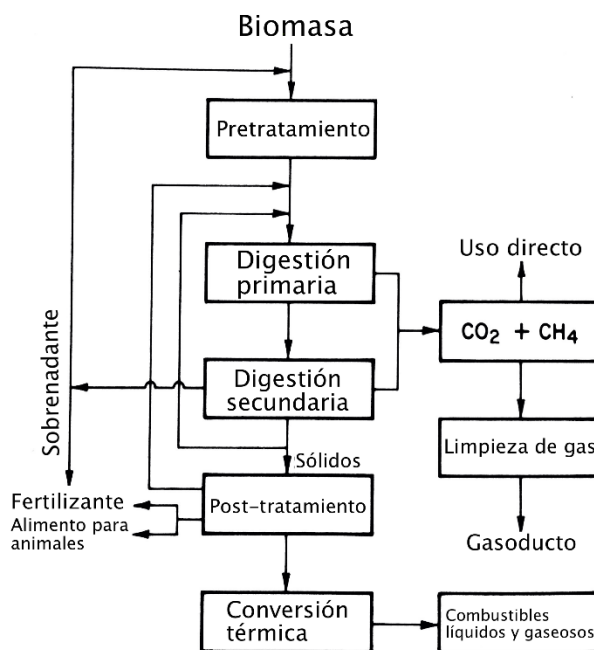
C. Microbiología del proceso de biogás

1. Digestión anaeróbica. La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo, que ocurre en ausencia de oxígeno, de materiales orgánicos que se convierten en mezcla de dióxido de carbono, hidrógeno, metano, sulfuro de hidrógeno y trazas de otros elementos (Ferrer y Pérez, 2010). El tratamiento anaeróbico es una opción viable para la reducción y estabilización del volumen de desechos sólidos, donde sus productos pueden ser usados como fuente de energía renovable (Muhammad *et al.*, 2012). De esta manera se genera un equilibrio ecológico donde existe una disminución de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de la carga contaminante de los sustratos (Ferrer y Pérez, 2010).

El proceso de digestión anaeróbica se resume en la Figura 1. Inicia con la recolección de biomasa o desechos orgánicos, los cuales usualmente se pasan por un pre-tratamiento para mejorar la biodegradación. Estos se añaden a un biodigestor que se mantiene a temperatura constante para que diversos tipos de bacterias lleven a cabo la conversión de cerca del 50% de materia orgánica

(sólidos volátiles) a metano y dióxido de carbono (digestión primaria y secundaria). Los residuos de la digestión secundaria se llevan a un post-tratamiento para ser utilizados como fertilizantes y abonos. Así mismo pueden ser sometidos a un proceso de conversión térmica para dar lugar a combustibles líquidos y gaseosos (Chynoweth, 1987).

Figura 1. Proceso generalizado de digestión anaeróbica desde la materia prima (biomasa) hasta el uso directo y sub-productos.



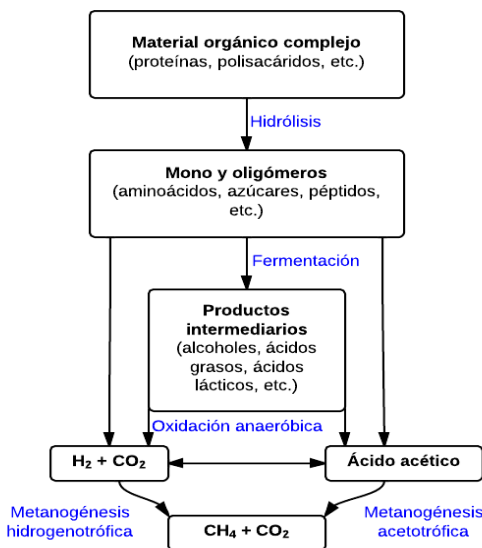
(Adaptado de Chynoweth 1987)

2. Etapas de digestión anaeróbica. La digestión anaerobia para producción de metano consta de dos pasos generales: la parte aeróbica, donde las bacterias aerobias utilizan el oxígeno presente y desechan CO_2 ; y la parte anaeróbica, donde el último paso es la producción de metano y CO_2 . La porción orgánica de los desechos es digerida por bacterias acidogénicas (etapa ácida) y los compuestos volátiles que producen son usados por las bacterias metanogénicas (Fry, 1973; Chynoweth, 1987).

a. Descomposición compuestos orgánicos. El proceso de formación de biogás se basa en el metabolismo de diferentes tipos de bacterias, donde ocurre la descomposición de compuestos orgánicos hasta el producto final deseado. Las bacterias descomponen la materia orgánica generando metano (CH_4) de 55%-70% y dióxido de carbono (CO_2) de 30%-45% que conforman el biogás (Krich *et al.*, 2005). En la Figura 2 se resume el proceso de la descomposición de compuestos orgánicos.

- Hidrólisis de materia orgánica compleja: proceso donde la materia orgánica compleja (proteínas, polisacáridos, grasas) se convierte en compuestos solubles sencillos (Vattamparambil, 2012).
- Fermentación: empieza la etapa anaeróbica, donde la fermentación ocurre por la ausencia de oxígeno. Los microorganismos fermentativos descomponen los compuestos sencillos en productos intermedios (alcoholes, ácido láctico, ácido propiónico, ácido butírico) y en compuestos como ácido acético, hidrógeno, dióxido de carbono que son usados directamente por bacterias metanogénicas (Blanco, 2011).
- Oxidación anaeróbica: los compuestos formados por la fermentación liberan electrones, donde los protones son los aceptores finales de éstos y forman gas hidrógeno. También se produce acetato y dióxido de carbono (Schnüren y Jarvis, 2010).
- Metanogénesis: los compuestos importantes para el inicio de esta etapa son gas hidrógeno, dióxido de carbono y acetato (Schnüren y Jarvis, 2010). Es importante el consumo de hidrógeno y acetato por las metanógenas, ya que la acumulación de estos inhibe el crecimiento de bacterias acetogénicas (Chynoweth, 1987). La metanogénesis acetotrófica usa como sustrato el acetato, donde un carbono es para el metano y el otro para el CO_2 . El 70% de biogás se genera a partir de acetato. La metanogénesis hidrogenotrófica usa como sustrato gas hidrógeno y CO_2 (Schnüren y Jarvis, 2010).

Figura 2. Pasos de la descomposición de compuestos orgánicos para la producción de biogás.



(Adaptado de Schnüren y Jarvis 2010)

3. Factores que influyen en el proceso de digestión anaeróbica. Se debe considerar aspectos importantes para el proceso de digestión, entre estos: temperatura, concentración de iones hidrógeno, razón carbón-nitrógeno (C/N), pH, presencia de tóxicos o inhibidores. Tienen que ser controlados y manipulados para obtener un rendimiento óptimo en el digestor (Muhammad *et al.*, 2012).

- *Temperatura:* el proceso de biogás usualmente opera en los rangos de temperatura de 30-40°C (microorganismos mesofílicos) y de 50-60°C (microorganismos termofílicos). Debido al diverso rango de especies bacterianas, el valor recomendado para la generación de biogás es de 45°C (Schnüren y Jarvis, 2010).
- *pH:* durante la fermentación y acidogénesis el pH disminuye (debajo de 5). Para que los productores de metano estén activos el pH debe ser neutro (Schnüren y Jarvis, 2010).
- *Relación Carbono/Nitrógeno (C/N):* es un indicador de tratamientos biológicos que representa la relación entre la cantidad de carbono y nitrógeno de materias orgánicas (Zhang *et al.*, 2013). Tiene que estar equilibrada, cuando es muy baja se dificulta la descomposición de materia

orgánica y disminuye la producción de gas; cuando es muy alta se inhibe el proceso por la acumulación de N amoniacal (Blanco, 2011).

- *Presencia de tóxicos o inhibidores*: para los metanógenos, que son anaerobios estrictos, la presencia de tan sólo 0.01ppm de oxígeno inhibe su crecimiento (Blanco, 2011). Los ácidos grasos, como ácido propiónico (3000 mg/L) y ácido butírico, causan fallo en la digestión. También son inhibitorios el amonio libre (1200 mg/L), hidrógeno de sulfuro (200-1500 mg/L) y iones metálicos (1 mg/L para metales pesados y 5-8 g/L para metales del Grupo II) (Mata-Álvarez, 2003).

4. Tipos de microorganismos. La población bacteriana responsable de la digestión anaerobia se distingue principalmente por las diferentes etapas. Se pueden dividir en tres grandes grupos: bacterias hidrolíticas, bacterias transicionales y bacterias metanogénicas. Las comunidades microbianas representan una cadena trófica (proceso sintrófico) donde los desechos de las bacterias hidrolíticas son utilizados por las bacterias fermentadoras y los desechos de éstas los usan las metanogénicas (Dohrmann *et al.*, 2011). Es decir, cada tipo de bacteria tiene condiciones y sustratos específicos que representan un papel importante en el proceso de biodigestión (Zhao *et al.*, 2013).

a. Bacterias hidrolíticas. En la etapa de hidrólisis están presentes diferentes especies anaerobias que tienen sustratos específicos. En la hidrólisis de polisacáridos se encuentran las del género de Bacteroides, Clostridium, Acetivibrio. En hidrólisis de proteínas las del género Clostridium, Peptostreptococcus, Bifidobacterium. En hidrólisis de grasas se encuentran los anaerobios estrictos del género Clostridium (Schnüren y Jarvis, 2010). Hay otras especies que son más especializadas y metabolizan sustratos más complejos. Los del género Clostridium, Acetivibrio, Bacteroides, Ruminococcus, Butyrivibrio, Fibrobacter y Cellobacterium hidrolizan celulosa. Los del género Ruminobacter, Bacteroides, Prevotella, Clostridium, Succinomonas, Butyrivibrio, Streptococcus y Thermoanaerobacterium hidrolizan almidón. Los del género Bacteroides, Butirivibrio, Prevotella, Ruminococcus, Clostridium y Lachnospira hidrolizan xilanos y pectinas (Tsavkelova y Netrusov, 2012).

b. Bacterias transicionales. En este grupo entran las responsables de fermentación (del género *Enterobacterium*, *Bacteroides*, *Acetobacterium* y *Eubacterium*) y de oxidación anaeróbica (del género *Syntrophomonas*, *Syntrophus*, *Clostridium*, *Syntrobacter*) (Schnüren y Jarvis, 2010). Las bacterias del género *Syntrophomonas* y *Syntrophobacter* pueden crecer en ambientes libres de gas hidrógeno. Las bacterias *Syntrophobotulus glycolicus* y *Syntrophococcus sucromutans* se caracterizan por su metabolismo que se basa en el transporte de hidrógeno (Tsavkelova y Netrusov, 2012). Las bacterias homoacetogénicas (BHA) autótrofas realizan la reducción de CO_2 , utilizando H_2 mediante la vía del acetyl-CoA. Esta reacción es catalizada por la enzima monóxido carbono deshidrogenasa. El otro grupo de bacterias BHA (no autótrofos) utilizan la fermentación de azúcares por la vía glicolítica generando piruvato, que luego es transformado en acetato usando ATP, también liberan CO_2 y H_2 , que son usados por las otras bacterias BHA autótrofas. Dentro del grupo de bacterias transicionales también se encuentran las bacterias reductoras de sulfatos (BSR). Estas bacterias utilizan el sulfato como aceptor de electrones, reduciéndolo a ácido sulfhídrico (H_2S) mediante ATP y la enzima sulfito reductasa. Algunas BSR pueden oxidar el acetato a CO_2 , propiciando el ambiente para que bacterias BSR autótrofas puedan crecer (Ferrer y Pérez, 2010).

c. Bacterias metanogénicas. Las bacterias metanogénicas se caracterizan principalmente por su metabolismo que tiene como producto principal metano; son bacterias anaerobias estrictas y forman parte del dominio Archeobacteria. Los principales sustratos de este tipo de bacterias son H_2 , CO_2 , formato y acetato. Sólo crecen en ambientes donde hay producción de metano (Whitman *et al.*, 2006). Hay dos tipos de grupos en los metanógenos: los acetotróficos (que usa acetato como sustrato), entre los que están *Methanosaeta* y *Methanosarcina* (Schnüren y Jarvis, 2010). *Methanosaeta* puede consumir únicamente acetato como sustrato y *Methanosarcina* puede consumir como sustrato H_2/CO_2 , metanol, metilaminas y acetato (Tsavkelova y Netrusov, 2012). El otro grupo son los hidrogenótrofos (usan como sustrato el gas hidrógeno y CO_2), entre los están *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanogenium* y *Methanobrevibacter* (Schnüren y Jarvis, 2010).

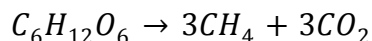
D. Materia prima para producir biogás

Se consideran fuentes de bioenergía los cultivos energéticos, residuos post-cosecha, subproductos y desechos orgánicos; y éstos se pueden transformar en biocombustibles en estado sólido, líquido o gaseoso (Deutsche Gesellschaft Sonnenenergie & ECOFYS, 2005). Como materia prima, para producir biogás, se puede considerar la gallinaza, el estiércol de vaca y de puerco; aunque hoy en día se le puede adicionar substratos como: desechos vegetales, sub-productos de animales (Kirchmayr & Coautores, 2007), ensilaje de maíz y de pasto. La materia prima debe contener una alta carga orgánica, como por ejemplo: aguas residuales de la industria alimentaria, residuos agrícolas, de algas y de los rastros, la fracción orgánica de los RSM's, biomasa de agua dulce, malahierbas, etc.

La producción de biogás a partir de los componentes elementales de la materia orgánica puede establecerse de la siguiente forma según consideraciones teóricas:

1. Hidratos de carbono. A partir de la glucosa que se produce en la hidrólisis de los hidratos de carbono se puede establecer el siguiente esquema de degradación:

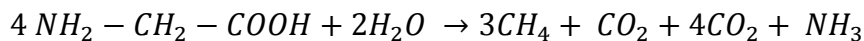
Ilustración 1: Ecuación química de hidrólisis de hidratos de carbono



El biogás se producirá a razón de 0.8 m³ por kg de glucosa y tendría una composición de sus componentes 1:1, con un poder calorífico de 4 250 kcal/ m³. (De Juana, 2004).

2. Proteínas. A partir de la glicina se puede establecer el siguiente esquema de degradación de los aminoácidos.

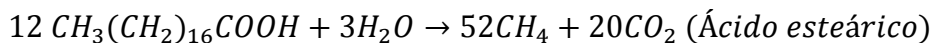
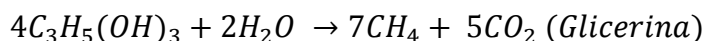
Ilustración 2: Ecuación química de hidrólisis de proteínas



El biogás se produciría a razón de 0.7 m³ por kg de proteína y tendría una composición de sus componentes de 3:1 (CH₄:CO₂) con un poder calorífico de 6 375 kcal/ m³. (De Juana, 2004)

3. Lípidos. La hidrólisis de los aceites y grasas da como productos glicerina y ácidos grasos. Se pueden establecer las siguientes ecuaciones globales de degradación metánica:

Ilustración 3: Ecuación química de hidrólisis de lípidos



El biogás se produciría a razón de 1.2 m³ por kg de grasa y tendría una composición de sus componentes (CH₄:CO₂) de 59:25, con un poder calorífico de 5 970 kcal/ m³. (De Juana, 2004)

Tomando como base la degradación de los hidratos de carbono a metano se puede observar que de cada mol de glucosa (686 kcal) se producen 3 moles de metano, de donde se deduce que prácticamente el 90% de la energía contenida en la glucosa se conserva en el metano producido, o lo que es lo mismo, las bacterias metanogénicas obtienen muy poca energía de la degradación de la biomasa, lo que explica que tengan un crecimiento muy lento en comparación con la bacterias aerobias (De Juana, 2004).

Tabla 2. Producción de estiércol, contenido de sólidos y producción de biogás de distintos animales

Tipo de animal	Producción de estiércol kg/día	Contenido de sólidos	Producción de biogás m ³ /día
Vaca	49	9.9	1.25
Añojo	33.5	9.9	0.83
Ternero	13.6	9.9	0.34
Cerda madre	9.6	7.0	0.19
Cerdo cebo	4.2	7.0	0.08
Orino y caprino	1.6	25	47
Aves	0.1	25	6.4

(De Juana, 2004).

Teniendo en cuenta la heterogeneidad en la composición de la biomasa, se entiende que la cantidad de biogás que se puede producir a partir de un

determinado tipo de biomasa y su composición y, por tanto, su contenido energético, dependerá de su composición química. Cuanto mayor sea su contenido en grasa y proteína, mayor será también su contenido proporcional en metano. En la tabla 1.1. se indica la producción media de biogás por diversos residuos ganaderos. (De Juana, 2004)

E. Estimación de producción de biogás

Para estimar la producción de biogás se tiene la siguiente fórmula (Deutsche Gesellschaft Sonnenenergie & ECOFYS, 2005):

Ecuación 1: Estimación de producción de biogás

$$E_{PB} = S \times MS \times MOS \times M \propto x_R$$

E_{PB} = Estimación de la producción de biogás (m^3)

S = Cantidad de materia prima (ton)

MS = Materia seca en la materia prima (%)

MOS = Materia orgánica seca en la materia prima (%)

$M_{\max R}$ = Producción máxima específica de biogás (m^3 /Ton de MOS)

F. Usos del biogás

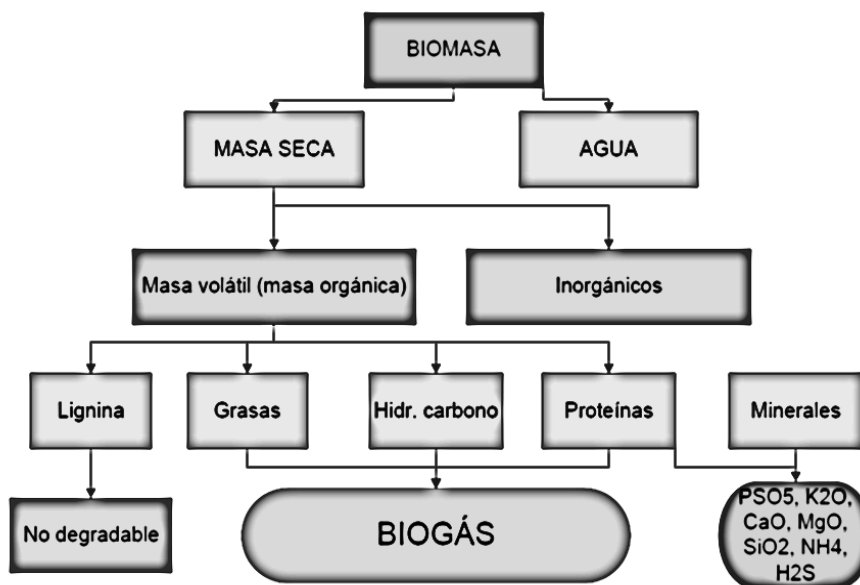
El biogás producido se puede utilizar en forma: calor, motores de ignición de gas, electricidad, turbinas de gas y combustible de un automóvil. Países como Bangladesh, China, India, Nepal, Ruanda, Sri Lanka y Vietnam, lo utilizan para la cocción de sus alimentos. Para el 2020, se predice que el mayor volumen de producción de biogás será a partir de granjas y de los sistemas de co-generación, entre el sector agrícola y el procesamiento de alimentos (Abbasi & Colaboradores, 2012). La eficiencia de conversión de biomasa a electricidad es del 8 al 16 % (Demirbas, 2006).

La problemática de no utilizar el biogás es que el potencial global de calentamiento del CH₄ y N₂O es 21 y 310, respectivamente, veces más alto que el de CO₂ (Sommer & Coautores, 2004), respectivamente.

G. Aprovechamiento de desechos orgánicos en biodigestores

Los avances tecnológicos han posibilitado el surgimiento de sistemas de transformación de los desechos sólidos que incluye tanto su aprovechamiento energético como su preparación para la creación de nuevos productos. En el siguiente diagrama se presenta la constitución de la biomasa así como la forma de su aprovechamiento de los desechos orgánicos en biodigestores (Sommer & Coautores, 2004).

Ilustración 4: Constitución de biomasa y degradación de componentes



El biogás, por un lado, se convierte en una fuente de combustible para cocina, secadores e incluso fuentes de luz en el caso de bombillas que operan con gases. La producción de biogás a partir de desechos orgánicos permite entonces un ahorro de energía sustancial a partir de un proceso que no requiere grandes espacios y ni gran infraestructura. Por otro lado, el bioabono, otro producto que se genera durante la digestión anaeróbica de desechos orgánicos puede también aprovecharse tanto a través de su comercialización como su uso para jardinería y/o prácticas agrícolas (Sommer & Coautores, 2004).

La disposición final de desechos orgánicos como excretas a través de la digestión anaeróbica permite además una disminución de los riesgos a la salud que estos residuos generan hacia la salud humana y el ambiente ya que la operación permite un mejor control de este tipo de desechos. Además, al momento de operar se logra disminuir sustancialmente los olores ofensivos y desagradables que se derivan de las excretas y/o degradación de desechos orgánicos (Sommer & Coautores, 2004).

La implementación de esta forma de tratamiento de desechos orgánicos también genera una serie de beneficios al medio ambiente. El aprovechamiento de los gases combustibles generados a partir de la digestión anaeróbica controlada permite la conversión del metano a dióxido de carbono, lo que representa una disminución en el impacto hacia el efecto invernadero. Esto se debe a que el metano es un potente gas de efecto invernadero y su potencial de calentamiento global es 23 veces más alto que el potencial del dióxido de carbono. Por otro lado, el uso de gases combustibles a nivel doméstico disminuye también la dependencia hacia energías térmicas ineficientes como la quema de leña y por ende la tala de árboles para el uso doméstico (Sommer & Coautores, 2004).

Un biodigestor es un tanque cerrado donde se lleva a cabo la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, como por ejemplo: desechos agrícolas, agroindustriales y forestales, aguas residuales urbanas e industriales, residuos sólidos urbanos y el estiércol de animales; posteriormente, se produce el biogás. Sus componentes básicos son: área de premezclado, digestor, sistema de captación de biogás y de distribución del efluente (Husáin & Islam, 2008). También, es considerado como la parte medular en un sistema de producción de biogás (Wang & Coautores, 2011).

La utilización de los biodigestores presentan las siguientes ventajas (Deutsche Gesellschaft Sonnenenergie & ECOFYS, 2005): es una inversión económicamente atractiva, de fácil operación, su instalación es segura, se produce energía renovable, mejora las cualidades fertilizantes proveniente del estiércol y disminuye las emisiones de CO₂ y CH₄.

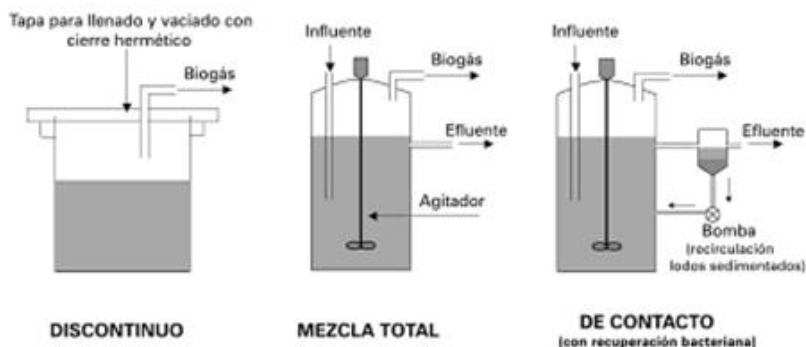
1. Sistemas de digestión anaerobia. La digestión anaerobia es un proceso especialmente indicada para la depuración de aguas residuales urbanas, efluentes de industrias agrarias o de explotaciones ganaderas y residuos sólidos urbanos. Es un proceso de depuración que, a su vez, produce energía pero, en general, su empleo desde un punto de vista meramente energético, al margen del componente medioambiental, no estaría justificada (De Juana, 2004).

Según la humedad de la materia que se trata, se pueden establecer los siguientes tipos de residuos (De Juana, 2004):

- Residuos sólidos, con una concentración de sólidos superior a 200g/l (mayor a 20%).
- Residuos semisólidos, con concentración de sólidos entre 20 y 200 g/l (entre 10 a 200%)
- Residuos líquidos, con concentraciones inferiores a 10g/l.

Existe un gran número de tecnologías de digestión anaerobia que, en general, tratan de adaptarse a las diversas características del sustrato que se ha de digerir. Básicamente, las tecnologías se pueden caracterizar por el sistema de carga y descarga y por la localización y conservación de la biomasa bacteriana en el interior del digestor. Con respecto al sistema de carga, los digestores, pueden ser tipo discontinuo o de carga continua. (De Juana, 2004)

Ilustración 5: Tipos de biodigestores



Según la localización y conservación de la biomasa microbiana, pueden agruparse en tres categorías, existiendo diferentes formas para cada una de ellas (De Juana, 2004):

- Con biomasa microbiana incluida en toda la masa digerir (biomasa suspendida).
- Con la biomasa microbiana adherida a un soporte inerte, que puede ser fijo o móvil.
- Digestores de dos fases en cada una de las cuales se optimizan las condiciones para la fase acidogénica y la metanogénica respectivamente.

2. Digestores discontinuos. Están adecuados para tratar residuos sólidos con más del 20% de materia seca (estiércol, camas de ganado o deyecciones sólidas). La carga del volumen total útil del digestor se realiza de una sola vez. El arranque de la fermentación se realiza añadiendo un inóculo procedente de una digestión anterior. Transcurrido el tiempo necesario para que la digestión se complete (3 a 6 meses) se procede al vaciado y se repite la operación de carga. Este sistema presenta un bajo rendimiento y una producción de gas discontinua, lo que dificulta su utilización. Como contrapartida, es un proceso sumamente sencillo de tecnología aplicable a los países en vías de desarrollo, por ser fácil diseño y bajo coste de inversión. Estos digestores pueden adoptar formas diversas, desde simples bidones con orificio de salida de la conducción de gas hasta construcciones de hormigón en las que la carga y descarga se realiza con pala cargadora o grúas con cucharada. Lo más importante es garantizar la hermeticidad del sistema para impedir la entrada de aire, que detendría el proceso. Es frecuente utilizar tapas con juntas de agua para garantizar la estanqueidad del proceso (De Juana, 2004).

3. Digestores continuos. Son sistemas en los que la carga y la descarga se realizan de forma continua, al menos una vez al día o cada pocos días. En ellos, la biomasa puede estar suspendida o adherida a un soporte. Los principales tipos de digestores continuos son:

a. Mezcla completa: También denominados mezcla total. Son reactores sencillos aplicables a residuos semisólidos de alta concentración, en los que la mezcla íntima entre el sustrato y los microorganismos se realiza mediante un agitador. Se utilizan para los residuos ganaderos y lodos de depuradoras. Se pueden tecnificar, en cierta medida, con el empleo de intercambiadores de calor, aislamiento, bombas, etc. El tiempo de retención suele ser de 10 a 30 veces el

volumen del influente diario. Con este tipo de digestores se puede trabajar en dos fases, utilizando uno para la fase acidogénica y otro en serio para la metanogénica ajustando las condiciones de cada uno de los requerimientos de los microorganismos respectivos (De Juana, 2004).

b. Flujo Pistón: Son digestores en los que el movimiento del sustrato en el interior de un conducto se realiza por la simple presión del influente y la depresión que produce el efluente de salida. El movimiento de la masa por digerir suele ser horizontal, sobre un conducto a modo de canal, pero también se puede lograr el movimiento de forma ascendente y descendente, sucesivamente mediante la instalación de láminas, pantallas y paredes verticales sobre un recipiente circular que obligan al sustrato a realizar el recorrido de subida y bajada en un flujo continuo desde la entrada a la salida. Se utiliza para tratar residuos con alta concentración en sólidos (17-20%). Los principales problemas se derivan de la aparición de costras en la superficie que, a veces, forma una capa dura de carbonato (De Juana, 2004).

H. Diseño de biodigestores

El diseño de biodigestores en instalaciones de características convencionales, se define en función de la carga de materias primas: continuos (de carga diario o semanal) o estacionarios (sin recarga durante el proceso de fermentación). La elección del tipo de digestor se basa principalmente en constancia de la producción de materia prima para alimentar el digestor y en la disponibilidad de agua (Sáenz, 2006).

1. Parámetros a tomar en cuenta para diseño de digestor. A la hora de diseñar un digestor habrá que tener en cuenta los siguientes parámetros principales:

a. Características del influente

- Concentración en sólidos (%)
 - Sólidos totales (ST), que se determinan por el secado en estufa a 105C.
 - Sólidos fijos (SF), que se determinan por calcinación a 550C durante 1 hora.
 - Sólidos volátiles (SV), que se obtienen por la fórmula $SV = ST - SF$

- Demanda Química de Oxígeno (DQO) expresada en g/L
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) normalmente medida a 20C y al cabo de 5 días (DBO5)
- Contenido de nitrógeno total, amonio y nitratos
- pH y conductividad
- Relación carbono/nitrógeno
- Alcalinidad o poder neutralizante de ácidos en términos de CaCO₃ equivalente.
- Inhibidores, tales como antibióticos o metales pesados que por encima de 1mg/l suelen ser tóxicos.

b. Parámetros de diseño

- Sistema de operación
- Sistema de carga (separación de gruesos previo)
- Sistema de descarga (sifón, vertido o bombeo)
- Sistema de agitación (mecánico, circulación líquido, circulación biogás)
- Sistema de calefacción (interior o intercambiador de calor exterior)
- Aislamiento térmico
- Forma. Relación diámetro/altura.
- Volumen necesario según la carga diaria y el tiempo de retención

c. Instalaciones complementarias

- Depósito de almacenamiento previo
- Caldera o unidad de calefacción
- Gasómetro
- Unidad depuradora del biogás
- Unidad de tratamiento de lodo y efluentes
- Unidad de compresión del biogás (una compresión de 200-350 kg/cm² representa un coste energético del 20% de la energía acumulada.

d. Parámetros de la digestión

- Características del influente
- Temperatura de digestión de zona mesófila (35-40 C) y zona termófila (55-60 C).
- pH
- Alcalinidad
- Potencial redox
- Factores nutricionales

La técnica utilizada en estos reactores es la separación del tiempo de retención de sólidos (SRT, *Solid Retention Time*) con la del tiempo de retención hidráulica (HRT, *Hydraulic Retention Time*). El HRT indica el tiempo en que los residuos, agua de desecho, están dentro del reactor en contacto con la biomasa y el SRT es el tiempo que la masa microbiológica o microorganismos están dentro del reactor para alcanzar un grado deseado de estabilización para que éstos puedan generar el producto deseado. En el caso de microorganismos metanógenos se quiere tener un SRT largo y que son microorganismos de crecimiento lento; el objetivo es lograr crear un medio estable de metanógenos y que lo que utilicen del afluente y los residuos que producen salga pronto teniendo así un HRT bajo (Kumar, S 2008).

Para calcular el HRT que es uno de los parámetros de diseño se utilizar la siguiente fórmula:

Ecuación 2: Tiempo de retención hidráulica

$$HRT = \frac{V_R}{V}$$

(Al Seadi, T; *et. al.* 2008)

En dónde:

HRT: Tiempo de retención hidráulica.

V_R : Volumen del biodigestor.

V: Caudal de sustrato alimentado.

De acuerdo con la fórmula si la alimentación de los sustratos al biodigestor es muy alta el HRT será más bajo, éste es un factor a tomar muy en cuenta por lo mencionado anteriormente sobre el tiempo que los microorganismos necesitan para producir biogás (Al Seadi, T; *et. al.* 2008).

Para el cálculo del STR que es el otro parámetro se utiliza la fórmula siguiente:

Ecuación 3: Tiempo de retención de sólidos

$$STR = \frac{M_R}{M}$$

(Baxter Woodman. 2009)

En donde:

SRT: Tiempo de retención de sólidos.

M_R : Masa de sólidos en el reactor por unidad de tiempo.

M: Masa de sólidos en el efluente por unidad de tiempo.

Otro factor que también es muy utilizado en el dimensionamiento es la carga de materia orgánica u OLR por sus siglas en inglés (OrganicLoadingRate) el cual es una medida de la cantidad de desecho que puede ser tratada por unidad de volumen del reactor (Zhou, I. 2007).

Ecuación 4: Carga de materia orgánica (Zhou, I. 2007)

$$OLR = \frac{C_i \cdot Q}{V}$$

En donde:

OLR: Carca de materia orgánica.

C_i : Materia orgánica que generalmente es el valor de DBO o DQO.

Q: Caudal del afluente.

V: Volumen del reactor.

Se ha podido observar que la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO) son valores que se utilizan para los cálculos de los factores necesarios para el diseño y dimensionamiento de los

biodigestores. El DQO es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar todo el contenido orgánico, el biodegradable y el no biodegradable, de la muestra y la DBO es la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para degradar el material orgánico biodegradable de la muestra (Ramalho, R. 2003).

Otra forma de diseñar un biodigestor es a través de las ecuaciones de diseño para los diferentes tipos de reactor, los reactores utilizados para esto son el reactor batch o intermitente (BR), el reactor continuo de tanque agitado (MFR o CSTR en inglés) y el reactor de flujo pistón o de tubos (PFR) (Heinzle, E. 2009).

Para el reactor continuo de tanque agitado las ecuaciones de diseño son:

Ecuación 5: Ecuación de diseño para reactor continuo

$$\tau = \frac{1}{s} = \frac{VC_{A0}}{F_{A0}} = \frac{C_{A0}X_A}{-r_A}$$

(Levenspiel, O. 2012)

Para las ecuaciones de diseño:

V: Volumen del reactor.

F_{A0} : Caudal molar del componente A.

τ : Espacio-tiempo (tiempo necesario para tratar un volumen de alimentación igual al volumen del reactor).

X_A : Conversión del componente A.

$$X_A = 1 - (C_A/C_{A0})$$

C_A : Concentración final del elemento A.

C_{A0} : Concentración inicial del componente A.

$-r_A$: Cinética de reacción para el componente A.

(Levenspiel, O. 2012)

2. Cinética enzimática. Los principios generales de las reacciones químicas se aplican también a las reacciones enzimáticas. En una reacción de orden cero, la velocidad de formación del producto es independiente de la concentración de sustrato: $v = k$. En una reacción de primer orden la velocidad de formación de los productos es directamente proporcional a la concentración del sustrato: $v = k [A]$.

Una reacción de segundo orden es aquella en la que la velocidad de formación del producto depende:

- de la concentración de dos sustratos (como en una reacción de condensación): $v = k [A1] [A2]$.
- del cuadrado de la concentración de un único sustrato (reacción de dimerización): $v = k [A]^2$.

En la tabla siguiente se resumen los distintos tipos de reacción, y la forma de calcular sus parámetros cinéticos.

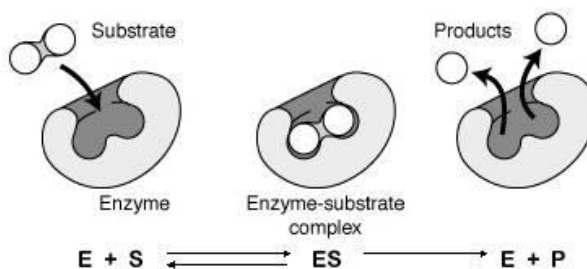
Tabla 3: Cinética de reacción para reacciones de diferentes órdenes

	ORDEN CERO	PRIMER ORDEN	SEGUNDO ORDEN
Expresión diferencial de la velocidad	$-\frac{d[A]}{dt} = k$	$-\frac{d[A]}{dt} = k \cdot [A]$	$-\frac{d[A]}{dt} = k \cdot [A]^2$
Ecuación integrada de la velocidad	$[A] = -kt + [A]_0$	$\ln[A] = -kt + \ln[A]_0$	$\frac{1}{[A]} = kt + \frac{1}{[A]_0}$
Vida media ($t_{1/2}$)	$\frac{[A]_0}{2k}$	$\frac{0.693}{k}$	$\frac{1}{k[A]_0}$
Representación que da lugar a una recta	$[A]$ vs t	$\ln[A]$ vs t	$1/[A]$ vs t
Signo de la pendiente	negativo	negativo	positivo
Significado de la pendiente	-k	-k	k

Continuación - Tabla 3: Cinética de reacción para reacciones de diferentes órdenes			
Significado de la ordenada en el origen	$[A]_0$	$\ln[A]_0$	$\frac{1}{[A]_0}$
$[A]_0$ es	b	e^b	1/b

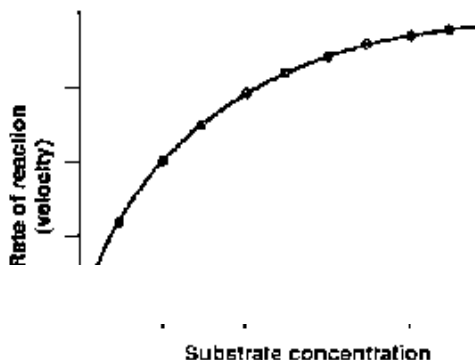
La cinética enzimática estudia la velocidad de las reacciones catalizadas por enzimas. Estos estudios proporcionan información directa acerca del mecanismo de la reacción catalítica y de la especificidad del enzima. La velocidad de una reacción catalizada por un enzima puede medirse con relativa facilidad, ya que en muchos casos no es necesario purificar o aislar el enzima. La medida se realiza siempre en las condiciones óptimas de pH, temperatura, presencia de cofactores, etc, y se utilizan concentraciones saturantes de sustrato. En estas condiciones, la velocidad de reacción observada es la velocidad máxima (V_{max}).

Ilustración 6: Mecanismo de reacción enzimática



La velocidad puede determinarse bien midiendo la aparición de los productos o la desaparición de los reactivos.

Ilustración 7: Dependencia de velocidad de reacción hacia concentración de sustrato



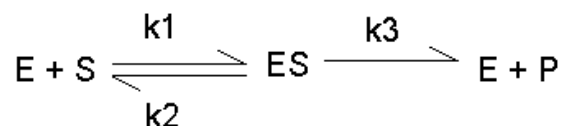
Al seguir la velocidad de aparición de producto (o de desaparición del sustrato) en función del tiempo se obtiene la llamada curva de avance de la reacción, o simplemente, la cinética de la reacción. A medida que la reacción transcurre, la velocidad de acumulación del producto va disminuyendo porque se va consumiendo el sustrato de la reacción (Figura de la derecha). Para evitar esta complicación se procede a medir la velocidad inicial de la reacción (v_0). La velocidad inicial de la reacción es igual a la pendiente de la curva de avance a tiempo cero (Figura de la derecha). De esta forma, la medida de v_0 se realiza antes de que se consuma el 10% del total del sustrato, de forma que pueda considerarse la $[S]$ como esencialmente constante a lo largo del experimento. Además, en estas condiciones no es necesario considerar la reacción inversa, ya que la cantidad de producto formada es tan pequeña que la reacción inversa apenas ocurre. De esta forma se simplifican enormemente las ecuaciones de velocidad.

Para estudiar la cinética enzimática se mide el efecto de la concentración inicial de sustrato sobre la velocidad inicial de la reacción, manteniendo la cantidad de enzima constante. Si representamos v_0 frente a $[S]_0$ obtenemos una gráfica como la de la Figura de la derecha. Cuando $[S]_0$ es pequeña, la velocidad inicial es directamente proporcional a la concentración de sustrato, y por tanto, la reacción es de primer orden. A altas $[S]_0$, el enzima se encuentra saturada por el sustrato, y la velocidad ya no depende de $[S]_0$. En este punto, la reacción es de orden cero y la velocidad es máxima (V_{max}).

Los estudios sistemáticos del efecto de la concentración inicial del sustrato sobre la actividad enzimática comenzaron a realizarse a finales del siglo XIX. Ya en 1882 se introdujo el concepto del complejo enzima-sustrato como intermediario del proceso de catálisis enzimática. En 1913, Leonor Michaelis y Maud Menten desarrollaron esta teoría y propusieron una ecuación de velocidad que explica el comportamiento cinético de los enzimas.

Para explicar la relación observada entre la velocidad inicial (v_0) y la concentración inicial de sustrato ($[S]_0$) Michaelis y Menten propusieron que las reacciones catalizadas enzimáticamente ocurren en dos etapas: En la primera etapa se forma el complejo enzima-sustrato y en la segunda, el complejo enzima-sustrato da lugar a la formación del producto, liberando el enzima libre:

Ilustración 8: Ecuación química para reacción enzimática



En este esquema, k_1 , k_2 y k_3 son las constantes cinéticas individuales de cada proceso y también reciben el nombre de constantes microscópicas de velocidad. Según esto, podemos afirmar que:

- $v_1 = k_1 [E] [S]$
- $v_2 = k_2 [ES]$
- $v_3 = k_3 [ES]$

Este modelo cinético adopta la hipótesis del estado estacionario, según la cual la concentración del complejo enzima-sustrato es pequeña y constante a lo largo de la reacción (Figura de la derecha). Por tanto, la velocidad de formación del complejo enzima-sustrato (v_1) es igual a la de su disociación ($v_2 + v_3$):

$$v_1 = v_2 + v_3$$

La expresión más conocida de la ecuación de Michaelis-Menten es:

Ecuación 6: Ecuación de Michaelis Menten

$$v = \frac{V_{max} [S]}{K_m + [S]}$$

Existen enzimas que no obedecen la ecuación de Michaelis-Menten. Se dice que su cinética no es Michaeliana. Esto ocurre con los enzimas alostéricos, cuya gráfica v frente a $[S]$ no es una hipérbola, sino una sigmoide (Figura de la derecha). En la cinética sigmoidea, pequeñas variaciones en la $[S]$ en una zona crítica (cercana a la K_M) se traduce en grandes variaciones en la velocidad de reacción.

I. Sulfuro de hidrógeno

Gas contaminante producido en el biodigestor en el mismo proceso que el metano. Este gas producido tiene distintos efectos a distintas concentraciones sobre la vida humana. A 10 ppm no causa ningún peligro sobre la vida de aquellos que lo manejan a diario. A 50 ppm causa mareos y molestias con el olfato y la cabeza. A 100 ppm puede causar ahogo en las personas que lo manejan con frecuencia, pérdidas del olfato y provoca estornudos. A 200 ppm, irrita los ojos, nariz y garganta, provocando ahogo en las personas, pudiendo provocar la muerte. A 1000 ppm causa la muerte casi de inmediato. (Castells, 2012).

1. Propiedades físicas

Punto de ebullición: -60°C

Punto de fusión: -85°C

Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C : 0.5

Punto de inflamación: gas inflamable

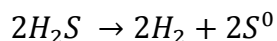
Temperatura de autoignición: 260°C

2. Estado y peligros físicos

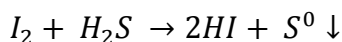
Gas incoloro, de olor característico a huevos podridos. Al combustionar crea una llama azul generando un gas tóxico, dióxido de azufre (SO_2).

3. Carácter químico

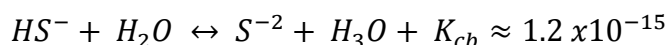
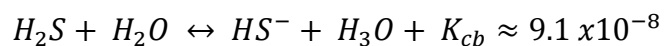
A altas temperaturas: descomposición fácil



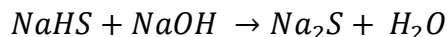
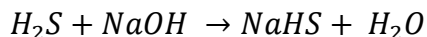
Oxidación con diferentes elementos: depende de materiales oxidantes



Disuelto en agua: ácido sulfúrico



En medio alcali: la tasa de disolución es alta a temperatura normal y presión atmosférica



Existen dos maneras de remover el Sulfuro de hidrógeno, los cuales son por medio de sustrato “seco” o sustrato húmedo.

J. Sustrato seco

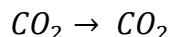
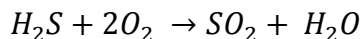
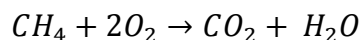
Este se remueve por medio de óxido de hierro, el cual reacciona con el Sulfuro de hidrógeno para formar sulfuro de hierro, el cual no es gaseoso y por lo tanto no puede continuar su flujo con el biogás generado. En Guatemala se ha trabajado con algunos biodigestores colocando alambrina, una estructura de acero (hierro y carbono). De igual manera se pueden utilizar como sustratos secos, el óxido de zinc, sólidos alcalinos, hidróxido de sodio, carbón activado y zeolita (McKinsey, 2003).

K. Sustrato húmedo

Una de las opciones es el uso de agua. Se utilizan equipos llamados “lavador de gases”, la cual hace pasar la corriente de biogás contra una “lluvia” de agua. Una sustancia líquida que es común mencionar es el agua de cal (carbonato de calcio disuelto en agua). (McKinsey, 2003).

Para la limpieza del biogás obtenido en el biodigestor se necesitan remover dos componentes que se forman para poder trabajar con metano más puro. El primer paso es la eliminación del CO₂ contenido en el biogás y posteriormente la eliminación de H₂S.

Las siguientes ecuaciones representan la combustión completa del gas metano obtenido:



La combustión se descompone principalmente en CO₂ y H₂O.

L. Presencia de CO₂ en biogás

La composición de CO₂ en el biogás producto de la descomposición de la materia orgánica, en este caso estiércol es de alrededor de 40-50% del producto total. El CO₂ no contiene poder calorífico, un exceso de CO₂ en el gas provoca una propagación de llama bastante lenta, significa que reduce la velocidad de reacción y velocidad térmica del biogás. Esto se traduce en menor eficiencia del gas generado. (Castells, X. 2012).

Es necesario reducir el contenido de CO₂ a aproximadamente 10% para lograr incrementar el contenido de metano puro y obtener una mayor eficiencia. (Castells, X. 2012).

M. Técnicas de purificación para eliminación de Dióxido de Carbono

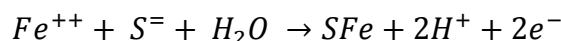
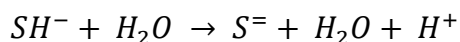
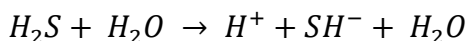
El método más común, simple y económico para la eliminación del CO₂ es mediante la absorción del mismo en agua con cal. (Castells, X. 2012) Tras el agotamiento del agua con cal después de varios usos, ésta se puede regenerar a través de calentamiento. El agua con cal tiene un pH igual o superior a 10 y debe ser almacenada en un tanque cilíndrico. El biogás primero debe ser atravesado a contracorriente por el cilindro con agua con cal. Al salir el biogás queda como resultado dentro del filtro (cilindro) agua con ácido carbónico. (Castells, X. 2012)

Se puede utilizar la eliminación con cal con una solución de 1.8 kg de CaO en 1000L de agua, con el cual pueden eliminarse 560 L de CO₂ generados del gas en el biodigestor. (Castells, X. 2012). También se puede utilizar soda cáustica, agregando 5kg de NaOH en 1000 L de agua para eliminar 3200 L de CO₂. (Castells, X. 2012)

N. Presencia de H₂S en biogás

El H₂S también conocido como sulfuro de hidrógeno es el componente que más problemas causa al utilizar el gas generado del biodigestor, ya que éste afecta los artefactos a utilizar. El ácido sulfhídrico corroe metales no ferrosos o artefactos con partes metálicas no ferrosas. En el caso de una instalación de estufa destruye reguladores de presión, válvulas, grifería o medidores de presión (Castells, X. 2012).

La corrosión por ácido sulfhídrico provoca pérdidas de material o fisuras en el metal a través de la formación de sulfuros de hierro e hidrógeno atómico desgastando las piezas. A continuación se presentan las reacciones involucradas (Castells, X. 2012).



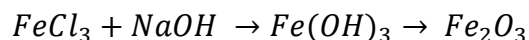
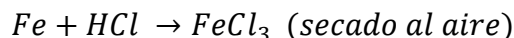
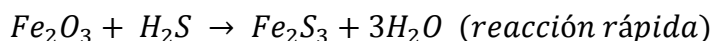
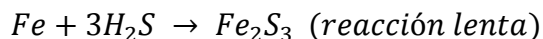
Ñ. Técnicas de purificación para eliminación de Sulfuro de Hidrógeno

Existen diversas técnicas de purificación del biogás en cuanto al tema de sulfuro de hidrógeno que se basan fundamentalmente en dos mecanismos principales como; absorción y adsorción.

1. Métodos de absorción. Los métodos de se basan en el principio de la alta reactividad que posee el sulfuro con la mayoría de los metales. Es por ello que todos los métodos utilizan como material absorbente distintos metales. A continuación, se describen los métodos más comunes:

2. Utilización de pellets de hierro. Eliminación a partir de óxido de hierro. Las formas más efectivas son $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ y $Fe_2O_3 \cdot 2H_2O$. Este método es bastante eficiente para la remoción de sulfuro de hidrógeno. Se basan de columnas o recipientes llenos de viruta o laminillas de hierro (Fernández, 2004). La viruta de hierro debe ser humedecida con agua logrando aproximadamente entre 30 y 60% de humedad. Para mayor eficiencia puede acompañarse al hierro con aserrín para lograr un amplio rango de presiones logrando buena eficiencia en la eliminación del H_2S . (Fernández, 2004).

a. Cálculo de cantidad de viruta de hierro. Para lograr que el hierro reaccione rápidamente con el H_2S , éste debe convertirse en Fe_2O_3 (óxido férrico) compuesto. Las reacciones involucradas en este proceso son las siguientes: (Fernández, 2004)



3. Métodos de adsorción. Estos métodos se basan en un lecho seco utilizando material de óxido de hierro, zinc, carbón activado o zeolitas. Se basa en la retención de las moléculas de ácido sulfhídrico en las superficies de estos materiales. Se debe tomar muy en cuenta y controlar variables como humedad, selectividad, temperatura, presión y presencia de otras partículas para que el material adsorción se dé de manera efectiva. Cabe mencionar que se trabaja bajo temperaturas y presiones bajas requiriendo menos energía reduciendo costos de operación e inversión. (Fernández, 2004) (Pérez *et al.*, 2008).

a. Los principales materiales a utilizar bajo este método son:

- **Carbón activado.** La superficie interna del carbón activado absorbe el azufre o el sulfuro de hidrógeno se ve interceptado por los poros del carbón, limpiando el gas metano de dicho gas. (Fernández, 2004) (Pérez *et al.*, 2008).

- **Sílica gel.** Este método se puede utilizar tanto para remoción de sulfuro de hidrógeno como para dióxido de carbono. La sílica gel adsorbe las partículas de estos compuestos a eliminar y en conjunto con un indicador, muestran la saturación al cambiar de tonalidad. Las condiciones para trabajar ambos compuestos son: (Pérez *et al.*, 2008).

- **Sulfuro de hidrógeno.** temperatura y presiones normales.

Dióxido de carbono: 5000 hPa.

4. Absorción con agua. Esta metodología utiliza el agua para remover como absorbente, es también llamada limpieza húmeda. Las temperaturas adecuadas para la aplicación de este método es entre 5 – 10°C o bien a temperatura ambiente, pero controlando la presión a valores mayores de 1726kPa. (Pérez *et al.*, 2008).

O. Requerimiento para uso de biogás

Para el uso eficiente del biogás para su combustión es necesario un 21% o más mínimo de aire. Para ello se ajusta la relación aire- gas aumentando la presión de aire abriendo la válvula dosificadora de gas (Castells, X. 2012).

La presión de gas se debe manejar entre 7 y 20 mbar.

Para la utilización del biogás en motores o artefactos se permite una cifra máxima de 0.15% (volumen) de H₂S (Castells, X. 2012).

Tabla 4: Límite de aceptación de composición del biogás

Componente	% Volumen
Metano (CH₄)	40 – 75
Dióxido de Carbono (CO₂)	25 – 60
Oxido de Nitrógeno (NO₂)	0 – 7
Oxígeno (O₂)	0 - 2
Hidrógeno (H₂)	0 – 1
Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)	0 - 1

Tabla 5: Consumo y rendimientos de biogás

Artefacto	Consumo	Rendimiento %
Estufa	300 – 600 L/h	50 – 60
Bombilla (60W)	120 – 170 L/h	30 – 50
Motor de gas	0.5 m ³ / kWh	25 - 30

P. Medidor de gas metano y sulfuro de hidrógeno

a. Detector de gas BX170. Este es un detector portátil de gas, capaz de detectar gases inflamables y tóxicos. Trabaja con el principio de detección en forma de difusión natural y un controlador embebido MCU. Cada tipo de detector es equipado con un sensor que depende del tipo de gas, se puede elegir entre varios tipos de sensores para diferentes gases. El detector debe calibrarse con gases de referencia y alarmas para los gases tóxicos cuando estos se encuentran a altas concentraciones. Al equipo se le adjunta una bomba aspiradora para aspirar los gases y el detector pueda realizar la lectura. El detector trabaja a temperaturas de -20 °C a 50 °C a un rango de humedad desde 5 hasta 95% RH.

El principio de funcionamiento de este detector es catalítico, de tipo electrocatalítico. Contiene un sensor de alambre de platino cubierto por una base de cerámica y una capa exterior de catalizador de paladio o rodio disperso en sustrato de torio. El funcionamiento se basa en la mezcla de gas o aire combustible sobre la superficie del catalizador caliente, se produce combustión y

el calor que se produce incrementa la temperatura interna y por ende la del sensor. Posteriormente se altera la resistencia de platino, la cual está relacionada con la concentración de gas en la atmósfera, indicando el porcentaje de concentración del gas que se requiere.

Los rangos detectados de los distintos gases son:

CO: 0 – 1000 ppm

O₂: 0 – 30% en volumen

H₂S: 0 – 100 ppm

Cl₂: 0 – 20 ppm

NH₃: 0 – 100 ppm

LEL: 0 – 100% LEL

LEL es el Límite Inferior de Explosión de un gas, es la concentración mínima de gas requerida para que se encienda, y se expresa como un porcentaje de aire total. Mientras que ppm son partes por millón, la concentración más común reportada en los medidores de gas. Para convertir el dato de % LEL de la lectura a PPM se debe multiplicar por 10,000. (Castells, X. 2012)

La cromatografía de gases se basa en la separación de componentes de una mezcla por medio de una fase gaseosa (móvil) y una fase estacionaria que se representa por una columna. La fase móvil se compone de un gas inerte que mediante un flujo que pasa por la fase estacionaria realiza la elución de los componentes de la mezcla (Montoya y Páez, 2012). Para la detección de los componentes que se separan durante la cromatografía de gases se puede utilizar el detector de ionización de llama, conociéndose la técnica completa de GC-FID (cromatografía de gases acoplada a detector de ionización de llama). Una mezcla de hidrógeno-aire/oxígeno ingresa en el flujo de la columna, esta mezcla se quema y por medio de la energía formada los electrones se liberan del soluto en forma de iones. Los iones se mueven hacia el lado de la carga opuesta de electrodos, causando una corriente eléctrica en el flujo. La señal es amplificada y esta es proporcional a la tasa de flujo del soluto en el detector (Remington, 2006). El horno tiene que estar a 200°C aproximadamente para evitar la pérdida de metano (Pineda, 2011).

Q. Aplicaciones

Cuando el biogás está formado por un 60% de metano (CH_4) y 40% de dióxido de carbono (CO_2) tiene una densidad de 1.22 g/cm^3 , siendo más ligero que el aire. El biogás arde gracias al metano, produciendo una llama azul, sin formar hollín. Tiene un poder calorífico de 4,500 a 5,500 Kcal/ m^3 . (Castells, 2012).

Cuando 1m^3 de metano se combustiona, desprende alrededor de 8,900 - 9,500 Kcal y debido a la concentración de CO_2 en el biogás, éste reduce su poder energético a un promedio de 5,000 Kcal. A pequeña y mediana escala, el biogás se utiliza normalmente con combustión directa en estufas simples, iluminación, para calefacción y refrigeradoras. También puede ser utilizado como combustible para motores diesel y a gasolina, a partir de los cuales se puede producir energía eléctrica por medio de un generador. (Castells, 2012)

Un metro cúbico de biogás totalmente combustionado es suficiente para: Generar 6 horas de luz equivalente a un bombillo de 60 watts. (Castells, 2012).

R. Factibilidad financiera

1. Inversión. La inversión es el acto mediante el cual se invierten ciertos bienes con el ánimo de obtener unos ingresos o rentas a lo largo del tiempo. La inversión se refiere al empleo de un capital en algún tipo de actividad o negocio, con el objetivo de incrementarlo. Dicho de otra manera, consiste en renunciar a un consumo actual y cierto, a cambio de obtener unos beneficios futuros y distribuidos en el tiempo. (Gregory Mankiw, 2012)

2. Costo de oportunidad. El costo de oportunidad es la tasa de retorno de una oportunidad no Aprovechada por la imposibilidad de ejecutar el proyecto. Numéricamente, corresponde a la tasa de retorno más grande de todos los proyectos no aceptados (no Aprovechados) debido a la carencia de fondos de capital o de otros recursos. Cuando no se establece una TMAR específica, la que se toma de facto es el costo de oportunidad, es decir, la tasa de rendimiento del primer proyecto que no emprende porque no se dispone de fondos de capital. (Leeland Blank, 2012)

3. Capital de trabajo. El capital de trabajo (también denominado capital corriente, capital circulante, capital de rotación, fondo de rotación o fondo de maniobra), es el excedente de los activos de corto plazo sobre los pasivos de corto plazo, es una medida de la capacidad que tiene una empresa para continuar con el normal desarrollo de sus actividades en el corto plazo.

Sobre el capital de trabajo resaltan dos aspectos fundamentales sobre la toma de decisiones referentes a la determinación de:

- Nivel óptimo de inversión en activo circulante.
- La mezcla adecuada de financiamiento a corto y largo plazos utilizada para apoyar esta inversión en activo circulante.

El capital de trabajo puede definirse como "la diferencia que se presenta entre los activos y los pasivos corrientes de la empresa". (Espinoza, 2011)

4. Flujos de efectivo. Los flujos de efectivo son las cantidades de dinero estimadas para los proyectos futuros, u observados para sucesos que ya tuvieron lugar en los proyectos. Todos los flujos de efectivo ocurren durante períodos específicos, como de un mes, cada seis meses, o un año. El período más común es un año. La ingeniería económica basa sus cálculos en el tiempo, monto, dirección de los flujos de efectivo.

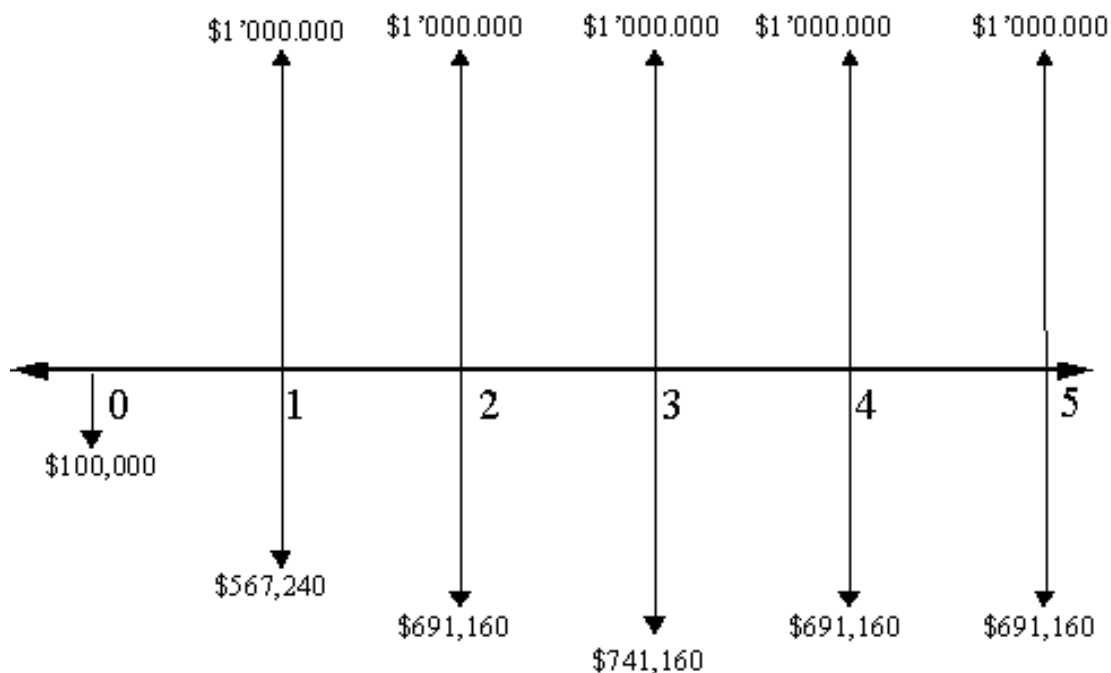
Los *flujos de entrada de efectivo* son las recepciones, ganancias, ingresos y ahorros generados por los proyectos y actividades de negocios. Un signo positivo o más indica un flujo de entrada de efectivo.

Los *flujos de salida de efectivo* son los costos, desembolso, gastos e impuestos ocasionados por los proyectos y actividades de negocios. Un signo negativo o menos indica un flujo de salida de efectivo. Cuando un proyecto sólo implica costos, puede omitirse el signo negativo para ciertas técnicas, como el análisis beneficio/costo. (Leland Blank, 2012)

Ecuación 7: Flujo de efectivo

Flujo Neto de Efectivo = Flujos de Entrada – Flujos de Salida

Figura 3: Diagrama de flujo neto



(Leland, 2012)

5. Valor actual neto (VAN, VP). El Valor Presente Neto de una propuesta de inversión es el valor el valor presente de los flujos efectivos de dicha propuesta, menos su inversión inicial. El VAN es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja (en inglés cash-flow) futuros den determinar la equivalencia en el tiempo 0 de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. (Roca, 2011)

La fórmula es la siguiente:

Ecuación 8: Valor actual neto

$$VAN = \sum_{t=1}^n v_t / (1 + i)^t - I_0$$

v_t = flujos de caja

i = interés

n = número de periodos

$I_0 = \text{valor inicial}$

Para la aceptación de un proyecto:

VAN > 0, la inversión producirá ganancias. Se acepta el proyecto.

VAN < 0, la inversión producirá pérdidas. No se acepta el proyecto.

VAN = 0, la inversión no producirá ganancias ni pérdidas. No agrega valor.

6. Tasa interna de retorno (TIR). La tasa de rendimiento es la tasa de interés que hace que el valor presente o el valor anual de una serie de flujo de efectivo sea exactamente igual a cero.

Los criterios para la viabilidad económica de un proyecto:

Si $TIR \geq TMAR$, se acepta el proyecto como económicamente viable.

Si $TIR < TMAR$, el proyecto no es económicamente viable.

Otra definición de la TIR, es la tasa pagada sobre el saldo no pagado del dinero obtenido en préstamo, o la tasa ganada sobre el saldo no recuperado de una inversión, de forma que el pago o entrada final iguala exactamente a cero con el interés considerado. (Leland, 2012)

7. Tasa mínima atractiva de rendimiento (TMAR). La tasa mínima de rendimiento es una tasa de retorno razonable para evaluar y elegir una opción. Un proyecto no es económicamente viable a menos que se espere un rendimiento mayor a una TMAR. La TMAR también recibe el nombre de tasa por superar, tasa de corte, tasa paramétrica y tasa mínima aceptable de rendimiento.

La TMAR no es una tasa que se calcule como la tasa interna de retorno (TIR). La TMAR la establecen los directivos financieros y se usa como criterio contra el cual se compra una tasa de retorno alternativa cuando se toma la decisión de aceptar o rechazar alguna inversión.

Aunque la TMAR sirve como criterio para decidir si se invierte en un proyecto, el monto de la TMAR está relacionado fundamentalmente con lo que cuesta

obtener los fondos de capital que se requieren del proyecto. (Leland, 2012)

La TMAR se define como la siguiente forma:

Ecuación 9: Tasa mínima atractiva de rendimiento

$$TMAR = i + f + if$$

Donde “i” es la tasa de interés definida como el premio al riesgo y “f” es la tasa de inflación anual en el país, en este caso Guatemala.

8. Análisis del período de recuperación. El periodo de recuperación es el tiempo estimado, generalmente en años, en que los ingresos estimados, ahorros y otros beneficios económicos recuperen la inversión inicial y una tasa de rendimiento establecida.

Hay dos tipos de análisis:

- Sin rendimiento, $i = 0\%$, también llamado recuperación simple, consiste en la recuperación solo de la inversión inicial.
- Recuperación descontada, $i > 0\%$, el valor del dinero en el tiempo se considera en cierta forma como rendimiento.

Las ecuaciones para calcular n_p difieren en cada tipo de análisis. Para ambos análisis la terminología es P para la inversión inicial en el activo, proyecto, contrato, etcétera, y FNE es el flujo neto de efectivo estimado para cada año. La ecuación del FNE es:

$$FNE = \text{entradas de flujo de efectivo} - \text{salida de flujos de efectivo}$$

Para calcular el periodo de recuperación para $i = 0\%$ o $i > 0\%$, se determina el patrón de la serie de FNE.

$$\text{Sin rendimiento, } i = 0\%; FNE_t \text{ varía anualmente: } 0 = -P + \sum_{t=1}^{t=n_p} FNE_t$$

$$\text{Sin rendimiento, } i = 0\%; FNE \text{ uniforme anual: } n_p = \frac{P}{FNE}$$

$$\text{Descontado } i > 0\%; FNE \text{ varía anualmente: } 0 = -P + \sum_{t=1}^{t=n_p} FNE_t \left(\frac{P}{F}, i, t \right)$$

$$\text{Sin rendimiento, } i > 0\%; FNE \text{ uniforme anualmente:}$$

$$0 = -P + \sum_{t=1}^{t=n_p} FNE_t$$

Después de n_p años, el flujo de efectivo habrá recobrado la inversión realizada en el año 0 más un rendimiento de $i\%$. (Leland, 2012)

9. Análisis del punto de equilibrio. El análisis de punto de equilibrio encuentra el valor de un parámetro que hacen iguales a dos elementos. El punto de equilibrio Q_{BE} se determina a partir de ecuaciones matemáticas, como los ingresos y costos de un producto o el abasto de materiales y parámetros de oferta y demanda, u otros parámetros que impliquen el parámetro Q. el análisis del punto de equilibrio es fundamental para evaluar decisiones de fabricar o comprar.

- **Costos Fijos (CF)**, incluyen costos como edificios, seguros, gastos generales fijos, un nivel mínimo de mano de obra, recuperación de capital de equipo y sistemas de información.

- **Costos variables (CV)**, incluyen costos como mano de obra directa, materiales, costos indirectos, contratistas, mercadotecnia, publicidad y garantías. Los costos variables cambian con el nivel de producción, el tamaño de la plantilla laboral y otros parámetros.

Ecuación 10: Utilidades

$$Utilidades = Ingresos - (CF + CV)$$

La ecuación para el análisis de punto de equilibrio es:

$$Q_{BE} = \frac{CF}{r-v}$$

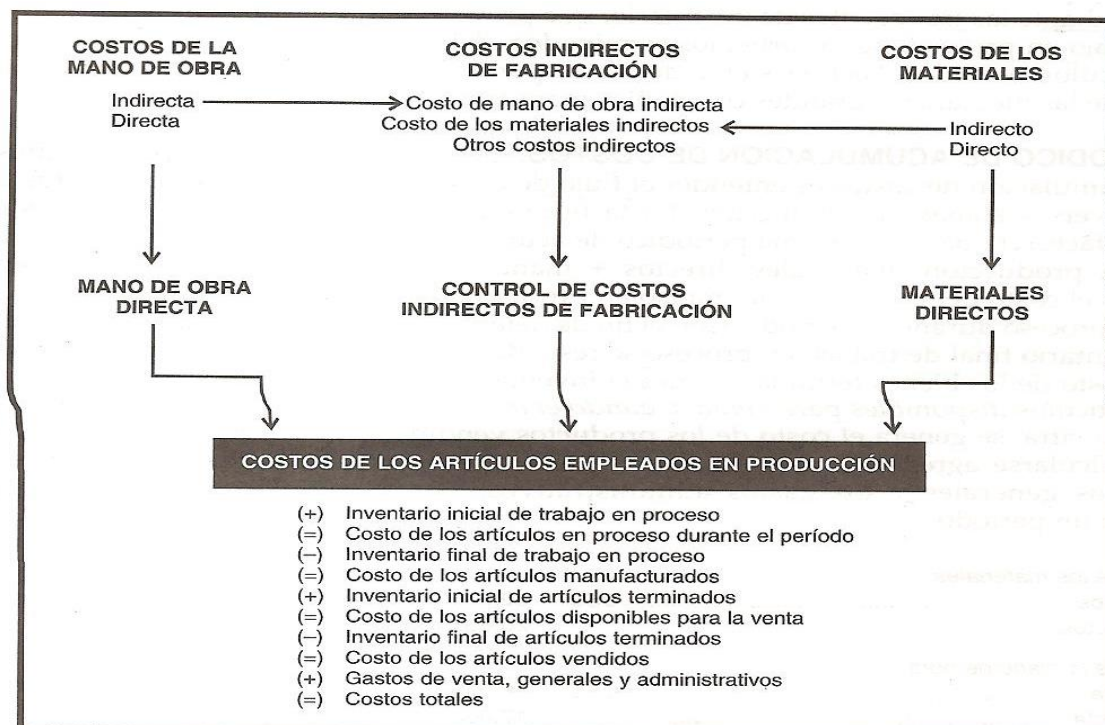
r = ingreso por unidad, v = costo variable por unidad

10. Costos de producción biogás. En la producción del biogás, se puede determinar su costo como cualquier otro proceso productivo. En este caso, el más Apropiado será un sistema de acumulación de costos. Un sistema de acumulación de costos es la recolección organizada de datos de costo mediante un conjunto de procedimientos o sistemas. La clasificación de costos es la agrupación de todos los costos de producción en varias categorías.

En un sistema de periódico de acumulación de costos, limita durante un periodo y requiere ajustes trimestrales o al final del año para determinar el costo de los bienes manufacturados. Los inventarios físicos periódicos se toman para ajustar las cuentas de inventario a fin de determinar el costo de los productos terminados. Esto funciona perfectamente para compañías pequeñas. Para la producción de biogás se podría trabajar de la misma manera.

En este diagrama podremos visualizar todos lo que conlleva utilizar este análisis de acumulación de costos (Charles, 2007)

Figura 2: Estructura de costos



(Charles, 2007)

S. Análisis del diseño y trabajo en procesos

Los objetivos primordiales de los métodos, estándares y diseño del trabajo son: 1) incrementar la productividad y la confiabilidad en la seguridad del producto y 2) reducir los costos unitarios, lo cual permite que se produzcan más bienes y servicios de calidad para más gente. La capacidad para producir más con menos dará como resultado más trabajos para más personas por número mayor de horas por año.

Las directrices que se desprenden de los objetivos principales son las siguientes:


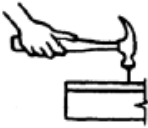


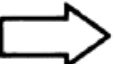




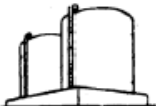





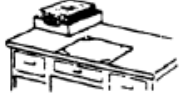




- Minimizar el tiempo requerido para llevar a cabo tareas.
- Mejorar de manera continua la calidad y confiabilidad de productos y servicios.
- Conservar recursos y minimizar costos mediante la especificación de los materiales directos e indirectos más apropiados para la producción de bienes y servicios.
- Considerar los costos y la disponibilidad de energía eléctrica.
- Maximizar la seguridad, salud, y bienestar de todos los empleados.
- Producir con interés creciente por proteger el medio ambiente. (Niebels, 2009)

1. Diagramas de flujo de proceso. El diagrama de flujo de proceso es particularmente útil para registrar los costos ocultos no productivos como, por ejemplo, las distancias recorridas, los retrasos y los almacenamientos temporales. Una vez que estos periodos no productivos se identifican, los analistas pueden tomar medidas para minimizarlos y, por ende, reducir sus costos.

Además de registrar operaciones e inspecciones, los diagramas de flujo muestran todos los retrasos de movimientos y almacenamiento. (Niebels, 2009)

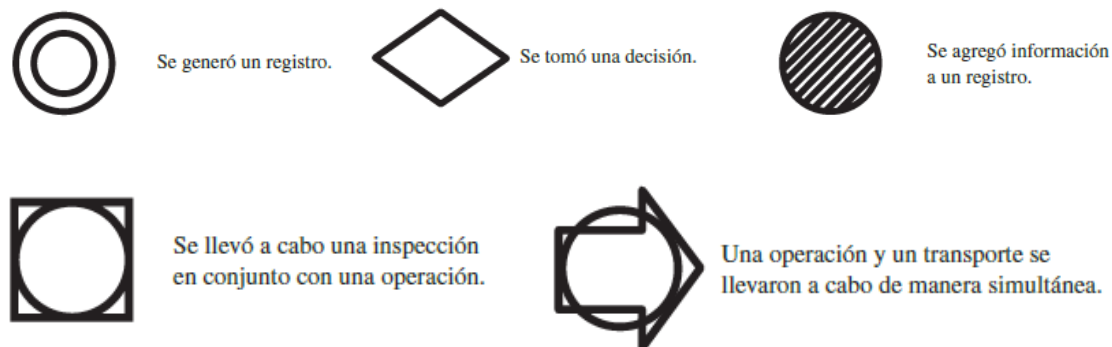
La simbología es la siguiente:

Figura 4: Conjunto de símbolos estándar de diagramas de procesos

<p>Operación</p>  <p>Un círculo grande indica una operación, como</p>	 <p>Clavar</p>	 <p>Mezclar</p>	 <p>Taladrar orificio</p>
<p>Transporte</p>  <p>Una flecha indica transporte, como</p>	 <p>Mover material mediante un carro</p>	 <p>Mover material mediante una banda transportadora</p>	 <p>Mover material transportándolo (mediante un mensajero)</p>
<p>Almacenamiento</p>  <p>Un triángulo representa almacenamiento, como</p>	 <p>Materia prima en algún almacenamiento masivo</p>	 <p>Producto terminado apilado sobre tarimas</p>	 <p>Archiveros para proteger documentación</p>
<p>Retrasos</p>  <p>Una letra D mayúscula indica un retraso, como</p>	 <p>Esperar un elevador</p>	 <p>Material en un camión o sobre el piso en una tarima esperando a ser procesado</p>	 <p>Documentos en espera a ser archivados</p>
<p>Inspección</p>  <p>Un cuadrado indica inspección, como</p>	 <p>Examinar material para ver si está bien en cuanto a cantidad y calidad</p>	 <p>Leer el medidor de vapor en el quemador</p>	 <p>Analizar las formas impresas para obtener información</p>

(Niebels, 2009)

Figura 5: Símbolos no estándares de los diagramas de procesos



(Niebels, 2009)

En estos diagramas de flujo es necesario indicar los tiempos asignados para los procesos o retrasos y las distancias de transporte. Para la realización del estudio de tiempos.

T. Comercializadores de energía eléctrica

Se entiende por comercializadores de energía eléctrica a toda sociedad mercantil debidamente inscrita en el registro correspondiente o equivalente en su país de origen que accediendo a las redes de transporte o distribución tiene como función la venta de energía eléctrica a los consumidores o a otros sujetos del sistema.

U. Autos productores

Según el artículo 6 de la Ley de la electricidad (Decreto 93-96), "auto productor", es la persona (individual o jurídica), cuya producción de energía se destina exclusivamente a su propio consumo.

V. Generador

Según el artículo 6 de la Ley de la electricidad (Decreto 93-96), es la persona (individual o jurídica), que comercializa total o parcialmente su producción de electricidad.

W. Protocolo de Kioto

Es un protocolo de la Naciones Unidas y acuerdo internacional como respuestas a Cambio Climático. Tiene como objetivo reducir las emisiones de los gases que causan el calentamiento: Metano CH₄, óxido nitroso N₂O, Dióxido de Carbono CO₂, Hidrofluorocarbonos HFC, Perfluorocarbonos PFC y Hexafluoruro de azufre SF₆ .

Dicho protocolo fue adoptado en Kioto, Japón en diciembre de 1997, pero entró en vigencia hasta el 2005 y su primera fase terminó en el año 2012. La segunda fase se ratificó en la decimoctava Conferencia de las Partes (COP 18) sobre cambio climático, dicho periodo abarcará desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020.

X. Bonos de carbono

Son una alternativa como mecanismo para reducir las emisiones contaminantes del medio ambiente, por medio del cual las empresas productoras de emisiones pagan incentivos económicos a empresas que no emiten o disminuyen la emisión como un bien canjeable por su derecho de emitir CO₂. Pagar a otros para que reduzcan sus emisiones. Las empresas que pueden aplicar a una certificación son las de generación de energía renovable (granjas eólicas, etc.), vertederos donde se capta metano, viveros, mejoramiento de eficiencia energética de procesos, limpieza de ríos y lagos, reforestación, etc. En términos de producción un bono de carbono representa el derecho a emitir una tonelada de dióxido de carbono.

Y. Certificado de reducción de emisiones

Es el documento emitido por el Ministerio en el que se hace constar que el proyecto que desarrolla utiliza fuentes de energía renovable, que puede ser objeto de comercialización por parte de su propietario como se consigna en el Artículo 23 de este Reglamento.

Z. Mercado de bonos de carbono en Guatemala

La planta de biogás de efluente de palma (Empresa extractora del atlántico), se registró en la Junta Ejecutiva del Mecanismo de desarrollo Limpio (MDL) del Secretaria de la Convención Marco de las naciones unidas incursionando en el mercado de reducir las emisiones de dióxido de carbono (Co₂). Para el 20 de marzo de 2010 el mercado verde había atraído a 10 empresa guatemaltecas generadores de energía renovable como las hidroeléctricas Las Vacas, Matanzas, San Isidro, El Canadá, Candelaria, HidroXacbal, la planta de biogás y co-composteo de racimos vacíos de fruta y palma africana en Izabal, la geotérmica Amatitlán, y Bioenergía en Escuintla, etc.

«Este mercado verde ha atraído a unas 10 empresas guatemaltecas generadoras de energía renovable, señala Raúl Catañeda Illescas, coordinador de la Oficina Nacional de Desarrollo Limpio del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN).»

«Entre los proyectos registrado planta de biogás y co-composteo de racimos vacíos de fruta y palma africana en Izabal, la geotérmica Amatitlán, y Bioenergía en Escuintla. Además, el MARN ha entregado nueve cartas de Aprobación Nacional a igual número de proyectos de energía renovable para que se registren ante el MDL.» (Periódico, 2010)

AA. Empresas generadoras de energía eléctrica en Guatemala

Tabla 6: Empresas generadoras de energía eléctrica en Guatemala

<p>HIDROELÉCTRICA CANDELARIA, SOCIEDAD ANÓNIMA</p> <p>16 calle 0-26, zona 14</p> <p>23138383</p>	<p>ORTITLÁN LIMITADA</p> <p>Avenida Reforma 7-62 zona 9 Edificio Aristos Of 310</p> <p>Tel: (502) 23628001</p>
<p>HIDROELÉCTRICA CHOLOMA, SOCIEDAD ANÓNIMA</p> <p>16 Calle 0 26 Zona 14</p> <p>Tels: (502) 2368-3330 2337-3255</p>	<p>HIDROTAMA, SOCIEDAD ANÓNIMA</p> <p>12 Calle 1-25 zona 10 Edificio Géminis Torre Norte, of 1103</p> <p>23816777</p>
<p>ORZUNIL I DE ELECTRICIDAD, LIMITADA</p> <p>Ave. Reforma 7-62 Edificio Aristos of. 310</p> <p>Tel. 2362-8007 al 08</p>	<p>COMPAÑÍA ELECTRICA LA LIBERTAD SOCIEDAD ANÓNIMA</p> <p>Av. Reforma 7-62 zona 9, Ed Aristos Reforma, Of 710, Nivel 7</p>
<p>INVERSIONES PASABIEN, SOCIEDAD ANÓNIMA</p> <p>Calz. Aguilar Batres 23-13, zona 12</p> <p>Tel. 24762455</p>	<p>HIDRONORTE, SOCIEDAD ANONIMA</p> <p>6ta. ave. 8-14 z.1 Edificio de Empresa Eléctrica 4to.nivel</p> <p>Tel. 2420-4000 ext.3181</p>

<i>Continuación de Tabla 6: Empresas generadoras de energía eléctrica en Guatemala</i>	
<p>GENERADORA ELÉCTRICA DEL NORTE, LIMITADA 16 calle 4-51 zona 10, Edificio Marbella, Nivel 9 Tel. 24218500</p>	<p>HIDRO XACBAL, SOCIEDAD ANONIMA 2a calle 8-01 zona 14 Edificio Las Conchas, tercer nivel 23124800</p>
<p>SIDERURGICA DE GUATEMALA, SOCIEDAD ANÓNIMA Ave. Las Américas 18-81 z. 14 Edificio Columbus Center nivel 14. Tel. 7740-1241</p>	<p>INTERNACIONAL DE COMERCIO Y CONSULTORIA, SOCIEDAD ANÓNIMA INVERSIONES ATENAS, SOCIEDAD ANÓNIMA Avenida La Reforma 9-76 zona 9</p>
<p>HIDROELÉCTRICA RÍO LAS VACAS, SOCIEDAD ANÓNIMA 41 Calle 6-27 zona 8 24210400</p>	<p>Alternativa de Energía Renovable S.A. Calzada Roosevelt, 6.19 zona 3 de Mixco Colonia Cotio Tel. 23281000</p>
<p>GENERADORA PROGRESO, SOCIEDAD ANÓNIMA Centro Gerencial Las Margaritas Torre I oficina 1201 Tel. 2414-3621/ 2414-3600</p>	<p>CODESCO 2a avenida 9-60 zona 9 Oficina #3 Tel. 23625523</p>

<i>Continuación - Tabla 6: Empresas generadoras de energía eléctrica en Guatemala</i>	
<p>INGENIO TULULÁ, SOCIEDAD ANÓNIMA Diagonal 6 10-01 zona 10, Centro Gerencial las Margaritas, Torre 2, Nive 7</p> <p>24709696 ext 7</p>	<p>Eolico San Antonio El Sitio Ruta 3 2-16 zona 4 Edificio Altamira 5to Nivel</p> <p>Tel. 22054545</p>
<p>RENOVABLES DE GUATEMALA, S. A. Diagonal 6 10-65, zona 10, CG las Margaritas, T I Of 801</p> <p>Tel. 23277000</p>	<p>US Geothermal 17 Avenida 19-870, Zona 10 Edificio Torino oficina 1001 Nivel 10</p> <p>Tel. 23680256</p>
<p>GENERADORA DE OCCIDENTE, LIMITADA Diagonal 6 10-65, zona 10, Centro Gerencial Las Margaritas, T I Of 801</p> <p>Tel. 23277000</p>	<p>Hidroeléctrica El Cobano 7a ave. 12-23 zona 9 Edificio Etisa Of. 1211 Sótano</p> <p>Tel. 24191072</p>
<p>GENERADORA MONTECRISTO, S. A. Diagonal 6, 10-65 Zona 10, Centro Gerencial Las Margaritas Torre I, Nivel 8, Oficina 801.</p> <p>Tel: (502) 23277000. Fax: (502) 2339-3176</p>	<p>Aguilar, Arimany, Consultores Asociados, S. A. Design Center Diagonal 6 12-42 zona 10 Torre 1, Nivel 6 Oficina 601</p> <p>Tel. 22618857</p>

(Salguero, 2014)

AB. Marco regulatorio del subsector eléctrico

1. Constitución de la República

a. Artículo 129 Electrificación. Se declara de urgencia nacional, la electrificación del país, con base en planes formulados por el Estado y las municipalidades, en la cual podrá participar la iniciativa privada.

b. Artículo 130 (Prohibición de monopolios). Se prohíben los monopolios y privilegios. El Estado, limitará el funcionamiento de las empresas que absorban o tiendan a absorber, en perjuicio de la economía nacional, la producción en uno o más ramos industriales o de una misma actividad comercial o agropecuaria. Las leyes determinarán lo relativo a esta materia. El Estado protegerá la economía de mercado e impedirá las asociaciones que tiendan a restringir la libertad del mercado o a perjudicar a los consumidores.

2. Ley de la electricidad (Decreto 93-96)

a. Artículo 1:

1) Es libre la generación de electricidad y no se requiere para ello la autorización o condición previa por parte del Estado, más que las reconocidas por la Constitución política de la República.

2) Es libre el transporte de electricidad, cuando para ello no sea necesario utilizar bienes del dominio público; también es libre el servicio de distribución privada de electricidad.

b. Artículo 7: Una misma persona, individual o jurídica, al efectuar simultáneamente las actividades de generar y transportar o distribuir energía eléctrica en el Sistema Eléctrico Nacional, deberá realizarlo a través de empresas o personas jurídicas diferentes.

c. Artículo 8: Es libre la instalación de centrales generadoras, las cuales no requerirán la autorización de ente gubernamental alguno y sin más limitaciones que las que se den de la conservación del medio ambiente y la protección a las personas, a sus derechos y sus bienes. No obstante, se requerirá de la respectiva autorización del Ministerio, cuando la potencia de la central exceda de 5MW.

d. Artículo 10: Los proyectos de generación y transporte de energía eléctrica deberán adjuntar evaluación de impacto ambiental, que se determinará a partir del estudio respectivo, el que deberá ser objeto de dictamen por parte de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), dentro de un plazo no mayor de sesenta días a partir de su recepción.

e. Artículo 39: Agentes del Mercado Mayorista: Como agentes del mercado mayorista se entenderán los generadores, comercializadores, importadores, exportadores y transportistas, cuyo tamaño supere los siguientes límites:

- Generadores: Tener una potencia firme de por lo menos 10 Megavatios (MW)
- Comercializadores: Comprar o vender bloques de energía de por lo menos 10 Megavatios (MW).
- Distribuidores: Tener un mínimo de 20,000 usuarios.

3. Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista

a. Artículo 5: Los agentes del Mercado Mayorista son: Generadores, Distribuidores, Transportistas y Comercializadores. Además de los agentes, se define también a los Grandes Usuarios. Cualquier agente y gran usuario es llamado en general: participante.

Para poder ser Agente o Gran Usuario del MM se debe cumplir con los siguientes requisitos básicos:

Figura 6: Requisitos para ser participante en el sector eléctrico

Participante	Requisito
Generadores:	Potencia Máxima de por lo menos 5 MW
Distribuidores:	Tener por lo menos 15,000 usuarios
Transportistas:	Potencia firme conectada de por lo menos 10 MW
Comercializadores:	Comprar o vender bloques de energía asociada a una potencia firme de al menos 2 MW
Grandes Usuarios:	Demanda máxima de al menos 100 KW

(CNEE, s.f.)

4. Requisitos para participar en el mercado mayorista de electricidad en Guatemala

- a. Para que un participante pueda ser habilitado para operar en el Mercado Mayorista debe cumplir con:
 - Cumplir con los requisitos de incorporación de participantes en el mercado mayorista.
 - Autorización para el uso de los equipos de medición y facultad de realizar pruebas.
 - Pruebas de potencia máxima o declaración de demanda.
 - Autorización para el acceso al sistema informático del Administrador del Mercado Mayorista.
- b. Presentar solicitud para operar en el Mercado Mayorista de Electricidad de Guatemala como Agente Generador.
- c. Presentar certificación de Inscripción en el Registro del Ministerio de Energía y Minas.
- d. Presentar copia legalizada de la escritura de constitución de la entidad.
- e. Presentar copia de patente de comercio y documentación de la representación legal.
- f. Acta notarial de Declaración de Declaración Jurada, en el cual se compromete al pago del monto adeudado por su participación en el Mercado Mayorista.

AC. Ley del Impuesto Sobre la Renta (Decreto 26-92)

Decreto 10-2012 “En cambio el decreto 10-2012 en su artículo 27 establece que el cálculo de la depreciación se hará usando el método de línea recta, el cual consiste en aplicar sobre el valor del activo un porcentaje anual, fijo y constante. I señalar y no exigir que obligadamente se tenga que utilizar el porcentaje máximo establecido en la ley, se interpreta que el contribuyente puede aplicar un porcentaje menor, obviamente tomando en cuenta las condiciones de uso y otros aspectos que determinarán la vida útil del bien y la determinación de una tarifa menor. Lo que sí hay que tomar en cuenta es que la ley establece que el porcentaje se debe aplicar en forma consistente y fijo, lo que quiere decir que una vez establecido, el mismo no se puede cambiar y se debe aplicar hasta culminar con la vida útil del bien. (Monroy, 12)

1. Artículo 16 (Regla general) Las depreciaciones y amortizaciones cuya deducción admite esta ley, son las que corresponde efectuar sobre bienes de activo fijo e intangibles, propiedad del contribuyente que son utilizados en su negocio, industria, profesión, explotación o en otras actividades vinculadas a la producción de rentas gravadas.
2. Artículo 17 (Base de cálculo) El valor sobre el cual se calcula la depreciación es el de costo de adquisición o de producción o de revaluación de los bienes y, en su caso, el de las mejoras incorporadas con carácter permanente. El valor de costo incluye los gastos incurridos con motivo de la compra, instalación y montaje de los bienes y otros similares, hasta ponerlos en condición de ser usados. Sólo se admitirán depreciaciones y amortizaciones sobre el aumento en valores de activos que fueren activos fijos depreciables y que se hubieren revaluado y se hubiera pagado el impuesto correspondiente, de acuerdo con lo establecido en el artículo 14 de esta ley.
3. Artículo 18 (Forma de calcular la depreciación): La depreciación se calcula anualmente, previa determinación del período de vida útil del bien a depreciar, mediante la aplicación de los porcentajes establecidos en esta ley. En general, el cálculo de la depreciación se hará usando el método de línea recta, que consiste en aplicar sobre el valor de adquisición o producción del bien a depreciar, el porcentaje fijo y constante que corresponda, conforme las normas de este artículo y el siguiente.
4. Artículo 19 (Porcentajes de depreciación): Se fijan los siguientes porcentajes anuales máximos de depreciación para el método de línea recta:
 - a. Edificios, construcciones e instalaciones adheridas a los inmuebles y sus mejoras, cinco por ciento (5%).
 - b. Árboles, arbustos, frutales y especies vegetales que produzcan frutos o productos que generen rentas gravadas, incluidos los gastos capitalizables para formar las plantaciones, quince por ciento (15%).
 - c. Instalaciones no adheridas a los inmuebles, mobiliario y equipo de oficina, buques - tanques, barcos y material

- ferroviario, marítimo, fluvial o lacustre, veinte por ciento (20%).
- d. Los semovientes utilizados como animales de carga o de trabajo, maquinaria, vehículos en general, grúas, aviones, remolques semirremolques, contenedores y material rodante de todo tipo, excluido el ferroviario, veinte por ciento (20%).
 - e. Equipo de computación, treinta y tres punto treinta y tres por ciento (33.33%).
 - f. Herramientas, porcelana, cristalería, mantelería, cubiertos y similares; veinticinco por ciento (25%).
 - g. Reproductores de raza, machos y hembras la depreciación se calcula sobre el valor de costo de tales animales menos su valor como ganado común, veinticinco por ciento (25%).
 - h. Para los bienes muebles no indicados en los incisos anteriores, diez por ciento (10%)

AD. Ley de Incentivos para el desarrollo de proyectos de Energía Renovable (Decreto 52-2003)

1. Sistemas avalados para gozar de incentivo relacionados con el proceso de generación de energía:
 - a. Sistema de generación de energía (Turbina, generador, sistema electrógeno, todos con sus componentes, controles, protecciones y accesorios).
 - b. Sistema de combustible (almacenamiento, conducción).}
 - c. Sistema de combustión (caldera).
 - d. Sistema de gases de combustión.
 - e. Sistema de tratamiento de agua.
 - f. Sistema agua-vapor.
 - g. Sistema desaereador.
 - h. Sistema olehidráulico (Turbina, de generador)
 - i. Sistema de refrigeración (Turbina, generador)
 - j. Sistema de equipo para montaje (puente grúa)
 - k. Sistema de servicios auxiliar.
 - l. Sistema de supervisión, control y adquisición de datos del proceso de generación de energía (incluye software).

- m. Sistema de prensado o extracción.
- n. Sistema de transformación de la biomasa (combustión, pirolisis, gasificación, fermentación, otro).
- o. Sistema de esterificación.

(Minas)

2. Artículo 5 (Incentivos): Las Municipalidades, el Instituto Nacional de Electrificación -INDE-, Empresas Mixtas, y las personas individuales y jurídicas que realicen proyectos de energía con recursos energéticos renovables gozarán de los siguientes incentivos:

- a. *Exención de derechos arancelarios para las importaciones*: incluyendo el Impuesto al Valor Agregado -IVA-, cargas y derechos consulares sobre la importación de maquinaria y equipo, utilizados exclusivamente para la generación de energía en el área donde se ubiquen los proyectos de energía renovable. Este incentivo tendrá vigencia exclusiva durante el período de pre inversión y el período de construcción, el cual no excederá de diez (10) años.
- b. *Exención del pago del Impuesto Sobre la Renta*: Este incentivo tendrá vigencia exclusiva a partir de la FIE, por un período de diez (10) años. Esta exención únicamente se otorga a las personas individuales y jurídicas que desarrollen directamente los proyectos y solamente por la parte que corresponda a dicho proyecto, ya que la exención no aplica a las demás actividades que realicen.

Aprovechamiento de incentivos:

- El interesado deberá presentar al órgano competente la siguiente información: - La solicitud deberá ser dirigida al Ministerio de Energía y Minas. Durante los períodos de pre inversión y de construcción podrán presentarse ampliaciones a la misma, siguiendo el mismo procedimiento.
- La documentación general del proyecto donde se indique claramente el cronograma de realización del período de pre inversión, del período de construcción y del período de operación.
- Declaración que ha cumplido con lo consignado en la Ley General de Electricidad, en lo que sea aplicable.

- Listado total o parcial de los materiales, equipos y otros asociados a estos períodos, y el tipo del o los incentivos solicitados, especificando el período a que corresponden.

El interesado presentará dicha certificación a la Superintendencia de Administración Tributaria -SAT- para que la citada dependencia emita la resolución de exención en un plazo no mayor de treinta (30) días, contados a partir de la fecha de presentación de la solicitud. La SAT otorgará las exenciones con base en la resolución del órgano competente. Si la solicitud no fuera resuelta y notificada dentro del plazo fijado, la misma se tendrá por resuelta favorablemente.

3. Artículo 6 (Certificado de reducción de emisiones):

Los certificados de reducción de emisiones pertenecerán a los propietarios de los proyectos, quienes de esa forma se beneficiarán de la comercialización de los mismos. Estos certificados serán emitidos por el órgano competente, de conformidad a la cuantificación de las emisiones reducidas o desplazadas por el proyecto.

IV. METODOLOGÍA

A. Módulo: Caracterización química y microbiológica de biogás producido por mezclas de estiércol de jirafa y elefante del Zoológico “La Aurora”.

La preparación de biodigestores a escala de laboratorio se llevó a cabo usando frascos de vidrio de 1L marca Kimax®, tapones de hule, mangueras de plástico y botellas plásticas calibradas. Las botellas plásticas tenían una capacidad de 1.5L, se calibraron tomando como unidad de medida 50ml. Éstas estaban unidas al frasco de vidrio por una manguera de plástico. El conjunto se colocó dentro de una incubadora a temperatura de 45°C. Inicialmente se prepararon cinco biodigestores a los cuales se les agregaron las mezclas que se mencionan en la Tabla 7.

Tabla 7: Diferentes proporciones de estiércol de elefante, jirafa y agua para crear las mezclas a evaluar.

Componente	Porcentaje (v/v)				
	1	2	3	4	5
Estiércol de elefante	30	50			50
Estiércol de jirafa*	30		50	40	50
Agua	40	50	50	60	

* El estiércol de jirafa estaba mezclado con estiércol de cebra debido a que se encuentran en el mismo recinto y no fue separado.

** Se escogieron los desechos (excretas) de elefante y jirafa debido a que se acumulan 194.68 l/día en el Zoológico “La Aurora” (85% de los excrementos acumulados en total en el Zoológico).

Las mezclas se incubaron durante 93 días (3 meses). Se realizaron lecturas del volumen de biogás producido en las botellas plásticas calibradas cada dos días (en algunos casos cada tres o cuatro días) hasta el día 57. También se anotaba la temperatura de la incubadora para determinar si ésta estaba constante. Por otro lado, para el análisis microbiológico se tomaron muestras del estiércol de elefante y jirafa sin incubar y de los frascos incubados. De éstos últimos se tomaron muestras luego de 53 días de incubación (segundo muestreo) y luego de 93 días de incubación (tercer muestreo). También se realizaron muestreos del biodigestor a escala normal de la siguiente manera: dos muestreos con diferencia

de 29 días entre cada uno; tres muestreos luego de una carga con excremento de jirafa y elefante (día 0, día 3 y día 6)

El análisis microbiológico se realizó a través de la estimación de población bacteriana mediante la técnica del Número Más Probable (NMP). Como inóculo inicial se utilizaron 0.5ml de la muestra y se prosiguió realizando diluciones con caldo anaerobio (ver receta en Anexos) hasta la dilución 1×10^{-7} y 1×10^{-8} . Las diluciones de 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} y 10^{-8} se realizaron en triplicado. Los tubos se colocaron dentro de una caja de anaerobiosis junto con un indicador de ambiente anaerobio y un sobre de *GasPak Plus BBL® Anaerobic System Envelope* activo. La caja de anaerobiosis se colocó en una incubadora a 42°C durante 48 horas. Se consideraron como resultado positivo los tubos que presentaban turbidez. La estimación de la población bacteriana se determinó mediante una tabla de NMP de tres tubos (ver Anexos). Con los resultados del segundo muestreo se escogieron las diluciones más concentradas de las dos muestras que generaron mayor cantidad de biogás. Con esto se realizaron dos cultivos puros de bacterias con volumen de 100ml. Se incubaron a 45°C durante tres días. El caldo saturado se añadió a dos mezclas originales: la que produjo menor cantidad de biogás y a la de mayor cantidad de biogás. Se monitoreó el volumen de biogás generado en botellas de 1.5L calibradas durante 35 días.

Se determinó la presencia de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y ácido sulfhídrico (H₂S) para encontrar la composición del biogás. Se utilizó un cromatógrafo de gases (GC-FID Agilent 6890N). Con columna HP-PLOT Q 30m, 0.32mm, 30um. La temperatura inicial fue de 60°C, aumentando 30°C/min hasta llegar a 240°C. La temperatura del inyector era de 100°C y la del detector (TCD y FID) de 250°C. Se tomaron 500ul de muestra de biogás directo de las cinco botellas calibradas y fueron inyectadas en el GC-FID. La composición del biogás se reportó como el porcentaje de área del pico característico para cada componente.

El análisis de resultados se realizó mediante la interpretación del Número Más Probable y por el análisis de gráficas de barras y dispersión. El Número Más Probable se usa para estimar la densidad poblacional de microorganismos viables en una muestra. Se basa en la teoría de probabilidad usando límites de un 95% de confiabilidad (USDA, 2014). También se realizaron las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y U de Mann-Whitney para determinar diferencias entre las mezclas realizadas. La prueba de Kruskal-Wallis se utiliza para determinar si existen diferencias entre varias muestras (“k”) independientes

(Tomás-Sábado, 2010). En este caso la Hipótesis nula (H_0) para esta prueba fue: todas las mezclas realizadas son iguales respecto a la carga microbiológica. La Hipótesis alternativa (H_a) fue: no todas las mezclas realizadas son iguales respecto a la carga microbiológica. La prueba U de Mann-Whitney se usa para determinar si existe diferencia entre dos muestras independientes (Tomás-Sábado, 2010). Ésta se utilizó para examinar si hay diferencia entre la carga microbiológica de los desechos de elefante y jirafa. En este caso la Hipótesis nula fue: la mezcla #2 y #3 son iguales respecto a la carga microbiológica. La Hipótesis alternativa fue: la mezcla #2 y #3 no son iguales respecto a la carga microbiológica.

B. Módulo: Caracterización de materia prima y determinación de variables básicas de un reactor diseñado para la biodigestión de desechos orgánicos generados del Zoológico “La Aurora”

Las técnicas analíticas empleadas en muchas de las etapas experimentales del trabajo corresponden a las descritas en los Métodos Estándar para el Análisis de Aguas Potables y Residuales (APHA, AWWA, WPCF, 1989).

1. Caracterización materia prima

2. Determinación de Ph

- Tomar una muestra de 5 gramos de las excretas seleccionadas.
- Homogeneizar las muestras manualmente.
- Aplicar el método normalizado 4500 de la APHA- AWWA-WPFC, 1989 por inmersión del electrodo de pH en la muestra homogeneizada

3. Determinación de sólidos totales y sólidos volátiles

- Tomar una muestra de excretas seleccionadas de 10 gramos.
- Pesar dicha muestra en balanza analítica.
- Introducir la muestra en un horno de secado a 70°C siguiendo el método normalizado 2540B de la APHA-AWWA-WPFC.
- Volver a pesar la muestra hasta que ésta permaneció constante; la diferencia con el peso inicial representa los sólidos volátiles presentes.
- El residuo obtenido en el horno se calcinó en una mufla a 600 °C.

- Las cenizas contenidas en el estiércol se calculan mediante la resta entre el peso de la muestra inicial y el peso del residuo luego de la calcinación.

4. Determinación de densidad (Atares, 2009)

- Tomar una muestra de las excretas seleccionadas de 10 gramos.
- Pesarse dicha muestra en una balanza analítica.
- Llenar un beaker con un volumen de agua conocido.
- Agregar al beaker con agua la muestra de excretas.
- Leer el nuevo volumen obtenido.
- Calcular el cociente que surge a partir de la división de la masa de la muestra y la diferencia entre el volumen inicial y el final.

5. Determinación de demanda química de oxígeno (Procedimiento DIN 38409 H41)

- Preparar 10ml de una muestra de excretas diluidas en agua en la proporción que se usará en el biodigestor en un matraz Erlenmeyer de 250mL.
- Añadir 0.4g de sulfato de mercurio (II)
- Añadir 5mL de la solución patrón de dicromato potásico.
- Añadir 15 mL de sulfato de plata.
- La solución se agita con cuidado y enfriando en un baño de hielo para evitar la pérdida de sustancias orgánicas volátiles.
- La muestra se diluye con 75mL de agua destilada.
- Valorar el exceso de dicromato con la solución patrón de sulfato de hierro (II) y amonio en presencia de 1 o 2 gotas de ferroina.
- El punto de virado se señala con el cambio brusco de color de verde azulado al rojo violeta.
- Calcular DQO según la siguiente ecuación:

Ecuación 11: Cálculo de DQO

$$DQO = \frac{800 c (V1 - V2)}{V_0}$$

En donde:

c es la concentración expresada en moles por litro de la solución de sulfato de hierro (II)

V_1 es el volumen en mililitros de la solución de sulfato de hierro (II) y amonio utilizada para el ensayo en blanco

V_2 es el volumen en mililitros de la solución de sulfato de hierro (II) y amonio utilizada para la determinación

V_0 es el volumen en mililitros de la muestra utilizada.

6. Determinación de proteínas

- Pesar una muestra en un matraz de micro-Kjeldahl.
- Añadir 2.5 ml. de H_2SO_4 , dos perlas de ebullición y aproximadamente 1.0 g de mezcla catalizadora.
- Someter a digestión la muestra en el aparato de microKjeldahl bajo una campana de extracción. La digestión terminará cuando el color de la muestra sea azul-verde claro. El proceso tomará aproximadamente 90 minutos.
- Enfriar el matraz durante unos 4 minutos para que no se endurezca al solidificarse la muestra.
- Añadir 7 ml. de H_2O cuidadosamente, poco a poco, a la muestra digerida. Mezclar y permitir enfriar.
- Destilar la solución.
- Colocar 1 frasco Erlenmeyer con 10 ml de ácido bórico y 2 gotas de indicador bajo la salida de destilación.
- Añadir aproximadamente 10 ml. de la solución de NaOH a la cámara de ebullición. La mezcla digerida se tornará oscura (azul-gris o café oscuro).
- Colectar aproximadamente 20 ml. del destilado (4-5 minutos). El destilado estará listo para ser titulado cuando se torna verde en el matraz receptor.
- Titular la muestra con 0.1N de HCl. Un color violeta indica el punto final de la titulación. Cada equivalente del HCl usado corresponde a un equivalente de NH_3 o a un equivalente de N en la muestra original. El peso del N en mg está dado por miliequivalentes del ácido $\times 14$ (el peso equivalente del N).

Para la determinación de Proteínas se utilizará el método Kjeldahl. El método Kjeldahl mide el contenido en nitrógeno en muestras orgánicas. El contenido en proteína se puede calcular seguidamente, presuponiendo una proporción entre la proteína y el nitrógeno para el alimento específico que esta. siendo analizando.(Fernández, 2010)

7. Determinación de grasas. El método Soxhlet involucra una extracción sólido-líquido con el fin de determinar la concentración de la materia grasa. El solvente a utilizar debe tener un punto de ebullición bajo y no reaccionar con el aceite a extraer. (Mejía, 2008)

- Pesar en un matraz erlenmeyer de 250 mL entre 2 a 5 gramos de muestra, previamente homogeneizada, adicionar 10 mL de agua y 10 mL de ácido clorhídrico más algunas perlas de ebullición.
- Conectar al sistema refrigerante, calentar por 45 minutos, agitando a intervalos de 10 minutos.
- Preparar una suspensión que contenga 3 gramos de celite en 20 mL de agua
- Una vez terminado el calentamiento, adicionar 1 gramo de celite y agitar.
- Proceder a filtrar al vacío por medio de un embudo Buchner con papel filtro, adicionados de la suspensión de celite preparada previamente.
- Secar el papel filtro con la celite y la grasa adsorbida en estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 1 hora y extraer la grasa por Soxhlet, de la siguiente forma:
- Incorporar la muestra hidrolizada y seca a un dedal de celulosa o envolver en papel filtro.
- Colocar el dedal en el tubo de extracción y adicionar el solvente al matraz previamente tarado.
- Extraer la muestra con solvente por 6 a 8 horas a una velocidad de condensación de 3-6 gotas/seg.
- Cuando se completa la extracción eliminar el solvente en rotavapor o evaporando con precaución bajo campana, hasta que se evapore todo el éter.
- Secar el matraz en estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 30 min, enfriar en desecador y pesar.

Ecuación 12: Cálculo de porcentaje de grasa

$$\% \text{ grasa crusa} = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100$$

Donde:

m peso de la muestra,

m1 tara del matraz solo y

m2 peso matraz con grasa.

Las etapas de este método comprenden de los siguientes procesos físicos: vaporización, condensación, extracción y evacuación por el sifón. (Mejía, 2008)

8. Selección y dimensionamiento de biodigestor

- Alimentar biodigestor piloto con desechos orgánicos seleccionados con mezcla de agua seleccionada.
- Monitorear variables críticas de biodigestor: ph y temperatura.
- Almacenar biogás producido en bolsa de biogás a lo largo de la prueba.
- Tomar muestras de biogás cada 15 días con el fin de determinar a partir de cromatografía de gases y Detector de gases HI-KP810 LA concentración de metano en biogás.
- Pesarse bolsa de biogás cada 15 días con el fin de determinar la cantidad total de biogás generado a lo largo del tiempo.
- Calcular y modelar velocidad de reacción de la digestión anaerobia de los desechos orgánicos seleccionados.
- Comparar modelo de reacción con los resultados de la caracterización de materia prima.
- Determinar características de biodigestor según el modelo creado y/o características iniciales de materia prima.
- Seleccionar biodigestor.

9. Determinación de retención de sólidos (SRT)

- Calcular volumen de digestor según los requerimiento y espacio disponible de Zoológico “La Aurora”
- Calcular concentración de sólidos en el digestor tomando en cuenta la caracterización de la materia prima.
- Calcular SRT con baseen la siguiente ecuación:

Ecuación 13: Determinación de retención de sólidos (SRT)

$$SRT = \frac{V C_d}{Q_w C_w}$$

En donde:

V = volumen del digestor

Cd = Concentración de sólidos en el digestor

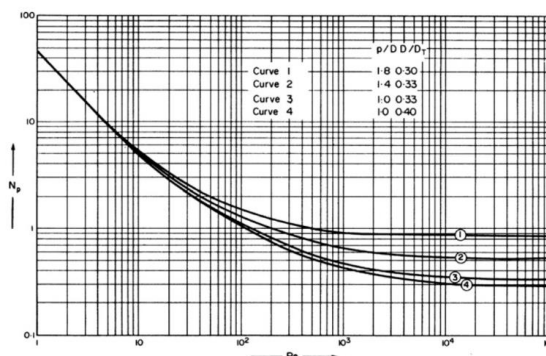
Qw = Volumen descargado cada día

Cw = Concentración de sólidos en el efluente

10. Dimensionamiento de agitador y determinación de potencia

- Calcular diámetro de agitador con un relación 1:3, diámetro agitador-diámetro reactor
- Cálculo de número de Reynolds
- Cálculo de número de potencia a partir de su relación con el número de Reynolds.

Ilustración 9: Correlación número de potencia y número de reynolds a diferentes relaciones de diámetro agitador tanque



- Cálculo de potencia a partir de siguiente ecuación

Ilustración 10: Cálculo de número de potencia

$$N_p = \text{número de potencia} = \frac{P}{D^5 N^3 \rho}$$

C. Módulo: Limpieza de biogás generado en el biodigestor

La metodología a utilizada en el módulo de remoción del Sulfuro de hidrógeno y Dióxido de Carbono para la recolección e interpretación de datos fue: la consulta bibliográfica, la búsqueda en Internet y la experimentación con la aplicación de las formas más efectivas y económicas de remoción.

La recolección de datos se llevó a cabo de distintas maneras. Estas se realizaron en el biodigestor que se encuentra en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. El biodigestor como prueba piloto se adquirió con un proveedor y se alimentó con desechos seleccionados del Zoológico “La Aurora”, principalmente de elefante y jirafa, ya que representan el 70% de los desechos del Zoológico.

La orientación de la investigación se basó en el control de la concentración y porcentaje de volumen de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono respectivamente para posteriormente limpiarlo, con la reducción de ambos gases contaminantes.

1. Medición de sulfuro de hidrógeno. Con la utilización de un medidor portátil calibrado para medición de sulfuro de hidrógeno se extrae el biogás de la bolsa de almacenamiento por medio de una bomba succionadora y posteriormente con ayuda de un compresor se calibra el flujo de biogás que se dejará fluir y medir durante 5 minutos. El dato de sulfuro de hidrógeno se reportará en partes por millón (ppm).

2. Medición de dióxido de carbono. Con la utilización de un medidor portátil calibrado para medición de dióxido de carbono se extrae el biogás de la bolsa de almacenamiento por medio de una bomba succionadora y posteriormente con ayuda de un compresor se calibra el flujo de biogás que se dejará fluir pasando primero por la medición de sulfuro de hidrógeno y medir durante 5 minutos. El dato de dióxido de carbono se reportará en porcentaje de volumen (ppm).

3. Pruebas de reducción de sulfuro de hidrógeno. Realización de pruebas semanales de remoción de Sulfuro de Hidrógeno por medio de filtro de plástico con lecho filtrante (óxido de hierro). Se mide la concentración previo al filtro y al salir del filtro. Se reporta el porcentaje de concentración de sulfuro de hidrógeno eliminado por cantidad de óxido férrico utilizado por corrida. (triplicado)

4. Pruebas de reducción de dióxido de carbono. Realización de pruebas semanales de reducción de Dióxido de Carbono por medio de filtro de plástico con lecho filtrante (cal). Se reportará porcentaje de concentración de Dióxido de Carbono eliminado por cantidad de cal utilizada por corrida. (triplicado)

5. Cálculos de cantidad de lecho filtrante para filtro de óxido de hierro. Con apoyo del promedio de porcentaje de reducción de sulfuro de hidrógeno y la reacción del gas contaminante con el lecho filtrante se calcula la cantidad de óxido de hierro utilizado hasta su agotamiento.

6. Comparación de poder calorífico de biogás filtrado y no filtrado. Se realiza la medición del poder calorífico de cada tipo de biogás (filtrado/no filtrado) quemando una cantidad conocida de biogás a través del contador para calentar un litro de agua durante 3 minutos. Primero se trabajo con el sistema completo armado que consta de un filtro de H₂S y uno de CO₂, posteriormente se trabajó sin filtros para lograr determinar si la presencia de H₂S y de CO₂ pueden afectar el poder calorífico del gas afectando su combustión al momento de utilizarlo en una estufa.

D. Módulo: Análisis y propuesta de mejora de los procesos de trabajo y viabilidad económica de la instalación de un biodigestor en el Zoológico “La Aurora”.

1. Recolecta de Información. En esta etapa se desea seleccionar todos los elementos que sean útiles para poder analizar posteriormente la recolección y desecho de todos los residuos orgánicos por los animales y como esto ayuda o no es de uso en el proceso actual.

2. Análisis de la situación actual. Actualmente el Zoológico “La Aurora”, no cuenta con ningún sistema planificado óptimo de la recolección y gestión de los residuos orgánicos. La recolección de estos residuos se hace sin una previa clasificación y por cada recinto de animal se desechan en aguas residuales y se guardan en toneles metálicos de Aproximadamente 60 galones.

La situación en este momento del proceso de mantenimiento y trata de los desechos es la siguiente: El Zoológico “La Aurora” paga para que un camión de la municipalidad y a una empresa privada para que llegue a recoger los desechos de todos los animales. En promedio los desechos semanales de los elefantes y de las jirafas son de 6 toneladas, más un tonel más de los otros animales; 7 en total.

3. Análisis del diseño de trabajo y procesos. Estos toneles los pasa recogiendo la municipalidad sin ningún costo. Para esta etapa se analizara el sistema como tal, utilizando diagramas de flujo y diagramas de causa y efecto.

Con estos análisis, llegaremos a saber en qué parte de estos procesos contiene más holguras. Con los diagramas de pescado podremos saber las

casusas principales de los problemas que no conllevan a optimizar el proceso.

En esta etapa, es importante contar con la colaboración del personal encargado para estas etapas de la recolección y clasificación de los desechos orgánicos del Zoológico.

Después de contar con la información necesaria se realizará una propuesta con una situación óptima dirigida hacia la propuesta del biodigestor en el Zoológico “La Aurora”.

Se establecerán parámetros y reestructura de todos los procedimientos que conllevan al proceso de desechar los desechos del Zoológico “La Aurora”. Para esta parte se va a utilizar diagramas de red para optimizar la ruta de la recolección de los desechos hacia el biodigestor.

4. Viabilidad económica. En esta etapa se realizaran los flujos de efectivo anuales, incluyendo todos los factores de ahorro, y la generación de biogás como los costos. Con estos datos podremos sacar los indicadores económicos donde da como resultado la viabilidad económica del proyecto.

Para este rediseño y estructura. Se realizó un análisis de inversión de equipo donde esta inversión será el costo total de la instalación y compra del biodigestor y gastos incurridos al manejo.

Para el periodo de recuperación es importante relacionar el costo de producir biogás. Para conocer el costo de producir una libra de biogás se utilizó el sistema de acumulación de costos para conocer los costos de fabricación partiendo de materiales directos, mano de obra y costos indirectos de fabricación (CIF). A consecuencia se llegó a los costos de artículos manufacturados y se conoció el costo unitario de por BTU's de biogás, sabiendo la capacidad del biodigestor.

5. Escenarios. Se realizaron tres escenarios, el más probable y otros dos pesimistas. En el primer escenario se miró la viabilidad económica de tal y como es el proyecto. . En el segundo escenario, se cambió el costo de recolección para poder observar en que porcentaje se puede reducir este costo para que el proyecto no sea viable financieramente. En el tercer escenario se cambiaron algunas variables más dependientes del proyecto, como la materia prima (desecho) y para poder concluir en que porcentaje el proyecto no sea viable.

E. Módulo: Modelo de negocios para la producción y venta de energía renovable a partir de biomasa en el Zoológico “La Aurora”

1. Recolecta de información. Para conocer las áreas de mejora y potencial para el uso del biogás a generar se realizaron entrevistas con Gerger García, Gerente de operaciones del Zoológico “La Aurora”, así como con Marcelo Estrada, Gerente de Mercado de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, para conocer cómo funciona el sector de energía eléctrica en Guatemala.

2. Análisis de la situación actual

a. Consumo de energía eléctrica. El Zoológico “La Aurora” tiene alta demanda energética dado a las unidades de climatización, las cuales consisten en luz especial para recintos ya que algunos animales requieren cierta temperatura para estar poder sobrevivir según su ambiente natural, consumo por iluminación, equipos, entre otros.

El Zoológico cuenta con un sistema descentralizado de energía, con 16 acometidas y 5 contadores, perteneciendo a la categoría de “usuario regulado” teniendo un consumo energético mensual en promedio de Q. 100,000.00.

b. Uso de gas propano. El Zoológico “La Aurora” cuenta con un área de restaurantes llamada “Comiplaza Chapina”, la cual está conformada por 6 comedores los cuales cuentan con área de cocina con parilla, mini bodega y espacio para acomodamiento de 10 mesas con sillas y tomacorrientes. Estos espacios se alquilan a microempresarias como fuente de ingreso.

Las estufas de leña (parillas) a pesar de tener bajo costo económico (a corto plazo) tiene un impacto considerable en la salud de las personas en contacto con las mismas, así como contaminación con el ambiente, por lo que en un análisis costo-beneficio representan la opción con menor rentabilidad dado al deterioro de la imagen social del Zoológico.

Se realizó una encuesta “Uso de carbón y gas en comiplaza del Zoológico “La Aurora”, aplicada a 5 de las comiplaza investigando uso, ventajas, desventajas de la aplicación de estas técnicas.

c. Luminación externa. Para el presente trabajo se tomó en cuenta la iluminación externa del Zoológico. Actualmente cuenta con:

<i>Tipo de lámpara</i>	<i># de lámparas</i>
	2
	3
	22
	41
	10
	16
	7

3. Análisis financiero. Para evaluar cada una de las alternativas propuestas, se realizaron flujos de efectivo anuales, incluyendo todos los factores de ahorro, así como los costos por suministro de biogás (costos de producción m³).

A partir del proyecto mutuamente seleccionado se realizó un análisis de recuperación para determinar a través alternativa elegida, el tiempo de recuperación con financiamiento propio, así como análisis de sensibilidad.

Dado a que independientemente del proyecto mutuamente excluyente que se seleccione el Zoológico puede dar charlas educativas y emitir “Certificados de reducción de emisiones”, se plantea un flujo de efectivo con financiamiento externo, así como una tabla de amortizaciones.

V. ANTECEDENTES

A. Situación actual de desechos sólidos en Guatemala

El manejo inadecuado de los desechos sólidos es uno de los problemas ambientales urbanos más severos que enfrenta Guatemala.

De acuerdo al Perfil Ambiental 2006, en el país diariamente se generan desechos sólidos por un monto de entre 6,000 a 7,000 toneladas, de las cuales, el 54% se producen en las zonas urbanas y el restante 46% en las zonas rurales. La urbanización, con sus efectos sobre el medio ambiente, conlleva también hábitos de consumo y de actividades por parte de los individuos, lo que implica, impactos y consecuencias, dentro de los cuales destaca una creciente generación de residuos y desechos sólidos.

Los desechos no recolectados se constituyen en uno de los grandes factores que ejercen presión al ambiente. La misma suele alimentar los botaderos ilegales tanto del área rural como urbana, y también existen hogares con el hábito de quemarla o enterrarla. Estos dos últimos fenómenos suceden con mayor frecuencia en el ámbito rural, en donde mayores extensiones de superficie y la dispersión de las viviendas refuerzan estas prácticas.

La técnica de disposición final de residuos y desechos sólidos más utilizada a nivel nacional es el botadero a cielo abierto (alrededor del 66%). El restante 29.5% de los municipios disponen sus residuos y desechos en botaderos controlados (autorizados únicamente por las municipalidades), sitios en los cuales no se toman medidas para evitar la contaminación de residuos y desechos y cuyo manejo carece de especificaciones técnicas. Para el caso de los “botaderos controlados” alguna de las consideraciones que se toman en cuenta es la localización del sitio y su dimensión a manera de controlar su expansión a otras áreas.

La procedencia y composición de los residuos y desechos sólidos que se producen en el país, el tipo de desecho que más se genera, es el agrícola y domiciliar, siendo éste en su mayoría materia orgánica. Los residuos de las actividades agrícolas son principalmente el tallo del racimo del banano, la pulpa del café, el rastrojo, bagazo y cachaza de la caña de azúcar y el desperdicio del destace de carne.

En lo que respecta a la composición de los residuos y desechos sólidos domiciliarios en el área metropolitana, el referente sigue siendo el estudio realizado por JICA (1995), en donde se concluye que del total de desechos el 63.3% es materia orgánica, el 14% es papel y cartón, el 8.1% es plástico, el 3.6% es textil, 3.2% es vidrio, el 3.0% es tierra y cenizas y el 5% restante se compone de madera, hojas, goma, metales, piedra, cerámica y pieles.

B. Ineficiente uso de la energía

En muchos países en vías de desarrollo, como Guatemala, ha habido, en los últimos años, un aumento significativo en el precio de los combustibles tradicionales así como de las tarifas de consumos energéticos, lo cual a su vez ha provocado un aumento en el costo de vida de nuestras sociedades.

A esto se suman actividades energéticamente poco eficaces como lo es cocinar a partir del uso de leña que además promueve la devastación de los bosques en estos países. En el caso de Guatemala, según el informe estadístico 2012 de la Dirección de Energía del Ministerio de Energía y Minas, el 56.85% del consumo energético del país proviene del uso de leña. A pesar que países, como Guatemala, se desarrollan rápidamente una gran parte de la población aún vive sin servicios como la electricidad, lo que los deja con la leña como su única alternativa hasta ahora.

C. Zoológico “La Aurora”

El Zoológico Nacional “La Aurora”, fue inaugurado el 25 de diciembre de 1924 y fue construido por el coronel Herlindo Solórzano durante el gobierno del General José María Orellana en un área original de 544 manzanas. (García, 1995)

Actualmente en Guatemala existen 3 centros recreativos que se dedican a la exhibición de animales: Auto Safari Chapín, Parque Zoológico “La Jungla” del Instituto de recreación de los trabajadores (IRTRA) zona 12 y el Parque Zoológico “La Aurora”, sin embargo los dos primeros mencionados no son accesibles a la totalidad de la población, dado la lejanía de uno y que el otro es para uso de los trabajadores de la iniciativa privada. (García, 1995)

El parque Zoológico Nacional “La Aurora” se encuentra ubicado en la zona 13 de la ciudad de Guatemala. Su área actual es de 8.97 km cuadrados. (García, 1995)

La Asociación Guatemalteca de Historia Natural ha planteado los siguientes objetivos para el parque Zoológico “La Aurora”:

- Preservar y defender un área verde de la ciudad capital.
- Mejorar y embellecer a un popular centro de recreación y descanso de los guatemaltecos.
- Ofrecer un lugar de estudio y esparcimiento espiritual para escolares amantes de la naturaleza.
- Estimular al turismo interno y externo, si es posible, mediante el mejoramiento y progreso de sus instalaciones.
- Servir como centro de investigación.
- Servir como medio de divulgación de conocimientos científicos en todos los niveles posibles.
- Tecnificar el servicio logístico del Parque para mejorar las condiciones de vida del animal de sus colecciones; y
- Defender uno de los más importantes reductos de las tradiciones y la historia de la ciudad capital, como parte del fundamento de la cultura guatemalteca y como fondo de los recursos de muchos ciudadanos. (García, 1995)

El Zoológico “La Aurora” genera una gran cantidad de desechos sólidos debido a la gran cantidad de animales que alberga y afluencia de visitantes que frecuentan el lugar. La única alternativa que actualmente tiene acceso el Zoológico para la gestión de dichos desechos es el botadero a cielo abierto que se encuentra en la Ciudad de Guatemala. Los desechos generados llegan a este lugar a través del servicio de recolección de basura que recibe el Zoológico y por el cual actualmente paga.

Por otro lado, la institución también tiene una demanda de gas para la cocción de comidas para el personal y los propios animales para lo que actualmente compra gas propano. Además debe proveer mantenimiento a las áreas verdes del recinto a través de la conservación de la vegetación del lugar que cubre un gran porcentaje del terreno. Para esto es necesario no sólo una constante irrigación sino también el uso de abono.

El Zoológico “La Aurora” busca constantemente medidas de ahorro o inversión ya que presenta varias necesidades como ampliación de infraestructura, mantenimiento, mejora en las condiciones de vida de los animales, entre otras. En el pasado, la implementación de tecnologías innovadoras dentro del Zoológico ha beneficiado a la institución positivamente aumentando su prestigio y, por ende, la afluencia de visitas. Esto beneficia también a los visitantes del Zoológico de manera que pueden educarse sobre prácticas innovadoras que promueven, entre otros, la disminución del impacto ambiental que las actividades humanas tienen sobre los ecosistemas naturales. Al implementar nuevas tecnologías el Zoológico cumple, por lo tanto, con uno de sus objetivos principales que es “educar, proveyendo de información al visitante acerca de las especies zoológicas en una forma integral”.

El sistema ideal no existe, pero si se tienen alternativas usarlas como fertilizante o como en muchos casos ya se ha propuesto el uso del biodigestor para ahorrar costos y que se vuelva en parte auto sostenible. En Zoológicos de Inglaterra están investigando la viabilidad de instalar un biodigestor en uno de sus Zoológicos, cuando un animal como el elefante que en promedio desecha una tonelada semanal de estiércol, Zoológico Paington, Inglaterra. (BBC Mundo, 2010)

Según señalan las autoridades del Zoológico, el proyecto para transformar estos residuos en electricidad ya está en marcha. En colaboración con la empresa *New Generation Biogás*, los expertos están buscando una alternativa más eficiente a los biodigestores actuales, que son demasiado grandes y se demoran un tiempo considerable en generar el gas.

"El nuevo sistema en el que estamos trabajando es radicalmente diferente. Es mucho más pequeño -los que hay ahora son enormes, pueden tener hasta dos o tres pisos- y produce biogás en un lapso menor ", le explicó a BBC Mundo Peter Morgan, encargado de la oficina de Medio Ambiente del Zoológico. (BBC Mundo, 2010)

Peter Morgan, encargado de medio ambiente de Paington indica “El nuevo sistema en el que estamos trabajando es radicalmente diferente. Es mucho más pequeño y produce biogás en un lapso mucho más rápido”.

D. Ubicación

Figura 7. Ubicación panorámica Zoológico “La Aurora”



(Maps, 2014)

E. Fuentes de financiamiento actuales

El presupuesto actual del Zoológico es aproximadamente 25 millones anuales de quetzales, parte de este presupuesto lo amortizan con:

- Subsidio del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) le otorga aproximadamente Q 3 millones para funcionamiento (pago de 65 trabajadores y la comida de los animales).
- Ingresos privativos:
 - Cobro por taquilla (pago de visitantes).
 - Área de parqueo.
 - Alquiler mensual de locales para foodcourts.
 - Alquiler de espacios para eventos sociales.
 - Ingresos por charlas, visitas guiadas, videos, entre otros.
- Carrera “Corre por el Zoo”
- Patrocinadores actuales:
 - Bimbo
 - Pepsi
 - Domino’s Pizza
 - Instalaciones modernas
 - Cemaco
 - MEGA productos
 - BAM
 - MAGA
 - Municipalidad de Guatemala

Figura 8 Patrocinadores Zoológico "La Aurora"



(Salguero, 2014)

F. Políticas patrocinio y donaciones

1. Tipo de patrocinio

- a. Carrera "Correr por el Zoo": Fondos para operación y entran empresas que patrocinan medallas, playeras, grupo, etc.
- b. Noches de luna.
- c. Patrocinio en efectivo para operación.
- d. Apadrinamiento de animales en específico.
 - 1) Recintos.
 - 2) Comida.
- e. Patrocinios en especie: Patrocinio para un proyecto en específico. Ejemplo: Instalaciones y traslado de pingüinos de Humboldt.

2. Beneficios que ofrece el Zoológico por donaciones

- a. Recibos por donación deducible de impuestos.
- b. Descuento por ingreso al parque.
- c. Áreas sociales:
 - 1) Uso:
 - a) Lanzamientos.
 - b) Convivios.
 - c) Presentaciones.
 - d) Shows.
 - e) Activaciones de marca al año por medio de stands.
 - 2) Lugares:
 - a) Área verde: Capacidad para 5,000 – 8,000 personas.
 - b) Casa del Té: Capacidad para 350 personas.
 - c) Teatro: Capacidad para 700 – 800 personas.
 - d) Pérgola: Capacidad para 120 personas.
- d. Presencia de marca en recinto, mural de entrada, entre otros.

*Sujetos a tabla de beneficios según monto patrocinado.

*Para fines del proyecto presencia en biodigestor y mural según convenio con el Zoológico.

VI. RESULTADOS

A. Módulo: Caracterización química y microbiológica de biogás producido por mezclas de estiércol de jirafa y elefante del Zoológico “La Aurora”

Tabla 8. Descripción de las cinco mezclas de estiércol de jirafa y elefante probadas (porcentaje v/v) y volumen inicial de la mezcla.

Mezcla	Composición	Código	Volumen inicial (ml)
1	30% jirafa, 30% elefante, 40% agua	J30/E30/A40	550
2	50% elefante, 50% agua	E50/A50	650
3	50% mezcla jirafa, 50% agua	J50/A50	750
4	40% mezcla jirafa, 60% agua	J40/A60	550
5	100% mezcla elefante + jirafa	E50/J50	900

J= Jirafa, E= Elefante, A= Agua

Figura 9. Volumen de biogás producido por cinco mezclas diferentes de estiércol de elefante y jirafa durante 57 días de incubación (la medición del volumen de biogás se realizó cada 2 o 3 días).

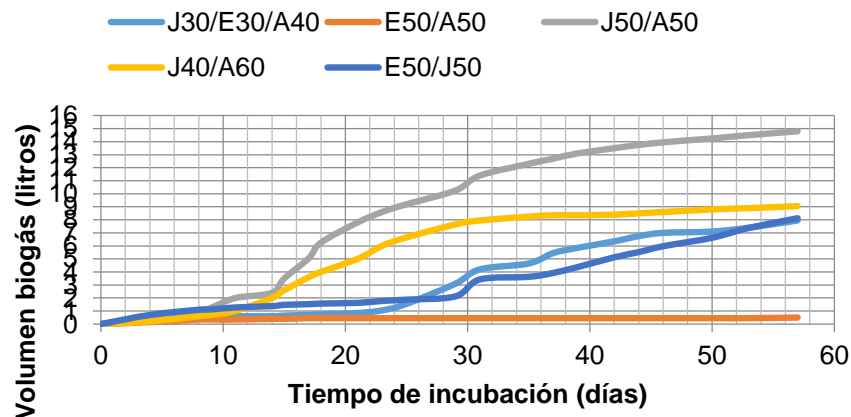


Figura 10. Volumen de biogás producido por las mezclas dos y tres originales y con inóculo bacteriano añadido (con asterisco) durante 35 días de incubación (la medición del volumen de biogás se realizó cada 2 o 3 días).

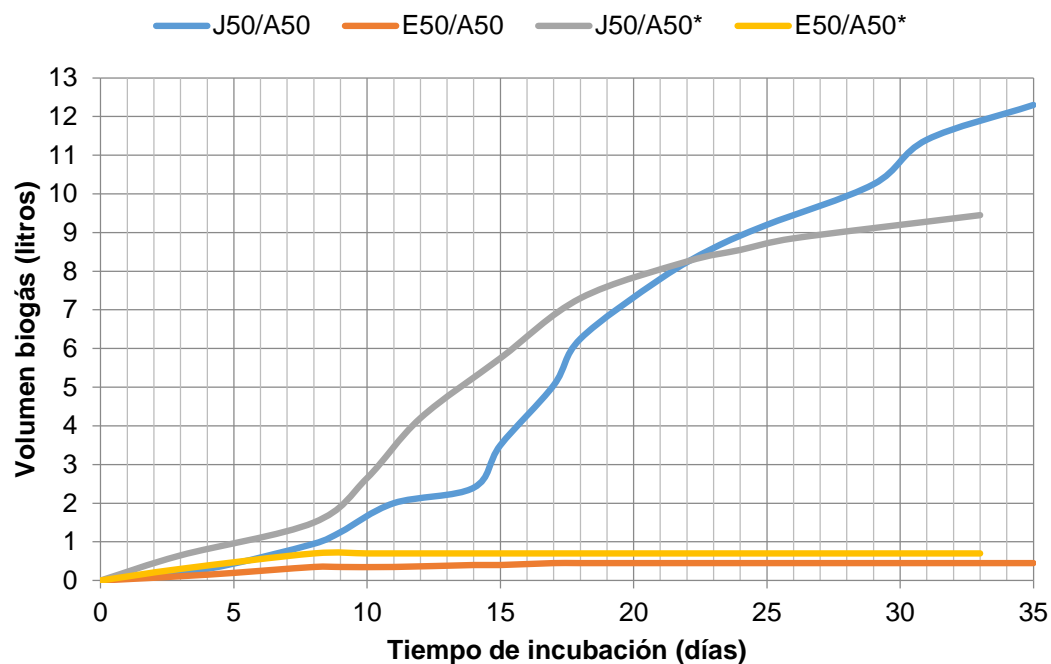


Figura 11. Representación gráfica del porcentaje de área del pico característico de metano en biogás, obtenido mediante GC-FID.

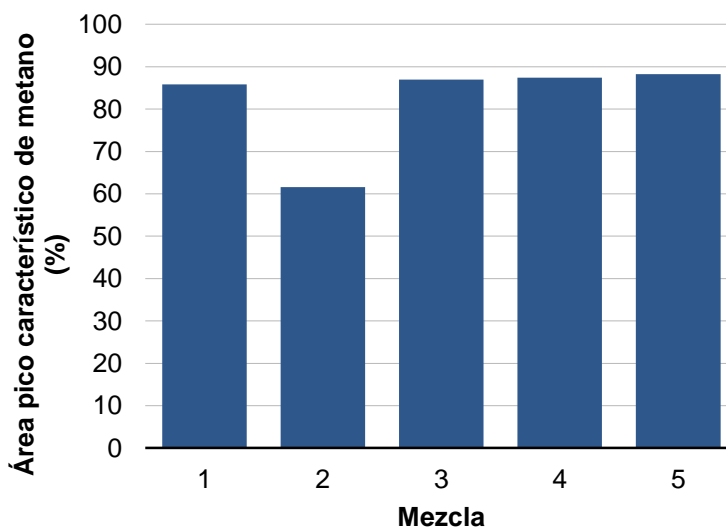


Figura 12. Representación gráfica del porcentaje del área del pico característico de dióxido de carbono en biogás, obtenido mediante GC-FID.

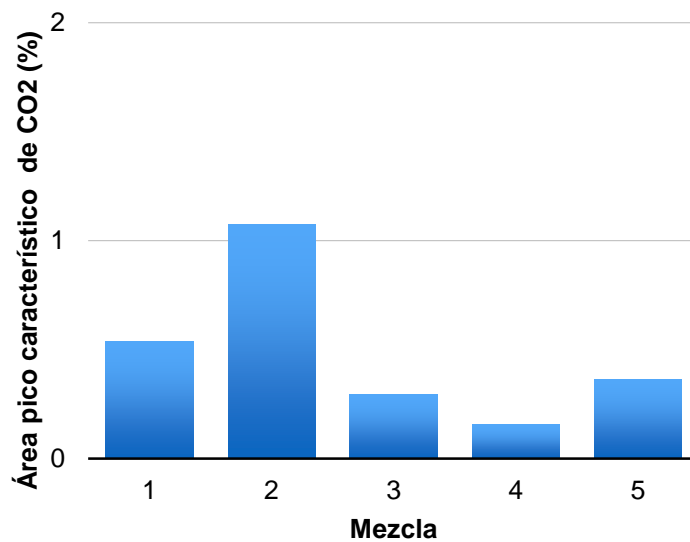


Figura 13. Representación gráfica del porcentaje del área del pico característico de ácido sulfhídrico en biogás, obtenido mediante GC-FID.

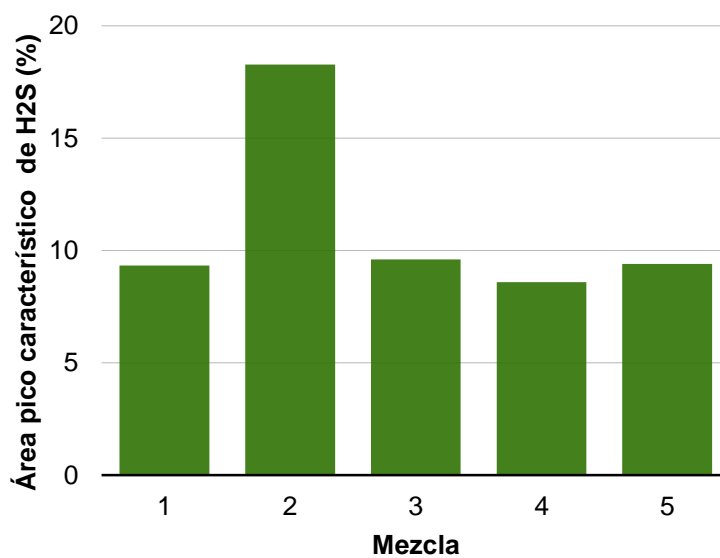


Figura 14. Comparación de los porcentajes de las áreas de picos característicos del cromatograma de gases de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S) del biogás producido por las cinco mezclas de estiércol.

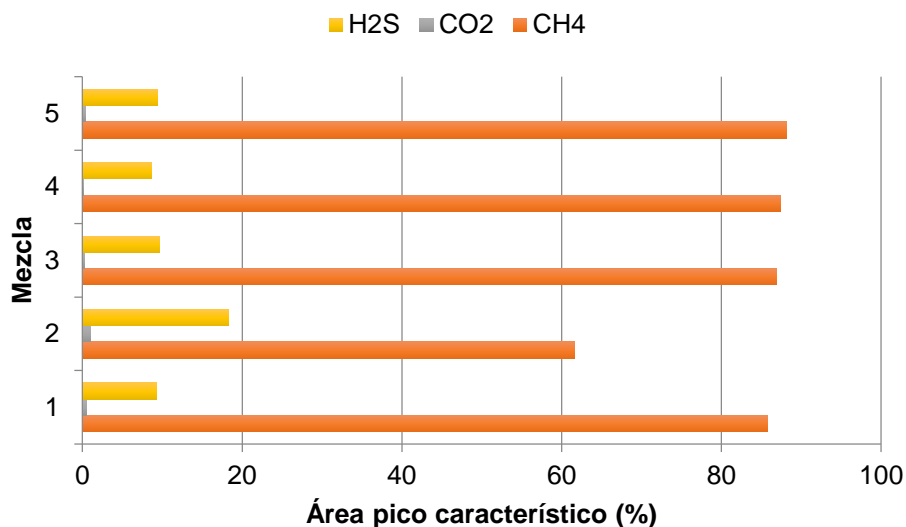


Tabla 9. Resultados del análisis de número más probable para la estimación de la población bacteriana en las cinco mezclas (Primer muestreo).

Muestra	Número tubos positivos para cada dilución			NMP	bacterias/ml
	1×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-7}		
Elefante	3	3	3	>110	$>2.20 \times 10^8$
Jirafa	3	3	3	>110	$>2.20 \times 10^8$

Tabla 10. Resultados del análisis de número más probable para la estimación de la población bacteriana en las cinco mezclas (Segundo muestreo).

Muestra	Número tubos positivos para cada dilución			NMP	bacterias/ml
	1×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-7}		
1	3	3	2	110	2.20×10^8
2	3	3	1	46	9.20×10^7
3	3	3	3	>110	$>2.20 \times 10^8$
4	3	3	0	24	4.8×10^7
5	3	3	3	>110	$>2.20 \times 10^8$

Tabla 11. Resultados del análisis de número más probable para la estimación de la población bacteriana en las cinco mezclas (Tercer muestreo).

Muestra	Número tubos positivos para cada dilución			NMP	bacterias/ml
	1×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-7}		
1	3	3	3	1100	$>2.20 \times 10^8$
2	3	3	1	46	9.20×10^7
3	3	3	3	>1100	$>2.20 \times 10^8$
4	3	3	1	24	4.8×10^7
5	3	3	3	>1100	$>2.20 \times 10^8$

Tabla 12. Datos para la prueba de Kruskal-Wallis de la carga microbiológica de las cinco mezclas (datos obtenidos del programa IBM SPSS Statistics versión 21).

Rangos

	Mezcla	N	Rango promedio
Carga Microbiológica	1.00	3	10.00
	2.00	3	5.33
	3.00	3	10.00
	4.00	3	4.67
	5.00	3	10.00
	Total	15	

Tabla 13. Estadísticos de contraste obtenidos para realizar la interpretación de resultados de la prueba de Kruskal-Wallis (datos obtenidos del programa IBM SPSS Statistics versión 21).

Estadísticos de contraste^{a,b}

	Carga microbiológica
Chi-cuadrado	7.556
gl	4
Sig. asintót.	.109

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: Mezcla

Tabla 14. Datos para la prueba de Mann-Whitney de la carga microbiológica de las mezclas 2 y 3 (datos obtenidos del programa IBM SPSS Statistics versión 21).

Rangos

	Mezcla	N	Rango promedio	Suma de rangos
CargaMicrobiológica	2.00	3	2.50	7.50
	3.00	3	4.50	13.50
	Total	6		

Tabla 15. Estadísticos de contraste obtenidos para realizar la interpretación de resultados de la prueba de Mann-Whitney (datos obtenidos del programa IBM SPSS Statistics versión 21).

Estadísticos de contraste^a

	Carga microbiológica
U de Mann-Whitney	1.500
W de Wilcoxon	7.500
Z	-1.581
Sig. asintót. (bilateral)	.114
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.200 ^b

a. Variable de agrupación: Mezcla

b. No corregidos para los empates.

Figura 15. Comparación de la carga microbológica y área del pico de metano de las cinco mezclas.

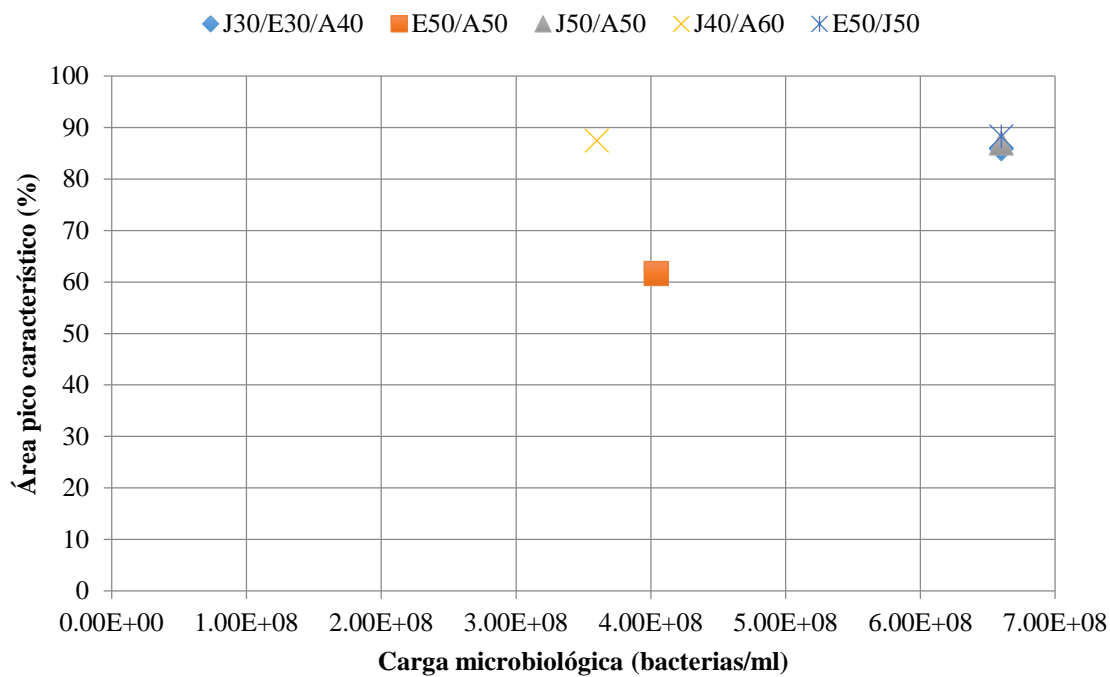


Figura 14. Comparación de la carga microbológica y área del pico de dióxido de carbono de las cinco mezclas.

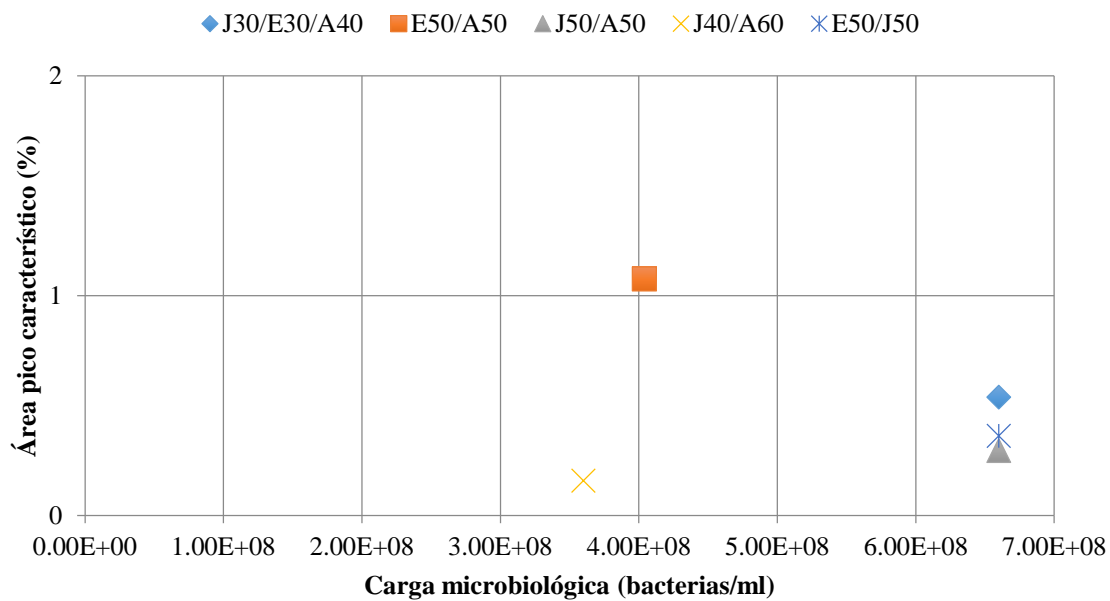


Figura 16. Comparación de la carga microbológica y área del pico de ácido sulfhídrico de las cinco mezclas.

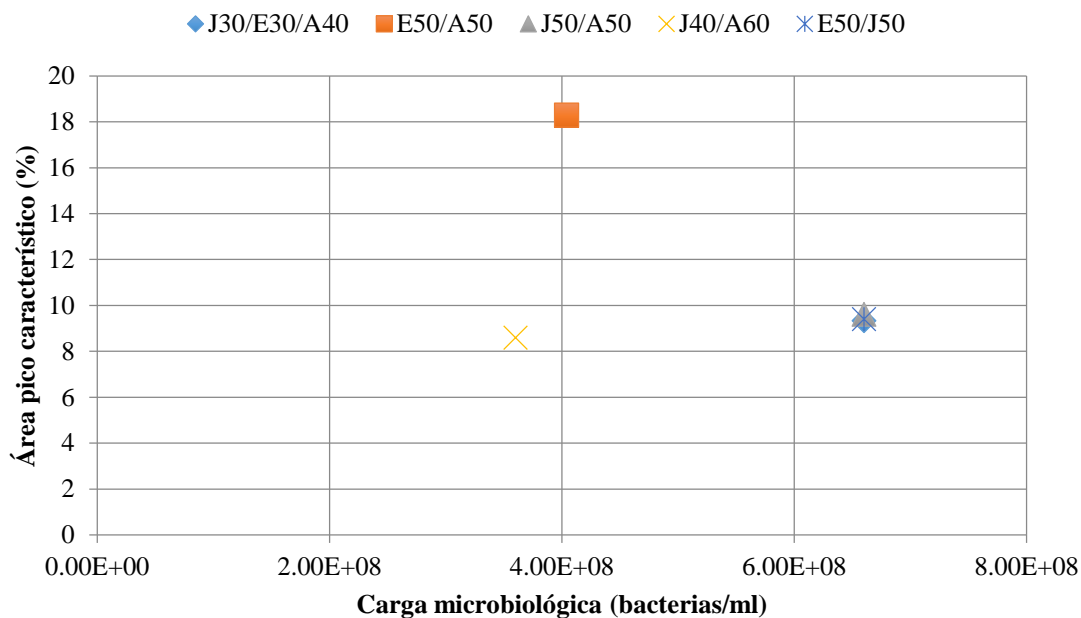


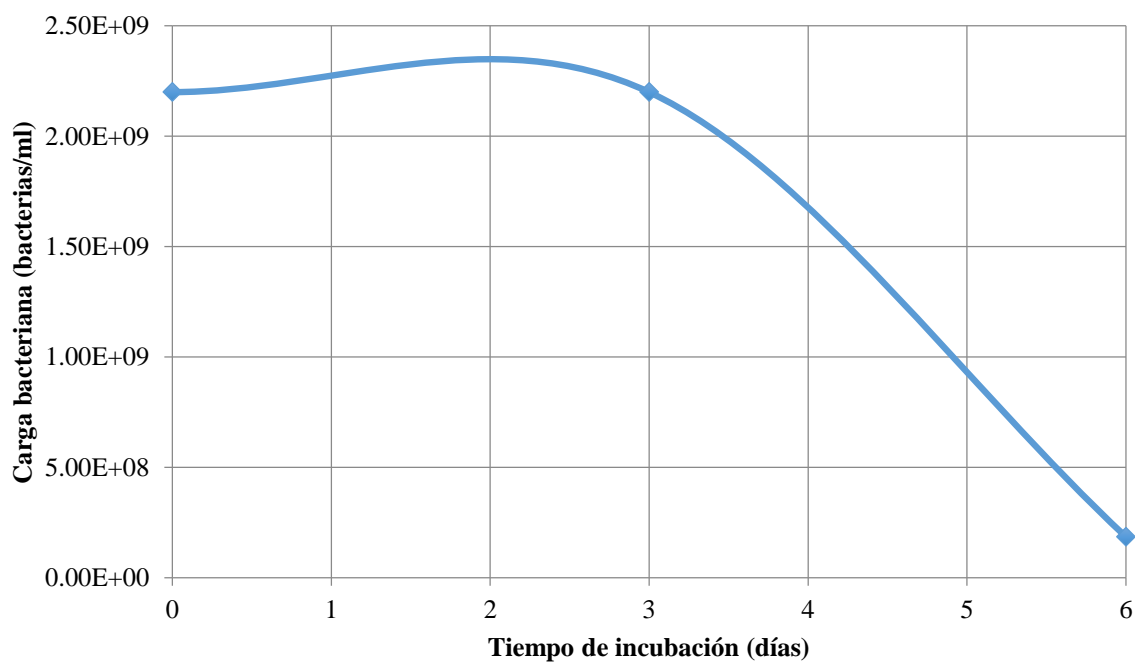
Tabla 16. Resumen de los resultados del análisis microbiológico y caracterización química del biogás generado por las diferentes mezclas analizadas.

Mezcla	Código	Densidad poblacional (bacterias/ml)	Metano (%)	Dióxido de carbono (%)	Ácido sulfhídrico (%)
1	J30/E30/A40	6.6E+08	85.80	0.54	9.33
2	E50/A50	4.0E+08	61.59	1.08	18.28
3	J50/A50	6.6E+08	86.95	0.30	9.60
4	J40/A60	3.6E+08	87.44	0.16	8.59
5	E50/J50	6.6E+08	88.21	0.36	9.40

Tabla 17. Resultados del análisis de número más probable para la estimación de la población bacteriana del biodigestor a escala normal.

Número de muestreo	Número tubos positivos para cada dilución			NMP	Bacterias/ml
	1x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁷	1x10 ⁻⁸		
1	3	2	1	15	3.00x10 ⁸
2	3	2	1	15	3.00x10 ⁸
3	3	3	3	>110	>2.20x10 ⁹
4	3	3	2	110	2.20x10 ⁹
5	3	2	0	9.3	1.86x10 ⁸

Figura 17. Comportamiento de la carga bacteriana en el biodigestor a escala normal durante seis días luego de una carga con estiércol de jirafa y elefante (las muestras se tomaron cada tres días).



B. Módulo: Caracterización de materia prima y determinación de variables básicas de un reactor diseñado para la biodigestión de desechos orgánicos generados del Zoológico "La Aurora"

Tabla 18: Caracterización física de desechos sólidos seleccionados en Zoológico "La Aurora" a través de diferentes métodos analíticos estandarizados.

Propiedad	Elefante	Jirafa - Cebra
Densidad	560.38 ± 0.11kg/ m ³	538.56 ± 0.17 kg/ m ³
DQO	1835.50±0.21 mgDQO/L	2145.50± 0.33mgDQO/Lw
Humedad	60.20 ±1.20%	68.57± 1.24%
Sólidos volátiles	76.24 ± 0.21%	78.43 ± 0.25%
Sólidos totales	23.76 ± 0.20%	21.57 ± 0.19%
Cenizas	6.5 ± 0.18%	5.45 ± 0.12%

Tabla 19: Caracterización bioquímica para determinación de proteína y grasas de desechos orgánicos seleccionados en Zoológico "La Aurora" a través de métodos Kjeldahl y Soxhlet.

	Elefante	Jirafa - Cebra
Grasas	6.15 ± 0.34%	5.11 ± 0.23%
Proteínas	12.00 ± 1.27%	8.36± 1.34%

Ilustración 11: Gráfica de mediciones de pH durante monitoreo de biodigestor piloto a lo largo de fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora".

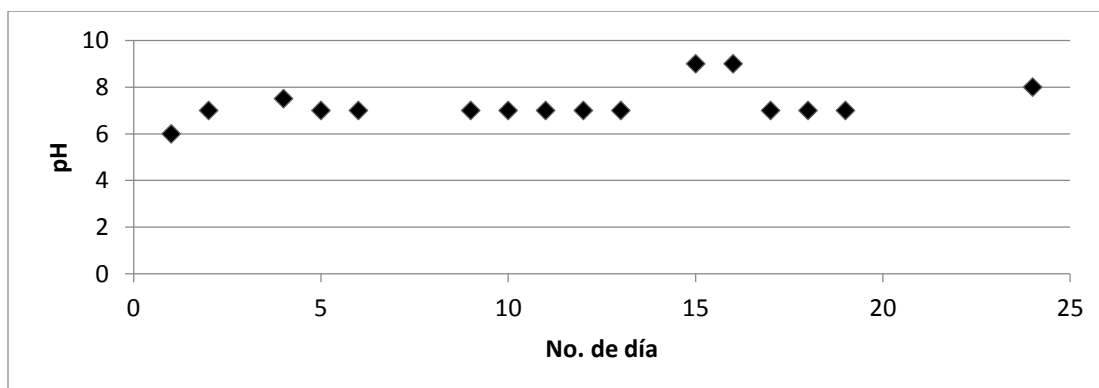


Ilustración 12: Mediciones de temperatura durante monitoreo de biodigestor piloto a lo largo de fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora".

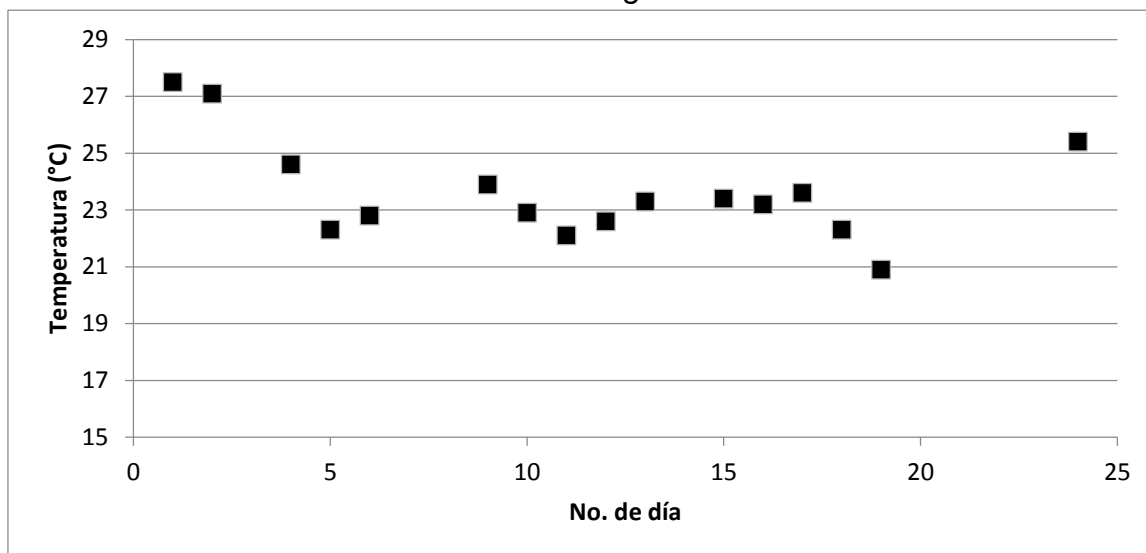


Tabla 20: Parámetros de ecuación y ecuación final de velocidad de reacción de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" con base en modelo de cinética de reacción tipo Michaelis-Menten

Ecuación de velocidad de reacción tipo Michaelis-Menten	$r = \frac{C_{EO} \times C_a}{C_M + C_a} \times k$
Unidades formadores de colonias	$C_{EO} = 6.64 \times 10^{-14} \frac{\text{mol MOO}}{\text{kg estiércol}}$
Constante de Michelis-Mentes para la reacción	$C_M = 0.1897 \frac{\text{mol lípidos}}{\text{kg estiércol}}$
Constante k	$k = 3.1043 \times 10^{11} \frac{\text{mol CH}_4}{\text{moles MOO} \cdot \text{kg estiércol} \cdot \text{día}}$
Ecuación de velocidad de reacción tipo Michaelis-Menten para la reacción de estudio	$r = \frac{6.64 \times 10^{-14} \times C_a}{0.1897 + C_a} \times 3.1043 \times 10^{11}$

Tabla 21: Tasa de generación de biogás a partir de los desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" a través de su fermentación anaeróbica en biodigestor piloto.

Tasa de generación de biogás por kg de estiércol base húmeda	0.07 m ³ de biogás/kg estiércol húmedo
--	---

Tabla 22. Dimensiones y parámetros de funcionamiento de bioreactor STR de tanque agitado seleccionado para la fermentación anaeróbica de la totalidad de desechos orgánicos de Zoológico "La Aurora".

V_{total reactor}	7 m³
Relación agua-desechos orgánicos durante carga	1:1
Flujo de alimentación de desechos orgánicos, F	0.2271 m ³ /día
Tiempo de residencia, T	15 días
Velocidad de reacción, R	0.0036707 <i>mol CH₄</i>
$\frac{V_{biogás}}{ciclo}$	$\frac{m^3 biogás - día}{m^3 biogás - día}$ 130.78 m ³ biogás
$\frac{V_{biogás}}{mes}$	261.55 m ³ biogás
Altura, h	3.30 metros
Diámetro, d	1.65 metros
Diámetro de agitador de hoja sencilla	0.5 metros
Potencia de agitador de hoja sencilla	52.73 Watts

Ilustración 13: Esquema y dimensiones de reactor STR diseñado para la fermentación anaeróbica de la totalidad de desechos orgánicos de Zoológico "La Aurora".

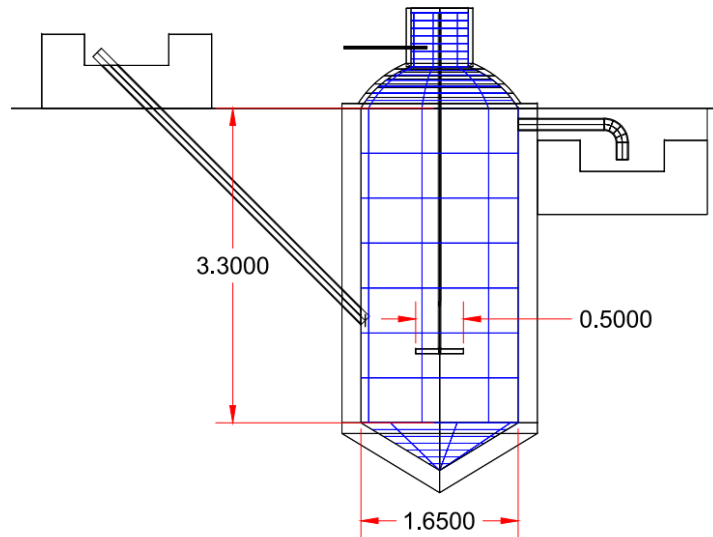


Ilustración 14: Vista isométrica de bioreactor STR diseñado para la fermentación anaeróbica de la totalidad de desechos orgánicos generados en Zoológico "La Aurora".

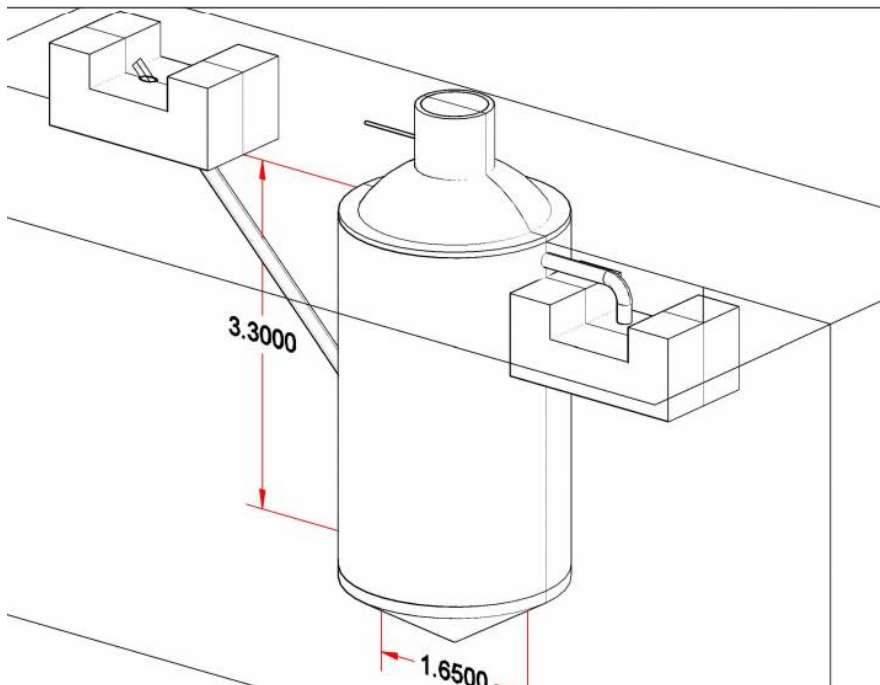
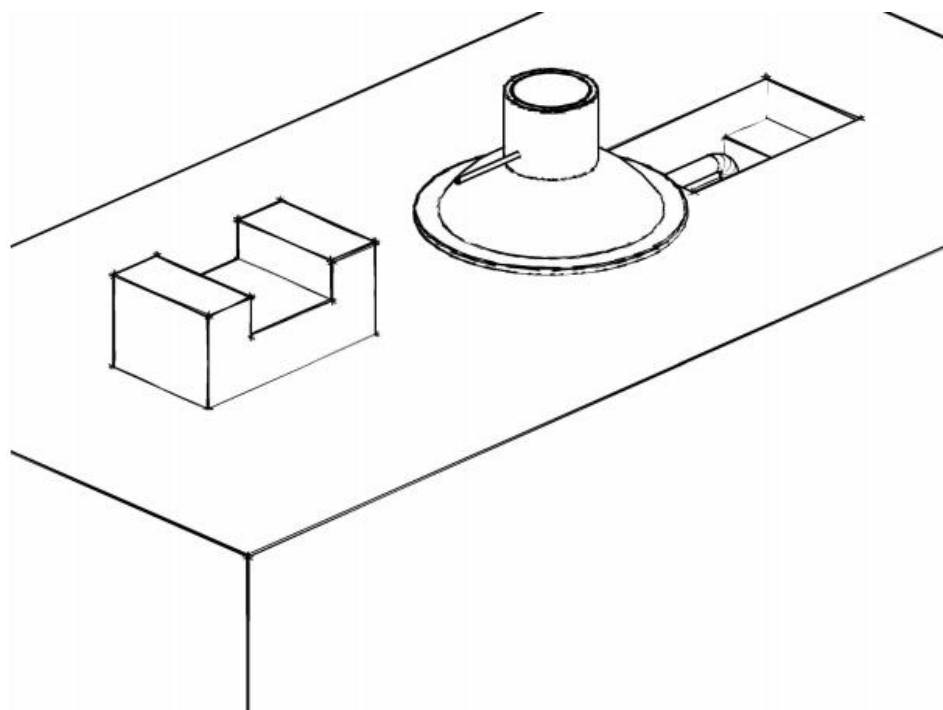


Ilustración 15: Vista isométrica visible sobre el terreno de bioreactor STR diseñado para la fermentación anaeróbica de la totalidad de desechos orgánicos generados en Zoológico "La Aurora"



C. Módulo: Limpieza de biogás generado en el biodigestor

A continuación, se presenta la tabla de mediciones realizadas durante el primer ciclo de generación, desde la primera carga hasta el primer agotamiento, realizado durante el mes de Julio.

Tabla 23: Contenido de H₂S en biogás en el diez mediciones realizadas en la primera carga de desechos seleccionados de elefante y jirafa

Medición	H ₂ S Entrada (ppm)
1	25
2	35
3	39
4	43
5	45
6	38
7	34
8	20
9	15
10	5

Ilustración 16: Prescencia de H₂S en biogás en el diez mediciones realizadas en la primera carga de desechos seleccionados de elefante y jirafa

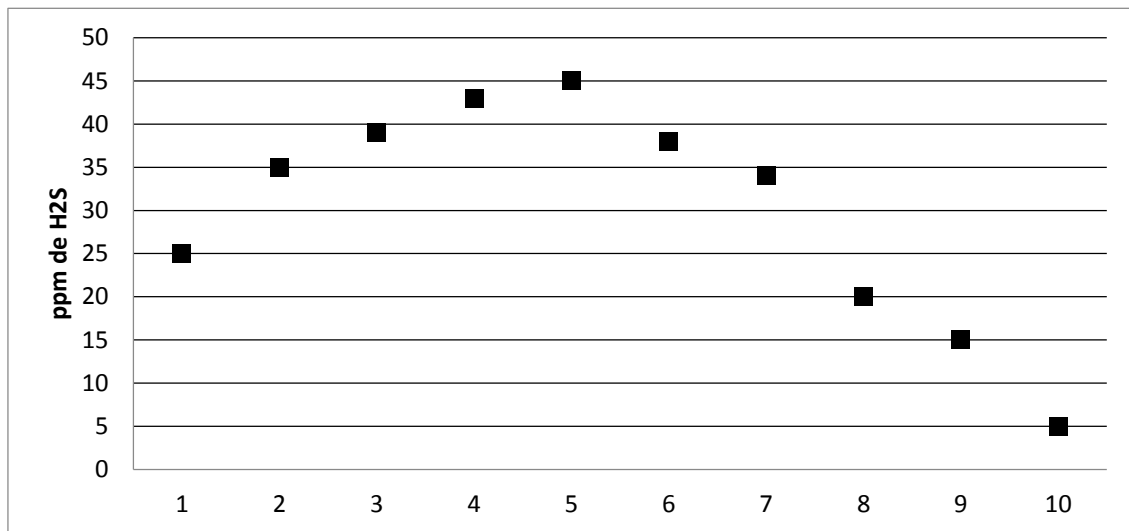
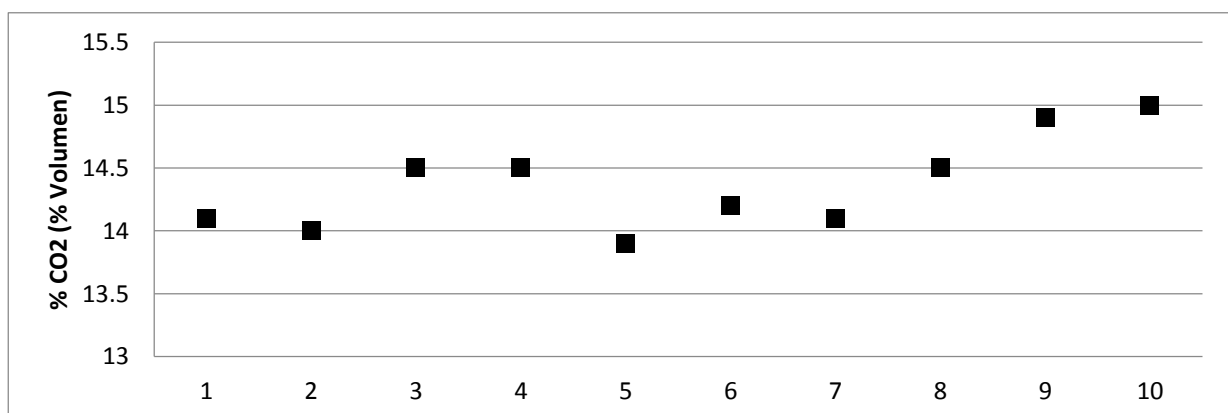


Tabla 24. Contenido de CO₂ en biogás en el diez mediciones realizadas en la primera carga de desechos seleccionados de elefante y jirafa

Medición	CO ₂ Entrada (%Vol)
1	14.1
2	14
3	14.5
4	14.5
5	13.9
6	14.2
7	14.1
8	14.5
9	14.9
10	15

Ilustración 17: Prescencia de CO₂ en biogás en diez mediciones realizadas en la primera carga de desechos seleccionados de elefante y jirafa



A continuación, se presentan las gráficas del cambio de concentraciones de H_2S y CO_2 tras las pruebas realizadas en Septiembre respectivamente:

Ilustración 18: Prescencia de H_2S en biogás en el diez mediciones realizadas en la segunda carga de desechos seleccionados de elefante y jirafa

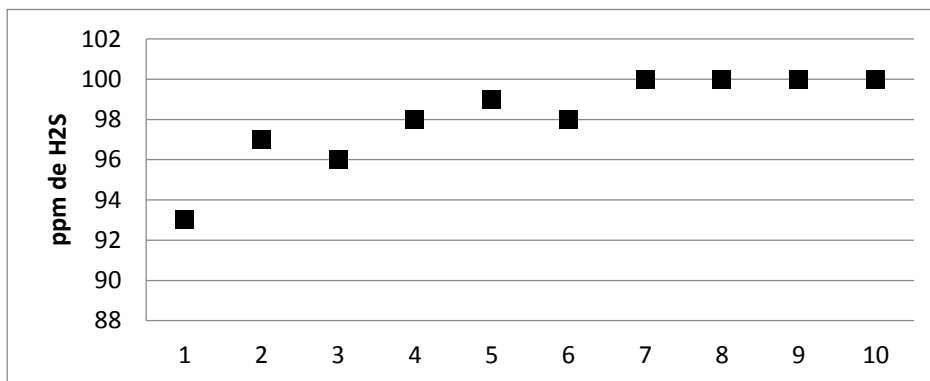


Ilustración 19: Reducción de H_2S en biogás tras limpieza con filtro de óxido de hierro para diez mediciones

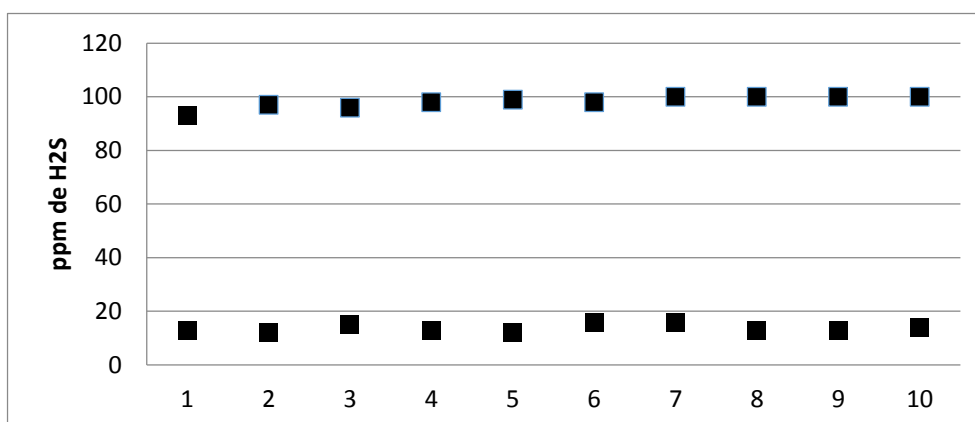


Ilustración 20: Prescencia de CO_2 en biogás en el diez mediciones realizadas en la segunda carga de desechos seleccionados de elefante y jirafa

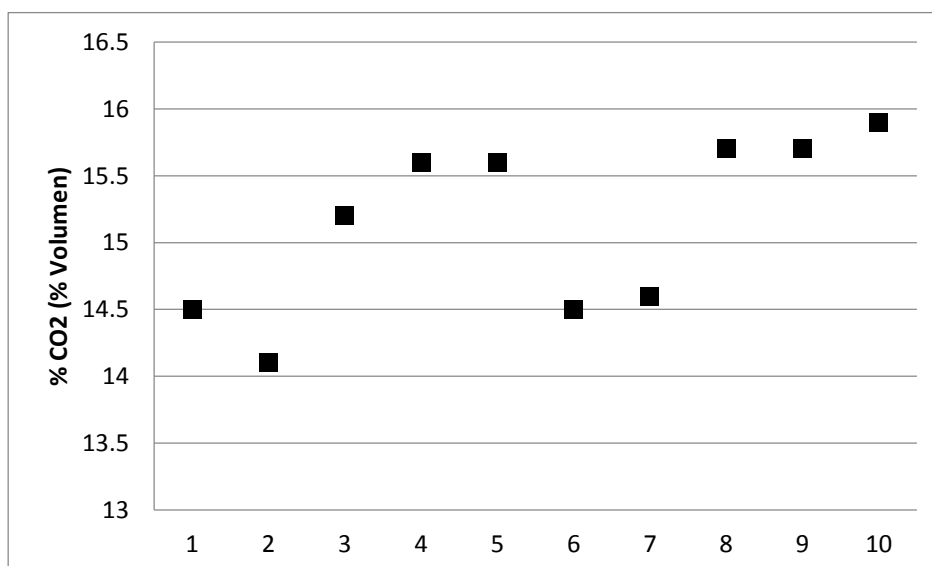


Ilustración 21: Reducción de CO₂ en biogás tras limpieza con filtro de óxido de hierro para diez mediciones

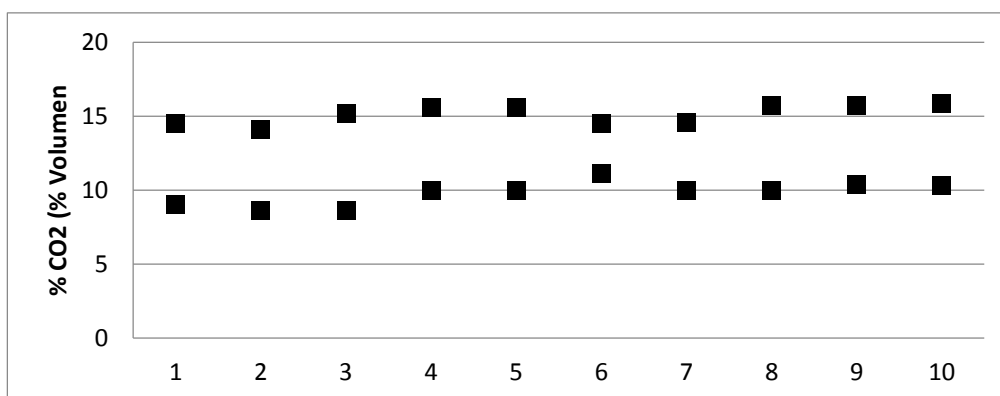


Tabla 25: Comparativo de poder calorífico de gas con tratamiento y sin tratamiento de limpieza de reducción de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono

Biogás con tratamiento (kcal/m ³)	Biogás sin tratamiento (kcal/m ³)
5,059.56	4,047.56

Tabla 26: Especificaciones técnicas de filtros de óxido de hierro e hidróxido de calcio para biogás generado en el biodigestor a partir de desechos orgánicos de Zoológico "La Aurora"

Especificación	Filtro Fe ₂ O ₃	Filtro Ca(OH) ₂
Lecho filtrante (kg)	14.09	585.36
Tiempo de vida	6 meses o 1567.8 m ³	1 mes o 261.3 m ³
Diámetro (m)	0.12	0.12
Altura (m)	0.72	0.72
Tiempo de residencia (s)	13.44	1628

D. Módulo: Análisis y propuesta de mejora de los procesos de trabajo y viabilidad económica de la instalación de un biodigestor en el Zoológico “La Aurora”.

1. **Ubicación del biodigestor el Zoológico “La Aurora”.** La distribución general del biodigestor en el Zoológico “La Aurora” estará distribuido de la siguiente manera:

Figura 5: Distribución del biodigestor



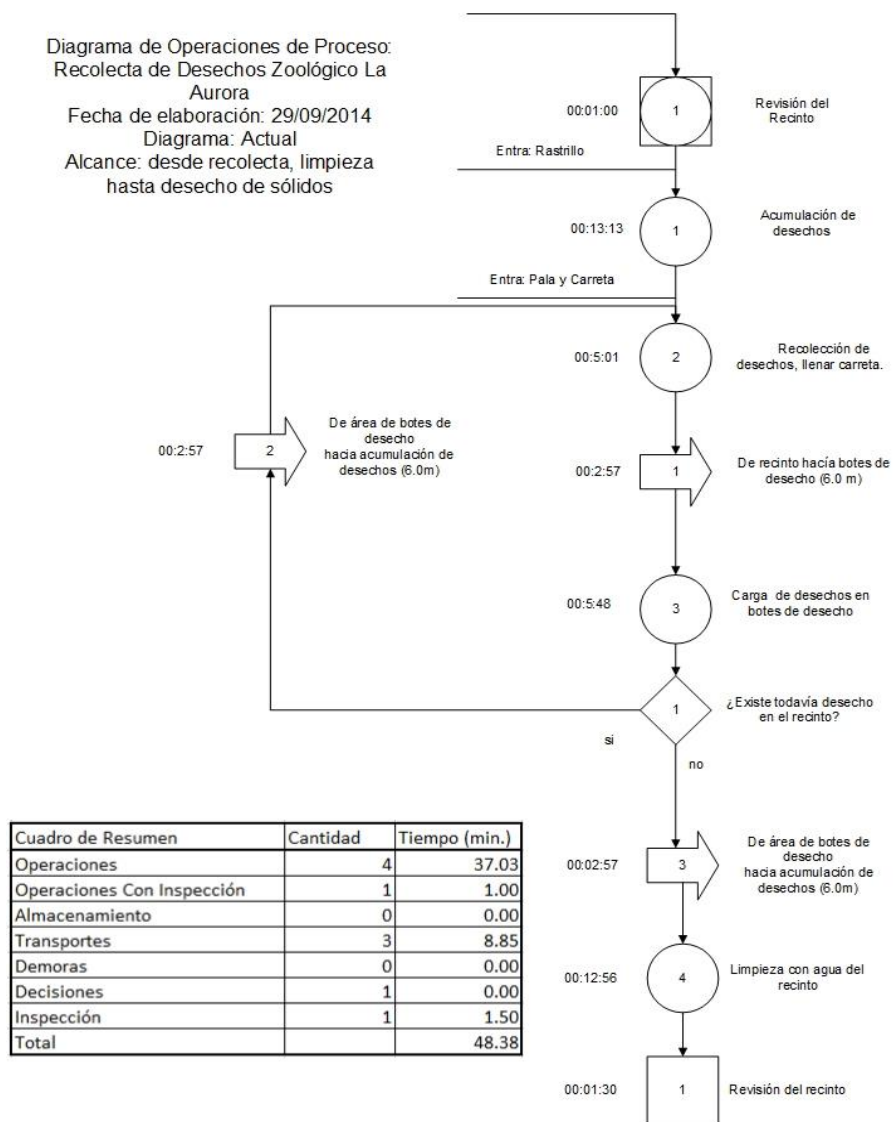
Fuente: Rodolfo Galdámez, 2014

Estará localizado a la par de las taquillas del Zoológico “La Aurora” en un área cerrada a la par de la planta de tratamiento de aguas residuales, por logística se propuso de esa manera para utilizar el agua tratada de la planta para la carga del biodigestor.

2. Diagrama de operaciones situación actual. En el análisis de la situación actual, se realizó un diagrama de operaciones de procesos (DOP), determinado sus flujos, entradas del sistema y tiempos de cada proceso, transporte o cualquier otra actividad.

Las operaciones de la situación actual son: Acumulación de desechos, recogida o recolección de desechos y limpieza con agua del recinto. La operación que lleva más tiempo de operación es la acumulación de desechos con 13.23 minutos. El tiempo estándar de todas las operaciones y en promedio regresando una vez por más desecho sería de 48.38 minutos.

Figura 6. Diagrama de operaciones situación actual



3. Estudio de tiempos situación actual. Los resultados del estudio de tiempos de la recolección de los desechos es de un tiempo estándar en esta operación de 42.96 minutos. El resultado es el siguiente.

Tabla 27. Resultados estudio de tiempos actual

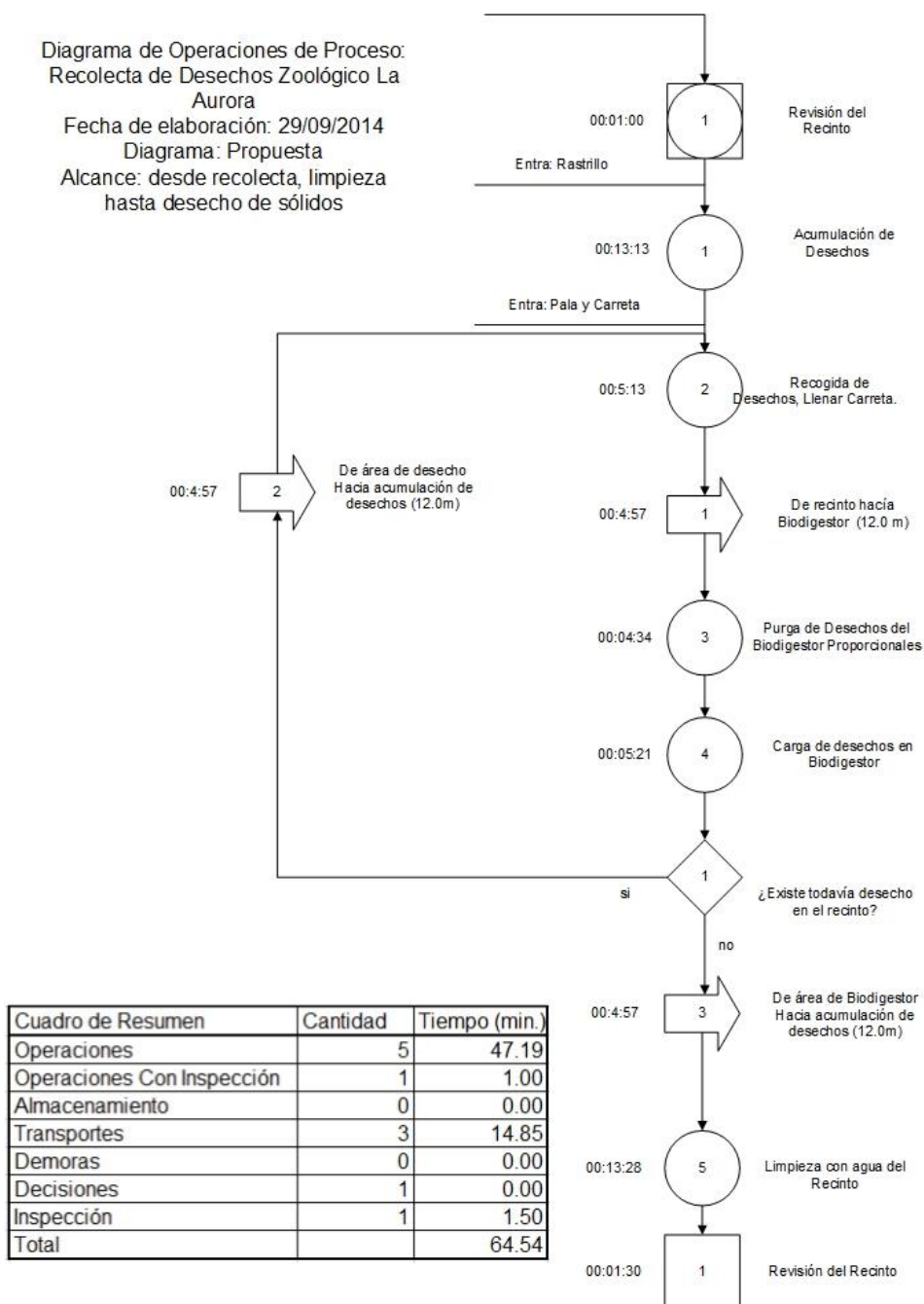


ID	Zoológico situación actual
Reportado	03/10/2014
Valor Agregado	86.26%
No Valor Agregado	13.75%
Tiempo normal	42.93 Minutos
Necesidades básicas	0.00%
Fatiga básica	0.00%
Fatiga variable	0.00%
Especial	0.00%
Asignación de tareas	0.00%
Estándar time	42.93 Minutos
Tiempo de Valor No Agregado	13.75%
Tiempo de Valor Agregado	0
Semi Valor Agregado	86.26%

Tarea ID	Descripción	VA(min.)	NVA	SVA	Tiempo normal (min.)	Asignación de código	Tiempo estándar (min.)
1	Acumulación de desechos	13.23	0	0	13.23		13.23
2	Recolección de desechos	5.02	0	0	5.02		5.02
3	Almacenamiento de desechos	5.81	2.95	0	8.76		8.76
4	Limpieza del recinto	12.97	2.95	0	15.92		15.92

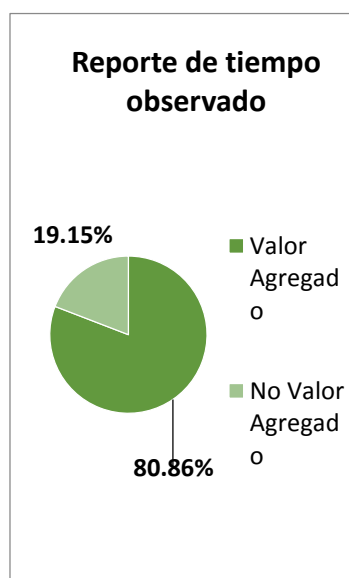
4. Diagrama de operaciones situación propuesta. A diferencia de la situación actual, en este caso ya se toma en cuenta el biodigestor a utilizar. Donde se incluyen dos operaciones más, una de cargar el biodigestor y una descargar el biodigestor con lo proporcional. El diagrama de operaciones es el siguiente:

Figura 9. Diagrama de operaciones situación propuesta



5. Estudio de tiempos situación propuesta. Los resultados del estudio de tiempos de la recolección de los desechos, es de un tiempo estándar en esta operación de 51.74 minutos. El resultado es el siguiente.

Tabla 28. Resultado estudio de tiempos situación propuesta



ID	Zoológico situación propuesta
Reportado	03/10/2014
Valor Agregado	80.86%
No Valor Agregado	19.15%
Tiempo normal	51.74 Minutos
Necesidades básicas	0.00
Fatiga básica	0.00
Fatiga variable	0.00
Especial	0.00
Asignación de tareas	0.00
Estándar time	51.74 Minutos
Tiempo de Valor No Agregado	19.15
Tiempo de Valor Agregado	0.00
Semi Valor Agregado	80.86

Tarea ID	Descripción	VA	NV A	SV A	Tiempo normal	Tiempo estándar
1	Acumulación de desechos	13.23	0.00	0.00	13.23	13.23
2	Recolección de desechos	5.22	0.00	0.00	5.22	5.22
3	Purga biodigestor	4.57	4.95	0.00	9.52	9.52
4	Almacenamiento de desechos	5.35	0.00	0.00	8.76	8.76
5	Limpieza del recinto	12.97	4.95	0.00	18.42	15.92

6. Factibilidad financiera

a. Costos de producción

1) Costos de mano de obra directa. Para los costos de mano de obra directa se utilizó únicamente un cuidador porque básicamente solo uno va llenar de desechos en el biodigestor y la carga de trabajo no aumenta, sus tareas de limpieza de recintos es la misma, con la única diferencia de en vez de desechar las excretas animales en botes las desechará en el biodigestor. El salario de un cuidador es de GTQ 3,841. 17.

Tabla 29. Salario de cuidador.

DESCRIPCION DE SALARIO CUIDADOR		
Cantidad de empleados	Sueldo	Sin bono
1	GTQ2,800.00	GTQ2,550.00
Prestaciones	Porcentaje	Monto
IGSS	10.67%	GTQ272.09
Aguinaldo	8.33%	GTQ212.42
IRTRA	1.00%	GTQ25.50
Bono 14	8.33%	GTQ212.42
Vacaciones	4.17%	GTQ106.34
Indemnización	8.33%	GTQ212.42
Bono incentivo	GTQ250.00	GTQ250.00
Total Salario		GTQ3, 841.17

Fuente: Rodolfo Galdámez, 2014.

El costo de mano de obra directa se determinó a las horas hombre que los cuidadores le dedican al biodigestor, estas horas que le dedican se determinó en el estudio de tiempos anterior. El cuidador le dedica una hora de su jornada de trabajo al día al biodigestor, se calculó de forma proporcional a su salario. El total de mano de obra directa de una hora sería de:

Tabla 30. Mano de obra directa

MANO DE OBRA DIRECTA	
HORAS HOMBRE AL DIA	1
COSTO HORA HOMBRE	GTQ18.47
COSTO MENSUAL	GTQ480.15

Fuente: (Rodolfo Galdámez, 2014)

b. Costos Indirectos de Fabricación (CIF). Los Costos Indirectos de Fabricación vienen dados por los costos de mantenimiento del biodigestor, este mantenimiento se refiere a los filtros. El agua a utilizar en los biodigestores no tiene ningún costo porque se utilizará el agua que es tratada en las plantas residuales del Zoológico. Estos costos indirectos de fabricación son mensuales.

Tabla 31. Costos Indirectos de Fabricación

SERVICIOS PRINCIPALES MENSUALES	
Agua residual	GTQ-
Mantenimiento	GTQ82.50
COSTOS INDIRECTOS DE FABRICACIÓN	GTQ82.50

Fuente: Rodolfo Galdámez, 2014

c. Estado de costos totales. En los costos totales, básicamente son los costos de artículos empleados en producción. Con un estado de costos totales de GTQ. 562. 65

Tabla 32. Estado de costos totales

Mano de obra directa	GTQ480.15
Mano de obra Indirecta	GTQ-
Material directo	GTQ-
Material Indirecto	GTQ-
CIF	GTQ82.50
Inventario de proceso de inicio de mes	GTQ-
Inventario de proceso de final de mes	GTQ-
Inventario inicial de producto terminado	GTQ-
Inventario final de producto terminado	GTQ-
Costos de los artículos empleados en producción	GTQ562.65
Inventario inicial trabajo en proceso	GTQ-
Costo de los artículos en proceso	GTQ562.65
Inventario final de trabajo en proceso	GTQ-
Costo de Los artículos manufacturados	GTQ562.65
Inventario inicial artículos terminados	GTQ-
Costos de los artículos disponibles para la venta	GTQ562.65
Inventario final artículos terminados	GTQ-
Costo artículos vendidos	GTQ562.65
Gastos	GTQ-
Estado de costos totales	GTQ562.65

c. Costo por BTU y m³ del biogás. Para conocer los costos por unidad de medida, es necesario conocer la capacidad del biodigestor a utilizar en cuantos BTU's y m³ pueden llegar a generar por unidad de tiempo. Estos son los siguientes datos:

Tabla 33. Especificación de biodigestor

V ESTIÉRCOL A TRATAR EN REACTOR	3.40 m³
V TOTAL REACTOR	7 m³

Fuente: Oscar Duarte, 2014

En un m³ de desecho animal del Zoológico "La Aurora" existen 5343.22 BTU, con esta conversión se logró sacar la capacidad de generación mensual por BTU.

Tabla 34. Capacidades de biodigestor

CAPACIDADES DE GENERACIÓN	
CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE BIODIGESTOR MENSUAL (BTU)	1,397,519.19
CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE BIODIGESTOR MENSUAL (MMBTU)	1.40
CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE BIODIGESTORES MENSUAL (m ³)	261.55

Fuente: Elaboración propia junto a miembro de equipo, Oscar Duarte

Teniendo la capacidad de los biodigestores y los estados de costos totales se determinaron los costos por unidad de medida, con una división del estado de costos mensuales y capacidad de generación mensual.

Tabla 35. Costos por unidad de medida

COSTOS UNITARIOS	
COSTO DE BIOGÁS POR MMBTU (GTQ/MMBTU)	GTQ402.60
COSTO DE BIOGÁS POR BTU (GTQ/BTU)	GTQ0.000403
COSTO DE BIOGÁS POR m³ (GTQ/ m³)	GTQ2.1512

Fuente: Rodolfo Galdámez, 2014

1) TMAR. La Tasa Mínima Atractiva de Rendimiento se determinó con una tasa de una cuenta de ahorro en un banco líder y con la tasa de inflación anual en Guatemala, según el Banco de Guatemala. Utilizando la ecuación número tres.

Tabla 36. Cálculo de la TMAR

TMAR	
Inflación en Guatemala 2014	3.41%
Tasa de Interés Líder-Cuenta de ahorro	4.50%
TMAR	8.06%

Fuente: Rodolfo Galdámez, 2014

2) Inversión. La inversión inicial para los métodos propuestos sería del costo de comprar y de instalar el biodigestor propuesto de 7 m³ intermitente de tanque agitado. Este monto de inversión nos lo proporciona la empresa EnerGetic de Guatemala. La inversión inicial incluye:

Tabla 37. Inversión inicial

Inversión	
Biodigestor anaeróbico	GTQ 76,600.00
Filtro desulfurizador	
Fittings	
Mangueras	
Accesorios	

7. Resumen factibilidad financiera de escenarios

Tabla 38. Resumen factibilidad financiera

Resumen de factibilidad financiera			
Escenario	Más probable	Pesimista por costo de recolección	Pesimista por baja en desechos
	GTQ	GTQ	GTQ
VPN	107,152.36	-	-
TIR	56.24%	8.06%	8.06%
Período de recuperación (años)	1.59	3.99	3.99
Porcentaje de reducción en variable	N/A	41.66%	41.66%

En los tres escenarios evaluados, se determinó que el proyecto es viable financieramente con el escenario más probable a ocurrir, con los otros dos escenarios pesimistas se determinó que el proyecto aguanta financieramente un 41.66% de sus variables dependientes a sus ingresos.

8. Escenario más probable

a. Flujos de caja financieros. Los flujos financieros del proyecto se determinaron según los ingresos por venta del biogás potencial que se puede llegar a generar por m³ y ahorros por métodos de recolección. En el método de recolección existe un ahorro que actualmente el Zoológico “La Aurora” tendría que pagar por retirar esos desechos a una empresa privada. Ecoprocesos nos cotizó el precio por desechos sólidos no tratados en 0.10\$ por libra. Los egresos se determinaron con los costos operativos de producción.

La inversión el año cero sería de GTQ 76,600.00, este es el precio de un biodigestor intermitente de tanque agitado para la fermentación de desechos.

Al año, nos daría un total de ingresos por venta de biogás y por ahorro en recolecta de desechos de GTQ 70,338.31 y costos operativos anuales de GTQ 6,751.75, generando una utilidad bruta de GTQ 63,586.56 y una utilidad líquida de GTQ 48,266.56. El ahorro de recolección viene dado por 0.10\$ por libra de desecho sólidos no tratados.

Analizando los flujos anuales, se determinó un valor actual neto de Q107,152.36 una tasa interna de retorno de 56.24% y una tasa de retorno sobre la inversión de 63.01%, la inversión de este biodigestor se recuperaría en 1.59 años

Continuación de Tabla 38: Resumen factibilidad financiera

ESTADO DE RESULTADOS: BIODIGESTOR						
Período/Anual	0	1	2	3	4	5
Ingresos/Ahorros						
Total ingresos venta de biogás		GTQ610.0 5	GTQ610.0 5	GTQ610.0 5	GTQ610.0 5	GTQ610.0 5
Total ahorro por recolección		GTQ69,72 8.26	GTQ69,72 8.26	GTQ69,72 8.26	GTQ69,72 8.26	GTQ69,72 8.26
Total Ingresos/Ahorros		GTQ70,33 8.31	GTQ70,33 8.31	GTQ70,33 8.31	GTQ70,33 8.31	GTQ70,33 8.31
Costo de operación						
Mano de obra directa		GTQ480.1 5	GTQ480.1 5	GTQ480.1 5	GTQ480.1 5	GTQ480.1 5
Materia prima		GTQ-	GTQ-	GTQ-	GTQ-	GTQ-
Gastos indirectos de fabricación		GTQ82.50	GTQ82.50	GTQ82.50	GTQ82.50	GTQ82.50
Total costos		GTQ6,751 .75	GTQ6,751 .75	GTQ6,751 .75	GTQ6,751 .75	GTQ6,751 .75
Utilidad/Resultado bruta		GTQ63,58 6.56	GTQ63,58 6.56	GTQ63,58 6.56	GTQ63,58 6.56	GTQ63,58 6.56
Depreciación anual activo		GTQ(15,3 20.00)	GTQ(15,3 20.00)	GTQ(15,3 20.00)	GTQ(15,3 20.00)	GTQ(15,3 20.00)
Total otros gastos		GTQ-	GTQ-	GTQ-	GTQ-	GTQ-
Utilidad líquida		GTQ48,26 6.56	GTQ48,26 6.56	GTQ48,26 6.56	GTQ48,26 6.56	GTQ48,26 6.56
(-) Inversión inicial	GTQ(76,6 00.00)					
Flujo de caja	GTQ(76,6 00.00)	GTQ48,26 6.56	GTQ48,26 6.56	GTQ48,26 6.56	GTQ48,26 6.56	GTQ48,26 6.56

E. Módulo: Modelo de Negocios para la producción y venta de energía renovable a partir de biomasa en el Zoológico “La Aurora”

1. Proyectos mutuamente excluyentes

Tabla 39. Cuadro comparativo proyectos mutuamente excluyentes

<i>Proyectos mutuamente excluyentes</i>			
Proyecto	Iluminación por lámparas de biogás	Estufas de biogás	Generación energía eléctrica
Inversión	Q 79,624.60	Q 83,953.26	Q 92,524.60
TIR	-24%	73%	-6%
VPN	(Q67,826.93)	Q383,552.17	(Q46,672.12)

2. **Modelo de negocios.** A partir de haber seleccionado de los proyectos mutuamente excluyentes la alternativa con mayor valor económico, opción más rentable, siendo esta el uso de biogás en estufas de biogás industriales en comiplaza, a su vez el Zoológico busca dar charlas educativas del uso de dicha energía renovable. A continuación se presenta el Estado de Resultados final tomando en cuenta ambos rubros de ingresos.

Tabla 40. Estado de resultados "modelo de negocios"

ESTADO DE RESULTADOS										
Estado de Resultados por año terminado										
Cifras expresadas en Quetzales										
Periodo anual	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Ingresos varios										
Ingresos/Ahorros	57,044. 53	59,966. 31	63,034. 18	66,255. 45	69,637. 77	73,189. 21	76,918. 23	80,833. 70	84,944. 93	89,261. 73
Ingresos charlas/ tour educativo	127,623 .10	130,686 .05	133,822 .51	137,034 .25	140,323 .08	143,690 .83	147,139 .41	150,670 .76	154,286 .85	157,989 .74
Total de ingresos	184,667 .63	190,652 .36	196,856 .70	203,289 .70	209,960 .85	216,880 .05	224,057 .64	231,504 .45	239,231 .79	247,251 .47
Costos de operación										
<i>Mano de Obra Directa</i>										
Sueldo expositora	4,333.3 3	4,550.0 0	4,777.5 0	5,016.3 8	5,267.1 9	5,530.5 5	5,807.0 8	6,097.4 4	6,402.3 1	6,722.4 2
Bonificaciones	270.83	270.83	270.83	270.83	270.83	270.83	270.83	270.83	270.83	270.83
<i>Otros</i>										
Energía eléctrica	191.84	186.43	186.43	186.43	186.43	186.43	186.43	186.43	186.43	186.43
Total Costos	4,796.0 0	5,007.2 6	5,234.7 6	5,473.6 3	5,724.4 5	5,987.8 1	6,264.3 4	6,554.6 9	6,859.5 7	7,179.6 8
Utilidad antes de impuesto	179,871 .63	185,645 .10	191,621 .94	197,816 .07	204,236 .40	210,892 .23	217,793 .30	224,949 .76	232,372 .22	240,071 .79
ISR	6,141.3 5	6,283.9 4	6,429.3 9	6,578.0 3	6,729.9 3	6,885.1 5	7,043.7 5	7,205.8 0	7,371.3 6	7,540.5 0
Utilidad después de impuesto	173,730 .27	179,361 .16	185,192 .55	191,238 .04	197,506 .47	204,007 .08	210,749 .55	217,743 .95	225,000 .86	232,531 .29

Supuesto

Cuatro horas de exposición a la semana

Sueldo área de exposición Q 4,000

Tabla 41 Flujo de efectivo "Modelo de negocios"

ESTADO DE FLUJO DE EFECTIVO											
Estado de flujo de efectivo por año terminado											
Cifras expresadas en Quetzales											
Periodo anual	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<i>Flujo de efectivo por operaciones</i>											
Utilidad del ejercicio		173,730.2 7	179,361.1 6	185,192.5 5	191,238.0 4	197,506.4 7	204,007.0 8	210,749.5 5	217,743.9 5	225,000.8 6	232,531.2 9
Flujo de efectivo por operaciones		173,730.2 7	179,361.1 6	185,192.5 5	191,238.0 4	197,506.4 7	204,007.0 8	210,749.5 5	217,743.9 5	225,000.8 6	232,531.2 9
<i>Flujo de efectivo por inversión</i>											
Adquisición de inversión	139,493.2 6										
Flujo de efectivo por inversión	139,493.2 6	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -	Q -
<i>Flujo de efectivo por financiamiento</i>											
Intereses pagados	Q -	(20,800.0 0)	(19,824.4 6)	(18,692.8 3)	(17,380.1 4)	(15,857.4 2)	(14,091.0 6)	(12,042.0 9)	(9,665.28)	(6,908.18)	(3,709.95)
Abono préstamo	Q -	(6,097.14)	(7,072.68)	(8,204.31)	(9,517.00)	(11,039.7 2)	(12,806.0 8)	(14,855.0 5)	(17,231.8 6)	(19,988.9 6)	(23,187.1 9)
Flujo de efectivo por financiamiento	Q -	(26,897.1 4)	(26,897.1 4)	(26,897.1 4)	(26,897.1 4)	(26,897.1 4)	(26,897.1 4)	(26,897.1 4)	(26,897.1 4)	(26,897.1 4)	(26,897.1 4)

Continuación Tabla 44 Flujo de Efectivo “Modelo de negocios”

Periodo anual	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
EFFECTIVO Y EQUIVALENTES DE EFFECTIVO A FIN DE AÑO	139,493.26	146,833.13	152,464.02	158,295.41	164,340.89	170,609.32	177,109.94	183,852.41	190,846.81	198,103.72	205,634.15
TMAR	8.06%										
VPN	Q1,281,789.85										

El presente flujo de efectivo representa el escenario pesimista de la solicitud de charlas/educativas dado a que para calcular los ingresos por conferencias se utilizó un 50% de demanda por la población estimada de visitas del segmento target.

Con dicho escenario, el valor presente neto del modelo de negocios final con charlas/tour educativo es de Q 1,281, 789.85, dado a que este valor es mayor que el VPN del proyecto solo con estufas de biogás, se justifica la inversión adicional.

Dado a que el implementar dichas charlas educativas genera costos adicionales, como lo son el material audiovisual, experto en el tema, etc.; la inversión aumenta en comparación a realizar el proyecto de estufas de biogás en "Comiplaza" exclusivamente por lo que a continuación se presenta un análisis financiero con financiamiento permitiendo al Zoológico realizar la inversión sin descuidar proyectos prioritarios según su plan de acción. A pesar de que la tasa de interés utilizada del 16% el proyecto presenta utilidades todos los años siendo auto sostenible.

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Módulo: Caracterización química y microbiológica de biogás producido por mezclas de estiércol de jirafa y elefante del Zoológico “La Aurora”.

En la sección de resultados se presentan diferentes gráficas y cuadros que responden a los objetivos planteados para este estudio. La principal función de las pruebas a escala laboratorio era determinar las condiciones adecuadas para la producción de biogás así como encontrar la mezcla de estiércol de jirafa y elefante más conveniente. En el Cuadro 1 se puede observar la proporción de estiércol y agua agregados en cada frasco. Como se mencionó en la sección de Justificación, se utilizó el excremento de jirafa y elefante debido a que son los animales de mayor tamaño del Zoológico y los que generan mayor cantidad de excretas al día. Por esta razón se buscaba responder a la necesidad de disminuir la acumulación de dichos residuos y aprovecharlos para la producción de biogás mediante la biodigestión anaerobia. También se basó en el tipo de alimentación, debido a que son animales herbívoros y omnívoros, por lo que la microbiota intestinal es más variada y tiene mayor capacidad de producción de metano. Las mezclas seleccionadas representan las proporciones a mayor escala de los excrementos en el Zoológico donde la más representativa es la mezcla No. 1 (E30/J30/A40) ya que contiene la mezcla de los dos tipos de desechos con agua, que en el Zoológico utilizarían aguas residuales. La mezcla No. 5 (E50/J50) también representa la mezcla de ambos tipos de desechos (que es como se realizaría en el Zoológico). Las otras mezclas se realizaron para identificar el comportamiento de las excretas de jirafa y elefante por separado y de esta forma encontrar cuál de las dos puede ser más eficiente tanto en la producción de biogás como en la producción de metano. Otra razón de la diferencia de las cinco mezclas fue que se quería determinar cuál era la que generaba menor cantidad de ácido sulfhídrico (componente no deseado en el biogás) para incrementar la eficiencia del reactor que elimina dicho componente del biogás. Entonces todas las mezclas son diferentes, tanto en proporción como en volumen inicial. Todas las mezclas se sometieron a las mismas condiciones de temperatura dentro de una incubadora sin agitador. Esta incubadora se colocó a temperatura de 45°C, manteniendo la temperatura entre 40-45°C (Figura 12, Anexos).

Se colocó a esta temperatura ya que es recomendada por la literatura para activar los microorganismos mesofílicos y termofílicos del medio. El tiempo de incubación fue de 57 días.

El avance de la producción de biogás se fue monitoreando cada dos o tres días (en algunos casos, hasta cuatro días). En este paso sólo se medía la cantidad de agua desplazada por el gas dentro de las botellas de plástico calibradas. No se logró determinar el porcentaje de metano y otros componentes durante este proceso ya que no se contaba con un aparato adecuado para la cuantificación del biogás. Por esta razón se realizó una prueba en el cromatógrafo de gases al final del proceso (se menciona después). En la Figura 3 se puede observar el avance de la producción de biogás de las cinco mezclas. Se observa que durante los primeros 10 días todas se mantuvieron en casi el mismo volumen de biogás, hasta después de estos días empieza a verse la diferencia. La mezcla #3 produjo mayor volumen de biogás (14.8L), seguida por la mezcla #4 (9.05L). Éstas dos tienen en común que la composición es la misma (1:1 de estiércol de jirafa y agua), pero con diferente volumen inicial. Esto sugiere que el volumen inicial puede influir en el volumen de biogás producido. La mezcla #1 y #5 generaron casi el mismo volumen final de biogás (7.95 L y 8.13L, respectivamente). Estas mezclas se asemejaban en que ambas tenían mezcla de (1:1) de estiércol de elefante y jirafa, la diferencia fue que la mezcla #5 no se le agregó agua inicial. Se observa que la mezcla #5 incrementa el volumen de biogás aproximadamente en el día 30, en cambio la mezcla #1 inicia el incremento en el día 20. Llegan a un punto en que se une el volumen de biogás, pero si se hubiera seguido con la medición, se puede inferir que la mezcla #5 seguía aumentando mientras la #1 empezaba a disminuir. Finalmente la mezcla #2 (1:1 estiércol elefante y agua) fue la que menor volumen de biogás produjo, ésta sólo tuvo producción en los primeros días hasta llegar a 450ml. Durante los 57 días se mantuvo a este mismo volumen, sin incrementar a lo largo de los días. La diferencia se puede deber al tipo de alimentación de los animales, a pesar que ambos son herbívoros hay contraste en relación a que la jirafa es rumiante y el elefante no. Es decir que la jirafa tiene más características similares a la vaca (rumiante también) que es el organismo que mayor cantidad de metano genera. Es válido agregar que el estiércol de la jirafa contenía estiércol de cebras, ya que se encuentran en el mismo recinto y es complicado separarlo. Esto puede contribuir en la generación de metano y en el aumento del volumen de producción, ya que las cebras tienen características parecidas a los caballos, los cuales también son organismos ideales para la generación de metano.

Se realizó un inóculo bacteriano con muestras de cultivos de bacterias anaerobias termófilas del análisis microbiológico. Para el cultivo se realizó dilución 1:100 y se incubó durante tres días, esperando que éste estuviera lo suficientemente saturado. Es posible que la dilución haya sido muy alta y el caldo no se haya saturado como se deseaba. El caldo se agregó, sustituyendo parte de la proporción de agua, en dos mezclas originales: en la que mayor volumen de biogás produjo (#3) y en la que menor volumen produjo (#2). Esto para determinar si había efecto en las dos mezclas con resultados opuestos. Al observar la Figura 4 a simple vista, se puede inferir que no hubo diferencia real en el volumen de biogás producido por las mezclas originales y las inoculadas. Es más, la mezcla #3 inoculada al final del tiempo de incubación generó menor volumen que la original (2.85L menos). La diferencia que se puede ver es que la inoculada empezó a generar más volumen de gas antes que la original. La primera empezó a los 10 días y la segunda a los 15. Sin embargo, la primera (inoculada) empezó a disminuir la producción a los 20 días aproximadamente, mientras la segunda seguía incrementando la producción. En la mezcla #2 no tuvo gran efecto tampoco, sólo incrementó el volumen a 750ml (300ml más que la original) pero no incrementó a lo largo del tiempo tampoco. Con esto se puede sugerir que un inóculo bacteriano adecuado se puede contribuir en la generación de biogás, agregando cada 10 días para impulsar la producción y ayudar en la eficiencia. Para incrementar la eficiencia del inóculo se sugiere obtener este a partir de lodos activados de otros biodigestores funcionando o de excremento de otro tipo de animales metanógenos, como vacas o cerdos. También es recomendable tener una campana de anaerobiosis completa (ausencia máxima de oxígeno) para el cultivo de bacterias metanógenas y mediante éste generar un inóculo de bacterias metanógenas que son las que directamente producen gas metano. De esta forma se podría garantizar el éxito del inóculo bacteriano y aumentar la eficiencia de producción de metano en el biogás, que es lo que garantiza incrementar la aplicación del biogás.

Las cinco mezclas se incubaron durante, aproximadamente, tres meses (57 días). Se debe tomar en cuenta que durante este tiempo no se realizó ningún tipo de alimentación. Debido a que se pretendía determinar el tiempo "útil" de la materia prima. En el día 57 se realizó una cromatografía de gases del biogás producido por las cinco mezclas para determinar diferencias en la composición del biogás de las mezclas. Se basó en un análisis cualitativo de los porcentajes de las áreas bajo los picos característicos de tres componentes principales del biogás: metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico en un cromatograma de gases. Para poder apreciar las diferencias en los porcentajes se realizaron gráficas de barras. En la Figura 5 se representa el porcentaje del área del pico característico de metano (en relación a todos los picos) del biogás de las cinco

mezclas. Como se puede observar las mezclas 1, 3, 4 y 5 tienen de 85% - 88% de metano del área total, donde la mezcla 5 tiene el mayor porcentaje y la mezcla 1 el menor porcentaje. Por otro lado, la mezcla dos fue la que menor área de metano presentó, con un valor de 61.59%. En la Figura 6 se observa la representación del porcentaje de las áreas de los picos característicos de dióxido de carbono. Todas las mezclas presentaron un porcentaje menor de 2%. Siendo la mezcla 2 la que mayor porcentaje presentó (1.08%), seguidas las mezclas 1, 5, 3 y por último la 4. En la Figura 7 se observa la representación del porcentaje de las áreas de los picos característicos del ácido sulfhídrico. Éste se considera un gas contaminante que interfiere con la eficiencia del biogás (es corrosivo para las estufas e inhibitorio en el crecimiento de las bacterias metanogénicas), por lo que se desea que éste se encuentre en menor cantidad o ausente en el biogás. Se puede observar que las mezclas 1, 3, 4 y 5 tienen un porcentaje de área de ácido sulfhídrico entre 8-9%, mientras la mezcla 2 tiene 18% del área. Esto sugiere que el excremento de elefante contiene mayor cantidad de componentes sulfurados (sulfatos) que son sustrato para las bacterias reductoras de sulfato, que su producto final es ácido sulfhídrico. También utilizan acetato como sustrato, el cual también es utilizado por las bacterias metanógenas (ver Marco Teórico). Para evitar el aumento del porcentaje de ácido sulfhídrico se recomienda realizar alimentaciones constantes (cada 3 o 4 días) para favorecer el crecimiento de las bacterias metanógenas y que el porcentaje de metano se mantenga alto. También considerar un sistema buffer para controlar el impacto de compuestos sulfatados del medio, por ejemplo buffer de acetatos o adición de alícuotas que contienen pH neutro y que tienen producción de metano alto. Es decir, se podrían agregar alícuotas de la mezcla J50/A50 que ya se observó que el porcentaje de metano es mayor. Con estos resultados se determinó que la mezcla No. 4 (J40/A60) es la que menor porcentaje de ácido sulfhídrico presentó, lo que representaría una ventaja en el uso del reactor desulfurizador. Debido que de esta manera aumentaría la eficiencia del reactor, así como su tiempo de uso y aprovechamiento del mismo, tanto como en la disminución de los costos.

En la Figura 8 se puede determinar con mayor facilidad la diferencia entre las cinco mezclas. De esta gráfica de barras se pueden determinar varios aspectos, donde resalta principalmente que en todas las muestras de biogás predomina el área del metano, que es lo que se desea. En la mezcla 4, el área de metano es 10 veces más que el área del ácido sulfhídrico; en las mezclas 1, 3 y 5 el área de metano es 9 veces más que la del H₂S y en la mezcla 2 es tres veces más. El área del dióxido de carbono no es significativa en relación a las demás, por lo que no se toma en cuenta. Con esta información se puede determinar que después de tres meses de incubación de los desechos, el biogás que se produce tiene en mayor proporción metano y ácido sulfhídrico. Éste último se puede

eliminar mediante reactores desulfurizadores y así obtener únicamente metano. También se encontró que el estiércol de elefante (mezcla 2) no es adecuado (por sí sólo) de generar cantidad de biogás suficiente. El que produce tiene mayor área de componente contaminante y menor área de metano, siendo esta una razón para no usarlo para iniciar el proceso de digestión anaerobia de un biodigestor. Por otro lado sí es recomendable usarlo combinado con otros estiércoles, ya que otorga nutrientes y condiciones adecuadas para el medio, como se puede apreciar en las mezclas 1 y 5. En cambio el estiércol de jirafa sí se recomienda utilizar para iniciar los lodos activados de un biodigestor.

El análisis microbiológico se realizó mediante la estimación de la población bacteriana anaerobia termófila por el método del Número Más Probable (NMP). Es importante indicar que se realizó el análisis de población bacteriana anaerobia facultativa termófila ya que para cultivar bacterias metanogénicas (anaerobias estrictas) se requieren condiciones especiales que no se contaban en el laboratorio de microbiología de la Universidad del Valle de Guatemala. Sin embargo, se sabe por la literatura que los productos de las bacterias anaerobias son usados por las bacterias metanogénicas para su crecimiento, por lo que se puede hacer una suposición donde la concentración de bacterias anaerobias es relativa con la de bacterias metanógenas. Permitiendo así tener un estimado de la carga microbiológica de los desechos orgánicos analizados. Una de las limitaciones de este proceso fue mantener el ambiente anaerobio para el crecimiento de las bacterias adecuadas. Para esto el medio de cultivo utilizado fue caldo anaerobio (el cual se usó para realizar las diluciones también). Este contenía L-cistina y dextrosa, los cuales actuaban como agentes reductores y así disminuían el potencial de óxido-reducción del medio, favoreciendo el desarrollo de microorganismos anaerobios. Para generar el ambiente de anaerobiosis, se utilizó *GasPak Plus Anaerobic System* dentro de una caja cerrada herméticamente. El *GasPak* contiene una tableta de borohidruro sódico, el cual al tener contacto con agua empieza a formar hidrógeno. Este se combina con el oxígeno de la caja y empieza a formar agua, auxiliado por un catalizador de paladio. El dióxido de carbono se genera por la acción de una tableta de bicarbonato de sodio y ácido cítrico, activados también por el agua que se agrega. Sin embargo estas reacciones son alteradas por las condiciones de los sobres, si están golpeados, arrugados o almacenados por mucho tiempo, pierden parte de su capacidad de reacción. Estos son factores que pudieron haber afectado el ambiente anaerobio que se usó para el análisis microbiológico. Todo el trabajo microbiológico se realizó en condiciones estériles.

En los Cuadros 6, 7 y 8 se presentan los resultados del NMP de los tres muestreos realizados a las cinco mezclas (respecto al segundo y tercer muestreo) y del excremento sin incubar (primer muestreo). La densidad poblacional de las

mezclas se presenta como bacterias/ml. Debido a que se trataba de materia prima con alta carga microbiológica se trabajó con diluciones altas, llegando hasta 1×10^{-8} . Las últimas tres diluciones se realizaron en triplicado para poder realizar el cálculo del NMP. Para esto se utilizó una tabla de NMP de tres tubos por dilución usando como base 1, 0.1 y 0.01ml de inóculo (Anexos). Se calculó con un factor de corrección, donde el NMP se multiplicó por dos ya que el inóculo fue de 0.5ml y luego por el factor de dilución (de la segunda dilución). En algunas muestras se obtuvo el resultado de número positivos para cada dilución de 3-3-3, dicho resultado se presenta como $>110\text{NMP}$, por lo que la densidad se presenta como “mayor de 2.20×10^8 bacterias/ml”. Este no es un dato exacto, por lo que generaba problemas para el cálculo del análisis estadístico, entonces el valor se consideró igual a 2.20×10^8 bacterias/ml para poder realizar las pruebas de Kruskal-Wallis y U de Mann-Whitney.

La prueba de Kruskal-Wallis se realizó para determinar si existía diferencia respecto a la carga microbiológica de las cinco mezclas. Se utilizó esta prueba ya que los datos no presentaban una distribución normal y las muestras eran independientes. En el Cuadro 9 se presentan los rangos otorgados a cada mezcla, siendo 10 para la #1, 3 y 5; 5.33 para la #2 y 4.67 para la #4. En el Cuadro 10 se muestran los datos para la interpretación del resultado de la prueba de Kruskal-Wallis. Para poder rechazar H_0 el valor-P debe ser menor a 0.05. En este caso el valor-P ($H=7.56$, 4 g.l., $P=0.109$) es mayor a 0.05 por lo que no se puede rechazar la hipótesis nula. Con esto se concluye que no hay evidencia suficiente para determinar que la carga microbiológica es diferente en las cinco mezclas. Las mezclas 2 (1:1 estiércol de elefante y agua) y 3 (1:1 estiércol de jirafa y agua) fueron las que tuvieron resultados opuestos (respecto a la producción de biogás) por esta razón se quería determinar si existían diferencias en la carga microbiológica de ambas mezclas. Para esto se realizó la prueba U de Mann-Whitney, debido a que eran dos muestras independientes y los datos no presentaban distribución normal. En el Cuadro 11 se presentan los rangos otorgados a cada muestra, siendo 2.50 para la 2 y 4.50 para la 3. Con éstos datos se obtuvieron los estadísticos de contraste presentados en el Cuadro 12, donde el nivel de significancia bilateral se usó como el valor de contraste. En este caso el valor-P ($p=0.114$) es mayor a 0.05 por lo que no se puede rechazar la hipótesis nula. Con esto se concluye que no hay evidencia suficiente para determinar que la carga microbiológica es diferente entre las mezclas 2 y 3. Para mejorar los resultados del análisis estadístico es recomendable realizar mayor número de muestreos (más de tres) y llegar al número de diluciones donde los resultados no sean iguales en los tres tubos. Siempre es recomendable que disminuya el número de tubos positivos con el grado de dilución (3,2,1; 2,1,0, etc.).

En las Figuras 9,10 y 11 se presenta la comparación entre la carga microbiológica de cada mezcla con el porcentaje del área de cada componente presente en el biogás (metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico respectivamente). Estas gráficas se realizaron para poder encontrar la proporción de las áreas de cada componente entre las mezclas y determinar si la carga microbiológica tenía influencia con dichas proporciones. De estas gráficas se deduce que tres mezclas (1, 3 y 5) tienen la misma carga microbiológica y la composición del biogás es muy parecida en las tres, especialmente en metano y ácido sulfhídrico. En relación a dióxido de carbono se observa que la 1 tiene mayor porcentaje y la 3 menor porcentaje. La mezcla 4 es la que menor carga microbiológica presenta pero tiene proporciones de los componentes del biogás muy similares a las mezclas 1,3 y 5 a excepción del dióxido de carbono, ya que la mezcla 4 es la que menor porcentaje de este componente presenta que todas las demás mezclas. Por último la mezcla 2 es la que se comporta de forma diferente a las demás, ya que la proporción de ácido sulfhídrico es mayor que la del metano y dióxido de carbono, a pesar que tiene mayor carga microbiológica que la mezcla 4. Con el análisis de estas gráficas se puede concluir que la mezcla 1:1 de estiércol de jirafa y agua es la más indicada para producción de biogás (en volumen) y tiene mayor porcentaje de área de metano. A pesar de esto también se encontró que la mezcla de excremento de elefante y jirafa puede generar un volumen alto de biogás con alto porcentaje de metano. Sin embargo no es recomendable usar el estiércol de elefante (sin complementos) para generación de biogás ya que no es eficiente y tiene mayor contaminación con gases no deseados como ácido sulfhídrico. También se deduce que la carga microbiológica no influye en la composición del biogás, siempre y cuando las condiciones se mantengan adecuadas para que el ecosistema de los microorganismos sea el apropiado y haya una correcta digestión anaerobia de los desechos orgánicos.

Finalmente en el Cuadro 13 se presenta el análisis microbiológico realizado al biodigestor a escala normal que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de Ingeniería Química. Los muestreos 1 y 2 se realizaron con 30 días de separación y se obtuvieron los mismos resultados de la densidad poblacional. Se debe tomar en cuenta que a la mitad de dicho rango de tiempo se alimentó el biodigestor con estiércol fresco de elefante y jirafa. Con esto se infiere que las condiciones de los desechos orgánicos dentro del biodigestor se mantienen constantes durante la producción del biogás. Para determinar el rango de tiempo adecuado para la alimentación del biodigestor se realizó un muestro del estiércol fresco que se agregó, muestra del los desechos en el biodigestor después de 3 días del agregado y muestra después de 6 días del agregado. Esto se presenta en la Figura 12, donde se puede observar que luego de tres días la carga

microbiológica se mantiene constante y al sexto día disminuye el valor de la densidad poblacional bacteriana. Esta gráfica sugiere que la alimentación se realice al menos cada tres días, ya que sí es recomendable mantener una alta carga microbiológica para que la producción de biogás sea mayor y por consiguiente su aplicación. Sin embargo para la alimentación también se debe considerar la cantidad de materia prima que se tiene, la velocidad de reacción del biodigestor (producción de metano) y la capacidad de éste.

B. Módulo: Caracterización de materia prima y determinación de variables básicas de un reactor diseñado para la biodigestión de desechos orgánicos generados del Zoológico “La Aurora”

1. Caracterización de materias primas. El primer objetivo principal del presente módulo fue determinar las propiedades de los desechos orgánicos seleccionados generados en Zoológico “La Aurora”, a través de diferentes métodos analíticos. Para esto se determinaron propiedades como densidad, humedad, sólidos volátiles y DQO así composición bioquímica de los excrementos seleccionados.

En el caso de la humedad se obtuvo un resultado promedio de 64.18% lo que indica que los tipos de excremento seleccionados son en su mayoría agua y el resto sólidos. Este resultado era el esperado ya que el agua es parte fundamental del sistema biológico de los animales que generan los desechos tanto durante la digestión como parte de su dieta. Así mismo pudo determinarse la composición bioquímica del sustrato a utilizar en la biodigestión anaerobia. Los resultados muestran que el excremento seleccionado se compone en un 12.00% de proteínas en el caso del excremento de elefante y un 8.36% de proteínas en el caso de excremento de cebra y jirafa. En el caso de los lípidos o grasas se determinó una concentración promedio del 5.63% peso/peso a través del método Soxhlet. La cuantificación de ambos tipos de macromoléculas es de suma importancia ya que durante la reacción representan el verdadero sustrato para la reacción microbiana; es decir a mayor porcentaje de este tipo de macromoléculas en los desechos se tendrá un mayor potencial de generación de biogás. Es importante resaltar el hecho que tanto los valores de humedad como de grasas y proteínas son bastante parecidos entre las excretas de los animales estudiados. Esto se debe probablemente a la similitud en las dietas de elefantes, jirafas y cebras ya que estos tres son herbívoros y se almacenan de una forma parecida.

Las muestras utilizadas para la determinación de humedad, proteínas, sólidos volátiles y totales y grasas fueron tomadas en el Zoológico de modo que estas fueran lo más “frescas” posible y llevaran un corto tiempo expuestas al ambiente. La forma y condiciones de almacenamiento de cualquier excreta puedan afectar en gran medida estas variables. Por ejemplo, un aumento sustancial en la temperatura del excremento puede afectar la estructura de macromoléculas como proteínas y grasas. Por otro lado, la exposición del material a fuentes de agua también afectaría en gran medida el porcentaje de humedad del excremento. Es de suma importancia, al momento de instalar un proceso de fermentación anaeróbica controlada dentro de las instalaciones del Zoológico “La Aurora”, verificar que los procesos y condiciones de almacenamiento no afecten las características del sustrato, en este caso excremento de los distintos animales. Este factor también fue tomado en cuenta al seleccionar el tipo de reactor necesario para la fermentación, de modo que la totalidad del desecho generado durante el día pudiese ser alimentado al reactor y no tuviesen que ser almacenado.

2. Determinación de variables básicas de un reactor. El segundo objetivo general del presente módulo fue determinar las variables básicas de un reactor diseñado para la biodigestión de desechos orgánicos seleccionados que se generan en Zoológico “La Aurora”. Para este objetivo se utilizó un biodigestor a escala piloto en donde se llevó a cabo la reacción de estudio. Las pruebas a escala piloto fueron útiles para confirmar datos obtenidos durante las pruebas a escala laboratorio realizado por otros módulos y para obtener datos que permitan escalar el reactor a las condiciones del Zoológico “La Aurora”. El diagrama y equipos utilizados durante las pruebas pilotos pueden observarse en los diagramas No.3 y No. 4 de la sección de Anexos. El reactor piloto fue un equipo tipo “batch” de fibra de vidrio con una capacidad de volumen de 2.5m^3 instalado en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala a la intemperie del laboratorio de operaciones unitarias del departamento de Ingeniería Química. Dicho reactor presenta una salida de gas que permite el almacenamiento del biogás en una bolsa externa así como una tubería que funge como purga para la evacuación de los productos en forma de lodos de la reacción.

El biodigestor piloto fue monitoreado en diferentes variables: composición de biogás producido, pH de sustrato y temperatura de medio de reacción. El reactor utilizado un reactor tipo “batch” el cual fue alimentado con residuos orgánicos seleccionados del Zoológico “La Aurora” y agua en una proporción 1:1. La proporción agua-desechos orgánicos fue seleccionada con base en los resultados de las pruebas a escala laboratorio realizadas por módulos anteriores. Es

importante resaltar que durante la prueba piloto el biodigestor se encontraba expuesto a condiciones ambientales ya que no se controló la temperatura interna del reactor. Esto permite evaluar la reacción en las condiciones más simples posibles cuyo resultados presentan la base para buscar, luego, formas de optimización de la condiciones de la reacción y obtener aún mejores composiciones de metano en el biogás y/o mayor cantidad de biogás en un periodo determinado de tiempo. Durante las pruebas piloto en acompañamiento de los monitoreos de la reacción también se realizó diariamente agitaciones del medio de forma manual para poder homogenizar el medio.

Las Gráficas no. 3 y 4 muestran la generación de biogás a lo largo de las pruebas realizadas en el biodigestor piloto. El biogás producido a lo largo de la prueba muestra en promedio la siguiente composición de metano y dióxido de carbono: 49.22% de CH₄ y 37.23% CO₂; ambos gases fueron cuantificados a lo largo de las pruebas piloto con los instrumentos respectivos que pueden observarse en la sección de anexos. Estos datos coinciden con lo esperado según la bibliografía consultada. El resto de gases no fueron cuantificados durante la prueba piloto. La generación de metano y dióxido de carbono a lo largo de la prueba tiene un comportamiento logarítmico que se apega los modelos de cinética de reacción tipo Michaelis-Menten tal y como se esperaba. Adicionalmente se confirmó la presencia de metano y dióxido de carbono a través de pruebas de absorción de gases, cuyos resultados se observan en la sección de Anexos. Tal y como se observa en los resultados de las pruebas de absorción de gases la presencia de metano y dióxido de carbono fue visible a lo largo de toda la reacción.

Es importante agregar que durante las pruebas piloto se observó siempre un aumento gradual en la concentración de metano del biogás que se generaba día a día. Esto se observa tanto en las gráficas de resultados No. 3 y No. 4 como en las tablas de datos calculado No.3 y No. 4. Esto se apega a lo esperado ya que la etapa metanogénica es la última durante una fermentación anaerobia como la que se llevó a cabo.

Durante las mismas pruebas piloto pudo además cuantificarse la tasa de generación de biogás por kg de excremento a utilizar en forma de sustrato. El resultado fue de 0.07 m³ de biogás por cada kg de mezcla de excremento húmedo de los animales seleccionados. Este resultado se asemeja a la tasa de rendimiento para la producción de biogás a partir de excretas de otros animales tales como excretas porcinas y aves para las cuales se tiene una tasa de generación de 0.06 y 0.08 m³/kg de excremento respectivamente.

Por último, a lo largo de la prueba piloto se monitorearon también las variables temperatura y pH para verificar su comportamiento a lo largo de la

reacción. Tanto pH como temperatura son determinantes en la velocidad de reacción especialmente en las reacciones microbiológicas como la que se estudió. Durante las pruebas piloto ninguna de estas dos condiciones fueron controladas, esto indica que los resultados obtenidos durante las pruebas piloto presentan únicamente la base para poder identificar puntos o condiciones de control para aumentar la velocidad de reacción. Los resultados de ambas variables pueden observarse en las tablas no. 1 y no. 2. Éstas comprueban que el pH se encontró en punto óptimo para la reacción a lo largo de la reacción con un pH 7. De algún modo se esperaba que durante la reacción descendiera en pH durante la etapa acidogénica de la reacción; sin embargo la producción de ácidos durante dicha etapa no afectó el pH del medio.

En el caso de la temperatura se observó un comportamiento dentro del rango de temperatura esperado para que la reacción pueda llevarse a cabo. Sin embargo esta variable fue menos constante. Las mediciones tomadas a lo largo de las pruebas piloto se realizaron alrededor de las mismas horas del día. Es muy probable que a lo largo de la noche y la mañana se observase un descenso en la temperatura del medio y un aumento significativo durante el medio día; ambas variaciones no fueron tomadas en cuenta en el modelo cinético creado para la reacción de estudio, sin embargo sí tienen un efecto sobre la velocidad de reacción.

3. Determinación de modelo cinético de reacción de fermentación anaerobia. Con base en la teoría consultada existen 3 diferentes tipos de macromoléculas dentro de los desechos orgánicos seleccionados que pueden convertirse en sustratos de los cuales los microorganismos presentes en el medio puedan realizar una fermentación anaeróbica para la producción de metano. Estas macromoléculas son grasas, proteínas y azúcares; éstos producen metano en diferentes proporciones (De Juana, 2004). Sin embargo, tal y como se observa en la gráfica de resultados No.4, no existe durante la reacción estudiada y bajo las condiciones establecidas un cambio significativo en la velocidad de reacción. Por lo tanto se asumió que bajo las condiciones de la prueba piloto únicamente es un sólo tipo de macromolécula el que juega un papel predominante como sustrato durante la reacción. Ese tipo de sustrato debe corresponder a las grasas ya que éstas presentan un mayor rendimiento para la producción de metano según las fuentes consultadas (De Juana, 2004). Para el modelo de cinética de reacción, por lo tanto, se utilizaron las grasas presentes en los desechos orgánicos seleccionados como el sustrato principal de la reacción.

Para la determinación de un modelo que pudiese explicar la cinética y velocidad de reacción de la fermentación anaerobia de los desechos orgánicos seleccionados del Zoológico “La Aurora” se utilizó como base las ecuaciones de Michaelis-Menten. Con base en los resultados experimentales de la prueba piloto se procedió a determinar los parámetros de ambos modelos. Para estos dos modelos se fijó como velocidad máxima de reacción la velocidad más alta de reacción encontrada durante las pruebas piloto, r_{max} , 0.0036 moles de metano por metro cúbico de biogás por día, y una tasa de producción de biogás de 0.07 metros cúbicos de biogás por kilogramo de estiércol húmedo..

En el caso del modelo Michaelis Menten se concluyó con base en el comportamiento de la reacción, composición de los productos y tabla No. 11 que la constante de Michaelis-Menten, C_m , para la reacción de estudio asciende a 0.1897 moles de lípidos por kilogramo de estiércol base seca y una constante de reacción, k , de 5.5203×10^{-10} día⁻¹. Con base en estos dos parámetros es posible construir la ecuación No.1 en la sección de resultados que relaciona velocidad de reacción con la concentración de sustrato reaccionante presente en el medio.

Tanto los resultados de cinética de la reacción como las condiciones de reacción como temperatura y pH pueden haberse visto afectados por agitación. Durante la prueba piloto la agitación se realizó de forma diaria de forma manual. El dimensionamiento del biodigestor propuesto incluye un agitador que permitirá homogeneizar el medio y probablemente mejorar los resultados observados durante en el bioreactor piloto. Algunas consecuencias de no tener una agitación permanente fueron observadas durante las primeras pruebas en el biodigestor piloto. Se observó, por ejemplo, la separación de fases en el medio así como la formación de capas sólidas tanto en la parte inferior como superior del digestor. Durante las pruebas en las que ocurrió esto se observó una visible disminución en la velocidad de reacción y rendimiento de la misma.

4. Dimensionamiento de biodigestor de tanque agitado para materia orgánica seleccionada. El modelo de reacciones tipo Michaelis-Menten permiten definir variables básicas para el diseño de un reactor en el cual pueda llevarse a cabo la reacción de estudio. El reactor seleccionado para las condiciones existentes en Zoológico “La Aurora” fue un biodigestor intermitente de tanque agitado ya que es el que mejor se adapta a éstas. El beneficio de este tipo de reactores es su bajo costo de compra y mantenimiento así como su simple operación y control. Para el diseño del biodigestor se tomó en cuenta las velocidades de reacción encontradas durante la prueba piloto en las condiciones bajo las cuales se monitoreó dicha reacción. Se fijó además una concentración de grasas en la materia orgánica de salida que permitiese tanto un alto porcentaje de conversión respecto a la concentración inicial de grasas un

tiempo de residencia no tan largo. Con base en los resultados del modelo cinético de reacción creado a partir de los datos experimentales fue posible dimensionar el reactor necesario para el tratamiento de los desechos orgánicos seleccionados de Zoológico “La Aurora”. El reactor necesario fue dimensionado para poder tratar un total de 2.33 m³ de estiércol cada 15 días. Tomando en cuenta que la relación agua – estiércol fijada fue 1:1 el volumen del bioreactor se estableció en 5m³. Bajo estas condiciones se estarían generando 93.46m³ de biogás cada 15 días o 186.92m³ al mes.

5. Dimensionamiento de biodigestor de tanque agitado para Zoológico “La Aurora”. Partiendo del mismo modelo de cinética de reacción desarrollado a partir de los resultados de las pruebas pilotos se escalaron los resultados a un reactor que pudiese tratar el 100% de los desechos orgánicos generados en el Zoológico “La Aurora”. Según antecedentes del Zoológico la generación semanal de excremento en dicha institución asciende a 420 galones de los cuales aproximadamente el 70% proviene del recinto de elefantes, jirafas y cebras. Con base en esta premisa es posible suponer que los parámetros para el tratamiento de la totalidad de los desechos orgánicos será proporcional a los parámetros encontrados para el tratamiento de los desechos de elefante, jirafa y cebra.

Al escalar el bioreactor para 420 galones de desechos orgánicos se obtiene un digestor 7m³ que permitirá tratar la totalidad de desechos orgánicos generados el Zoológico. De acuerdo con la Tabla no. 8 los desechos tendrán un tiempo de residencia dentro del reactor por 15 días, lo que permitirá producir desde 261.55m³ de biogás al mes.

Con estos parámetros fue posible determinar además las dimensiones del bioreactor. Tomando en cuenta una relación altura y diámetro 2:1 el biodigestor debe tener una altura de 3.30 metros y una diámetro de 1.65 metros y un grosor de paredes de concreto de 45 centímetros, tal y como se observa en la tabla No.8 en la sección de resultados.

Adicionalmente, se diseñó para el requerimiento del biodigestor y la mezcla de desechos orgánicos y agua a tratar en éste el agitador necesario para poder permitir tener una reacción homogénea y evitar sedimentaciones. El agitador diseñado es un agitador de hoja sencilla debido a la baja viscosidad de la mezcla. Por otro lado, debido a que no se necesita una agitación violenta sino una homogenización la potencia del agitador es de 52.73Watts.

Tal y como se observa en la Ilustración No. 13 al dimensionar el reactor se seleccionó un diseño cilíndrico como el apropiado para poder utilizar materiales como concreto y block en las construcción del reactor; únicamente la parte exterior del tanque debería de ser de fibra de vidrio que permita realizar mantenimientos cuando sea necesario. Es necesario impermeabilizar correctamente las paredes del tanque ya que, debido a que el tanque se encontraría subterráneo, una filtración en las paredes implicaría un derrame de los reactivos a la tierra. Este tipo de diseño de tanques permite un buen mantenimiento del reservorio. Cabe mencionar que el biogás generado durante la reacción se almacenará en un reservorio externo, que puede ser una bolsa, por lo que el contenido de biogás dentro del biodigestor será mínimo.

6. Uso diario de reactor y mantenimiento. Durante el uso diario del reactor en el Zoológico deberá asegurarse al momento de recolectar los desechos no incluir piedras ni tierra ya que ambos no son degradables durante la reacción y únicamente modificarán el volumen del reactor; la adición recurrente de piedras y tierra provocará que los mantenimiento sean más frecuentes. Previo a la alimentación de los desechos al reactor se debe contar con la misma cantidad de agua que de desechos de modo que la alimentación sea 1:1 volumétricamente. Al alimentar el biodigestor, se debe purgar hasta llevar la solución, que se encuentra dentro del reactor, al nivel más alto. De este modo existirá un “sello de agua” que permita al biogás salir únicamente por la boquilla superior del biodigestor hacia el reservorio.

Tal y como se ha discutido el material de la parte superior del tanque es de fibra de vidrio para poder realizar mantenimientos preventivos al tanque de reacción. El mantenimiento debe consistir en lavados de agua y verificación de grietas y posibles fugas de las paredes al exterior; en caso existan deberá impermeabilizarse con materiales de construcción. De igual forma es necesario poder verificar cualquier fuga en las mangueras de transporte de biogás para garantizar que éste no escape al ambiente.

7. Seguridad y ambiente. Tanto al momento de la construcción del reactor como durante los mantenimientos se estarán realizando trabajos en espacios confinados. Esto implica riesgos generales como caídas de distinto nivel, caídas de objetos al interior mientras se está trabajando, malas posturas, entre otros; y riesgos más específicos como asfixia e intoxicación. Medidas preventivas a estos riesgos incluyen permisos de trabajo para poder operar en estos sitios, escaleras de apoyo, evaluación de la atmósfera a través de la medición de oxígeno, que no debe ser inferior a 21%, y equipo de protección personal que incluye casco, guantes, mascarilla y botas de punta de acero. El personal que

trabaja en este tipo de espacios, como el del reactor diseñado, debe estar capacitado para poder trabajar en este tipo de espacios. Puede consultarse la norma española NTP223 sobre “TRABAJOS EN RECINTOS CONFINADOS”.

Por otro lado la localización del biodigestor y mangueras de transporte de biogás deben estar debidamente señalizadas debido al riesgo de incendio por la alta inflamabilidad del gas combustible a producir y transportar. Medidas preventivas para este tipo de riesgo debe ser una correcta señalización, control de generación de chispas, control de generadores de calor o fuego en los alrededores y comunicación a personal y visitantes sobre estos riesgos. Para este tipo de riesgos puede también consultarse la normativa técnica ecuatoriana NTE INEN 2 260: 2010 que indica los “REQUISITOS PARA LAS INSTALACIONES DE GASES COMBUSITBLES PARA EL USO RESIDENCIAL, COMERCIAL E INDUSTRIAL”.

Tantas fugas de gases como fugas de desechos sólidos diluidos a través de las paredes del reactor pueden provocar también riesgos ambientales. En el caso de una fuga gas se estaría emitiendo un gas de efecto invernadero, metano, hacia la atmósfera, el cual es veintiocho veces más dañino para el efecto invernadero que el dióxido de carbono. De esta forma mantenimiento preventivo para fugas de gas será determinante no sólo para la eficiencia del equipo sino también para cualquier impacto negativo que se pueda tener en el ambiente. Por otro lado, una fuga de desechos sólidos diluidos de las paredes del digestor hacia el suelo también puede provocar la contaminación de aguas subterráneas que existan en los alrededores de los cimientos del digestor. Ambos tipos de fugas pueden prevenirse a través de mantenimiento preventivo que permita la identificación de desgastes en las mangueras o grietas en el material de construcción.

C. Módulo: Limpieza de biogás generado en el biodigestor

1. Carga inicial. El biogás generado en el proceso anaerobio de desechos orgánicos del Zoológico “La Aurora” específicamente el elefante y la jirafa, tiene una concentración promedio de 98.1ppm de sulfuro de hidrógeno, con un promedio de 16.87% en volumen de dióxido de carbono tras la finalización del módulo de limpieza del Megaproyecto realizado.

La Ilustración 16 que se presenta en la sección de resultados de este módulo describe la presencia de sulfuro de hidrógeno durante la generación de biogás.

Aumenta conforme se lleva a cabo la reacción, describe en qué momento la producción de biogás empieza a disminuir debido al agotamiento del sustrato. Se logró observar no solo con el volumen de H_2S producidos después de la primera carga de excremento, sino también debido a que el volumen de generación disminuyó. Desde el momento de la carga del excremento hasta el agotamiento transcurrieron un total de veinte días. Las mediciones iniciaron a partir del día 10^o debido a que previo a este día la concentración de H_2S es bastante pequeña.

De igual manera se controló el porcentaje de CO_2 presente en el biogás durante la primera carga, mostrando que éste incrementa con el tiempo y se mantiene a pesar del agotamiento de la generación del biogás.

Esta primera corrida se realizó con el objetivo de observar cómo se comportaba el biodigestor con la carga inicial de excremento, cuántos días duraba la generación de biogás hasta el agotamiento, cuánto volumen se generaba y así mismo la generación de los gases contaminantes que posee el biogás. Posteriormente, se iniciaron las cargas periódicas para activar la generación constante de biogás y mantener una producción de metano continua.

En la producción y utilización del biogás en equipos y artefactos tales como estufas o lámparas de gas se recomienda no sobrepasar una presencia de 150 ppm de H_2S , primero debido a que la presencia de dicho gas no permite la pureza del metano y disminuye la vida útil de equipo y materiales por la corrosión, además de presentar un olor característico a huevo podrido. De igual manera la presencia de CO_2 no debe sobrepasar el 10% para que nuestra combustión pueda ser eficiente y el poder calórico no disminuya.

2. Remoción de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono.

Para las siguientes pruebas se calculó el poder calorífico del biogás generado en el biodigestor. Se realizaron pruebas utilizando el biogás sin tratamiento de limpieza a una concentración de H_2S de 98 ppm y porcentaje de CO_2 de 14.5% y utilizando biogás con tratamiento de limpieza a una concentración de H_2S de 16 ppm y CO_2 de 8.9%. Para esta prueba se lograron retener en promedio 82 ppm de H_2S con un 83.67% de reducción de sulfuro de hidrógeno y 38.62% de dióxido de carbono. Se logró comprobar la influencia que tiene el dióxido de Carbono y el sulfuro de hidrógeno en el poder calorífico del biogás generado. Cabe mencionar que previo a la filtración el biogás contenía un porcentaje en volumen de metano de 42.4%, mientras que posterior al filtrado el porcentaje de metano aumentó a 49.1% reportado en medición directa sin contemplar el contenido de aire que interfiere.

Se quemó una cantidad conocida de biogás para calentar un litro de agua durante tres minutos. Primero se trabajó con el sistema completo armado que consta de un filtro de H_2S y uno de CO_2 , posteriormente se trabajó sin filtros para lograr determinar si la presencia de H_2S y de CO_2 puede afectar el poder calorífico del gas afectando su combustión al momento de utilizarlo en una estufa. Se dejó fluir la misma cantidad de biogás de $0.0276m^3$ durante los tres minutos, medida con un contador de gas y tomando en cuenta el cambio de temperatura del agua transcurrido ese tiempo se logró calcular la eficiencia térmica.

El poder calorífico calculado por este método para el biogás producido entrega valores aceptables para los parámetros establecidos para un biogás que se encuentra entre 4,500 y 5,600 kcal/ m^3 mientras que el biogás sin ser filtrado presenta un valor de poder calorífico por debajo del mínimo aceptable de un biogás eficiente para ser utilizado en combustión. Las pruebas muestran que aumenta aproximadamente 25% el poder calorífico de un biogás tratado con un kilogramo de óxido de hierro y un kilogramo de cal para remover el dióxido de carbono.

Físicamente se puede reconocer una llama de biogás tratado y una que no ha sido tratado, pues el color de la llama sin limpieza es de color gris claro, mientras que la llama azul posee las características de una combustión de biogás con previo tratamiento. (Ver anexo 4. Fotos del Megaproyecto realizado) En estas fotos se puede observar una llama de distinto color para cada combustión, además de tener dificultad para encender la ornilla.

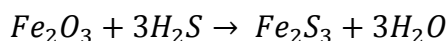
La reducción de CO_2 y H_2S incrementa el valor calorífico y lleva a una calidad del gas similar a la del gas natural que se utiliza hoy en día en las cocinas. Realizar un tratamiento de biogás con óxido ferroso limita el contenido de H_2S tras la formación de sulfatos insolubles, sin embargo es importante utilizar la cantidad necesaria de medio filtrante, ya que si se utiliza una mayor cantidad, esto puede inhibir el biogás, reduciendo el porcentaje de metano siendo éste inservible para su combustión y uso en equipos como estufas o lámparas de gas. Durante la prueba de poder calorífico se comprobó que el contenido de metano incrementó 6.42% en volumen.

La razón por la que se trata el biogás luego de ser generado y previo a ser utilizado es debido a que un contenido alto de gases contaminantes tales como dióxido de carbono o sulfuro de hidrógeno entre otros puede afectar el manejo del biogás más si éste desea ser transportado a largas distancias, ya que pierde presión y pureza. Además es importante incrementar el contenido energético del biogás como se muestra en los resultados anteriormente presentados.

Tomar nota que los valores para el poder calorífico que se presentan en este megaproyecto solamente demuestran cómo la reducción de gases contaminantes puede aumentar su valor y que el biogás generado en este proyecto se encuentra dentro del rango aceptable, pero no es un valor oficial para biogás, ya que las condiciones en las que se realizaron las pruebas no son ideales. Para obtener un valor comparable con la teoría se debe experimentar mediante una bomba calorimétrica a condiciones ideales y parámetros controlables.

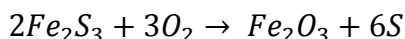
3. Limpieza de biogás. Una de las finalidades de este megaproyecto es presentar el diseño de un biodigestor óptimo para su utilización en el Zoológico “La Aurora”. A partir de los cálculos realizados de generación y mecanismo de reacción, el biodigestor genera con los desechos de jirafa y elefante una cantidad de biogás de 8.71 m³ al día para un biodigestor de 7m³.

Para lograr una limpieza del biogás basándonos en la reducción de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono para el biodigestor diseñado de 7m³ con una generación de 8.71 m³ de metano diarios, el método utilizado como se describe anteriormente es el de la absorción de Sulfuro de Hidrógeno por medio de óxido de hierro, el cual se basa en la siguiente reacción entre ambos compuestos:



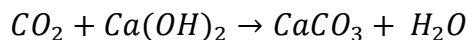
Como se pudo observar durante las pruebas experimentales el óxido de hierro actúa sobre el H₂S formando sulfuro de hierro, eliminándolo del biogás, reduciendo su concentración en el mismo. El biogás generado presenta un promedio de Sulfuro de Hidrógeno de 98.1ppm. Se calculó el volumen de Fe₂O₃ necesario durante 6 meses de uso para reducir el H₂S en un 86.03% como se logró durante las pruebas realizadas. Es necesario utilizar 14.09 kg de óxido de hierro durante 6 meses hasta que reaccione y se agote todo el medio filtrante y se deba cambiar el filtro.

Las ventajas encontradas en utilizar el compuesto de Fe₂O₃ es que éste no se disuelve al reaccionar con el Sulfuro de Hidrógeno. Cuando éste se agota puede removerse del filtro y dejar que el compuesto se oxide con el oxígeno en el ambiente cumpliendo con la siguiente reacción y regenerándose para utilizarse de nuevo.



Sin embargo, se considera mejor renovar toda la cantidad de óxido de hierro a los 6 meses, que reutilizarlo pues el compuesto se regenera, pero estos estudios no abarcan la eficiencia de dicha regeneración y si esto se cumple siempre.

De igual manera para la remoción de dióxido de carbono (CO_2) se utilizó una solución de agua con cal, la cual se basa en la siguiente reacción entre ambos compuestos:



La reducción de CO_2 incrementa el valor calorífico del biogás y minimiza las pérdidas de metano, logrando también una mejor combustión del biogás en una estufa o una lámpara de gas. El biogás generado presenta un promedio de dióxido de carbono de 16.87%. Inicialmente se logró reducir un 35.24% el porcentaje de CO_2 contenido en el biogás generado (Ver Tabla No.1). A pesar que con esta reducción las pruebas de poder calorífico que se realizaron dieron como resultado un buen rendimiento y uso del gas, se pensó en una manera de hacer más eficiente el uso de cal como lecho filtrante y reducir la cantidad de cal que se debe adquirir mensualmente para renovación del filtro. Para ello se aumentó el área de contacto del gas con el lecho filtrante por medio de pequeños orificios a lo largo de la manguera y se introdujo la misma por todo el diámetro del filtro. Tras las pruebas realizadas finalmente (Ver Tabla No. 2) se calculó el volumen de $Ca(OH)_2$ (cal) necesario durante un mes de uso para reducir el CO_2 en un 43.60% como se logró durante las pruebas realizadas para los 8.71 m³ de biogás generados en el biodigestor diarios. Es necesario utilizar 585.36 kg de cal para una remoción exitosa mensualmente.

Para la limpieza tanto del H_2S como el CO_2 , las reacciones anteriormente presentadas están limitadas por el equilibrio termodinámico. Para ambas remociones, las cantidades de los gases que se obtuvieron después de los filtros, cumplen con las cantidades requeridas para que el biogás pueda operar de manera óptima. Debido a que el CO_2 no contiene poder calorífico, un exceso de esto podría afectar en la llama y velocidad térmica del biogás, por lo que se requiere aproximadamente 10% de su contenido, logrando obtener experimentalmente un promedio de 9.51% lo cual se encuentra dentro del rango del máximo aceptado. Para el H_2S tras su limpieza en el filtro presentó un promedio de 13.7 ppm, lo cual se encuentra dentro del rango permitido de presencia no causando ningún peligro sobre la vida de aquellos que lo manejan a diario y poder corroer el equipo en el que se utilizará el biogás. Para ambos métodos no es necesaria una segunda etapa de limpieza.

El dato de kilogramos requeridos para la reducción de dióxido de carbono es bastante elevado para la cantidad de lecho filtrante que se requiere y un tanto elevado su precio al momento de echar a andar este proyecto. Entre las posibles fuentes de error están, el diseño del filtro utilizado para las pruebas. Por cómo estaba diseñado, éste no permitía tener mayor área de contacto entre el biogás y la cal dentro del filtro. Es mínimo su contacto, que no aplica tomar en cuenta la

eficiencia obtenida en los resultados para realizar cálculos de agotamiento del lecho filtrante, ya que éste no se agotaría por no tener contacto con todo el biogás.

Para ello se recomienda agregar al filtro de cal un tubo con pequeños hoyos a lo largo de la entrada de éste para distribuir el gas a lo ancho de todo el filtro y tenga mayor área de contacto con el lecho filtrante.

Para el cálculo de las dimensiones del filtro que se recomienda utilizar para la limpieza del biogás del Zoológico “La Aurora” se tomará en cuenta el caudal a tratar y la velocidad de ascenso de la corriente de gas metano que atraviesa el filtro compuesto por viruta de hierro.

Con los resultados obtenidos de las pruebas con los filtros se utilizaron para estimar el tamaño adecuado de los filtros a utilizar necesarios para el biodigestor propuesto para el Zoológico “La Aurora”. Para un período de 6 meses sería necesario un filtro de hecho con 14.09 kg de Fe_2O_3 con un tiempo de residencia de 13.44 segundos para una mejor limpieza. Para el filtro de limpieza de CO_2 se recomienda durante un período de un mes utilizar 585.36 kg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en con un tiempo de residencia de catorce minutos.

Como se puede observar en los resultados, la utilización de cal para este Megaproyecto no es un método eficiente, pues requiere mucha cantidad de medio filtrante, mucho tiempo de residencia y su eficiencia según las pruebas realizadas es muy escasa.

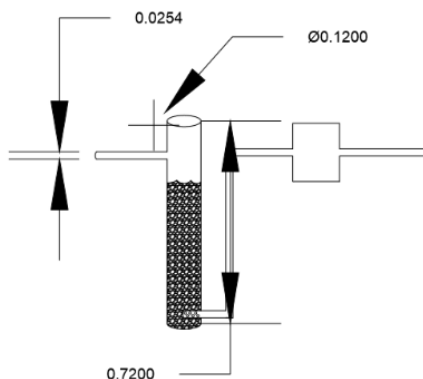
Los filtros que se proponen es este módulo de Megaproyecto cuenta con una entrada de la tubería del del biogás proveniente del biodigestor. Esta tubería debe ingresar por la parte inferior del filtro para lograr mayor efecto y remoción de los gases contaminantes. Para trabajar con los filtros se requiere de un compresor para ayudar al biogás la fuerza de presión.

A la entrada del filtro se coloca un tubo perforado como una flauta, con pequeños agujeros para provocar mayor distribución del gas dentro del filtro y poder tener una mayor área de contacto. Se recomienda que el filtro para la limpieza de dióxido de carbono contenga varios tubos perforados en su interior a lo largo de todo su diámetro para mayor área de contacto del gas, mientras que para el sulfuro de hidrógeno puede abarcar todo su diámetro o bien solo en la entrada.

Los filtros no trabajarán continuos, pues primero se almacenará el biogás en una bolsa sin reducirles el CO_2 y el H_2S , posteriormente se comprimirá el biogás con el compresor, pasándolo por el filtro para su limpieza, únicamente cuando éste se necesite y los equipos de combustión estén en funcionamiento.

A continuación, se presenta un modelo de filtro de óxido de hierro para su utilización en la limpieza del biogás generado con desechos orgánicos en el Zoológico “La Aurora”.

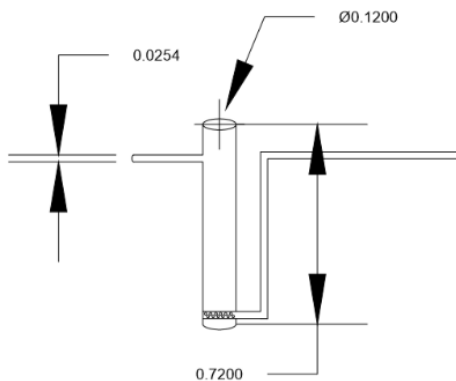
Ilustración 22: Modelo de filtro de óxido de hierro



Se recomienda que éste se posicione directamente después del compresor y del contador, para ser el primer elemento que se remueva. Posteriormente, se colocará el filtro para la limpieza y reducción del dióxido de carbono. Este es un lecho líquido y tras las pruebas realizadas, se recomienda colocar un tubo de entrada con orificios a lo largo de todo el diámetro, esto con el objetivo de dispersar todo el gas entrante por todo el lecho filtrante y tenga contacto con el mismo. De esta manera podemos garantizar que el gas podrá ser removido con mayor eficiencia y el lecho filtrante se agotará según los cálculos realizados. (Ver Anexo B, cálculo No.8)

A continuación, se presenta el modelo propuesto para el filtro de cal para la reducción de dióxido de carbono a utilizar en el Zoológico “La Aurora”.

Ilustración 23: Modelo de filtro de cal



Sin embargo, también se propone la cotización de filtros que ya contienen pellets de óxido de hierro y cuyas especificaciones indiquen la posibilidad de tratamiento de 1600 m³ de biogás para así lograr una vida útil del filtro de seis meses de igual manera. (Ver Anexo D)

D. Módulo: Análisis y propuesta de mejora de los procesos de trabajo y viabilidad económica de la instalación de un biodigestor en el Zoológico “La Aurora”.

1. Procesos de recolección. En el análisis de los procesos de recolección de los desechos orgánicos se realizó una estandarización por medio de estudio de tiempos y por medio de los diagramas de operaciones. La situación actual de recolección la realizan los cuidadores de los recintos, todos los días a las 7:00 am, se realizó un estudio de tiempo sobre este proceso de recolección para poder determinar un tiempo estándar de recolección de desechos y sobre esto conocer cuánto tiempo le dedicarán al biodigestor. Para este estudio de tiempos de la situación actual se hicieron varias mediciones y se apoyó al programa *Pro Time Estimation*, utilizando la opción de “stopwatch”, ya que también se puede utilizar la opción de video.

En el estudio de tiempos de la situación actual, los desechos van almacenados en unos botes de desecho que están Aproximadamente a 6 metros de distancia, a diferencia del otro estudio de tiempos de la situación actual donde los desechos van almacenados en el reactor de 7m³. En esta comparación podemos observar que el tiempo de estándar de recolección es de la situación actual es de 42.39 minutos y el estudio de tiempos con la situación propuesta tiene un tiempo estándar de 51.74 minutos, esto significa un 20.52% de aumento en el tiempo de operación de la recolección de los desechos. Este resultado se debe a que la situación propuesta tiene una actividad más, que es la purga proporcional de los desechos, a los desagües, y tiene una distancia doble hacia los puntos de desecho. Estos tiempos estándar es una medida para conocer en promedio el tiempo estandarizado para este proceso, pero hay que recordar que pueden existir variaciones en tiempo dependiendo la cantidad de desecho y los viajes requeridos hacia el punto de desecho en ambos proceso de recolección.

Cuadro 19. Comparación de estudio de tiempos en ambos procesos

Estudio de tiempos comparación		
	Actual	Propuesto biodigestor
Tiempo estándar (min)	42.93	51.74
Valor Agregado	86.26%	80.86%
No Valor Agregado	13.75%	19.15%

El valor agregado en ambos procesos, se debe a todas las operaciones que si agregan valor en el tiempo estándar determinado, el tiempo de valor no agregado son las acciones que no generan valor para la realización del proceso, como el transporte. En el proceso actual, tiene un 86.26% de tiempo de valor agregado esto sería 37.03 minutos de valor agregado en todas las operaciones y cuenta con un 13.75% de valor no agregado, en tiempo sería de 5.90 minutos. Este tiempo de valor no agregado se debe a los transportes en el proceso de recolección.

En el proceso propuesto, tiene un tiempo estándar de un 20.52% mayor al actual; se determinó un 80.86% de tiempo de valor agregado y un 19.15% de tiempo de valor no agregado. En tiempo es proporcional a 41.83 minutos en las operaciones de valor agregado y un 9.90 minutos en operaciones que no aportan ningún valor, de un 51.74 minutos de tiempo estándar en las operaciones de desechos.

Cuadro 20. Análisis de distribución de tiempos

Análisis Valor Agregado y Valor No Agregado	Actual	Propuesto	% Aumento
Tiempo de Valor Agregado	37.03	41.836964	12.98%
Tiempo de Valor No Agregado	5.90	9.90821	67.85%
Total tiempo estándar	42.93	51.745174	

En el Cuadro no.11, se puede observar que el tiempo de valor no agregado es el que aumenta significativamente por la distancia al biodigestor, un 67.85%. En las actividades de valor agregado aumenta en 12.98%, un porcentaje relativamente bajo. Esta variación se debe a la operación extra y a variaciones en tiempo de operaciones.

En los diagramas de operaciones del proceso actual y el propuesto, se realizó con base en los resultados de los estudios de tiempos para cada proceso. En los estudios de tiempos nos dio un tiempo estándar para cada operación, como se puede observar en las figuras 7 y 10, en la parte de resultados.

2.Factibilidad financiera. En la determinación de costos, se utilizó el sistema de acumulación de costos. Sin embargo, por la simplicidad del proceso de producción, no existían inventarios en ningún tiempo determinado. Por el cual, los costos de los artículos empleados en producción van a ser iguales a nuestro estado de costos totales. Los costos directos de fabricación se deben solamente el mantenimiento del biodigestor. El mantenimiento se debe a un filtro de Fe_2O_3 que se debe de cambiar dos veces por año porque tienen un tiempo de duración de 6 meses. Este costo anual se sacó por mes para poder distribuirlo en los costos. El biodigestor utiliza una proporción de agua diaria, pero esta no tiene ningún costo porque el Zoológico “La Aurora” consta con una planta de aguas residuales donde sería ideal para el uso del biodigestor.

En la mano de obra directa se utilizó como base el salario de un cuidador del Zoológico “La Aurora” con todas sus prestaciones correspondientes. Esta mano de obra se dimensionó con el tiempo que el operario le dispone al biodigestor, porque su puesto cuenta con muchas actividades que no le agregan valor al proceso de generación de biogás. Es por eso que se utilizó la relación hora-hombre para poder distribuir el tiempo que el cuidador dispone para operar el biodigestor. Este tiempo de una hora se hizo en relación con el estudio de tiempos de la situación propuesta.

Para conocer el costo unitario de un metro cúbico de biogás o costo por BTU, se tuvo que conocer el potencial de generación mensual del reactor para saber cuántos m^3 de biogás se podría llegar a producir con la demanda total del desecho. Los costos de generación de biogás se pueden observar en la Tabla No. 6 de costos unitarios de medidas.

En la factibilidad económica fueron necesarios conocer estos costos para conocer el monto anual de los costos de operación. Para continuar con la determinación de factibilidad económica se determinó una TMAR a partir de la tasa inflación anual y la tasa líder de una cuenta de ahorro, información proporcionada por el Banco de Guatemala. La TMAR se determinó para poder decidir sobre la tasa interna de retorno según los criterios explicados en el marco teórico.

Según el artículo 34 y 35 de la Ley de ISR de Guatemala se utilizó el método de línea recta para el cálculo de la depreciación. La depreciación se hizo de un 20% anual o a un plazo de 5 años. El inciso 3 del artículo 35, nos indica el porcentaje a utilizar para las instalaciones no adheridas a los inmuebles.

Los ingresos para este análisis se tomaron con la venta del biogás potencial a generar y con los ahorros de recolección de desecho. Según precios cotizados en Guatemala por la empresa *Eco-Procesos* el costo de recolección es de 0.10\$ por libra no tratada. Los ingresos se deben más a los ahorros del proyecto que a los ingresos por venta de biogás. Por motivos de confiabilidad no se nos otorgó las cotizaciones formales de las empresas mencionadas como EnerGetic y Ecoprocesos.

Se realizaron varios escenarios para conocer hasta donde podría aguantar el proyecto financieramente, cambiando variables dependientes como el precio por libra de recolección y la cantidad de desecho animal mensual, así poder determinar en qué punto el valor presente neto fuera cero. En el primer escenario no se cambió ninguna variable y se puede observar según el estado de resultados que el proyecto es económicamente viable por los ahorros de recolección. En el escenario 2, se determinó de la misma manera una reducción de la variable del costo de recolección y para que el proyecto no agregue valor económico al Zoológico "La Aurora", el costo de recoger los desechos es de 0.058338981 \$ por libra, un 45.11% de reducción. En el tercer escenario, para que el valor presente neto fuera cero con la variable dependiente del desecho o materia prima, los animales del Zoológico tienen que dejar de producir desecho en un 41.66%, en kilogramos sería 51.99 al día que se deben de dejar de producir, para que el proyecto no agregue ningún valor a nuestros flujos de efectivo. En si el proyecto da hasta un 41.66% de reducción de las variables mencionadas.

Cuadro 21. Comparación de escenarios

Indicador	Escenario más probable	Escenario pesimista	Escenario pesimista
TIR	56.24%	8.06%	8.06%
Período de Recuperación	1.59 años	3.99 años	3.99 años
Valor Presente Neto	GTQ107,152.36	GTQ-	GTQ-

Módulo: “Modelo de Negocios para la producción y venta de energía renovable a partir de biomasa en el Zoológico “La Aurora”

1. Proyectos mutuamente excluyentes. La diferencia significativa en los proyectos de generación e iluminación en comparación con estufas de biogás radica principalmente en que el precio Kwh presenta tendencia a disminuir dado al término de contratos.

La producción de energía eléctrica es un sector industrial altamente competitivo. Los precios de venta del suministro de energía, se realizan por medio de licitaciones y subastas entre las compañías privadas para la utilización de las redes de suministros de empresas eléctricas de Guatemala. Anteriormente muchos contratos de generación de energía renovable estaban indexados al precio del búnker, lo que no representaba diferencia económica significativa, sin embargo reducía la contaminación. Con el surgimiento de nuevas tecnologías, el precio de generación presenta una tendencia descendiente lo que a largo plazo reducirá significativamente el precio Kwh a pesar de que algunos contratos firmaron nuevamente indexados al precio del carbón. El costo de gas propano (precio al cual indexamos los ingresos por implementación de estufas de biogás) presentan fenómenos cíclicos de aumento atribuyéndose al comportamiento internacional en el precio del galón de gas licuado, representado ingresos mayores cada año para el Zoológico.

El 27 de diciembre de 2013, el Diario de Centroamérica (Diario Oficial), publicó el Acuerdo Gubernativo No. 537-2013, el cual fija los nuevos salarios mínimos incrementados en un 5%, mostrando un aumento en los costos por capital humano para cualquier organización. A pesar de que el tiempo de mano

de obra para producir cada una de las propuestas varía con base en el número de tareas y requerimientos de cada etapa, dichos incrementos se ven reflejados en los Estados de Resultados para cada proyecto, aumentando cada año con base en el anterior en comparación con la producción de biogás la cual se considera constante, conduciendo a utilidades menores cada año dado a los ingresos de producción constantes y los costos variables incrementales.

Para los proyectos de generación de energía e iluminación con lámparas de biogás aunque un aumento constante en los precios Kwh (tarifa social) de la energía eléctrica representaría un impacto positivo en el valor presente neto, dado al bajo volumen de producción y alto costo de inversión se necesitaría a su vez un aumento significativo en la producción para volver cualquiera de estos proyectos viables.

El horizonte de evaluación de cada proyecto fue con una vida útil de 10 años, con base en la depreciación del mismo.

El proyecto de menor inversión es el de “iluminación por lámparas de biogás” con un costo de inversión inicial de Q. 79,624.60. Para que un proyecto sea aceptable el VPN de la inversión debe ser >0 , con base en dicha regla esta opción no es una alternativa rentable para el inversionista. Buscando la rentabilidad del mismo, si aumentamos el volumen de desechos orgánicos aumentan sus costos por m^3 a la vez, dado a que este dato (costo m^3) fue proporcionado por el área de Ing. Industrial del proyecto estando fuera de nuestro alcance para mejorarlo, por lo que no es una opción viable. Una variable que está en nuestro alcance es la potencia deseada por luminaria dejando el consumo biogás m^3/h constante de 0.07. Maximizando para lograr un $VPN=0$ es necesario una potencia por lámpara de 0.22 Kw siendo constantes el resto de variables. Pero esto es una opción ideal por lo que el proyecto se descarta desde el inicio.

La inversión en “estufas de biogás” presenta un VPN Q 400,774.95 y dado a que $VPN>0$ inicialmente se vuelve una opción viable de inversión ya que indica que no sólo se recuperaría la inversión sino también que dicho negocio cumple y sobrepasa las expectativas de negocio esperadas. En caso el Zoológico financiara el proyecto, las tasas de interés anual circulan entre un 10% a 18% (dependiendo el monto de la inversión y condiciones de pago), dado a que la $TIR=76\%$, demuestra que aún con dicho financiamiento el proyecto cubrirá los gastos de financiamiento incurridos.

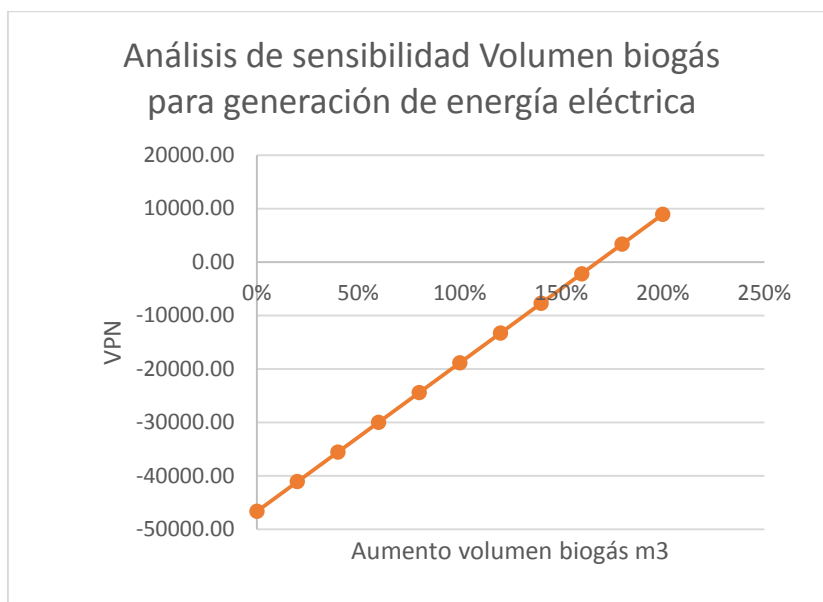
Una tercera opción es la “generación de energía eléctrica a partir de biogás” presentando un $VPN<0$, por lo que en la inversión adicional no justifica que sea mejor alternativa en comparación con el proyecto B. A continuación se realizaron

análisis de sensibilidad para determinar cuándo el proyecto se volvería rentable variando volumen de biogás producidos y producción de energía eléctrica.

Tabla 42: Análisis de sensibilidad volumen m³ de biogás para alternativa de generación de energía eléctrica
(VPN expresado en Quetzales)

Volumen m ³	0%	20%	40%	60%	80%	100%	120%	140%
VPN	-46672.12	41113.69	35555.27	29996.85	24438.43	18880.00	13321.58	7763.16

Figura 18: Gráfica análisis de sensibilidad volumen de biogás



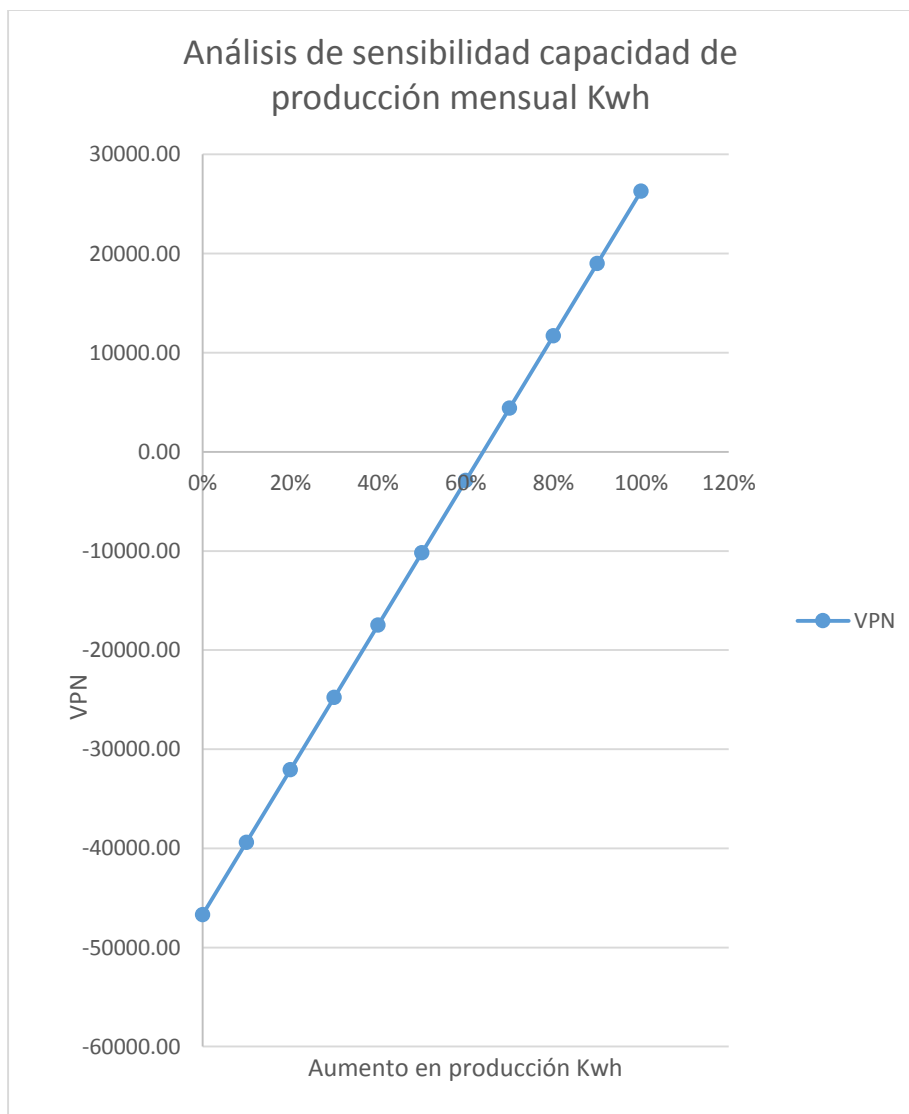
Este análisis se llevó a cabo aumentando porcentualmente el m³ de biogás comparado con el VPN que cada aumento generaría. Se observa una pendiente inclinada positivamente, lo que demuestra que el “Valor Presente Neto” es muy sensible al cambio en dicho parámetro ya que al aumentar el parámetro (volumen m³) aumenta el valor neto de la inversión. Con base en el presente análisis la alternativa se vuelve viable si la cantidad de biogás aumenta más de 165%, tasa con la cual se recuperaría únicamente la inversión, por lo que si desea obtener ganancias es necesario un incremento mayor. Estos comparativos se realizaron cambiando solamente una variable, dejando constantes las otras. Si el Zoológico desea realizar este proyecto se recomienda mejorar su sistema de recolección, dado a que mucha materia prima se pierde por falta de procesos estandarizados y horarios correctamente definidos, recolectando según la disponibilidad de empleados y no al volumen de desechos.

Otro factor a considerar es la eficiencia del generador, a continuación se analiza el efecto de las variaciones de la producción de Kwh en comparación con el VPN para dicho cambio.

Tabla 43: Análisis de sensibilidad capacidad de producción Kwh mensual

Producción	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
VPN	46672.68	39375.27	32077.87	24780.46	17483.06	10185.66	2888.25	4409.15	11706.55	19003.96	26301.36

Figura 19: Gráfica análisis de sensibilidad producción mensual Kwh



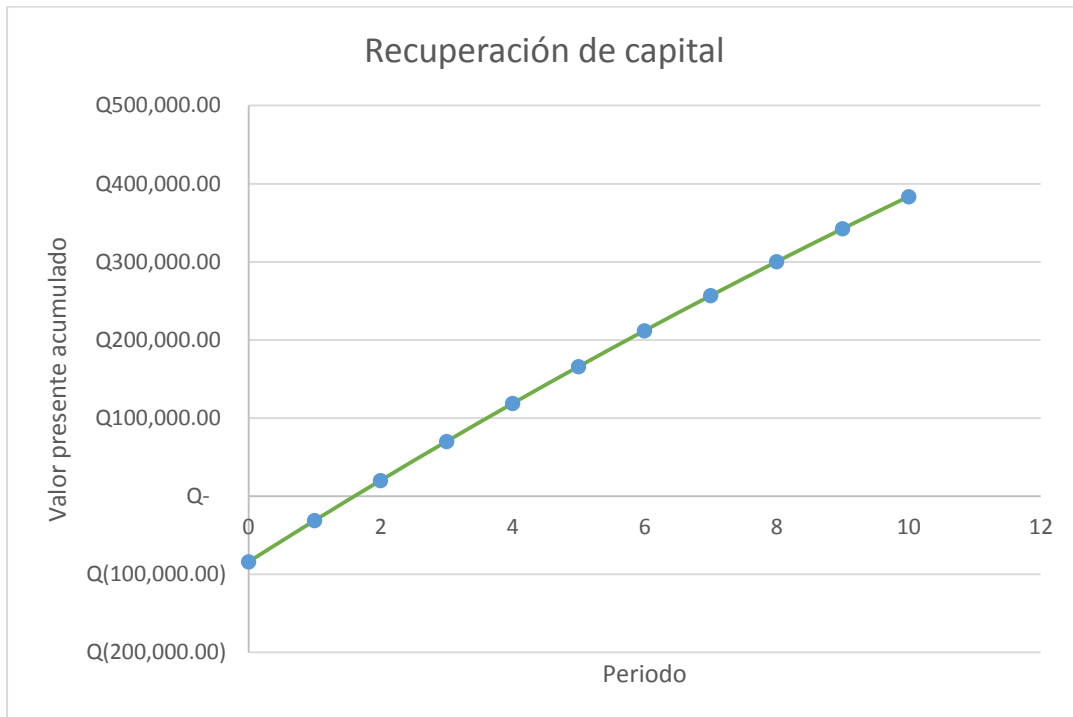
2. Modelo de negocios. Dado a que el precio Kwh es una variable independiente de la operación del Zoológico, un parámetro que está bajo su control es la cantidad de Kwh producidos mensualmente. Dejando fijo el resto de variables, el horizonte presenta resultados positivos. Para que dicha inversión sea justificable, con base en el análisis de sensibilidad anterior, el Zoológico debe de aumentar en más de 60% sus Kwh producidos, siendo la producción ideal 918.91 Kwh mensuales, pudiendo así recuperar su inversión. Un aumento del 60% hace que el proyecto sea viable si este es financiado con capital propio, por lo que si desea utilizar financiamiento externo el aumento debe ser mayor. Entre las opciones recomendadas para lograr dicho aumento se encuentra mejorar la eficiencia del generador dado a que el equipo cotizado tiene un consumo de 1.40 m³ de biogás/hora.

Independientemente del proyecto seleccionado la inversión fija (biodigestor, equipo de monitoreo, filtros, Fittings y mangueras, etc.), es alta por lo que para que sea atractiva para los inversionistas internos se presenta un análisis de recuperación de capital tomando como base la opción más rentable “estufas de biogás”

Tabla 44. Periodo de recuperación inversión en "Estufas de biogás"

Nper	Inversión Inicial	Beneficio Anual	Costos	FE Neto	Valor Presente	VP Acumulado
0	Q (83,953.26)			Q (83,953.26)	Q (83,953.26)	Q (83,953.26)
1		Q 69,005.66	Q (11,961.13)	Q 57,044.53	Q52,789.68	Q (31,163.58)
2		Q 72,164.66	Q (12,198.35)	Q 59,966.31	Q51,354.37	Q 20,190.80
3		Q 75,481.61	Q (12,447.43)	Q 63,034.18	Q49,955.26	Q 70,146.06
4		Q 78,964.41	Q (12,708.96)	Q 66,255.45	Q48,591.66	Q 118,737.72
5		Q 82,621.34	Q (12,983.57)	Q 69,637.77	Q47,262.87	Q 166,000.58
6		Q 86,461.13	Q (13,271.91)	Q 73,189.21	Q45,968.18	Q 211,968.76
7		Q 90,492.90	Q (13,574.67)	Q 76,918.23	Q44,706.90	Q 256,675.66
8		Q 94,726.26	Q (13,892.57)	Q 80,833.70	Q43,478.32	Q 300,153.98
9		Q 99,171.29	Q (14,226.36)	Q 84,944.93	Q42,281.74	Q 342,435.71
10		Q 103,838.58	Q (14,576.84)	Q 89,261.73	Q41,116.46	Q 383,552.17
VPN					<u>Q 383,552.17</u>	

Figura 20: Periodo de recuperación inversión de capital



Con una tasa de retorno del 8.06% con base en una tasa de inflación del 3.41% y una tasa de interés líder cuenta de ahorro, el cambio de signo en el valor presente acumulado representa que a después del primer año el Zoológico recuperará la inversión si invierte en este negocio según los ingresos por generación y costos proyectados.

VIII. CONCLUSIONES

- La mezcla de estiércol de elefante (50%) y jirafa (50%) sin agua (No. 5) produjo el mayor porcentaje de metano (88.21%).
- La carga microbiológica de las mezclas fue la siguiente: J/E/A (6.6×10^8 bacterias/ml), E/A (4×10^8 bacterias/ml), J/A (6.6×10^8 bacterias/ml), J/A (3.6×10^8 bacterias/ml) y J/E (6.6×10^8 bacterias/ml). Según la prueba de Kruskal-Wallis la carga microbiológica es igual (4 g.l., $P=0.109$, $p>0.05$) en todas las mezclas. Con la prueba U de Mann-Whitney se determinó que la carga microbiológica es igual ($p=0.114$, $p>0.05$) en la mezcla No. 2 y 3.
- Todas las mezclas presentaron mayor porcentaje de área del pico característico de metano (85-88%) en GC-FID, excepto la mezcla 2 (E/A) presentó el menor porcentaje (62%). Todas presentaron un valor insignificante (menos de 2%) del porcentaje de área del pico característico del dióxido de carbono. Todas presentaron menos del 20% del área del pico característico de ácido sulfhídrico, donde la mezcla 2 (E/A) presentó el mayor porcentaje (18%).
- Las mezclas de J/EJA (No. 1), J/A (No. 4) y E/J (No. 5) presentaron menor porcentaje de ácido sulfhídrico (menos de 9.5%).
- El inóculo bacteriano no fue suficiente para incrementar la producción de biogás en las mezclas experimentadas.
- La carga microbiológica no influye en la composición del biogás pero es adecuado que sea alta y mantenerla constante para que el volumen de biogás y metano que se produce sea alto.
- El estiércol de elefante no es útil para iniciar el proceso de digestión anaerobia y producción de biogás, pero sí tiene efectos positivos usándolo como un aditivo (co-digestión).
- El estiércol de jirafa es útil para el inicio del proceso de digestión anaerobia y alta producción de biogás y metano.
- La medición de las propiedades físicas de los desechos orgánicos seleccionados del Zoológico “La Aurora” dan como resultado una densidad

promedio de 549.47 kg/m³, que permite determinar una generación de desechos sólidos orgánicos de 0.22 m³ o 120.8 kg por día en el Zoológico “La Aurora”.

- Los desechos orgánicos seleccionados, generados en Zoológico “La Aurora” presentan una concentración promedio de 5.63 ± 0.27 % grasas, 10.18 ± 1.34% proteína, 77.34 ± 0.21 % de sólidos totales, 22.67 ± 0.11 % de sólidos volátiles y 1990.5 ± 0.26 DQO que permite determinar un potencial de generación de metano de 0.07 m³ biogás/kg de estiércol.
- El reactor seleccionado para la biodigestión anaeróbica de los desechos orgánicos totales generados en Zoológico “La Aurora” es un reactor de tanque agitado, intermitente, cilíndrico, de un volumen de 7 m³, 1.65 m diámetro y 3.30 m de alto que operará a con un tiempo de residencia de 15 días a una alimentación diaria de 0.22 m³ de desechos orgánicos al día a una relación desechos orgánicos - agua 1:1.
- A través de absorción, utilizando 14.09kg de óxido de hierro es posible filtrar durante 6 meses 1567 m³ de biogás reduciendo un 86.03% su contenido de sulfuro de hidrógeno llevándolo a 13.7 ppm, concentración óptima para su utilización en equipos.
- A través de un método de absorción utilizando 585.36kg de hidróxido de calcio (cal) es posible filtrar durante un mes 261.3 m³ de biogás reduciendo un 43.60% su contenido de dióxido de carbono llevándolo a 9.51% en volumen, contenido óptimo para su combustión.
- Por medio de una limpieza de biogás con óxido de hierro e hidróxido de calcio, reduciendo los niveles de H₂S y CO₂ se logra incrementar el volumen de metano un 6.42%, aumentando un 25% el poder calorífico de la combustión del gas.
- Se concluye en una estandarización de proceso de recolección de desechos orgánicos con un tiempo estándar de 42.93 minutos para el proceso actual y 51.74 minutos para el proceso propuesto, con un aumento del 20.52% y con una operación más para el proceso propuesto.
- En los tiempos estándares de recolección de los desechos orgánicos se obtiene que el proceso actual costa de una distribución de 86.26% de valor agregado y 13.75% de valor no agregado para las tareas del proceso de recolección. El proceso propuesto con el biodigestor instalado consta con

una distribución de 80.86% de valor agregado y 19.15% de valor no agregado para el tiempo de proceso de recolección de los desechos orgánicos del Zoológico “La Aurora”.

- Los costos de operación anuales del biodigestor son de GTQ 6,751.75 anuales, con un costo unitario de metro cúbico de GTQ 2.15. El costo de operación es básicamente la inversión inicial donde ya viene incluida la instalación del biodigestor con un valor inicial de GTQ 76,600.00.
- El proyecto es económicamente viable debido a los ahorros por recolección que por el ingreso de venta de biogás. Se determinó una tasa interna de retorno de 56.24% y con el costo de oportunidad de la TMAR de 8.06% es factible económicamente. El valor presente neto es de GTQ 107,152.36.
- El proyecto es económicamente viable hasta una reducción de 41.66% de desechos producidos por los animales del Zoológico “La Aurora” y de los costos de recolección de los desechos orgánicos.
- El monto por energía eléctrica mensual es de Q 100,000.00, incluyendo iluminación interna, externa y consumo de equipos.
- Los proyectos propuestos como alternativas para el uso del biogás a generar son: Generación de energía eléctrica, iluminación por lámparas de biogás y uso de metano en estufas de biogás para “Comiplaza chapina”.
- De los proyectos mutuamente excluyentes, la alternativa más rentable es la implementación de estufas de biogás.
- Dado a la responsabilidad social ambiental que fomentan muchas empresas, se recomienda gestionar financiamiento para el proyecto con los patrocinadores potenciales descritos en el documento.
- Si se desea volver rentables las alternativas de generación de energía e iluminación por biogás se debe de aumentar el volumen de desechos orgánicos o comprar equipo más eficiente.
- La recuperación de capital del proyecto de “Estufas de biogás” se logra a partir del primer año.

- El 100% de la muestra entrevistada (restaurantes Comiplaza) estarían dispuestos a cambiar el uso de gas propano por otro tipo de combustible.
- Por medio de las charlas educativas el Zoológico atenderá un mercado con potencial siendo este los niños que comprenden entre ocho a quince años, dado a que la mayoría de conferencias que ofrece están enfocadas para segmentos menores.
- El mercado objetivo para la venta de bonos de carbono es el mercado voluntario dado a que al regulado ya solo pertenece Europa y dicho continente tiene hasta el próximo año para dar respuesta si reitera o no su compromiso.

IX. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar las mismas pruebas con mezclas de estiércol otro tipos de animales que se encuentran en el Zoológico y realizar pruebas donde haya co-digestión del estiércol con otros desechos orgánicos vegetales y de cocina para determinar si aumenta la eficiencia de producción de biogás.
- Se recomienda agregar un inóculo de lodos activados de otros biodigestores funcionando o de estiércol de vaca o cerdo para iniciar el proceso de biodigestión de desechos orgánicos y monitorear si el inóculo agregado incrementan la eficiencia de producción de biogás y metano.
- Se recomienda utilizar estándares de metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico en la cromatografía de gases para poder cuantificar dichos componentes en las muestras de biogás y realizar la cuantificación a lo largo del proceso de biodigestión.
- Se recomienda analizar el gas que se genera mediante el *GasPak* dentro de la caja de anaerobiosis para determinar si contiene los componentes necesarios para crear ambiente anaerobio y usar una cepa anaerobia ATCC para verificar el crecimiento de microorganismos anaerobios en la caja de anaerobiosis.
- Se recomienda realizar mayor número de muestreos para la estimación de la densidad poblacional bacteriana con el Número Más Probable en el análisis microbiológico y así las pruebas estadísticas pueden presentar mayor validez.
- Se recomienda realizar un análisis poblacional (ecológico) de las bacterias anaerobias presentes en la materia prima mediante técnicas moleculares e identificar los microorganismos metanogénicos presentes en la materia prima (excretas). Principalmente del excremento de jirafa para identificar la riqueza bacteriana que produce altos porcentajes de metano y compararlo con otro tipo de excrementos productores de metano.

- Se recomienda utilizar una campana de anaerobiosis completa para el cultivo de microorganismos metanógenos para completar el análisis microbiológico.
- Se recomienda realizar, a largo plazo, investigaciones de ingeniería genética donde se evalúe transformar una bacteria anaerobia o metanogénica para que incrementen el metabolismo de metano y así volver más eficiente la producción de biogás.
- Determinación de velocidad de reacción y generación de modelo de cinética enzimática de fermentación anaeróbica de los desechos orgánicos generados en Zoológico “La Aurora” al adicionar lodos de agua residuales generados dentro de la misma institución.
- Determinar la posibilidad de producir compost a partir de los subproductos líquidos de la fermentación anaeróbica de los desechos orgánicos generados en Zoológico “La Aurora” a través de los análisis químicos y microbiológicos para su utilización para el mantenimiento de áreas verdes de la misma institución.
- Determinación de tipo y grosor de concreto a utilizar para la construcción de reactor STR diseñado para el tratamiento de los desechos orgánicos generados en Zoológico “La Aurora” a través de una fermentación anaeróbica.
- Desarrollo de un sistema de gestión OSHAS 18000 para el establecimiento de documentación, procesos y controles de seguridad durante la operación de producción de metano a partir de la fermentación anaeróbica de la totalidad de desechos orgánicos de Zoológico “La Aurora”.
- Se recomienda considerar otra metodología más económica para la reducción de CO₂ en el biogás generado con desechos orgánicos del Zoológico “La Aurora”, ya que 585.36kg de cal mensuales representan una alta inversión para la utilización del biogás.

- Un diseño de filtro para la reducción de CO₂ que incluya más área de contacto con el lecho filtrante incluyendo agitación como parte incorporada al filtro para obtener mayor eficiencia del filtro y aprovechar hasta su agotamiento.
- Comprar un filtro para la reducción del sulfuro de hidrógeno ya completo con la capacidad de tratamiento para 1600m³ de gas, pues es más fácil de implementarlo.
- Realizar pruebas para medición del poder calorífico del biogás generado en el biodigestor utilizando desechos orgánicos del Zoológico “La Aurora” por medio de una bomba calorimétrica y condiciones ideales, ya que los resultados mostrados en este trabajo solamente demuestran el incremento que se puede obtener tras una limpieza de los gases contaminantes.
- Se recomienda renovar el lecho filtrante de los filtros a utilizar según especificaciones descritas en este trabajo (Ver Tabla No.9) para un mejor rendimiento del biogás generado en el biodigestor utilizando desechos orgánicos del Zoológico “La Aurora”. Estos datos se calcularon según eficiencia y agotamiento del lecho filtrante.
- Sobre la parte del análisis y estandarización de procesos, para similitudes de proyectos de la misma magnitud se recomienda realizar más corridas de estudio de tiempos con ambos procesos de recolección. Esto ayudara en la determinación de un tiempo estándar de proceso con más precisión y con menos variación. Ambos procesos presentan diferentes situaciones dependiendo el recinto y es por eso que existen variaciones en el tiempo estándar.
- Se recomienda establecer un tiempo estándar por cada recinto porque muchas veces no es lo mismo limpiar el recinto de un elefante que el recinto de un animal mamífero de la mitad de su tamaño. El tiempo estándar dependerá de los desechos producidos por el animal. En este proyecto se tomó estandarizado para generalizar el proceso de recolección.
- Un aspecto que se debería de tomar en cuenta para estudios posteriores del análisis financiero son diferentes tipos de inversión. Se recomienda utilizar inversiones de biodigestores con diferentes calidades, como por ejemplo biodigestores más artesanales y biodigestores de alta tecnología

X. BIBLIOGRAFÍA

1. Abbasi, T., & Colaboradores. 2012. *BiogásEnergy* (Primera ed., Vol. 2). Springer.
2. Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., y otros. 200. *Biogás Handbook*. (U. o. Esbjerg, Ed.) Denmark.
3. Atares, L. 2009. Determinación de la densidad de un líquido con el método del picnómetro. Obtenido el 25 de mayo de 2014, de:
<http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12655/11.%20Art%C3%ADculo%20de%20Determi%20naci%20n%20de%20la%20densidad%20de%20un%20l%20qu%20ido%20con%20el%20m%20t%20odo%20del%20picn%20metro.pdf?sequence=1>
4. (4 de 10 de 2014). Obtenido de <http://www.encyclopediainanciera.com/finanzas-corporativas/tasa-interna-de-retorno.htm>
5. Blanco, Daniel. 2011. «Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost». Tesis Universidad De León. 287 págs.
6. Bishopp, K. (s.f.). *Ehow en español*. Obtenido de http://www.ehowenespanol.com/son-gases-metano-butano-propano-info_43879/
7. CNEE. (s.f.). *Calculadora pliegos tarifarios*. Obtenido de 2014
8. Castells, X. 2012. *Métodos de valorización y tratamiento de residuos municipales: Reciclaje de residuos industriales*. Ediciones Diaz de Santos. P 873 -874
9. Chynoweth, David. 1987. «Overview». En *Anaerobic Digestion of biomass*, de David Chynoweth y Ron Isaacson. London & New York: Elsevier Applied Science. págs. 1-7.

10. Constitución de la República de Guatemala, título II, capítulo II, sección décima, artículo 129 13.
11. *Convert World*. (29 de 09 de 2014). Obtenido de <http://www.convertworld.com/es/presion/>
12. De Juana, J. 2004. Energías Renovables para el desarrollo. 1a Edición. Thomson Paraninfo. Pág. 245.
13. Deutsche Gesellschaft Sonnenenergie & ECOFYS. 2005. Planning and Installing Bioenergy Systems: A guide for installers, architects and engineers. UK: James & James.
14. Duran, M., & Colaboradores. 2006. Bioaugmenting Anaerobic Digestion of Biosolids with Selected Strains of Bacillus, Pseudomonas y Actinomycetes Species for Increased Methanogenesis and Odor Control. *Applied Microbiology & Biotechnology*(73), 960-966.
15. Dohrmann, Anja, *et al.* 2011. «Bacterial community structure in experimental methanogenic bioreactors and search for pathogenic clostridia as community members». *Applied Microbiology Biotechnology*. 89: 1991 – 2004.
16. Encovi . (2011). *Caracterización de la República de Guatemala*. Guatemala: Instituto Nacional de Estadística.
17. Enerwaste, S. A. (s.f.). *Plan de Negocios Enerwaste, S. A.* Guatemala.
18. Estadísticas, I. N. (2010). *Caracterización de la República de Guatemala*. Guatemala.
19. Fernández, Luis. 2008. Caracterización cinética de la degradación anaerobia termofílica seca de la forsu. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo. Tesis Universidad de Cádiz. Cádiz.: Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente. 442 págs.

20. Fernández, E; S. Montalvo.1997. Eliminación del H₂S(g) del gas acompañante del petróleo. (Biológicamente). Memorias III. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Ciudad de la Habana. Cuba.
21. Ferrer, Yoandy y H. Pérez. 2010. «Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento». Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. 43(1): 9-20.
22. Friedrich, C. G., D. Rother, F. Bardischewsky, A. Quentmeier and J. Fischer. 2001. Oxidation of reduced inorganic sulfur compounds by bacteria: emergence of a common mechanism?. Applied and Environmental Microbiology.
23. Frobisher, M. 1980. Microbiología. 6ta. Edición Española. Editores Salvat.
24. Fry, John. 1973. «Methane Digesters for fuel gas and fertilizer». The New Alchemy Institute. California: 58 págs.
25. García, F. 1995. Guía para visitantes del Parque Zoológico “La Aurora”. Universidad de San Carlos de Guatemala.
26. Generadores, A. N. (3 de 9 de 2014). *Procesos para generar energía*. Obtenido de <http://www.ang.org.gt/procesos-para-generar-energia/>
27. Grisales, K. 2012. Manual para el análisis de aguas residuales. Obtenido el 25 de mayo de 2014, de: <http://es.scribd.com/doc/88734524/37/DEMANDA-QUIMICA-DE-OXIGENO-DQO---METODO- No-5220>
28. Gruber, Stephen y J. Sheimberg. 2010. «Una planta de biogás en base de estiércol animal en mezcla de silaje forrajeras de maíz en el marco agropecuario argentino». INTA. Argentina, 19 págs.
29. <http://energia9.webnode.es/energia/la-energia-electrica-/>. (2012). <http://energia9.webnode.es/energia/la-energia-electrica-/>. Obtenido de <http://energia9.webnode.es/energia/la-energia-electrica-/>

30. Harold, Drake; K. Küsel y C. Matthies. 2013. «Acetogenic Prokaryotes». En *The Prokaryotes*. 6a. Edición. Springer. Pp. 3-60.
31. Hossain, M. E., & Islam, M. R. 2008. An Alternative Fuel for Motor Vehicles. *Energy Sources*, 30, 942-953.
32. IDAE, I. p. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Madrid.
33. Jinan Jin Youli Gas Equipment Co., Ltd. 2012. «BX568 Portable biogás analyzer operation manual». China. 8 págs.
34. Julián, I.; Susana M. 1999. *Diccionario de química: Diccionario Oxford-Complutense*. Editorial Complutense. Madrid, España.
35. Krich, Ken, *et al.* 2005. «Biomethane from Dairy Waste». USDA Rural Development, Estados Unidos: 282 págs.
36. Kirchmayr, R., & Coautores. 2007. Anaerobic Degradation of Animal By-Products. En V. Oreopoulou, & W. Russ, *Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry* (págs. 159-191). Springer.
37. Ley general de electricidad, decreto (93-96), título I, capítulo I, artículo 1, inciso a.
38. Ley general de electricidad, decreto (93-96), título I, capítulo IV, artículo 1, inciso b.
39. Ley general de electricidad, decreto (93-96), título II, capítulo IV, artículo 7.
40. Ley general de electricidad, decreto (93-96), título II, capítulo IV, artículo 8.
41. Ley general de electricidad, decreto (93-96), título II, capítulo IV, artículo 10.
42. Ley general de electricidad, decreto (93-96), título II, capítulo IV, artículo 39.

43. López Pérez, Antonio Carlos. 2010. "Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás" [en línea].wikipedia.31 de mayo de 2010 n°526.<http://es.wikipedia.org/wiki/Biodigestor> [consulta:4 de junio de 2010].
44. Magaña, Luis, *et al.* 2006. «Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabras». Acta Universitaria. 16(2): 27-37.
45. Maps, G. (06 de 09 de 2014). Ubicación Zoológico "La Aurora".
46. Mata-Alvarez, J. 2003. «Fundamentals of the anaerobic digestion process». En Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes de J. Mata-Alvarez. London: IWA publishing. Págs. 9 – 20.
47. McKinsey, S. 2003. Removal of hydrogen sulfide from biogás. Estados Unidos, Universidad de Cornell.
48. Mesa de Biogás. 2010. El sector del biogás agroindustrial en España. Madrid. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 89 págs.
49. Mejía, O. 2008. Informe sobre método soxhlet. Obtenido el 10 de septiembre de 2013, de:
<http://www.slideshare.net/bibliojengibre/mtodo-soxhlet-en-alimentos>
50. Montoya, Sergio y C. Páez. 2012. «Documentación de la técnica de cromatografía de gases en el análisis de hidrocarburos alifáticos en aguas residuales». Tesis de Universidad tecnológica de Pereira. 109 págs.
51. Muhammad, Ismail; T. Mohd y R. Omar. 2012. «Production of biogás from solid organic wastes through anaerobic digestion: a review». Applied Microbiology Biotechnology. 95: 321-329.
52. Mendiburu, F. L. (30 de 11 de 2010). *Economía de la energía*. Obtenido de Biomasa: Qué es biomasa?:
<http://www.economiadelaenergia.com/2010/11/biomasa-que-es-la-biomasa/>

53. Minas, M. d. (s.f.). *Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable (Decreto 52-2003)*. Guatemala.
54. Monroy, O. C. (21 de 12 de 12). *Prensa Libre*. Obtenido de Termómetro Fiscal: http://www.prensalibre.com/economia/TERMOMETRO-FISCAL_0_832716730.html
55. *Planthogar*. (2010). Obtenido de <http://www.planthogar.net/encyclopedia/jump.asp?doc=00000293.htm>
56. Pineda, Gerardo. 2011. «Caracterización de biogás proveniente de la fermentación de la mezcla de agua de lavado de café y glicerina residual de biodiesel por medio de cromatografía de gases». Tesis de Universidad de San Carlos de Guatemala. 52 págs.
57. Peretó, J., *et al.* 2007. *Fundamentos de bioquímica*. 3ra Edición. Valencia, España. Pág. 198.
58. Pérez, M., M. J. Cuesta, S. Núñez y J. A. Cabrera. 2008. Utilización de biogás en pilas de combustible. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España. 68 p.
59. Pongutá Hurtado, J. J. 2005. *Guía para el Manejo de Energías Alternativas (Primera ed.)*. Bogotá, Colombia: Convenio Andrés Bello.
60. *Portal del cerdo*. (9 de 04 de 2008). Obtenido de Biodigestores: http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/que_es_un_biodigestor.html
61. Remington, J. 2006. «Cromatography» En *Remington: The Science and practice of pharmacy*. 21ª. Edición. Lippincott Williams & Wilkins. Pág. 608.
62. Roque, R. M. 1987. *Adsorción física de gases*. MES. Cuba.
63. Sáenz, C. 2006. Utilización agroindustrial del nopal. Roma. Organización de la naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Pág. 84.
64. Saigua, S. A. (2014).
65. Salguero, K. (01 de 09 de 2014). Patrocinadores Zoológico "La Aurora".

66. Santambrosio, Eduardo. Catedra Biotecnológica. 2014.
[http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/biote
cnologia/DBO](http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/biote
cnologia/DBO) .pdf [30 de mayo de 2014]
67. Schnürer, Anna y A. Jarvis. 2010. «Microbiological handbook for biogás plants». Swedish Gas Centre Report 207. Suecia: 142 págs.
68. Sommer, S. G., & Coautores. 2004. Algorithms for Calculating Methane and Nitrous Oxide Emissions from Manure Management. (K. A. Publishers, Ed.) Nutrient Cycling in Agroecosystems(69), 143-154.
69. Tomás-Sábado, J. 2010. Fundamentos de bioestadística y análisis de datos para enfermería. 1ª. Edición. Universidad Autónoma de Barcelona. Págs. 99-101.
70. Tsavkelova, Elena y A. Netrusov. 2012. «Biogás production from cellulose-containing substrates: a review». Applied Biochemistry and Microbiology. 48(5): 421-433.
71. USDA. 2014. «Most Probable Numer Procedure and Tables». En MLG Appendix 2.05. Laboratory Quality Assurance Staff. Págs. 1-8.
72. Vattampambil, Sneha. 2012. «Anaerobic Microbial Hydrolysis of Agriculture Waste for Biogás Production». International Conference on Emerging Frontiers in Technology for Rural Area. India. págs. 25-27.
73. Villaseñor, C. M. (31 de 08 de 2008). Cuestionable manejo de Recursos en Zoológico La Aurora . *Prensa Libre*.
74. Walsh, J.; Roos, C.; Smith, M.; Harper, S.; Wilkins, A. 1988. Utilización del biogás. Estados Unidos.

75. Wang, A.-J., & Coautores. 2011. Advances in Biogás Technology. (T. Scheper, & Coeditores, Edits.) Advances in Biochemical Engineering Biotechnology, 1-23.
76. Whitman, William; T. Bowen y D. Boone. 2006. «The Methanogenic Bacteria». En The Prokaryotes . 3a. Edición. Springer. Págs. 165-207.
77. Zhang, Tong, *et al.* 2013. «Biogás Production by Co-Digestion of Goat Manure with Three Crop Residues». PLoS ONE 8(6): 1-7.
78. Zhao, Hong-yan, *et al.* 2013. Microbial Community Dynamics During Biogás Slurry and Cow Manure Compost. Journal of Integrative Agriculture. 12(6): 1087 – 1097.

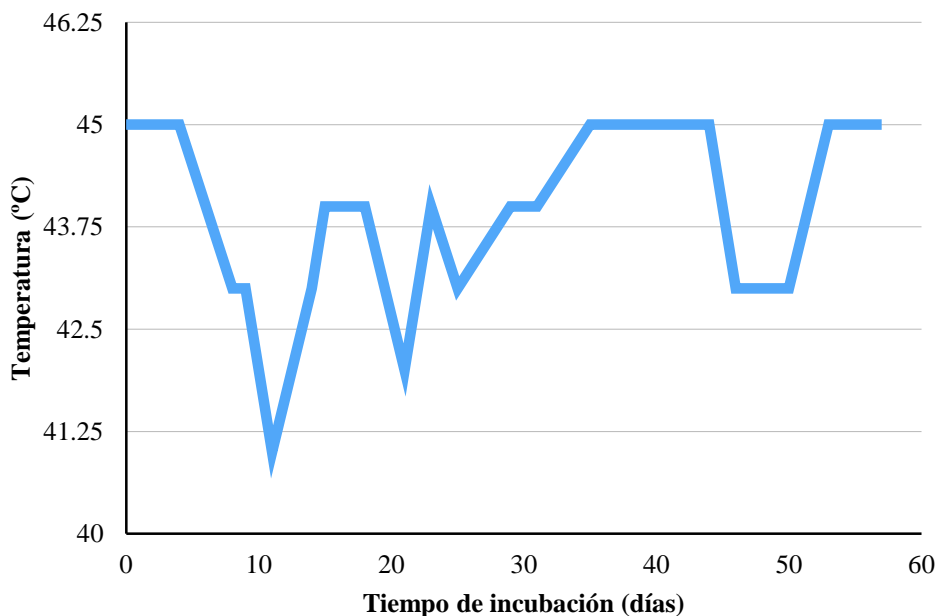
XI. APÉNDICE

A. Módulo: Caracterización de materia prima y determinación de variables básicas de un reactor diseñado para la biodigestión de desechos orgánicos generados del Zoológico “La Aurora”

Tabla 45. Avance de la producción de biogás medido en litros de las cinco mezclas de estiércol de elefante y jirafa y temperatura de la incubadora.

No. Día	J30/E30/A40	E50/A50	J50/A50	J40/A60	E50/J50	Temperatura (°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45
4	0.50	0.15	0.30	0.20	0.70	45
8	0.60	0.35	0.95	0.60	1.10	43
9	0.60	0.35	1.25	0.70	1.13	43
11	0.60	0.35	2.00	1.00	1.28	41
14	0.60	0.40	2.40	2.00	1.38	43
15	0.65	0.40	3.50	2.60	1.48	44
17	0.70	0.45	5.05	3.60	1.53	44
18	0.75	0.45	6.25	4.00	1.58	44
21	0.85	0.45	7.80	5.00	1.63	42
23	1.05	0.45	8.60	6.00	1.78	44
25	1.55	0.45	9.20	6.65	1.88	43
29	3.10	0.45	10.25	7.65	2.13	44
31	4.20	0.45	11.40	7.95	3.43	44
35	4.65	0.45	12.30	8.25	3.63	45
37	5.45	0.45	12.70	8.35	3.93	45
39	5.85	0.45	13.10	8.35	4.38	45
42	6.35	0.45	13.50	8.40	5.13	45
44	6.75	0.45	13.75	8.50	5.53	45
46	7.00	0.45	13.95	8.60	5.98	43
50	7.10	0.45	14.25	8.80	6.63	43

Figura 21. Representación gráfica de la variación de temperatura de la incubadora (entre 40-45°C) durante los 57 días de incubación.



1. Datos originales

Tabla 7: Peso de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" utilizados para prueba piloto para su fermentación anaeróbica.

Muestra	Animal	Peso (± 0.01 kg)
1	C/J	9.94
2	C/J	9.02
3	E	11.38
4	E	11.14
5	E	10.22

Tabla 8: Peso de muestras de desechos orgánicos seleccionados generados en Zoológico "La Aurora" para la determinación de proteínas a través de método Kjehldal.

	Muestra	Proteínas (± 0.0001 g)
Cebra/Jirafa	1Z	0.2579
	2Z	0.2585
Elefante	1E	0.255
	2E	0.2505

Tabla 9: Volumen de solución NaOH utilizado para la titulación de muestras de desechos orgánicos seleccionados generados en Zoológico "La Aurora" para la determinación de proteínas a través del método Kjehldal

	Muestra	Titulación (± 0.1 mL)
Cebra/Jirafa	1Z	2.3
	2Z	2.4
Elefante	1E	3.3
	2E	3.3

Tabla 10: Resultados de generación de biogás a partir de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" durante prueba piloto.

Medición	Fecha	Volumen 1 ($\pm 0.01 \text{ m}^3$)	Volumen 2 ($\pm 0.01 \text{ m}^3$)
1	09/08/2014	-	-
2	12/08/2014	-	0.50
3	13/08/2014	0.50	0.60
4	14/08/2014	0.60	0.80
5	19/08/2014	0.80	2.00
6	20/08/2014	0.30	0.50
7	22/08/2014	0.50	1.30
8	23/08/2014	0.40	0.70
9	25/08/2014	0.70	0.75
10	27/08/2014	0.75	0.80
11	29/08/2014	0.80	0.82

Tabla 11: Resultados de composición de biogás generado a partir de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora"

Medición	NH4 ($\pm 0.01\%$)	CO2 ($\pm 0.01\%$)
1		
2	30.10%	11.20%
3	35.20%	12.40%
4	38.30%	13.20%
5	39.90%	14.00%
6	42.14%	15.00%
7	46.50%	16.30%
8	41.30%	14.30%
9	42.00%	15.80%
10	42.75%	15.50%
11	43.01%	15.60%

B. Módulo: Limpieza de biogás generado en el biodigestor

1. Datos originales.

En la realización de las corridas se fijó un flujo de biogás de aproximadamente $0.035 \text{ m}^3/\text{min}$ a 20°C . Se realizaron las mediciones en proceso continuo y a una escala no de laboratorio. A continuación se muestra una tabla de resumen de diez días corridas experimentales para diferentes concentraciones de H_2S y CO_2 .

Tabla 12: Resultados recopilados para pruebas de limpieza con filtros para reducir H₂S y CO₂ del biogás generado en el biodigestor del Zoológico La Aurora

Corrida	Tiempo (min)	Flujo (m3/min)	Concentración de entrada		Concentración de salida		ppm retenidos (2kg)	% Reducción H ₂ S (2kg)	% Reducción CO ₂
			H ₂ S (ppm) entrada	CO ₂ (%) entrada	H ₂ S (ppm) salida	CO ₂ (%) salida			
1	5	0.035	93	14.5	13	9	80	86.02%	37.93%
2	5	0.035	97	14.1	12	8.6	85	87.63%	39.01%
3	5	0.035	96	15.2	15	8.6	81	84.38%	43.42%
4	5	0.035	98	15.6	13	10	85	86.73%	35.90%
5	5	0.035	99	15.6	12	10	87	87.88%	35.90%
6	5	0.035	98	14.5	16	11.1	82	83.67%	23.45%
7	5	0.035	100	14.6	16	10	84	84.00%	31.51%
8	5	0.035	100	15.7	13	10	87	87.00%	36.31%
9	5	0.035	100	15.7	13	10.4	87	87.00%	33.76%
10	5	0.035	100	15.9	14	10.3	86	86.00%	35.22%
Promedio			98.1	15.14	13.7	9.8	84.4	86.03%	35.24%

Tabla 13: Resultados recopilados para pruebas de limpieza con filtros para reducir H₂S y CO₂ del biogás generado en el biodigestor del Zoológico "La Aurora

Corrida	Tiempo (min)	Flujo (m3/min)	Concentración de entrada		Concentración de salida		ppm retenidos (1kg)	% Reducción H ₂ S (1kg)	% Reducción CO ₂
			H ₂ S (ppm) entrada	CO ₂ (%) entrada	H ₂ S (ppm) salida	CO ₂ (%) salida			
1	5	0.035	93	16.9	13	8	80	86.02%	52.66%
2	5	0.035	97	17	12	8.6	85	87.63%	49.41%
3	5	0.035	96	17	15	8.6	81	84.38%	49.41%
4	5	0.035	98	16.9	13	10	85	86.73%	40.83%
5	5	0.035	99	17	12	10	87	87.88%	41.18%
6	5	0.035	98	17	16	10	82	83.67%	41.18%
7	5	0.035	100	17	16	10	84	84.00%	41.18%
8	5	0.035	100	16.9	13	10	87	87.00%	40.83%
9	5	0.035	100	17.1	13	10.1	87	87.00%	40.94%
10	5	0.035	100	15.9	14	9.8	86	86.00%	38.36%
Promedio			98.1	16.87	13.7	9.51	84.4	86.03%	43.60%

2. Datos calculados

Tabla de datos calculados No. 1: Peso base seca de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico “La Aurora” utilizados para prueba piloto para su fermentación anaeróbica.

Muestra	Peso base húmedo (± 0.01 kg)	% Humedad (± 0.01)	Peso estiércol base seca (± 0.01 kg)
1	8.96	68.57%	2.14
2	8.04		1.85
3	10.4	60.20%	3.54
4	10.16		3.45
5	9.24		3.08

Tabla de Datos originales No. 2: Resultados de generación de biogás a partir de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico “La Aurora” durante prueba piloto

Medición	Fecha	Volumen acumulado (± 0.01 m ³)	Peso acumulado (± 0.01 kg)
1	09/08/2014	-	-
2	12/08/2014	0.50	0.79
3	13/08/2014	0.60	0.95
4	14/08/2014	0.80	1.27
5	19/08/2014	2.00	3.18
6	20/08/2014	2.20	3.49
7	22/08/2014	3.00	4.76
8	23/08/2014	3.30	5.24

Continuación de Tabla de Datos originales No. 2: Resultados de generación de biogás a partir de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" durante prueba piloto			
Medición	Fecha	Volumen acumulado ($\pm 0.01 \text{ m}^3$)	Peso acumulado ($\pm 0.01 \text{ kg}$)
9	25/08/2014	3.35	5.32
10	27/08/2014	3.40	5.40
11	29/08/2014	3.42	5.43

Tabla 12: Relación de datos experimentales de prueba piloto de fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" para determinación de parámetros de ecuación Michaelis-Menten

$(C_{ao}-C_a)/\ln(C_{ao}/C_a)$	$C_{eot} / \ln(c_{ao}/c_a)$
0.189702	6.13415E-11
0.189649	6.99193E-11
0.189618	8.03116E-11
0.189601	1.54169E-10
0.189540	1.47531E-10
0.189531	1.7099E-10
0.189485	1.67898E-10
0.189485	1.91854E-10
0.189484	2.15666E-10
0.189484	2.39571E-10

Ilustración 16: Gráfica de relación de datos experimentales de prueba piloto de fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" para determinación de parámetros de ecuación de Michaelis Menten.

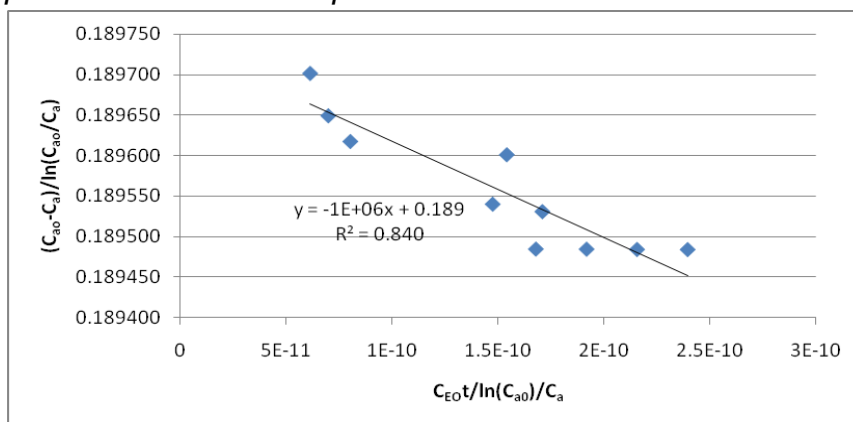


Tabla 13: Resultados volumétricos a partir de composición de biogás generado a partir de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológica "La Aurora".

Medición	Fecha	NH4 (± 0.01 m ³)	CO2 (± 0.01 m ³)
1	09/08/2014		
2	12/08/2014	0.15	0.05
3	13/08/2014	0.21	0.07
4	14/08/2014	0.30	0.10
5	19/08/2014	0.79	0.28
6	20/08/2014	0.21	0.07
7	22/08/2014	0.60	0.21
8	23/08/2014	0.28	0.10
9	25/08/2014	0.31	0.11
10	27/08/2014	0.34	0.12
11	29/08/2014	0.35	0.12

Ilustración 17: Gráfica de resultados de generación de ácido sulfídrico (H₂S) a lo largo del tiempo durante digestión anaerobia de desechos orgánicos seleccionados de Zoológicos "La Aurora" durante prueba piloto.

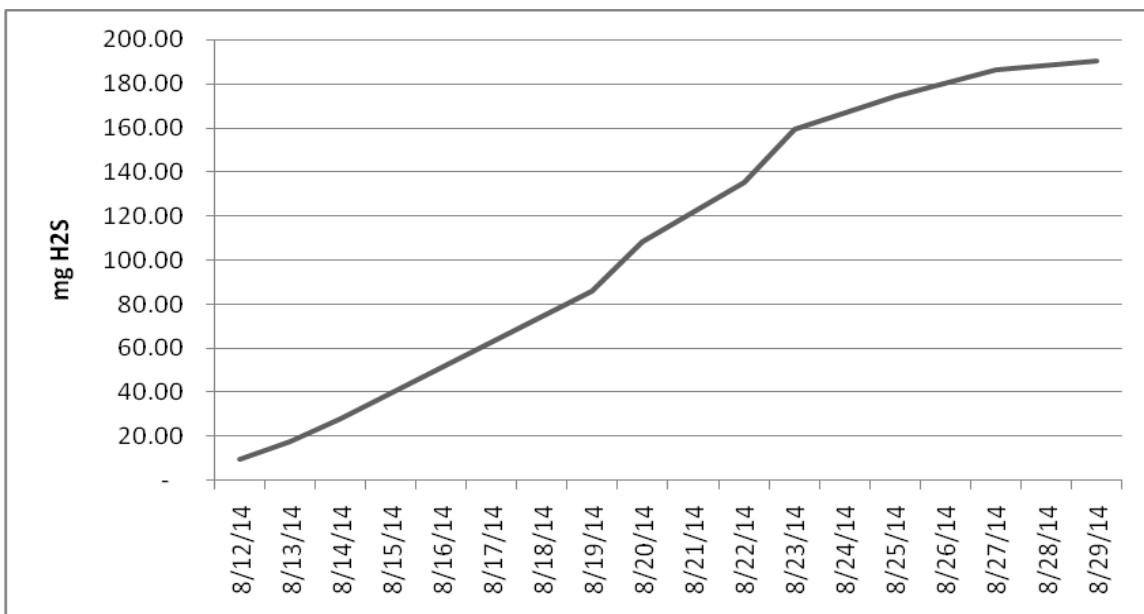


Ilustración 18: Resultados de generación de metano (CH₄) a lo largo del tiempo durante digestión anaerobia de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" durante prueba piloto.

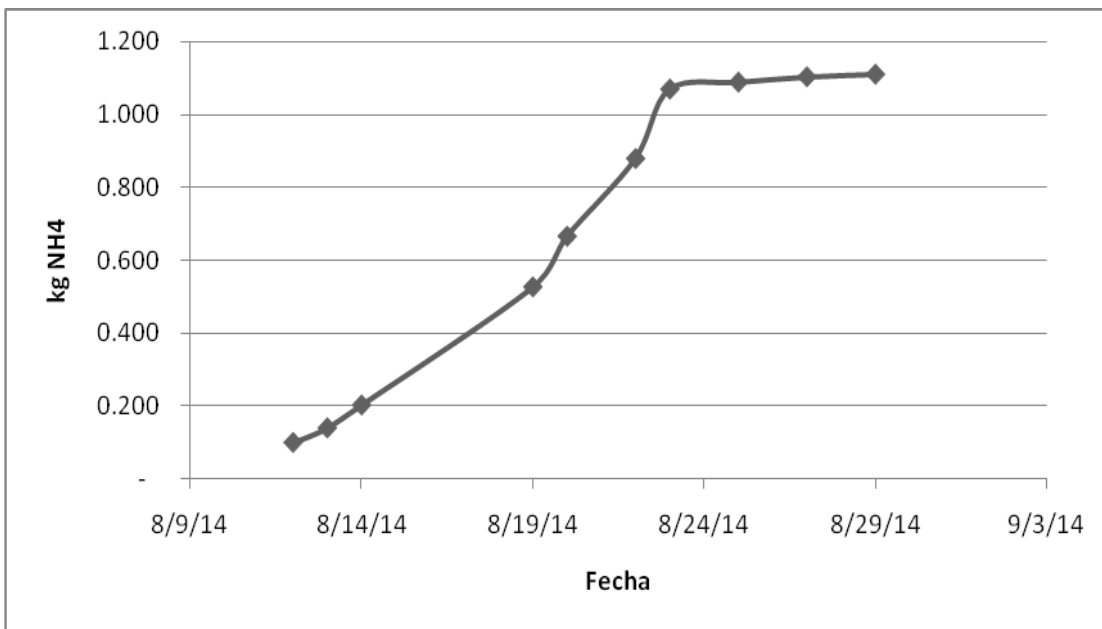


Ilustración 19: Gráfica de comportamiento de velocidad de reacción de fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" a lo largo del tiempo.

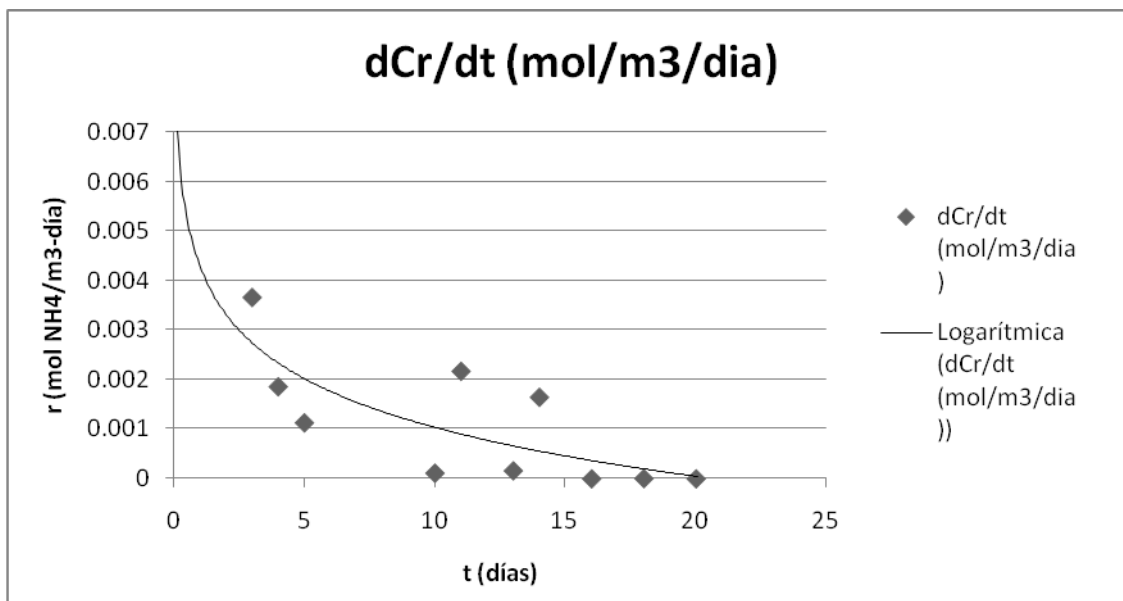


Ilustración 20: Gráfica de ecuación final de velocidad de reacción para la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" con base en modelo de cinética de reacción enzimático Michaelis-Menten

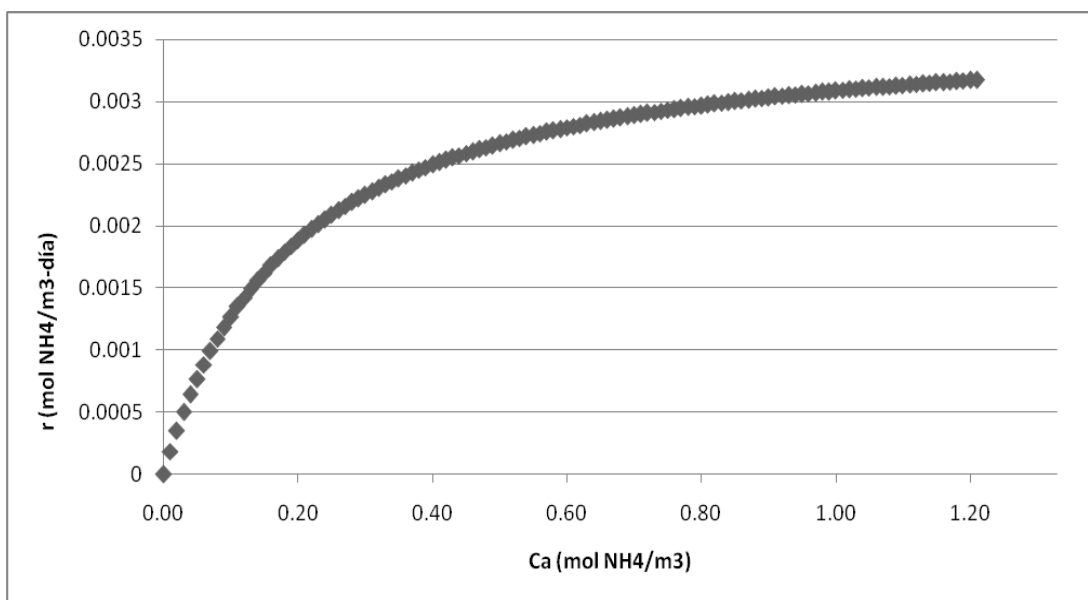


Tabla 14: Resultados de porcentaje de nitrógeno y proteínas para determinación la caracterización bioquímica de los desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora" a partir del método Kjeldal.

	Muestra	% Nitrógeno	% Proteína	% Proteína
Cebra/Jirafa	1Z	1.31%	8.19%	8.36%
	2Z	1.36%	8.53%	
Elefante	1E	1.90%	11.89%	12.00%
	2E	1.94%	12.10%	

Tabla 15: Parámetros utilizados para el diseño del agitador de hoja sencilla del reactor para la biodigestión de los desechos orgánicos generados en el Zoológico "La Aurora".

Parámetro	Valor
Reynolds	1 650
Velocidad	1.5 rps
Número de potencia	0.5

Para estas pruebas de limpieza se utilizó un filtro de H₂S que contenía 1kg de óxido de hierro y un filtro para CO₂ que contiene 1kg de cal. Estos datos se utilizaron para los cálculos de kilogramos de materia filtrante para ambos filtros a escala mayor.

Tabla 16: Valores obtenidos de prueba de poder calorífico para biogás sin tratamiento

Temperatura inicial (°C)	Presión atmosférica (mm Hg)	Presión manométrica (cm H ₂ O)	Valoumen de biogás utilizado (m ³)	Temperatura ambiente (°C)
22	760	2	0.025	21
22	760	2	0.028	21
23	760	2	0.030	21
295.33	1.031625	2	0.0276	21

Se trabajó en triplicado para pruebas con ambos gases.

Tabla 17: Valores iniciales de prueba de poder calorífico para biogás con tratamiento

Temperatura inicial (°C)	Presión atmosférica (mm Hg)	Presión manométrica (cm H ₂ O)	Valoumen de biogás utilizado	Temperatura ambiente (°C)
22	760	2	0.028	21
23	760	2	0.027	21
23	760	2	0.028	21

Temperatura (°K)	Presión (kg/cm ²)	Presión manométrica (cm H ₂ O)	Valoumen (m ³)	Temperatura ambiente (°C)
295.66	1.031625	2	0.0276	21

Tabla 18: Datos obtenidos tras calentamiento de agua con biogás sin tratamiento a una temperatura inicial del agua de 23°C

Biogás sin tratamiento		
Temperatura final (°C)	ΔT (°C)	Tiempo (s)
51	28	180

Tabla 19: Datos obtenidos tras calentamiento de agua con biogás con tratamiento a una temperatura inicial del agua de 23°C

Biogás con tratamiento		
Temperatura final (°C)	ΔT (°C)	Tiempo (s)
58	35	180

Tabla 20: Resultados obtenidos de calor entregado y absorbido de biogás sin tratamiento

$Q_{entregado}$ (kcal)	$Q_{absorbido}$ (kcal)	Rendimiento
116.18	28	0.241

Tabla 21: Resultados obtenidos de calor entregado y absorbido de biogás con tratamiento

Q _{entregado} (kcal)	Q _{absorbido} (kcal)	Rendimiento
145.23	35	0.241

Cálculo de la densidad poblacional según el NMP

Para calcular la densidad poblacional bacteriana en cada muestra usando la tabla del NMP (Cuadro 15) se utilizó la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{bacterias}}{\text{ml}} = \text{NMP} * \text{vol. inóculo} * \text{factor de dilución} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Como el volumen del inóculo fue 0.5ml y la tabla de NMP es para 1ml, el NMP se multiplica por dos. Luego se multiplica por el factor de dilución, para el cual se utiliza la segunda dilución. A continuación se presenta un ejemplo del cálculo.

Cálculo 1. Determinación de la densidad poblacional usando el NMP/ml.

$$\frac{\text{bacterias}}{\text{ml}} = 110 \frac{\text{NMP}}{\text{ml}} * 2 * 1 \times 10^6 = 2.20 \times 10^8 \text{ bacterias/ml}$$

Este cálculo se realizó para poder determinar la constante k de la ecuación que describe la velocidad de reacción en el modelo para reacciones tipo Michaelis Menten. De esta forma se procedió a calcular el medio de la velocidad máxima de reacción determinada a partir de las pruebas piloto; esta velocidad se define como la velocidad a la que C_a es igual a C_m por lo que se sustituyen en la ecuación.

Cálculo No.2: Espacio-tiempo de desechos orgánicos seleccionados generados en Zoológico "La Aurora" dentro de biodigestor propuesto para su fermentación anaeróbica.

$$\frac{r_{max}}{2} = k \frac{C_{E0} C_m}{C_m + C_m}$$

$$\frac{0.003671 \frac{\text{mol CH}_4}{\text{m}^3 \text{biogás} - \text{día}}}{2} = k \frac{6.65 \times 10^{-14} \frac{\text{moles MOO}}{\text{kg estiércol humedo}} \cdot 0.1897 \frac{\text{mol lípidos}}{\text{kg estiércol base seca}}}{0.1897 \frac{\text{mol lípidos}}{\text{kg estiércol base seca}} + 0.1897 \frac{\text{mol lípidos}}{\text{kg estiércol base seca}}}$$

$$k = 3.1043 \times 10^{11} \frac{\frac{\text{mol } CH_4}{m^3 \text{ biogás} - \text{día}}}{\frac{\text{moles } MOO}{kg \text{ estiércol humedo}}}$$

Para la determinación del espacio tiempo, tau, del reactor diseñado fue necesario utilizar las ecuaciones de diseño establecidas para un reactor STR y que posee una cinética descriptible con el modelo de cinética de reacción tipo Michaelis Menten.

Cálculo No.3: Determinación de volumen de biodigestor propuesto para la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados generados en Zoológico "La Aurora" .

$$\tau = \frac{(C_{ao} - C_a)(C_m + C_a)}{k_3 C E_o C_a}$$

$$\tau = \frac{(0.190010 - 0.057) \frac{\text{mol lípidos}}{kg \text{ estiércol}} \cdot (0.1897 - 0.057) \frac{\text{mol lípidos}}{kg \text{ estiércol}}}{3.1043 \times 10^{11} \frac{\frac{\text{mol } CH_4}{m^3 \text{ biogás} - \text{día}}}{\frac{\text{moles } MOO}{kg \text{ estiércol humedo}}} \cdot 6.65 \times 10^{-14} \frac{\text{mol } MOO}{kg \text{ estiércol}} \cdot 0.057 \frac{\text{mol lípidos}}{kg \text{ estiércol}}}$$

$$\tau = 15.001 \text{ días} \approx 15 \text{ días}$$

$$V_{\text{estiércol}} = \tau \cdot F = 14.97 \text{ días} \cdot 0.1622 \frac{m^3}{\text{día}} = 2.43 m^3$$

Tomando en cuenta que la relación escogida para agua - estiércol dentro del bioreactor es 1:1

Cálculo No. 4: Volumen de biogás a generar por ciclo durante fermentación anaeróbica de de desechos orgánicos seleccionados en Zoológico "La Aurora" tratados en biodigestor propuesto.

$$V_{\text{total reactor}} = 2.43 m^3 \cdot 2 = 4.86 m^3 \approx 5 m^3$$

El volumen de biogás a generar por el biodigestor se obtiene de la cantidad de desechos orgánicos que se tratarán en cada ciclo y de la relación de volumen de biogás producido por volumen de desechos orgánicos obtenida durante las pruebas piloto.

Cálculo No. 5: Potencia de agitador de hoja sencilla diseñado para reactor para desechos orgánicos.

$$V_{biogás} = 2.43 \frac{m^3 \text{ estiércol}}{\text{ciclo}} \cdot \frac{549.47 \text{ kg estiércol}}{m^3 \text{ estiércol}} \cdot \frac{0.07 m^3 \text{ biogás}}{\text{kg estiércol}} = 93.46 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{ciclo}}$$

La potencia del agitador fue determinada a partir de relaciones de propiedades del fluido a agitar y la velocidad de agitación que se mantendrá en el biodigestor.

Cálculo No. 6: Obtención de sólidos totales en muestra de estiércol

$$P = N_p D^5 N^3 \rho = 0.5 \cdot 0.5^5 m \cdot 1.5 rps \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} = 52.73 \text{ Watts} = 0.052 \text{ kW}$$

$$\text{sólidos totales} = \text{masa crisol} + \text{estiércol} - \text{masa crisol}$$

$$\text{sólidos totales} = 117.8 - 103.45 = 13.55 \text{ g}$$

Se realizó el mismo cálculo para las muestras de desechos sólidos seleccionados.

Cálculo No. 7: Obtención del porcentaje de sólidos totales en muestra de estiércol

$$\% \text{ sólidos totales} = \frac{\text{masa sólido totales (g)}}{\text{masa estiércol utilizada (g)}} \cdot 100$$

$$\% \text{ sólidos totales} = 26.76\%$$

Se realizó el mismo cálculo para las muestras de desechos sólidos seleccionados.

Cálculo No. 8: Obtención de la humedad en muestra de estiércol

$$\text{humedad} = (\text{masa crisol} + \text{masa estiércol}) - (\text{masa crisol} + \text{masa estiércol de horno a } 70^\circ\text{C})$$

$$\text{humedad} = 143.2 \text{ g} - 110.2 \text{ g} = 33 \text{ g}$$

Se realizó el mismo cálculo para las muestras de desechos sólidos seleccionados.

Cálculo No. 9: Obtención del porcentaje de humedad en muestra de estiércol

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{humedad (g)}}{\text{masa estiércol utilizada (g)}} \cdot 100 = 60.20\%$$

Se realizó el mismo cálculo para las muestras de desechos sólidos seleccionados.

Cálculo No. 10: Obtención de peso de cenizas (gramos) en muestra de estiércol

$$\text{cenizas} = (\text{masa crisol} + \text{masa estiércol luego de mufla a } 600^{\circ}\text{Celsius}) - \text{masa crisol}$$

$$\text{cenizas} = 115.44 \text{ g} - 112.09 \text{ g}$$

$$\text{cenizas} = 2.54 \text{ g}$$

Se realizó el mismo cálculo para las muestras de desechos sólidos seleccionados.

Cálculo No. 11: Obtención del porcentaje de cenizas en muestra de estiércol

$$\% \text{ cenizas} = \frac{\text{cenizas (g)}}{\text{masa estiércol utilizada (g)}} = 6.5\%$$

Se realizó el mismo cálculo para las muestras de desechos sólidos seleccionados.

Cálculo No. 12: Conversión de concentración de mg O₂ a mg DQO.

$$500 \frac{\text{mg ftalato}}{\text{L}} * 1.176 \frac{\text{mg O}_2}{\text{mg ftalato}} = 1835 \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}}$$

Cálculo No. 13: Cálculo del nitrógeno amoniacal. Se realizó para las muestras de excremento de los desechos sólidos orgánicos seleccionados.

$$\begin{aligned} N \text{ amoniacal} &= \frac{\text{mL HCl consumidos} * \text{Normalidad} * \text{masa nitrógeno} * 100}{\text{masa muestra}} \\ &= 1.31\% \end{aligned}$$

Se realizó el mismo cálculo para las muestras de desechos sólidos seleccionados.

Cálculo No. 14: Cálculo de proteínas partiendo del cálculo de nitrógeno amoniacal. Se realizó para las muestras de excremento.

$$\text{Porcentaje de proteína} = \frac{g \text{ Nitrógeno}}{100 g \text{ muestra}} * \text{factor } K = 8.19\%$$

$$\% \text{ Reducción } H_2S = 1 - \frac{H_2S_{salida}}{H_2S_{entrada}} * 100\%$$

$$1 - \frac{15ppm}{96ppm} * 100\% = 84.38\%$$

Se realizó el mismo cálculo para el porcentaje de reducción de CO₂

Cálculo No.15: Cálculo de kg de H₂S que pueden filtrar 1kg de Fe₂O₃ hasta su agotamiento según pruebas realizadas en biodigestor

$$1kg \text{ Fe}_2\text{O}_3 * \frac{1kmol \text{ Fe}_2\text{O}_3}{159.688kg \text{ Fe}_2\text{O}_3} * \frac{3 \text{ mol } H_2S}{1 \text{ mol } Fe_2O_3} * \frac{39.08kg \text{ H}_2S}{1kmol} * (0.8603) \\ = 0.63kg \text{ H}_2S$$

Cálculo No.16: Cálculo de caudal de H₂S utilizado para las corridas realizadas

Se asume 0.01% de generación de H₂S en biogás producido

$$\frac{0.035 \text{ m}^3 \text{ Fe}_2\text{O}_3}{min} * (0.01) = 0.00035m^3 H_2S/min$$

Cálculo No.17: Cálculo de cantidad de H₂S removido por minuto de operación del filtro

$$\frac{84.4 \text{ mg } H_2S}{1L \text{ biogás}} * \frac{0.00035 \text{ m}^3 \text{ H}_2S}{1 \text{ min}} * \frac{1000 \text{ L biogás}}{1m^3} = 29.54 \text{ mg } H_2S/min$$

Cálculo No.18: Horas de vida de filtro de 1kg para remoción de H₂S

$$\frac{1 \text{ min}}{0.03433 \text{ g } H_2S} * 631.61 \text{ g } H_2S = 18,389 \text{ min} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ día}}{24} = 12.77 \text{ días}$$

Estos cálculos fueron realizados para la remoción de H_2S a un volumen de generación de $8.71 \text{ m}^3/\text{día}$,

Cálculo No.19: kg de óxido de hierro necesarios para remoción de H_2S durante 6 meses

$$\frac{1 \text{ kg } Fe_2O_3}{12.77 \text{ días}} * 180 \text{ días} = 14.09 \text{ kg } Fe_2O_3 \text{ en 6 meses}$$

Cálculo No.20: Volumen total de biogás que se puede limpiar durante los tres meses de vida útil del filtro

Para un biodigestor que produce 8.71 m^3 de biogás diarios como el que se propone para el Zoológico

$$\frac{8.71 \text{ m}^3}{1 \text{ día}} * 180 \text{ días} = 1567.8 \text{ m}^3 \text{ de biogás}$$

Cálculo No.21: Cálculo de kg de CO_2 removidos posibles con 1kg de cal hasta el agotamiento

$$1 \text{ kg } Ca(OH)_2 * \frac{1 \text{ kmol } Ca(OH)_2}{74.093 \text{ kg } Ca(OH)_2} * \frac{1 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol } Ca(OH)_2} * \frac{44.01 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} * 0.4360 = 0.2589 \text{ kg } CO_2$$

Cálculo No.22: Volumen de CO_2 removidos por minuto durante las pruebas realizadas con 1kg de cal

$$\frac{0.035 \text{ m}^3 \text{ } CO_2}{\text{min}} * 0.0534 = 0.0019 \text{ m}^3 \text{ } CO_2$$

Cálculo No.23: Cantidad de CO_2 removidos por minuto durante las pruebas realizadas con 1kg de cal

$$\frac{1.842 \text{ kg } CO_2}{m^3} * 0.0019 \text{ m}^3 CO_2/min = 0.0035 \text{ kg } CO_2/min$$

Cálculo No.24: Horas de vida de filtro de 1kg para remoción de CO₂

$$\frac{1 \text{ min}}{0.0035 \text{ kg } CO_2} * 0.2589 \text{ kg } CO_2 = 73.99 \text{ min} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 1.23 \text{ h}$$

Estos cálculos fueron realizados para la remoción de CO₂ a un volumen de generación de 8.71 m³/día de biogás

Cálculo No.25: kg de cal necesarios para remoción de CO₂ durante 1 mes

$$\frac{1 \text{ kg } Ca(OH)_2}{1.23 \text{ h}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} * 30 \text{ días} = 585.36 \text{ kg } Ca(OH)_2 \text{ en 1 mes}$$

Cálculo No.26: Volumen total de biogás que se puede limpiar durante 1 mes de vida útil del filtro

Para un biodigestor que produce 8.71 m³ de biogás diarios como el que se propone para el Zoológico

$$\frac{8.71 \text{ m}^3}{1 \text{ día}} * 30 \text{ días} = 261.3 \text{ m}^3 \text{ de biogás}$$

Cálculo No.27: Masa de biogás con tratamiento utilizada para combustión

(cálculo de la masa de biogás contenida en la cantidad utilizada para la combustión)

$$M_1 = \frac{(1.031625 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}) (\frac{1 \text{ cm}^2}{0.0001 \text{ m}^2}) * (0.0276 \text{ m}^3)}{(31.172 \frac{\text{kg m}}{\text{kg} * ^\circ K}) * (295.66 \text{ } ^\circ K)}$$

$$= 0.031 \text{ kg biogás con tratamiento}$$

R del biogás = 31.172 $\frac{\text{kg m}}{\text{kg} * ^\circ K}$ según literatura (Martina *et al.*, 2005)

Cálculo No.28: Masa de biogás sin tratamiento utilizada para combustión

(cálculo de la masa de biogás contenida en la cantidad utilizada para la combustión)

$$M_2 = \frac{\left(1.031625 \frac{kg}{cm^2}\right) \left(\frac{1cm^2}{0.0001m^2}\right) * (0.0276 m^3)}{\left(31.172 \frac{kg m}{kg * ^\circ K}\right) * (295.33 ^\circ K)}$$

$$= 0.031 kg \text{ biogás sin tratamiento}$$

R del biogás = $31.172 \frac{kg m}{kg * ^\circ K}$ según literatura (Martina *et al.*, 2005)

Cálculo No.29 : Rendimiento teórico de biogás

$$Q_{entregado} = \frac{5050 kcal/m^3 * 0.031kg}{1.08 kg/m^3} = 144.95 kcal$$

$$Q_{absorbido} = 1kg * 1 \frac{kcal}{kg * ^\circ C} * 35^\circ C = 35 kcal$$

$$Rendimiento = \frac{35 kcal}{144.95 kcal} = 0.241 kcal$$

Cálculo No. 30: Calor absorbido por el agua en combustión de biogás sin tratamiento

$$Q_{absorbido} = 1kg * 1 \frac{kcal}{kg * ^\circ C} * 28^\circ C = 28 kcal$$

Cálculo No.31 : Calor entregado por el biogás sin tratamiento

Al quemarse el calor entregado se calcula en función del rendimiento de la combustión y el calor absorbido por el agua. Asumimos que el rendimiento es el de la literatura 0.65.

$$Q_{entregado} = \frac{28 kcal}{0.241} = 116.18kcal$$

Cálculo No.32 : Calor absorbido por el agua en combustión de biogás con tratamiento

$$Q_{\text{absorbido}} = 1 \text{ kg} * 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * 35^\circ\text{C} = 35 \text{ kcal}$$

Cálculo No.33 : Calor entregado por el biogás con tratamiento

Al quemarse el calor entregado se calcula en función del rendimiento de la combustión y el calor absorbido por el agua. Asumimos que el rendimiento es el de la literatura 0.65.

$$Q_{\text{entregado}} = \frac{35 \text{ kcal}}{0.241} = 145.23 \text{ kcal}$$

El calor entregado que se calculó anteriormente es igual al producto del poder calorífico que contiene el biogás multiplicado por la masa utilizada para la combustión. Asumimos según la literatura una densidad del biogás de $\rho = 1.08 \text{ kg/m}^3$.

Cálculo No.34 : Poder calorífico de biogás con tratamiento

$$\text{Poder calorífico} = \frac{145.23 \text{ kcal} * 1.08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.031 \text{ kg}} = 5,059.56 \text{ kcal/m}^3$$

Cálculo No. 35: Poder calorífico de biogás sin tratamiento

$$\text{Poder calorífico} = \frac{116.18 \text{ kcal} * 1.08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.031 \text{ kg}} = 4,047.56 \text{ kcal/m}^3$$

Cálculo No. 36: Cálculo de área de la sección transversal al flujo

(Se utiliza mismo cálculo para área de filtro de CO₂)

$$A = \frac{Q}{V}$$

Donde:

A: Área de la sección transversal perpendicular al flujo de gas (m^2)

Q: Caudal de gas (m^3/h)

V: Velocidad de diseño del gas (m/s)

Según la literatura se recomienda para mayor eficiencia en la remoción de impurezas del gas una velocidad de diseño de entre 3 a 1 m/s, esto para aumentar el tiempo de contacto entre la fase sólida (viruta de hierro) y la gaseosa (metano).

La mayor capacidad del compresor utilizado en el Megaproyecto es de 12 L/min

Se utilizó 1m/s para los cálculos del área de la sección transversal.

$$A = \frac{0.012 \frac{m^3}{min}}{1 \frac{m}{s}} = 0.012m^2$$

Cálculo No. 37: Cálculo de diámetro óptimo para el filtro de sulfuro de hidrógeno

(Se utiliza mismo cálculo para diámetro de filtro de CO₂)

Ecuación No.2:
$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

Donde:

A: Área de la sección transversal perpendicular al flujo de gas (m^2)

D: Diámetro de la columna

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.012m^2}{\pi}} = 0.12m$$

Cálculo No. 38: Altura promedio de la columna de medio filtrante

(Se utiliza mismo cálculo para altura de filtro de CO₂)

$$\frac{L}{D} = 6$$

$$\frac{L}{0.12} = 6$$

$$L = 0.72m$$

Cálculo No. 39: Tiempo de residencia de gas en filtro de óxido de hierro

(Se utiliza mismo cálculo para tiempo de residencia de filtro de CO₂)

$$EBRT = \frac{V_f}{Q}$$

$$EBRT = \frac{0.0027m^3}{0.0002m^3/s} = 13.44s$$

3. Análisis de Error

Cálculo No. 1: Propagación de error por suma y resta

La fórmula para determinar la propagación de error por operaciones de suma y resta, según Skoog en su libro "Fundamentos de Química Analítica", 8ª edición es:

$$S_y = \sqrt{(S_a)^2 + (S_b)^2}$$

Por ejemplo para la incertidumbre de la determinación de cenizas

$$S_y = \sqrt{(0.0001g)^2 + (0.0001g)^2} = \pm 0.0002g$$

Este cálculo se realizó para todas las operaciones que incluían una suma o resta.

Cálculo No. 2: Propagación de error por multiplicación y división

La fórmula para determinar la propagación de error por operaciones de multiplicación y división, según Skoog en su libro "Fundamentos de Química Analítica", 8ª edición es:

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2}$$

Por ejemplo, para determinar la incertidumbre de $S_y =$

$$\left(1.0059 \frac{g}{mL}\right) \sqrt{\left(\frac{0.2mL}{10mL}\right)^2 + \left(\frac{0.0001g}{10.0596}\right)^2} = \pm 0.02 \frac{g}{mL}$$

Este cálculo se realizó para todas las operaciones que incluían una multiplicación o resta.

Cálculo No. 3: Propagación de error por suma y resta

El promedio es la suma de la serie de números dados, dividido entre el número total de elementos que forman la serie:

$$Promedio = \frac{\sum_i^n x_i}{n}$$

Por ejemplo, para determinar el promedio del nitrógeno amoniacal del estiércol:

$$N \text{ amoniacal promedio} = \frac{0.0131g + 0.0136g + 0.0190g + 0.0194g}{4} = 0.0163 g$$

Cálculo No. 4: Incertidumbres para sumas y restas

$$s_y = \sqrt{s_a^2 + s_b^2 + \dots + s_n^2}$$

Se aplica a los resultados de ppm de sulfuro de hidrógeno y % de dióxido de carbono reducidos, ya que es una diferencia entre dato inicial y dato final.

$$\sqrt{(0.5)^2 + (0.5)^2} = 80 \pm 0.7\text{ppm}$$

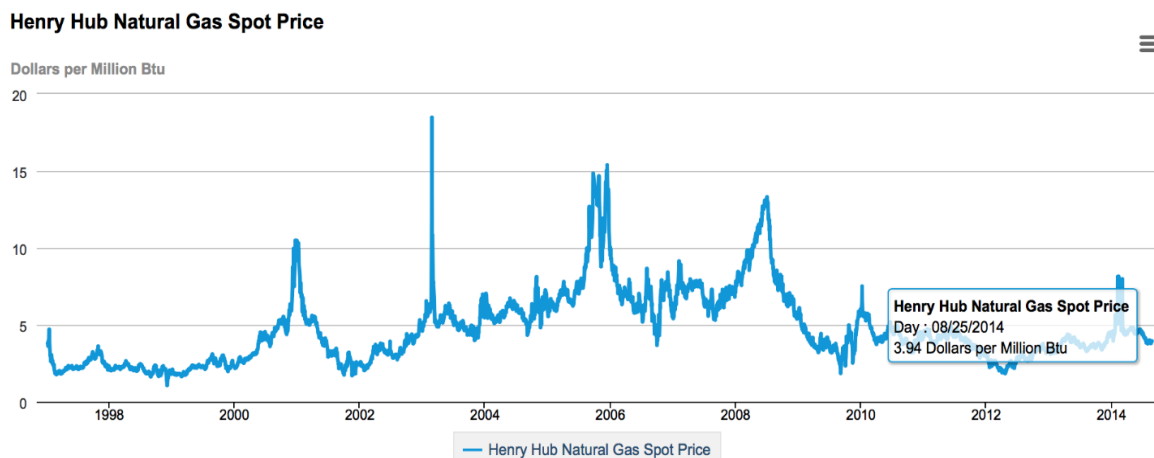
Cálculo No. 5: Incertidumbres para cálculo de porcentaje de reducción de gases contaminantes

$$\text{resultado} + \sqrt{\left(\frac{Sa}{a}\right)^2 + \left(\frac{Sb}{b}\right)^2 + \dots}$$

$$\sqrt{\left(\frac{0.7}{80}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{93}\right)^2} = 86.02 \pm 0.01\%$$

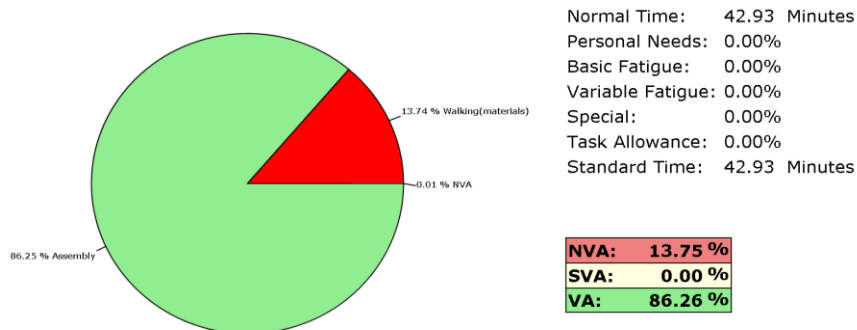
C.Módulo: Análisis y propuesta de mejora de los procesos de trabajo y viabilidad económica de la instalación de un biodigestor en el Zoológico “La Aurora”.

Figura 17: Gráfica de tendencias del precio del biogás



En esta gráfica del precio del biogás por millones de Btu, se puede visualizar las tendencias que ha tenido el biogás en los 16 años.

Figura 18: Resultado Estudio de Tiempos Actual



Resumen de tareas	
Descripción	Tiempo estándar (min)
Tarea 1: Acumulación de desechos	13.23
Tarea 2: Recolección de desechos	5.02
Tarea 3: Almacenamiento de desechos	8.76
Tarea 4: Limpieza del recinto	15.92

Tarea 1: Acumulación de desechos

Obs. No.	Rating	Start Time	End Time	Observed Time	Normal Time
1	100	0.00	12.45	12.45	12.45
5	100	0.00	11.25	11.25	11.25
9	100	0.00	16.00	16.00	16.00

Tarea 2: Recolección de desechos

Obs. No.	Rating	Start Time	End Time	Observed Time	Normal Time
2	100	12.45	16.57	4.12	4.12
6	100	12.00	18.29	6.29	6.29
10	100	16.35	21.00	4.65	4.65

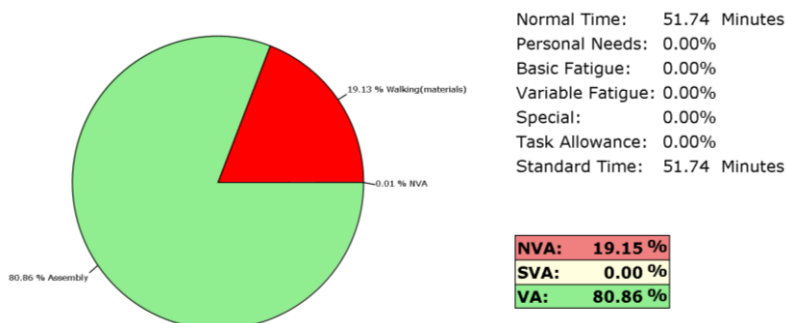
Tarea 3: Almacenamiento de desechos

Obs. No.	Rating	Start Time	End Time	Observed Time	Normal Time
3	100	16.58	25.13	8.55	8.55
7	100	18.30	28.64	10.34	10.34
11	100	21.12	28.51	7.39	7.39

Tarea 4: Limpieza del recinto

Obs. No.	Rating	Start Time	End Time	Observed Time	Normal Time
4	100	25.13	39.52	14.39	14.39
8	100	28.64	46.00	17.36	17.36
12	100	28.51	44.51	16.00	16.00

Figura 19: Resultados estudios de tiempos propuesto



Resumen de tareas	
Descripción	Tiempo estándar (min)
Tarea 1: Acumulación de desechos	13.23
Tarea 2: Recolección de desechos	5.22
Tarea 3: Purga de biodigestor	9.52
Tarea 4: Almacenamiento de desechos	5.35
Tarea 5: Limpieza del recinto	18.42

Tarea 1: Acumulación de desechos

Obs. No.	Rating	Start Time	End Time	Observed Time	Normal Time
1	100	0.00	12.45	12.45	12.45
6	100	0.00	11.25	11.25	11.25
11	100	0.00	16.00	16.00	16.00

Tarea 2: Recolección de desechos

Obs. No.	Rating	Start Time	End Time	Observed Time	Normal Time
2	100	12.45	16.57	4.12	4.12
7	100	11.26	17.54	6.28	6.28
12	100	16.01	21.28	5.27	5.27

Tarea 3: Purga de biodigestor

Obs. No.	Rating	Start Time	End Time	Observed Time	Normal Time
3	100	16.58	25.53	8.95	8.95
8	100	17.54	26.85	9.31	9.31
13	100	21.29	31.59	10.30	10.30

Tarea 4: Almacenamiento de desechos biodigestor

Obs. No.	Rating	Start Time	End Time	Observed Time	Normal Time
4	100	25.53	30.21	4.68	4.68
9	100	26.85	31.84	4.99	4.99
14	100	31.60	37.97	6.37	6.37

Tarea 5: Limpieza del recinto

Obs. No.	Rating	Start Time	End Time	Observed Time	Normal Time
5	100	30.21	44.60	14.39	14.39
10	100	31.85	51.79	19.94	19.94
15	100	37.98	58.91	20.93	20.93

Tabla 46. Tabla de Número Más Probable (NMP) utilizada para el resultado del análisis microbiológico.

Combination of Positives	MPN Index per g (ml)	95% Confidence Limits	
		Lower	Upper
0-0-0	<0.3	---	0.95
0-0-1	0.30	0.015	0.96
0-1-0	0.30	0.015	1.1
0-1-1	0.61	0.12	1.8
0-2-0	0.62	0.12	1.8
0-3-0	0.94	0.36	3.8
1-0-0	0.36	0.017	1.8
1-0-1	0.72	0.13	1.8
1-0-2	1.1	0.36	3.8
1-1-0	0.74	0.13	2.0
1-1-1	1.1	0.36	3.8
1-2-0	1.1	0.36	4.2
1-2-1	1.5	0.45	4.2
1-3-0	1.6	0.45	4.2
2-0-0	0.92	0.14	3.8
2-0-1	1.4	0.36	4.2
2-0-2	2.0	0.45	4.2
2-1-0	1.5	0.37	4.2
2-1-1	2.0	0.45	4.2
2-1-2	2.7	0.87	9.4
2-2-0	2.1	0.45	4.2
2-2-1	2.8	0.87	9.4
2-2-2	3.5	0.87	9.4
2-3-0	2.9	0.87	9.4
2-3-1	3.6	0.87	9.4
3-0-0	2.3	0.46	9.4
3-0-1	3.8	0.87	11.
3-0-2	6.4	1.7	18.
3-1-0	4.3	0.90	18.
3-1-1	7.5	1.7	20.
3-1-2	12.	3.7	42.
3-1-3	16.	4.0	42.
3-2-0	9.3	1.8	42.
3-2-1	15.	3.7	42.
3-2-2	21.	4.0	43.
3-2-3	29.	9.0	100.
3-3-0	24.	4.2	100.
3-3-1	46.	9.0	200.
3-3-2	110.	18.	410.
3-3-3	>110.	42.	---

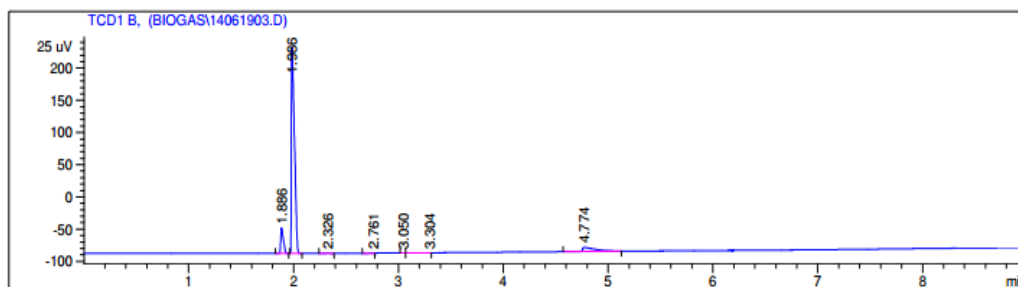
Issuing Authority: Director, Laboratory Quality Assurance Staff (LQAS)

(Obtenida de USDA, 2014)

Ilustración 21: Copia de resultados de pruebas de absorción de gases de biogás obtenido durante fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora"

```

-----
Injection Date   : 6/20/2014 1:27:40 PM
Sample Name     : Muestra E 10/06
Acq. Operator  : AdeM
Acq. Instrument : Instrument 1
Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 6/20/2014 11:20:53 AM by AdeM
                (modified after loading)
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 6/23/2014 11:40:24 AM by AdeM
                (modified after loading)
Metodo para determinacion de Metano en Biogas
Columna HP-PLOT Q 30mx 0.32mm 20um
temperatura inicial 60 C 2 min,30 C/min hasta 240 C 1 min
Temperatura del inyector 100 C
Temperatura del detector 250 C(TCD y FID)
Vol inyeccion 500ul
  
```



Area Percent Report

```

-----
Sorted By      : Signal
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
Sample Amount  : 500.00000 [ng/ul] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
  
```

Signal 1: TCD1 B,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	1.886	BP	0.0259	67.70895	39.75166	8.76148
2	1.986	PB	0.0315	649.57562	321.87415	84.05454
3	2.326	BB	0.0305	8.62467e-1	4.47856e-1	0.11160
4	2.761	PP	0.0514	2.71012e-1	6.53894e-2	0.03507
5	3.050	BP	0.0299	1.86892e-1	8.41679e-2	0.02418
6	3.304	VP	0.0944	5.64248e-1	7.20268e-2	0.07301
7	4.774	BB	0.1053	53.63335	6.43155	6.94011

Totals : 772.80254 368.72680

Results obtained with enhanced integrator!

*** End of Report ***

Ilustración 22: Resultados integrados de pruebas de absorción de gases de biogás obtenido durante fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora".

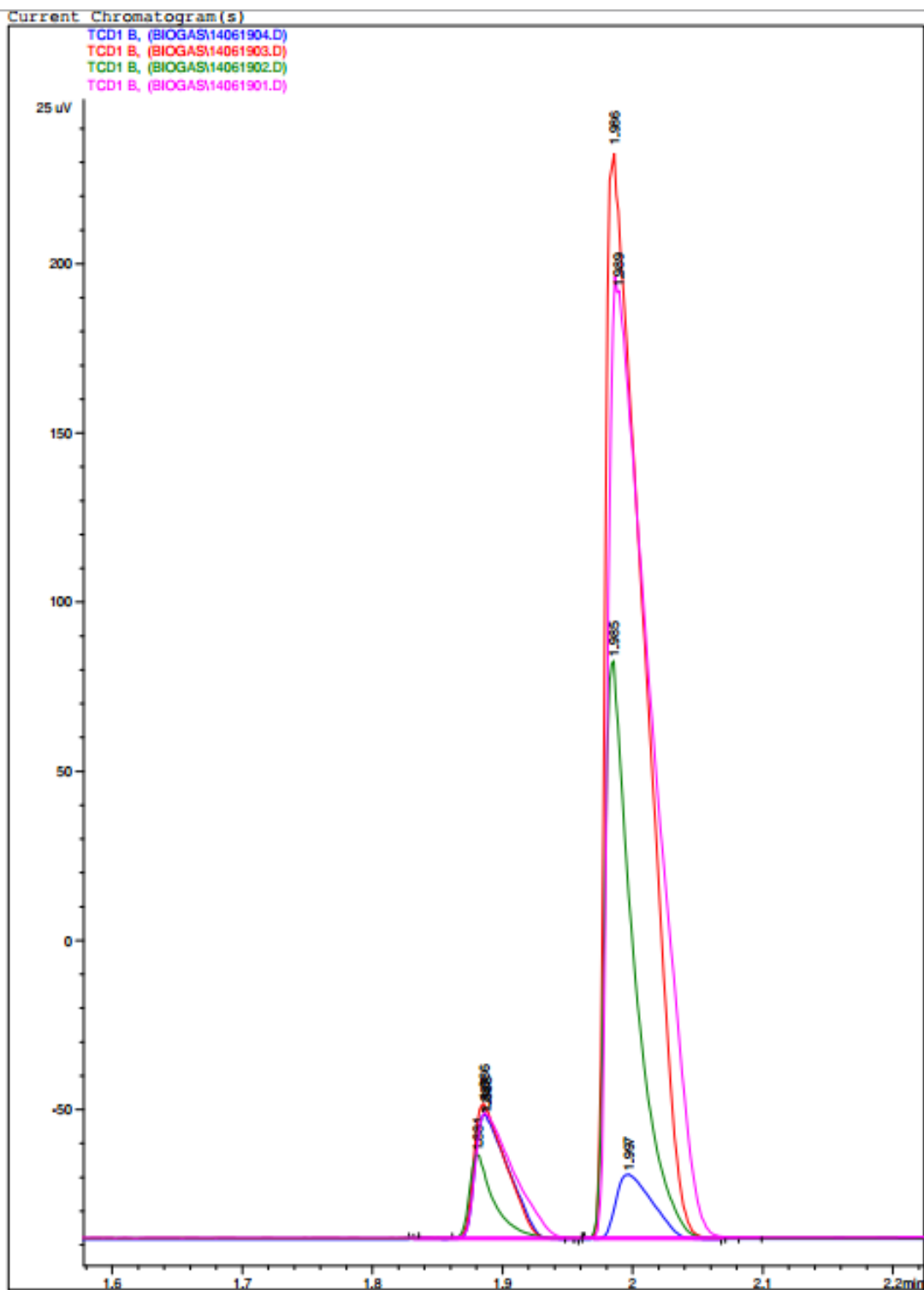


Ilustración 23: Biodigestor utilizado durante prueba piloto de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora"



Ilustración 24: Diagrama de equipos utilizados durante pruebas piloto de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico "La Aurora"

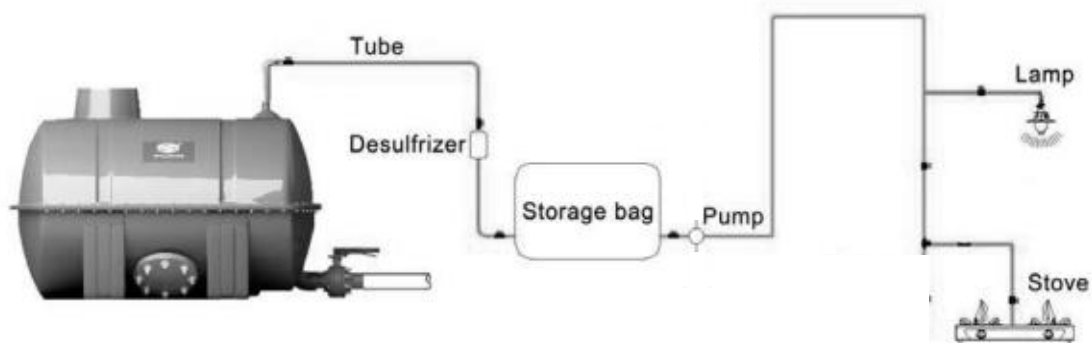


Ilustración 25: Diagrama de flujo de corrientes de entradas y salidas de biodigestor

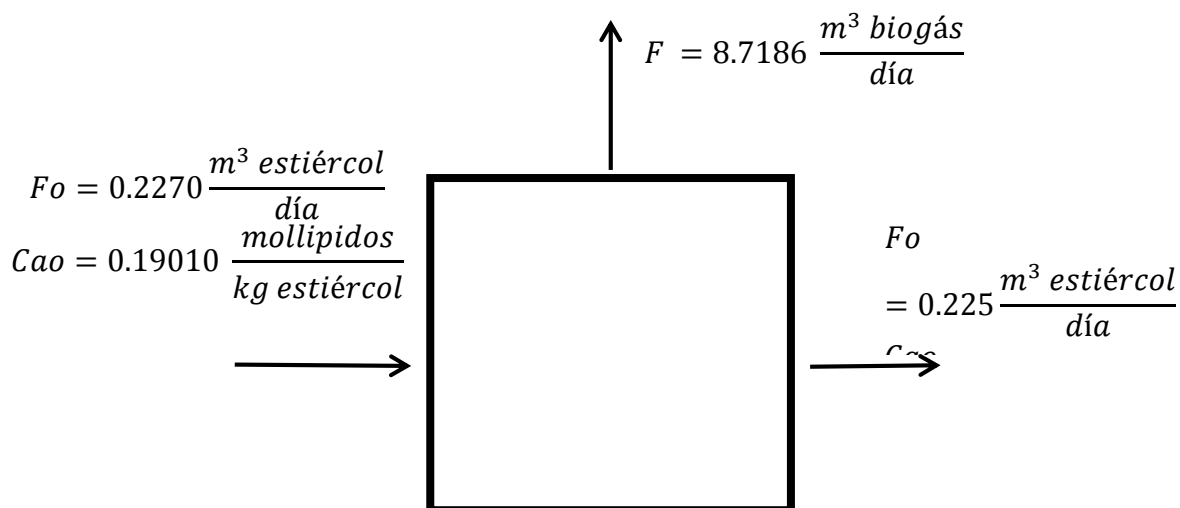


Figura 22. Caja de anaerobiosis utilizada en el análisis microbiológica. Están cerrada herméticamente, los tubos con las muestras en el interior, el GasPak (paquete de aluminio) y el indicador que no se observa en esta imagen. La caja se colocaba dentro de la incubadora a 42°C durante 48 horas.



Fuente: Yuguen Soto (Laboratorio de Microbiología)

Figura 23. Color del indicador antes y después de la incubación en ambiente anaerobio.

A) Antes de la incubación se observaba de color celeste y consistencia húmeda. B) Después de la incubación se observaba color blanco con indicios de celeste pálido, también de consistencia seca. Al haber un cambio de color (celeste a blanco) indica que el ambiente es anaerobio.



Fuente: Yunuen Soto (Laboratorio de Microbiología)

Figura 24. Biodigestores a escala de laboratorio dentro de la incubadora a temperatura constante.

Los frascos con las diferentes mezclas estaban unidos a botellas calibradas por medio de mangueras de plástico. El volumen de biogás producido se medía por el desplazamiento del agua dentro de las botellas. La incubadora se mantenía cerrada.



Fuente: Yugen Soto (Laboratorio de Ingeniería Bioquímica)

Ilustración 26: Fotografía de elaboración de análisis grasas y proteínas a través de método Kjeldahl y Soxhlet



Fuente: Oscar Duarte,

Ubicación: Laboratorio de Departamento de Ing. en Ciencias de los Alimentos

Ilustración 27: Fotografía de equipo instalado en Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala



Fuente: Oscar Duarte,

Ubicación: Laboratorio Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 28: Fotografía de materia prima de desechos orgánicos seleccionados de Zoológico “La Aurora” para alimentar a biodigestor piloto



Fuente: Oscar Duarte,

Ubicación: Laboratorio Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala

Lustración 29: Fotografía de sistema completo con lámpara de biogás instalada en Universidad del Valle de Guatemala y producido a partir de desechos orgánicos de Zoológico “La Aurora”



Fuente: Oscar Duarte,

Ubicación: Laboratorio Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 30: Fotografía de mezclado manual realizado a biodigestor piloto e instrumentación utilizada para mediciones de temperatura y pH de solución contenida en biodigestor piloto.



Fuente: Oscar Duarte,

Ubicación: Laboratorio Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 31: Fotografía de sistema completo con lámpara de biogás instalada en Universidad del Valle de Guatemala y producido a partir de desechos orgánicos de Zoológico “La Aurora”



Fuente: Oscar Duarte,

Ubicación: Laboratorio Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 25: "Biodigestor piloto semana 2 con carga de residuos sólidos provenientes de Zoológico "La Aurora"



Fuente: Rodolfo Galdámez

Ubicación: Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 26: "Biodigestor piloto semana 1 en carga de residuos sólidos provenientes del Zoológico "La Aurora"



Fuente: Oscar Duarte

Ubicación: Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 27: "Bolsa de biogás después de 3 semanas de biodigestión anaerobia de los desechos sólidos orgánicos generados en Zoológico "La Aurora"



Fuente: Yuguen Soto

Ubicación: Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 28: Prueba piloto estufa funcionando con biogás



Fuente: Melanie Castillo

Ubicación: Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 29: Semana 3 de biodigestión anaeroba de los desechos orgánicos del Zoológico "La Aurora"



Fuente: Oscar Duarte

Ubicación: Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 30: Sistema de purga para salida de residuos de biodigestión anaerobica



Fuente: Yunuen Soto

Ubicación: Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 31: Medición de composición de biogás producido durante biodigestión anaeróbica



Fuente: Oscar Duarte

Ubicación: Universidad del Valle de Guatemala



Ilustración 32: Transporte de Cargas Sólidas del Zoológico "La Aurora" hacia Universidad del Valle de Guatemala



Fuente: Rodolfo Galdámez

Ubicación: Zoológico "La Aurora"

Ilustración 32: Filtro con capacidad de 8L para 1600m³

FILTRO

DESULFURIZADOR DE 8 L.

www.energeticdepot.com
Productos para biogas


Características

En el biogás, existen trazas de ácido sulfhídrico, H₂S, también conocido como sulfuro de hidrógeno, el cual tiene potencial de toxicidad, corrosión y posee un olor peculiar (a huevo podrido), por lo que se deben instalar filtros desulfurizadores previo a almacenar y utilizar biogás. El componente básico del desulfurizador es el óxido férrico, Fe₂O₃.

Cuando el biogás sale de la planta (biodigestor), existe vapor de agua que puede ser separado por condensación mediante deshidratadores. Luego se procede a la desulfurización del biogás, cuyo principio es:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \cdot 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}$$

Después de utilizarlo, disminuirá su efectividad. Por lo que se debe cambiar o regenerar el material filtrante, cuyo principio de reacción es:



Kilómetro 14.5,
Carretera a El Salvador, Gran Plaza, Bodega 117, Puerta Parada, Santa Catarina Pinula, Guatemala, C.A.

Teléfonos
(502) 6634-1796
Fax 66852605

e-mail
biogas@saigua.com

D. Módulo: Producción y venta de energía renovable a través de biomasa en el Zoológico “La Aurora”

Características del biogás:

- 261.55 m³/mes
- 6.054 litros/minuto

Bolsa de almacenamiento de biogás 10 m³:

a. Vida útil: 10 años.

Tipo	Especificación	Observación
PX-CQD-HY005	los 0.5M ³	PVC, tamaño: el 1.5*1.2M
PX-CQD-HY01	1 M ³	PVC, tamaño: el 1.5*2.2M
PX-CQD-HY02	los 2M ³	PVC, tamaño: el 1.5*2.8M
PX-CQD-HY03	3M ³	PVC
PX-CQD-HY05	los 5M ³	PVC
PX-CQD-HY10	10M ³	PVC,
PX - CQD-A101	los 28.26M ³	PVC, tamaño: los 2*9M
PX - CQD-A102	los 37.68M ³	PVC, tamaño: los 2*12M
PX - CQD-A103	los 50M ³	PVC, tamaño: los 3*7M
PX - CQD-A104	los 64M ³	PVC, tamaño: los 3*9M
PX - CQD-A105	los 85M ³	PVC, tamaño: los 3*12M
PX - CQD-A106	el 100M ³	PVC, tamaño: los 4*8M
PX - CQD-A107	el 150M ³	PVC, tamaño: los 4*12M
PX - CQD-A108	el 196M ³	PVC, tamaño: los 5*10M
		Presión máxima: 8-10KPA Presión de funcionamiento: 4-5KPA

(Saigua, S. A., 2014)

Bomba (compresor):

Método de carga: Solar o CA 220V

Frecuencia: 50Hz

Energía: 10 W

Presión máxima

(kgf/cm²) >0.12

(Saigua, S. A., 2014)

_Filtro desulfurizador para interiores 800 m³ de biogás:



(Saigua, S. A., 2014)

Estufa Industrial de biogás:

Potencia: 2.8KW

Presión de la entrada del gas: 1600Pa

Tasa de Consumo:
0.45m³/h

Peso bruto: 3kgs

(c/hornilla)

Eficiencia del calor:



(Saigua, S. A., 2014)

Lámpara de biogás:

La luz es similar a una lámpara incandescente de 60 — 100w.

Consumo del gas:
0.07m3/h

Tamaño:
310×300×260m m,



(Saigua, S. A., 2014)

Generador 3 Kw

Quick Details

Place of Origin:	Guangdong China (Mainland)	Brand Name:	PUXIN	Model Number:	PX- 3KW
Output Type:	AC Single Phase	Speed:	1500R/M	Frequency:	50HZ
Rated Power:	3000W	Rated Voltage:	230V	Rated Current:	12V 8.3A
Model Number::	8KW--500KW	Generator Type:	Single-phase Brush Motor	Displacement:	163cc
Ignition System:	T.C.I.	Engine oil capacity:	0.55L	Suitable gas:	Biogas/LPG
Engine Type:	CC168F	Gas consumption:	1.4 m3/h	Bore X Stroke:	68 x 45mm

(Saigua, S. A., 2014)

Tabla 47: Cotizaciones para inversión

<i>Cotizaciones</i>		
Empresa	Teléfonos	Otro
Cien pies producción	2337-4825	5808-7120
Todo producciones		5293-0642
Smartkeping	2434-0448	5523-3002
Saigua (Juan Carlos Hernández)	66341796	23656915
Electroma	2207-3838	2207 3838
Amanco	2410 1300	

Equivalencias energéticas 1 m³ de biogás



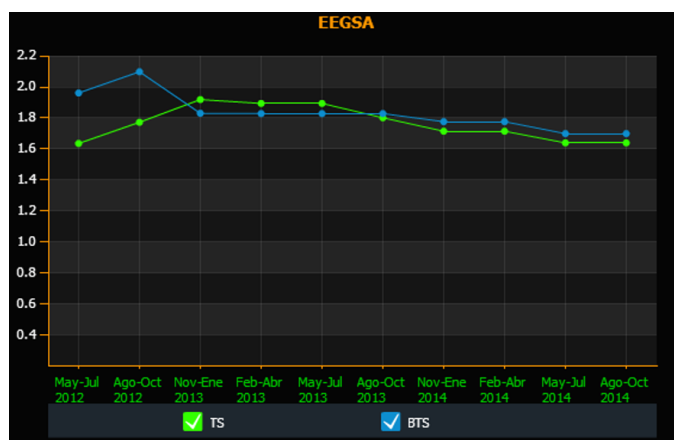
(IDAE, 2007)

Tabla 48: Porcentaje de variación en precio energía eléctrica:

Periodo	Año	Tarifa Social (Q/Kwh)	Promedio por año	Diferencia
May-Jul	2012	GTQ 1.6354	GTQ 1.7451	-
Ago-Oct	2012	GTQ 1.7707		
Nov-Ene	2012	GTQ 1.8291		
Feb-Abr	2013	GTQ 1.8278	GTQ 1.7928	Q0.0477
May-Jul	2013	GTQ 1.8280		
Ago-Oct	2013	GTQ 1.8013		
Nov-Ene	2013	GTQ 1.7139	GTQ 1.6886	-Q0.1042
Feb-Abr	2014	GTQ 1.7139		
May-Jul	2014	GTQ 1.6379		
Ago-Oct	2014	GTQ 1.7139		

Promedio
variación: -2.82%
(Salguero, 2014)

Figura 25: Variación histórica de tarifas Q/Kwh



(CNEE, s.f.)

Tabla 49: Amortización préstamo

AMORTIZACIÓN PRÉSTAMO					
N		10			
i		16%			
P	GTQ	130,000.00			
A	GTQ	26,897.14			

No. Cuotas	Capital	Interés / Capital	Total Deuda	Pago a Capital	Pago
1	GTQ 130,000.00	GTQ 20,800.00	GTQ 150,800.00	GTQ 6,097.14	GTQ 26,897.14
2	GTQ 123,902.86	GTQ 19,824.46	GTQ 143,727.32	GTQ 7,072.68	GTQ 26,897.14
3	GTQ 116,830.18	GTQ 18,692.83	GTQ 135,523.00	GTQ 8,204.31	GTQ 26,897.14
4	GTQ 108,625.86	GTQ 17,380.14	GTQ 126,006.00	GTQ 9,517.00	GTQ 26,897.14
5	GTQ 99,108.86	GTQ 15,857.42	GTQ 114,966.28	GTQ 11,039.72	GTQ 26,897.14
6	GTQ 88,069.14	GTQ 14,091.06	GTQ 102,160.20	GTQ 12,806.08	GTQ 26,897.14
7	GTQ 75,263.06	GTQ 12,042.09	GTQ 87,305.15	GTQ 14,855.05	GTQ 26,897.14
8	GTQ 60,408.01	GTQ 9,665.28	GTQ 70,073.29	GTQ 17,231.86	GTQ 26,897.14
9	GTQ 43,176.15	GTQ 6,908.18	GTQ 50,084.33	GTQ 19,988.96	GTQ 26,897.14
10	GTQ 23,187.19	GTQ 3,709.95	GTQ 26,897.14	GTQ 23,187.19	GTQ 26,897.14

Fuente tasa de interés: BANRURAL

Tabla 50: Cálculo de potencia máxima para iluminación externa

<u>Tipo de lámpara</u>	# de lámparas	Potencia unitaria (W)	Potencia (W)	Potencia (Kw)	Horas de uso diario	Energía consumida (Kwh)
1	2	40	80	0.08	12	0.96
2	3	15	45	0.045	12	0.54
3	22	75	1650	1.65	12	19.8
4	41	175	7175	7.175	12	86.1
5	10	0.5	5	0.005	12	0.06
6	16	60	960	0.96	12	11.52
7	7	400	2800	2.8	12	33.6
Energía consumida diaria (Kwh)						152.58

Energía consumida diaria (Kwh)	152.58
Precio (Sin IVA) Q/ Kwh (27/1/14)	Q1.71
Total cargo mensual (Sin IVA)	Q7,827.35
Total cargo mensual (Con IVA)	Q8,766.64
Tasa municipal 13%	Q1,017.56
Total cargo mensual	Q9,784.19

Supuestos:

Tarifa social según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE)

Mes de 30 días

IVA: 12%

$$E_{(kWh)} = P_{(W)} \times t_{(hr)} / 1000$$

Figura 26: Precio energía eléctrica Tarifa Social

RESOLUCIÓN	CNEE-255-2013	CNEE-256-2013
Tarifa: Social - TS		Valor
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)		9.859991
Cargo por Energía (Q/kWh)		1.713949

(CNEE, s.f.)

Figura 27: Proyecciones de población guatemalteca

Año	Proyecciones de población total	Tasa de crecimiento
2010	14,361,666	2.5
2011	14,713,763	2.5
2012	15,073,375	2.4
2013	15,438,384	2.4
2014	15,806,675	2.4
2015	16,176,133	2.3

(Estadísticas, 2010)

Figura 28: Población guatemalteca por grupo de edad y sexo

Grupos quinquenales por edad	Hombres	Mujeres	Total
0 - 4	919,315	868,193	1,787,508
5 - 9	973,970	878,063	1,852,033
10 - 14	1,019,787	961,444	1,981,231
15 - 19	848,146	880,489	1,728,635
20 - 24	646,134	711,705	1,357,839
25 - 29	477,475	554,505	1,031,980
30 - 34	461,427	538,532	999,959
35 - 39	370,039	412,502	782,541
40 - 44	298,834	348,453	647,287
45 - 49	270,505	302,897	573,402
50 - 54	215,230	281,992	497,222
55 - 59	189,253	192,887	382,140
60 - 64	145,639	168,734	314,373
65 - 69	104,416	123,496	227,912
70 - 74	92,004	97,609	189,613
75 - 79	63,028	70,334	133,362
80 - 84	39,395	39,940	79,335
85 ó más	28,416	41,699	70,115
TOTALES	7,163,013	7,473,474	14,636,487

(Encovi, 2011)

Apéndice 8

Entrevista CNEE:

ANTECEDENTES DE LA ENERGÍA EN GUATEMALA

Comisión Nacional de Energía

PRESENTACIÓN

Buenos días, mi nombre es Karla María Salguero, estudiante de cuarto año de ing. En ciencias de la administración en la Universidad del valle de Guatemala, integrante del megaproyecto “Implementación de un biodigestor en el Zoológico la Aurora”, dicho proyecto busca estudiar la factibilidad de producción de metano para la obtención y posteriormente venta de energía eléctrica.

INICIO

Empresa: COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELECTRICA DE GUATEMALA

Persona entrevistada: MARCELO

Función: GERENTE DE MERCADO

ETAPA 1: PERFIL DE LA EMPRESA

1. *¿Qué es la Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala?*

Es el ente regulador del sector eléctrico. Administrativamente es una entidad que es dependiente del Ministerio de Energía y Minas, es una unidad técnica, pero es totalmente autónoma, porque sus ingresos son privativos, vienen de la tarifa que pagan los usuarios finales (regulados). Su administración es nombrada de forma independiente, siendo nombrados los directores por las Universidades, otro es nombrado por el sector privado y el gobierno. La directiva tiene un periodo de 5 años siendo la función de la Comisión regular el sector.

2. *¿Qué es lo que se regula en el sector?*

Se regulan las tarifas de energía eléctrica a los usuarios finales, los peajes en el sistema de transporte y el mercado mayorista de electricidad.

3. *¿Por qué son una entidad separada del Ministerio de Energía y Minas y no se encuentra dentro del ministerio?*

Por la figura de reguladora, ya que el regulador debe de ser un ente bastante autónomo, técnico, objetivo, buscando no ser un ente político siendo sus decisiones con base en estadísticas. Cuando se hizo la ley en el año 1996, el primer intento fue que el ente fuera una organización completamente desligada del organismo ejecutivo; pero por cuestiones políticas (el número de votos que se requería), se unió al Ministerio. El único efecto que tuvo dicha acción, es que todas las resoluciones dentro de la Comisión pueden ser conocidas en segunda instancia por el Ministerio.

ETAPA 2: ANTECEDENTES DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA

4. *¿Está subsidiada la energía en Guatemala?*

La energía en Guatemala no está subsidiada, lo que sí está subsidiado son un segmento de usuarios que pertenecen a la tarifa social. En el gobierno del FRG salió la “Ley de la Tarifa Social” la cual establece que cierto segmento de usuarios debe recibir una tarifa preferencial. Son subsidios que el gobierno aplica directamente no es que exista una estructura tarifaria, y que hayan subsidios cruzadas en diferentes tarifas; sino que es un aporte directo que el Gobierno hace a través del INDE, este aporta dichos recursos para que los usuarios debajo de 300 KW/hora reciban un descuento. Por lo que el rol principal de la Comisión es fijar la tarifa que debe ser.

5. *¿Por qué han cambiado tanto las tarifas en el mercado guatemalteco en los últimos 10 años?*

Las tarifas de las distribuidoras han variado por los tipos de contratos de generación existentes, antes de la ley general de electricidad, en Guatemala hubo una crisis energética, en la cual hubo cortes de suministro energético ya que el Estado no se daba abasto para cubrir la demanda del suministro del mercado. En estas condiciones de crisis se firmaron algunos contratos de generación, dado a que no se contaba con el capital para que el propio Estado ampliara sus generadores, a los cuales se les llamó “contratos pre-existentes” por estar antes de la ley.

Estos contratos se han respetado hasta el último día, afortunadamente la mayoría vence el 30 de abril de 2014, siendo 20 años con contratos firmados en condiciones de emergencia. Primero se firmó contratos con generadores como

“ingenios”, y otras generadoras, los cuales tenían la ventaja de que por su proceso productivo ya tenían generador instalado. En dichos contratos se indexó el precio de la energía al precio del búnker, lo que ha hecho que los precios fluctúen tanto en relación a dicho producto.

El único contrato que resultó beneficioso fue el contrato con la carbonera “San José”, dado a que el precio de dicho recurso no ha variado tanto por los años.

El año pasado (2013), se adjudicaron contratos nuevos, promoviendo licitaciones de generación a largo plazo con el objetivo de tener nuevos y mejores contratos para las distribuidoras, que al final redundan en mejores precios para los usuarios. Los contratos fueron buenos porque los distribuidores tenían contratos nuevos con nuevas tecnologías (la mayoría de ellas en energías renovables) y a mejores precios. A la primera se buscó atraer licitaciones con energías renovables y se adjudicaron en su mayoría hidroeléctricas (a un precio bueno) y a su vez se adjudicaron otras energías no convencionales entre ellas una planta de 20 mega vatios (eólica), biodigestores y otros lamentablemente no pero si hubo la oportunidad de haber recibido esa clase de contratos. Muchas pequeñas hidroeléctricas cerca de las distribuidoras que se le conocen como *generación de energía renovable distribuida* que son de menos de 5 mega vatios y que pueden generar cerca de estos *centros de carga* ahorrándose pérdidas y muchas cosas más, dando como resultado que paulatinamente se va ir bajando la tarifa. Muchos proyectos no pueden entrar a partir del primero de mayo porque dichos programas han sufrido atrasos, no por culpa de los inversionistas sino por problemas sociales en Guatemala ya que por algún motivo hay mucha oposición a las hidroeléctricas en Guatemala, lo que provoca que los proyectos modifiquen su tiempo de inicio de operación. Para el 2015 esperamos que ya estén todos los proyectos o por lo menos en su mayor parte, lo que generará una reducción en el precio de la tarifa. Otro proyecto que se adjudicó por el vencimiento de los contratos fue el proyecto “Jaguar”, una carbonera de 300 mega vatios a un precio muy bueno para el mercado, pero que en este si hubo un problema de retraso por los inversionistas, ya que estos contrataron una empresa china y que por problemas de capitales el proyecto tiene atrasos significativos, tuvo que haber entrado en diciembre del año pasado se le hicieron efectivas garantías que ellos habían requerido (se benefició la tarifa), y ahora tienen plazo para entrar con una unidad de 150 mega vatios en septiembre y la otra en diciembre, pero por lo que se ve va a haber un poco más de atraso.

6. *¿Cuáles son los diferentes tipos de tarifas energéticas que existen?*

- a. Usuario regulado: Las tarifas son fijadas por la comisión. Es usuario de las distribuidoras, teniendo una gama de tarifas que la Comisión estructura para operar. Dichas tarifas puede ser:
 - i. Baja tensión: Conectados normalmente en 220 voltios, 480 voltios, entre otros.
 - ii. Media tensión: Clientes que se conectan directamente a las líneas de distribución. Se conectan en 13,000 voltios, etc.
 - iii. Alta tensión: Clientes que se conectan directamente a las líneas de distribución a los voltajes más altos.

La Comisión establece tarifas bases para todo el año, las va ajustando cada 3 meses con base en las compras de energía que los distribuidores hacen en el mercado.

- b. Gran usuario: Su consumo debe de ser mayor a 100 kilo vatios de potencia, durante 3 meses seguidos en un semestre. Teniendo la libertad de escoger su suministrador, que puede ser un generador o un comercializador. Al tener dicha libertad puede negociar precios y condiciones.
 - i. Los que participan directamente en el mercado.
 - ii. Los que actúan a través de un comercializador.

7. *¿Qué tipos de generadores existen?*

- a. Generador: Se conecta a la red TRELEC, no se puede conectar a una distribuidora.
- b. Generador distribuidor renovable (GDR): Depende del tamaño, si un proyecto genera menos de 5 mega vatios y se va a conectar a la red de una distribuidora y es energía renovable se puede calificar a este tipo de generador. Existe una Norma Técnica para la Conexión, Operación, Control y Comercialización de la Generación Distribuida Renovable. Esta establece que lo que se genera es consumida por la empresa generadora, proporcionando a la red la energía que esté de más. Puede utilizar energía por:
 - o Contrato: Pagando la factura normal y vendiendo la energía a la distribuidora directamente por aparte. La medición de generación serviría únicamente para el contrato.
 - o Net Mete ring: Rebajando el contador.

ETAPA 3: COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA Y MINAS

8. *¿Qué efectos/impactos ha tenido la creación de la Comisión Nacional de Energía eléctrica en Guatemala?*

Con la Ley General de la Electricidad, lo que se hizo fue formar un mercado eléctrico, pasando de ser un país donde el sector de energía era manejado por el Estado en una estructura verticalmente integrada, donde la generación, distribución y comercialización la tenía el INDE, a una estructura donde pueda haber mercado (competencias) en proyectos de generación. A partir de dicho momento empezaron a venir inversiones importantes del sector privado, habiendo últimamente en Guatemala y el mundo una tendencia a utilizar energías alternativas renovables.

9. *¿Qué puede vender un proyecto de generación de energía por biomasa?*

- a. Potencia: La potencia que se puede vender se determina a través de una prueba, del AMM, que se llama “Prueba de Potencia Máxima”, dicha prueba consiste en poner el proyecto a generar durante un periodo de horas, según la tecnología, determinando físicamente cuánto es la potencia que la máquina puede entregar al sistema. Dicha prueba genera el resultado de cuánta potencia dicho proyecto puede entregar al sistema. Esta potencia a su vez es afectada por un coeficiente de disponibilidad, el cual se mide para todo el año y tiene el valor máximo de 1, pero va de 0 a 1. Este valor mide qué tantas veces le falló el generador al sistema, mientras más veces falla más se aleja de 1. Esta potencia se determina a través de una empresa que certifique procesos, la cual aseguraría por medio de un certificado a la AMM que se cuenta con la disposición del recurso primario para la generación de energía todo el año.

Potencia: prueba de potencia máxima * coeficiente de disponibilidad.

- b. Energía: Se vende la que genere, lo que el medidor marque.

En ambos productos puede participar en el mercado:

- a. Mercado de contratos: La ventaja de este tipo de mercado es que se determina el precio al que se va a vender la potencia y la energía, el cual se acuerda entre el proveedor y el consumidor.
- b. Mercante: Sin contrato.
 - o Energía: El precio de energía para un mercante se establece a través de precio spot y si el operador requirió el proyecto para su despacho. Si es renovable siempre la va a despachar el AMM, si no es renovable se despacha del más barato al más caro.
 - o Potencia: El precio para la potencia para un mercante se establece a través del precio de referencia de la potencia, que es de \$ 8.9 kv/mes.

10. *¿Cómo empresa cómo apoyan ustedes estos proyectos o el Ministerio de Energía y Minas como incentivo para fomentar este tipo de energías?*

Un apoyo directo no hay, más bien, la Comisión el rol que tiene es de verificar que en el mercado existan condiciones de competencia, que se cumplan las reglas.

El rol del Ministerio es establecer las políticas energéticas, las cuales pueden favorecer a cierto tipo de tecnologías. En este momento dichas políticas favorecen las energías renovables sobre las no renovables. La política energética actual, la cual vence hasta el 2022, se establece que se van a privilegiar las renovables y en el mercado hay algunas señales regulatorias como que las energías renovables tienen prioridad de despacho, lo cual significa que a las primeras que convoca el generador (la AMM) a generar para surtir la demanda son las energías renovables y posteriormente llaman a las que no son renovables en orden de mérito (de los costos más bajos a los costos más altos). A su vez existe una ley de incentivos fiscales para tecnologías renovables, en este caso si una empresa va a comprar equipo (biodigestor) para generación de energía, está exonerada de aranceles de importación de todo lo que se necesite para instalar la planta (IVA y otros aranceles de importación) y esta exonerada de ISR por 10 años de la actividad de generación.

11. *¿Existe ayuda internacional para empresas generadoras de energía renovable?*

Ayuda internacional, como donaciones, es complicado; pero existe la Banca Multilateral o Banca Internacional que da préstamos a intereses muy bajos, los cuales favorecen proyectos que trabajan en energía renovable, dando tasas promedio de 2%, entre otros.

ETAPA 4: MARCO OPERATIVO

12. *¿Qué debe de cumplir un proyecto de energía renovable para ser generador y poder vender la energía?*

- a. Inscribirse como agente generador en el Ministerio de Energía y Minas.
- b. Hacer registro en el AMM.
- c. Realizar estudios eléctricos de acceso a la red a la que se van a conectar en la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en Guatemala, para poder ver el impacto del acto de generación en las redes.
- d. Si se desea vender potencia se debe realizar estudio con empresa que certifique procesos sobre el aseguramiento de que el Zoológico cuenta con la el recurso primario para la generación de energía. Este certificado garantiza el suministro del combustible para la generación para todo el año estacional.
- e. Autorización de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en Guatemala de los estudios anteriormente mencionados.
- f. El AMM realiza todas las operaciones técnicas para conectarlo.

13. *¿Cuáles son los trámites básicos para volverse consumidor generador renovable?*
Por medio de formularios y requerimientos con la distribuidora.

14. *¿De qué manera evalúan la calidad del producto (en este caso la electricidad) que brindan los generadores?*

Como hay medición comercial que es el medidor, la AMM está monitoreando a tiempo real, revisando la cantidad de Kv/h que se genera, nivel de voltaje que está dictándose a la red,

Verificando la calidad del producto por medio del voltaje en cierto punto, lo que debe cumplir la norma que dice que el voltaje debe de estar en un $\pm 5\%$ del voltaje nominal, manteniéndose en dicho rango.

Encuesta “Comiplaza”



Mi nombre es Karla María Salguero, estudiante de la Universidad del Valle de Guatemala en el cual como parte de mi proyecto de graduación “Modelo de Negocios para la producción y venta de energía renovable a través de biomasa en el Zoológico “La Aurora”, se está realizando una investigación sobre la viabilidad de dicho proyecto. La finalidad de esta encuesta es obtener respuesta a nuestras variables de estudio. Esta encuesta es confidencial, voluntaria y exclusivamente con fines académicos. Agradecemos su participación.

He leído el procedimiento descrito arriba. El (la) investigador(a) me ha explicado el estudio y ha contestado mis preguntas. Voluntariamente doy mi consentimiento para participar en esta encuesta.

INSTRUCCIONES: A continuación se presentan una serie de preguntas relacionadas con nuestro tema de investigación y sus variables. Seleccione la respuesta según se le solicite.

¿Con qué es más económico cocinar?

- Carbón
- Leña
- Estufa eléctrica
- Estufa de gas
- No sabe

¿Por qué utilizan parrilla para cocinar?

- Políticas del Zoológico
- Economía
- Otro

¿Qué utiliza para cocinar?

- Carbón
- Leña

¿Por qué?

¿Qué aspectos considera más importante en la elección del carbón?

- Precio
- Marca
- Otro

¿Cuál es la PRINCIPAL desventaja de cocinar con carbón?

- Transporte
- Limpieza
- Olor
- Contaminación
- Clima
- Otro

¿Dónde adquiere el carbón/ leña?

- Tienda de barrio
- Supermercado
- Mercado
- Lo vienen a dejar

¿Cada cuánto compra carbón?

- Diario
- Semanal
- Quincenal
- Mensual

¿En qué presentación lo compra?

- Libra
- 5 libras
- 10 libras
- Costal

¿Qué precio paga por la presentación seleccionada (anteriormente)?

¿Qué otra alternativa tiene para cocinar?

- Estufa de gas
- Estufa eléctrica
- No tengo

¿Qué marca de gas utiliza?

- Zeta gas
- Tropigas
- Otro

¿De cuántas libras compra su cilindro de gas?

- 25
- 35
- 100

¿Cada cuánto compra el cilindro?

- Semanal
- Quincenal
- Mensual

¿Estaría dispuesto a cambiar la parrilla por una estufa industrial?

- Sí
- No

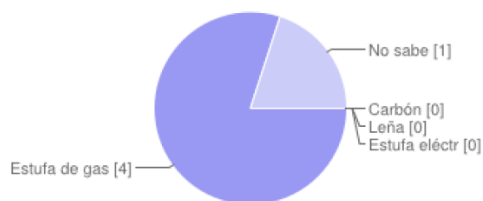
¿Por qué?

¿Qué tipo de estufa preferiría?

- Gas
- Eléctrica

Resultados encuesta comiplaza:

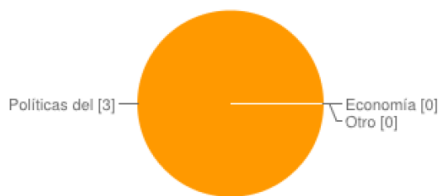
¿Con qué es más económico cocinar?



Carbón	0	0%
Leña	0	0%
Estufa eléctrica	0	0%
Estufa de gas	4	80%
No sabe	1	20%

(Salguero, 2014)

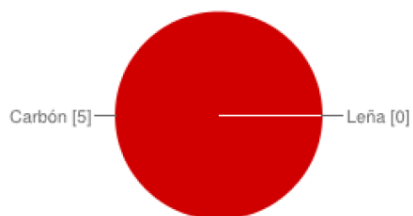
¿Por qué utilizan parrilla para cocinar?



Políticas del Zoológico	3	60%
Economía	0	0%
Otro	0	0%

(Salguero, 2014)

¿Qué utiliza para cocinar?



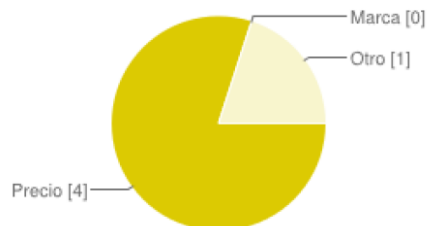
Carbón	5	100%
Leña	0	0%

¿Por qué?

Reglas del Zoológico
 Para asar carnes
 Solo eso permiten
 Instalaciones
 Economía

(Salguero, 2014)

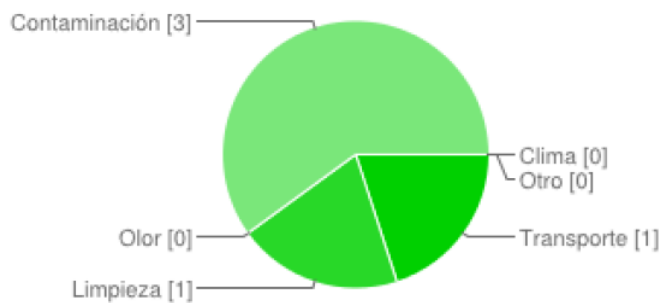
¿Qué aspectos considera MAS IMPORTANTE en la elección del carbón?



Precio	4	80%
Marca	0	0%
Otro	1	20%

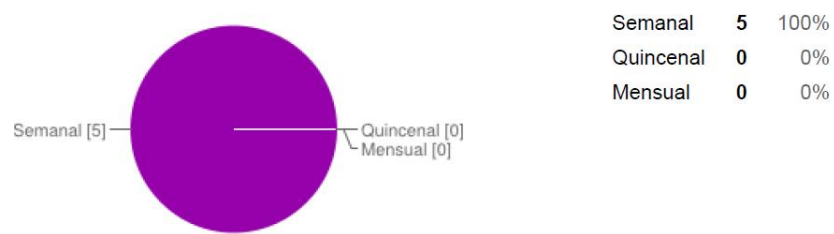
(Salguero, 2014)

¿Cuál es la PRINCIPAL desventaja de cocinar con carbón?



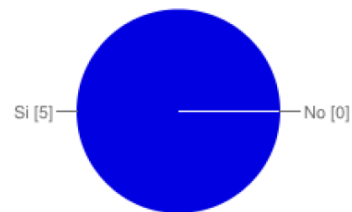
(Salguero, 2014)

¿Cada cuánto compra el cilindro?



(Salguero, 2014)

¿Estaría dispuesto a cambiar la parrilla por una estufa industrial?

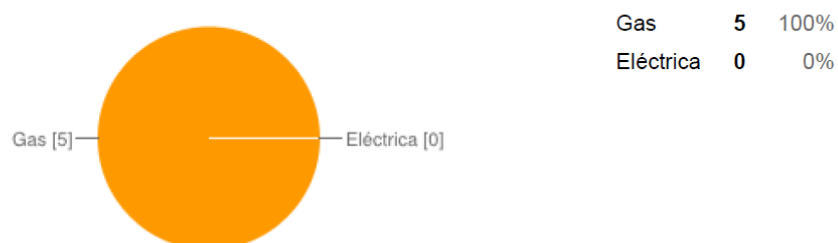


¿Por qué?

Más rápido
Salud
Rapidez

(Salguero, 2014)

¿Qué tipo de estufa preferiría?



Número de respuestas diarias

(Salguero, 2014)

XIV. GLOSARIO

- **Afluente:** En hidrología corresponde a un curso de agua que no desemboca en el mar sino en otro río más importante, con el cual se une en un lugar llamado confluencia. En ingeniería sanitaria es el flujo de agua que entra al sistema de tratamiento para ser depurado.
- **Anaeróbico:** Sin presencia de oxígeno.
- **Acidogénesis:** Transformación de productos solubles en ácidos grasos volátiles por la acción de bacterias fermentativa.
- **Agua residual:** Son líquidos que después de su uso son considerados un desecho, y su uso para riego y actividades humanas es restringido.
- **Biodigestión:** Fenómeno natural de degradación de la materia orgánica por acción bacteriológica, generando una mezcla de gases con un alto contenido de metano (CH₄).
- **Biodigestor:** Contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar.
- **Calentamiento global:** Incremento de los GEI en la atmósfera, ocasionado por la actividad humana que tiene impacto en la temperatura terrestre, modificando por ende el efecto invernadero.
- **Cromatografía de gases:** es un tipo de cromatografía que se utiliza para separar componentes gaseosos de una muestra. La muestra se volatiliza al inyectarla en la columna de cromatografía y la elución ocurre por el flujo de fase móvil de gas inerte. La separación ocurre en la columna por mecanismo de adsorción o partición de la muestra y por el incremento gradual de la temperatura.

- Demanda Química de Oxígeno (DQO): Indicador que señala cuánta materia orgánica tiene el agua residual.
- Diluciones seriadas: diluciones preparadas de forma consecutiva, es decir la reducción progresiva de la concentración de una sustancia o metabolito en la disolución.
- Excreta: Excremento o boñiga
- Hidrólisis: Descomposición de sustancias orgánicas e inorgánicas complejas en otras más sencillas por acción de agua y bacterias.
- Inóculo: suspensión de microorganismos que so viables, es decir que tienen las condiciones para reproducirse y generar metabolitos.
- Metanogénesis: Se refiere al proceso de formación de metano por bacterias. 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 el que se libera una mezcla de gases.
- Mega Joules (MJ): Es la unidad derivada del sistema internacional utilizada para medir energía, trabajo y calor.
- Número Mas Probable: método para estimación de densidad poblacional que se basa en la determinación de presencia o ausencia de una característica específica de microorganismos en diluciones seriadas. Es una estimación probabilística y tiene como ventaja que determina microorganismos activos metabólicamente.
- Potencia del Hidrógeno (pH): Indicador del nivel de acidez de un líquido.

- **Concentración:** Una medida de la cantidad de sustancia presente en una cantidad unidad de mezcla. Las cantidades se pueden expresar como moles , masas o volúmenes. 2. El proceso de aumentar la cantidad de sustancia en una cantidad dada de mezcla.
- **Gas:** Cuestión en un formulario que tiene baja densidad, es fácilmente compresible y ampliable, y se expande de manera espontánea cuando se coloca en un recipiente más grande. Las moléculas de un gas se mueven libremente y están relativamente separadas.
- **Estequiometría:** Relación entre los átomos de un compuesto. 2. Ratios de moles de los compuestos en una reacción. 3. Una rama de la química que se relaciona cuantitativamente las cantidades de elementos y compuestos que intervienen en las reacciones químicas, basado en la ley de conservación de la masa y la ley de las proporciones definidas .
- **Calorías:** La cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua a $14,5^{\circ}\text{C}$ a $15,5^{\circ}\text{C}$. Una caloría es equivalente a exactamente 4,184 J.
- **Capacidad calorífica:** El calor necesario para elevar la temperatura de un objeto de 1°C se denomina capacidad calorífica del objeto. Capacidad de calor es una extensa propiedad con las unidades de J/K. El calor es una transferencia de energía que se produce cuando los objetos con diferentes temperaturas se ponen en contacto. El calor es un proceso, no una propiedad de un material.
- **Julio. (J):** El SI unidad de energía, igual al trabajo necesario para mover una masa de 1 kg contra una fuerza opuesta de 1 newton .
- **Calor específico:** El calor necesario para elevar la temperatura de 1 g de una sustancia en 1°C se denomina calor específico de la sustancia. El calor específico es una propiedad intensiva con unidades de J/gK.