



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE EVALUACIÓN DE UN BIODIGESTOR COMO
ALTERNATIVA AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PRODUCIDOS
DURANTE EL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DE UNA PLANTA DE
MANUFACTURA TEXTIL EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Freddy Fernando García Muralles

Asesorado por el MSc. Ing. Edgar Leonel Ortiz Castillo

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE EVALUACIÓN DE UN BIODIGESTOR COMO
ALTERNATIVA AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PRODUCIDOS
DURANTE EL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DE UNA PLANTA DE
MANUFACTURA TEXTIL EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FREDDY FERNANDO GARCÍA MURALLES
ASESORADO POR EL MSC. ING. EDGAR LEONEL ORTIZ CASTILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Julio Alberto Rivera Palacios
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. José Eduardo Calderón García
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE EVALUACIÓN DE UN BIODIGESTOR COMO
ALTERNATIVA AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PRODUCIDOS
DURANTE EL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DE UNA PLANTA DE
MANUFACTURA TEXTIL EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 28 de octubre de 2013.


Freddy Fernando García Muralles



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
 Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

ADSE-MEAPP-008-2015

Guatemala, 15 de julio de 2015.

Director:
Víctor Manuel Monzón
 Escuela de Ingeniería Química
 Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del (la) estudiante **Freddy Fernando García Muralles** carné número **94-16198**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría en Energía y Ambiente**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.


Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. EDGAR L. ORTIZ E.
 Ing. Civil
 Col. 3525
 MSc. Ing. Edgar Leonel Ortiz Castillo
 Asesor (a)

Ing. Juan C. Fuentes M.
 M.Sc. Hidrología
 Colegiado No. 2,300
 MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes M.
 Coordinador de Área
 Desarrollo social y energético

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
 Director
 Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
 /la



Ref.EIQ.TG.126.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería del estudiante, **FREDDY FERNANDO GARCÍA MURALLES**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en ENERGÍA Y AMBIENTE** titulado **"DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE EVALUACIÓN DE UN BIODIGESTOR COMO ALTERNATIVA AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PRODUCIDOS DURANTE EL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DE UNA PLANTA DE MANUFACTURA TEXTIL EN LA CIUDAD DE GUATEMALA"**. Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, septiembre de 2015

Cc: Archivo
Copia: Colegio de Ingenieros Químicos de Guatemala
VMMV/ale



Asociación Centroamericana de Acreditación
Programa de Acreditación de Instituciones de Educación Superior





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE EVALUACIÓN DE UN BIODIGESTOR COMO ALTERNATIVA AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PRODUCIDOS DURANTE EL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DE UNA PLANTA DE MANUFACTURA TEXTIL EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Freddy Fernando García Muralles**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Pedro Antonio Aguilar Pola
DECANO



Guatemala, septiembre de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Todopoderoso y eterno que siempre me ha acompañado en todo momento.
Mi padre	Fredy Fernando Garcia Portillo, por su apoyo y cariño.
Mi madre	Elida de Jesús Muralles Rodríguez, por creer siempre en mí.
Mi esposa	Glenda Maribel Aquino de Garcia, por su amor y comprensión en todo momento.
Mis hijos	Sharon, José Daniel y Daniela Fernanda, por ser la fuente de inspiración de este trabajo y la herencia que Dios me regalo.
Mis hermanos	Edwin, Víctor, Steve, David y Suan, por haberme siempre motivado a ser el mejor ejemplo a seguir.
Mi familia	Por su apoyo, consejos y cariño.
Mis amigos	Por ser mis mejores aliados en este camino.
Facultad de Ingeniería	Por abrir sus puertas y darme instrucción en las ciencias y conocimiento científico.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por su amor, gracia y misericordia sin límite.
- Mi madre** Elida de Jesús Muralles Rodríguez, por apoyarme siempre sin escatimar en recursos, te quiero mucho mamita.
- Mi esposa** Glenda Maribel Aquino de Garcia, por ser mi apoyo sincero en todo momento y darme el soporte necesario para alcanzar la meta.
- Mi familia** En especial a Rebeca Muralles, Arabella Donis, Elizabeth Garcia, Fidelia de Molina y Abigail Garcia, ustedes contribuyeron mucho durante mi formación como ser humano.
- Mis amigos** En especial a Xiomara Cortez, Carlos Calderón, Obed Marroquín y Marco Tulio Romero, por acompañarme durante el proceso de formación profesional y su amistad incondicional.
- Mi asesor** Msc. Ing. Leonel Ortiz por su apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
RESUMEN.....	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. OBJETIVOS	9
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
5. JUSTIFICACIÓN	13
6. ALCANCES Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Legislación nacional que regula el tratamiento de residuos sólidos y líquidos	17
7.1.1. Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente.....	17
7.1.2. Política Nacional para el Manejo Integral de los Residuos y Desechos Sólidos	18
7.1.3. Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos	20
7.2. Medio ambiente y desarrollo sostenible.....	22

7.2.1.	Características de un desarrollo sostenible.....	23
7.2.2.	Economía ambiental.....	23
7.2.3.	Efectos provocados por los residuos en el medio ambiente.....	24
7.3.	Tratamiento de aguas residuales	25
7.3.1.	Tratamiento preliminar.....	25
7.3.2.	Tratamiento primario	26
7.3.3.	Tratamiento secundario.....	27
7.3.4.	Tratamiento terciario	28
7.4.	Otras alternativas de gestión de los residuos sólidos.....	28
7.4.1.	Clasificación de los residuos urbanos	28
7.4.2.	Gestión de residuos sólidos	29
7.4.3.	Alternativas para disposición de desechos orgánicos.....	30
7.4.4.	Elementos necesarios para la gestión de residuos sólidos.....	32
7.5.	Generalidades de biodigestor	33
7.5.1.	El proceso de digestión anaeróbica	35
7.5.2.	Criterios para considerar en el diseño de un biodigestor.....	38
7.5.3.	Tipos de biodigestores	43
7.6.	Generalidades del biogás.....	45
7.6.1.	Contenido energético	46
7.6.2.	Purificación del biogás	47
8.	HIPÓTESIS.....	49
9.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	51

10.	METODOLOGÍA.....	53
10.1.	Investigación preliminar	53
10.2.	Pruebas de campo y recolección de información documental	54
10.2.1.	Caracterización de los residuos disponibles	55
10.2.2.	Determinar el potencial de generación de biogás... ..	55
10.3.	Análisis de información y cálculos técnicos	56
10.4.	Impacto ambiental y análisis económico	57
10.5.	Revisión de resultados y presentación de caso.....	58
10.5.1.	Inversión	58
10.5.2.	Flujo de costos de operación y mantenimiento del proyecto	58
10.5.3.	Flujo de ingresos proyectados	59
10.5.4.	Flujo de efectivo.....	59
10.5.5.	Flujo de amortización del capital invertido	59
11.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	61
11.1.	Análisis estadístico descriptivo de las muestras.....	61
11.2.	Análisis de varianza.....	61
11.3.	Análisis de impacto ambiental	62
11.4.	Análisis económico	62
12.	CRONOGRAMA	65
13.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	67
13.1.	Financieros	67
13.2.	Tecnológicos	68
13.3.	Humanos	68

BIBLIOGRAFÍA.....69
APÉNDICE73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo de gestión de residuos sólidos	33
2.	Usos de la digestión anaeróbica	34
3.	Fases de la digestión anaeróbica.....	37
4.	Esquema para determinar la dimensión de un biodigestor	57
5.	Flujo de caja de un proyecto	63

TABLAS

I.	Características de las bacterias que intervienen en las fases de digestión anaeróbica	38
II.	Clasificación de bacterias acorde al rango de temperatura donde se desarrollan	40
III.	Tiempo de retención en función a la temperatura del sustrato.....	41
IV.	Sustancias inhibidoras de la digestión anaeróbica.....	42
V.	Generaciones de biodigestores.....	43
VI.	Composición del biogás	45
VII.	Equivalencias de otros combustibles para biogás.....	46
VIII.	Valor calorífico de diferentes combustibles	47
IX.	Variables preliminares.....	54
X.	Variables del estudio	55
XI.	Recursos financieros necesarios	67

RESUMEN

El manejo inadecuado de los residuos sólidos y líquidos de las industrias han ocasionado impactos ambientales negativos a nivel mundial, nuestro país no está exento de dichos impactos y por lo tanto es necesario trabajar en métodos alternativos que permitan el tratamiento adecuado de los mismos.

El presente diseño de investigación se fundamenta ante la falta de alternativas de tratamiento de desechos que existe en la industria textil de Guatemala, la cual genera producto de su actividad grandes cantidades de los mismos y que las empresas desconocen en muchos casos alternativas a los métodos de tratamiento tradicionales que no solo permitan un tratamiento adecuado sino que además pueden generar un beneficio económico.

El propósito de esta investigación es demostrar si un biodigestor es un medio de tratamiento adecuado para disponer de los desechos sólidos y líquidos que se producen en una planta de manufactura textil ubicada en la zona 7 de la ciudad de Guatemala, la factibilidad se evaluará combinando los aspectos técnicos, económicos y ambientales de llevar a cabo dicha forma de tratamiento.

1. INTRODUCCIÓN

El problema del tratamiento y disposición de los residuos sólidos y líquidos, producidos durante la actividad económica de las empresas en Guatemala, constituye uno de los principales desafíos para alcanzar el adecuado balance entre el desarrollo económico y el cuidado del medio ambiente.

Adicionalmente, ante la creciente presión de reducir los costos de operación, para mantener la competitividad en el mercado nacional e internacional, ha generado el interés de explotar de mejor forma los recursos disponibles. Este es el caso de los residuos de poco valor económico que actualmente se desechan y que tienen un potencial de aprovechamiento energético.

Este trabajo comprende el diseño de una investigación encaminado a determinar si la digestión anaerobia es una alternativa viable para el tratamiento alternativo de los residuos sólidos y líquidos orgánicos disponibles de una planta de manufactura textil ubicada en la ciudad de Guatemala. Encaja en la línea de investigación de gestión y políticas energéticas ambientales, en el apartado de formulación, gestión, seguimiento y evaluación de proyectos energéticos en el área de Evaluación de Proyectos de Inversión de la maestría de Energía y Ambiente de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El interés de realizar esta investigación nace de la inquietud de buscar medios que, además de proveer un tratamiento adecuado para los residuos

producidos y cumplir con los reglamentos vigentes de disposición de este tipo de desechos, se tenga una forma de generar un impacto financiero aprovechando el potencial energético presente en este tipo de residuos.

Los desafíos más importantes a superar son la factibilidad técnica de usar la tecnología de biodigestión existente para tratar el volumen de residuos producidos por la actividad de la empresa. También de demostrar que el balance en el impacto ambiental, que produciría este proyecto sobre el medio ambiente, sea positivo respecto a la situación actual de disposición de desechos del proceso. Finalmente, garantizar que el proceso es sostenible económicamente para que produzca un beneficio tangible para la operación que permita su consideración como alternativa de inversión de capital.

El tiempo estimado de duración de la investigación será de 6 meses, contando con el apoyo y autorización de la empresa para realizar el estudio. La empresa, espera con este proyecto, contribuir en la disminución el impacto ambiental de su operación además de obtener un beneficio económico que mantenga su competitividad.

El trabajo deberá demostrar si el proyecto es una alternativa viable para el tratamiento de desechos. Esto será al revisar los tres componentes y brindar una fuente de información necesaria para la toma de decisión en la inversión del proyecto. Para ello se realizará un informe final en donde se presentarán los resultados obtenidos de la investigación, para su exposición ante la Junta Directiva.

Dicho informe constará de 6 capítulos divididos de acuerdo con la temática desarrollada en la investigación. El primero de ellos abordará los conceptos teóricos utilizados como fundamento en el desarrollo del mismo. Entre ellos se

incluyen aspectos legales relativos al ambiente, desarrollo sostenible, el tratamiento de aguas residuales, la gestión de desechos sólidos y tratamientos alternativos para su tratamiento. Por último se incluirán lo relativo al proceso de biodigestión y producción de biogás.

El segundo capítulo se ocupará del estudio técnico de la alternativa de biodigestión, aplicando los conocimientos fundamentales para determinar aspectos del diseño del biodigestor como son el tipo y tamaño a utilizar. Además y se establecerá el cronograma necesario para su construcción a fin de determinar el flujo de costos asociados con la elaboración del proyecto.

El tercer capítulo se tratará de la temática ambiental del proyecto, son la estimación de los impactos ambientales, que puesto en marcha el proyecto acarrearía, así como su balance respecto a la situación actual.

En el capítulo 4 se desarrollará el análisis financiero del proyecto, determinando la inversión necesaria, costos de operación, ingresos que produciría, construcción del estado de resultados del proyecto. Su evaluación de viabilidad económica y el respectivo análisis de sensibilidad, a fin de obtener una probabilidad de éxito para la implementación efectiva del proyecto.

El capítulo 5 presentará los resultados obtenidos del estudio técnico, la evaluación del balance del impacto ambiental y la viabilidad económica.

El capítulo 6 se encargará del análisis y discusión de los resultados obtenidos a fin de comprobar o rechazar la hipótesis planteada.

2. ANTECEDENTES

En general cuando se investiga acerca de trabajos realizados en el campo de tratamiento de residuos sólidos, a través de biodigestores, los estudios previos abordan la temática desde 3 puntos de vista:

- Tratamiento final de los desechos (disminución de impacto ambiental)
- Producción de biogás para aprovechamiento energético
- Factibilidad técnica y económica

Baerlocher (2004) analiza la factibilidad técnica de una planta de biodigestión anaeróbica de residuos, provenientes de la exportación de banano de la región de Urabá en Colombia. Esto determinando que no es una alternativa viable debido, básicamente, a que los residuos no se encuentran separados de materiales no biodegradables y la incerteza del abastecimiento. El estudio hace recomendaciones en que deben estudiarse más a fondo los procesos de biodegradación del banano, así como procesos de tratamiento alternativo para grandes cantidades de banano.

Por otro lado Morales Aravena (2005) en su estudio menciona el impacto que tienen en el tratamiento integral de desechos orgánicos en el uso de compostas de origen domiciliario. En este se detalla que estas se tardan hasta 3 meses en formarse, por lo que aunque los impactos generados son positivos no es un método viable, para el tratamiento a gran escala para el manejo de residuos sólidos.

En otro estudio realizado por Murillo Marchena (2007) en Costa Rica demuestra la efectividad de un biodigestor para tratar las excretas provenientes de las actividades de porcicultura, logrando reducir el impacto ambiental sobre la cuenca del río Tempisque, el más importante de Costa Rica.

Couto Benítez (2008) se refiere al tratamiento integral de desechos urbanos provenientes de las ciudades fronterizas del norte de México, exponiendo los factores que impiden que el tratamiento de desechos se haga de una forma integral entre las tres ciudades. Destaca el hecho que a pesar de que una de las empresas presta servicios de recolección, en dos de las tres ciudades, existen diferencias en el manejo de la política de desechos, principalmente debido a factores sociales y políticos.

Otro enfoque al problema de tratamiento de desechos sólidos es económico. Se puede ver en el trabajo de Silva Jiménez (2009) donde se hace el estudio de factibilidad para una inversión en la industria porcina en el municipio de oratorio, Santa Rosa. Este proyecto propone el uso de tecnologías de degradación anaeróbica para mitigar el impacto ambiental de la implementación del proyecto. Aunque el trabajo está enfocado a la factibilidad de la actividad primaria tiene una base amplia de cómo evaluar el impacto ambiental de la disposición de los residuos que produciría el proyecto y cómo estos pueden ser convertidos en oportunidades.

Un antecedente importante en la línea de desarrollo del problema es el estudio de Campero Rivero (2011) en este se hace una comparación entre las diferentes tecnologías de biodigestión para el sector residencial e industrial de Bolivia como fuente de generación energética. En este estudio se explota el concepto de utilización de los residuos como fuente de generación de biogás, para suplir necesidades energéticas y proveer desarrollo.

En su estudio Migliavacca (2011) aborda el tema de forma similar al de Campero Rivero para el área de Tucumán, Argentina, pero enfocado a cierto tipo de desechos que son particularmente difíciles de tratar a través de tratamiento anaeróbico, los efluentes cítricos. El estudio logra demostrar que utilizando los controles adecuados en las condiciones del efluente es posible lograr su tratamiento logrando eliminar el efecto negativo de la industria de cítricos de la región, mejorando las perspectivas de sostenibilidad de la misma.

Aldana Paiz (2011) redactó un manual para el funcionamiento adecuado de las fincas ganaderas de pequeños y medianos productores. En este se resalta el uso de la biodigestión anaeróbica como una tratamiento efectivo para eliminar el impacto de los desechos. Los de las excretas del ganado y el aprovechamiento que se hace del biogás generado para hacer sostenible el funcionamiento de las granjas y reducir los costos operativos.

En el estudio de Doroteo Otlica (2012) se analiza el aprovechamiento de los residuos generados por el ganado para producir biogás. También de la fuente de autogeneración energética de las necesidades del establo que fue utilizado para realizar la investigación.

Como enfoque al control del proceso de biodigestión continua se cita el trabajo realizado por De La Merced, Jimenez (2012). Determinando los parámetros de control para el funcionamiento adecuado de un biodigestor continuo y cómo estos afectan la producción de biogás y efluentes del mismo. Se determinó, en este estudio, que la temperatura ambiente y radiación solar no afectan las condiciones de operación del mismo.

El estudio más reciente en la materia que se encontró es el de (Aguilar Alvarez, 2013) este aborda el uso de un biodigestor de múltiples etapa. En cada

etapa individual corresponden las 3 etapas del proceso de biodigestión anaeróbica. Con esto se logra hacer más eficiente el funcionamiento del biodigestor al manejar las condiciones óptimas de cada fase de forma independiente. Esto permite la reutilización del lodo final del tratamiento a fin de lograr un proceso de digestión más rápido.

El problema es bastante amplio y por lo tanto permite un campo de investigación que incluyen desde temas técnicos hasta temas sociales, en los que influye el tratamiento integrado de los residuos sólidos. La mayoría de estudios se enfocan en un tipo específico de sustrato. Sin embargo, hasta el momento no se ha encontrado un trabajo que lo haga de manera integral de las diferentes fuentes, lo cual abre el espacio para establecer si es posible a través de este estudio.

3. OBJETIVOS

General

Determinar la factibilidad técnica y económica de la utilización de un biodigestor anaeróbico como forma alterna de tratamiento para el manejo integral de desechos procedentes de una planta textil.

Específicos

1. Determinar la capacidad de tratamiento de los residuos disponibles que puede absorber por medio del biodigestor al año.
2. Establecer cuál es el balance del impacto ambiental generado al implementar la obtención de biogás.
3. Determinar los beneficios económicos, flujo de costos y capital necesario para implementar un biodigestor para el tratamiento de desechos de origen orgánico, en una planta de manufactura textil.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El manejo no integrado de los residuos sólidos y líquidos, que genera la actividad industrial en Guatemala, es una fuente de recursos energéticos de la que se hace poco uso.

Este es el caso de la industria textil, en donde debido al volumen de personal que labora en este tipo de empresas, la cantidad de residuos que se generan son considerables. Por lo que parte del beneficio económico que las empresas producen se utiliza para el tratamiento y disposición final de los residuos generadas.

La falta de una cultura de reciclaje avanzada, una educación ambiental y conciencia del impacto que se provoca en el ambiente hacen que solo una parte de los residuos sea reutilizada. Principalmente a aquellos que tienen un valor comercial directo y que son vendidos obteniendo a cambio de una cantidad, que permite en algunos casos costear la recolección y separación. Sin embargo, los residuos que no interesan a terceros son desechados y por lo tanto generan un costo adicional a la operación de la empresa y una imagen negativa por el impacto ambiental que generan.

Analizando las causas del problema resulta que existe la oportunidad de mejorar el tratamiento y disposición final de los residuos generados por la empresa textil ubicada en la zona 7 de la ciudad de Guatemala. A la vez produce beneficios económicos más allá de reducir el costo del tratamiento de los residuos.

El estudio que se propone tiene como alcance determinar si es factible técnica y económicamente realizar un tratamiento integral de los residuos que hoy se desechan. Tienen un potencial energético capaz de generar beneficio económico que permita costear la inversión necesaria.

El trabajo se centra en responder a la pregunta ¿Es un biodigestor un medio técnicamente factible para el tratamiento de los diferentes residuos de origen orgánico, provenientes de desarrollo de la actividad de una empresa textil?

Para responder a esta pregunta es necesario encontrar las respuestas a las siguientes interrogantes, dadas las restricciones de espacio y presupuesto ¿Es posible tratar todo el volumen disponible de residuos a fin de generar los beneficios esperados? De ser viable tratar el volumen ¿El biodigestor podría reducir el impacto ambiental que hoy tiene la actividad de la empresa? Y por último ¿Es viable técnica y económicamente construir y operar el biodigestor?

Al responder estas interrogantes a través de la realización del estudio se podrá determinar si es factible el uso de la biodigestión anaeróbica como una alternativa al tratamiento de los residuos producidos de la empresa textil.

5. JUSTIFICACIÓN

Con este trabajo se desea aportar una solución integral al problema del tratamiento de los desechos sólidos y líquidos orgánicos, producidos durante la actividad económica de una empresa de manufactura textil. El mismo encaja en la línea de investigación de tratamiento y estrategias en la gestión de residuos y estudios de impacto ambiental en el sector energético, en el apartado de formulación, gestión, seguimiento y evaluación de proyectos energéticos en el área de Evaluación de Proyectos de Inversión de la maestría de Energía y Ambiente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Con el proyecto se pretende disminuir el impacto ambiental que actualmente produce la actividad por la disposición final de los desechos sólidos y líquidos de la empresa. Además, provee una fuente alternativa para sustituir el uso de gas licuado de petróleo (GLP) en el proceso productivo, esto contribuiría a reducir los costos de operación.

Tanto el impacto ambiental como el impacto en el costo de operación pueden ser positivos, si el resultado de este trabajo demuestra que el biodigestor es una alternativa viable y efectiva para tratar el volumen de los desechos humanos, basura orgánica y lodos de la planta de tratamiento de agua. Estos se generan como producto de la actividad de la empresa, logrando así un beneficio integral que permita mantener un nivel competitivo con empresas del mismo tipo a nivel internacional.

Entre los beneficiarios de este trabajo, además de la empresa, colaboradores y accionistas, también incluye a la comunidad de la colonia El Rodeo, en la zona 7 de la ciudad de Guatemala. Esta última podría beneficiarse si el proyecto se comprueba es factible, ya que tiene alta probabilidad de ser implementado.

6. ALCANCES Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo se planea, como primer paso, determinar la factibilidad técnica de usar los residuos disponibles para ser usados en el biodigestor. Se deben establecer los parámetros técnicos que permitan definir el tipo de biodigestor recomendado, para maximizar la producción de biogás. Además de dimensionar el tamaño de la obra y los equipos necesarios para tratar el volumen de residuos orgánicos producidos por la empresa de manufactura textil.

Con estos datos se debe determinar qué tipo y volumen de los desechos es posible tratar, dadas las restricciones de espacio y presupuesto que se tienen para desarrollar el proyecto. Se deben proyectar además de los costos de inversión y operación la disponibilidad de biogás que puede usarse sustituyendo parcialmente el uso de gas licuado de petróleo (GLP).

La segunda etapa debe evaluar el impacto ambiental que generará la instalación del biodigestor. Para ello es necesario comparar el impacto actual con el impacto proyectado al implementar la medida. Es de importancia para la viabilidad del proyecto la disposición final del efluente residual y definir si puede ser considerado un material valioso, que generará ingresos que ayuden a costear la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto.

En la última fase se deberá hacer un estudio de factibilidad económica donde se determine si el proyecto es viable. Esto para proponerse como una alternativa de inversión que genere un beneficio económico tangible ayudando a financiar el proyecto y considerarlo dentro de las inversiones a corto plazo de

la empresa. Además, mostrar los efectos positivos que generen la utilización de recursos renovables para el abastecimiento energético y la disminución del impacto ambiental.

Las conclusiones se obtendrán luego de haber analizado cada una de las etapas que comprende este trabajo. A fin de determinar si la alternativa responde a las necesidades técnicas, ambientales y económicas.

Este trabajo podrá servir de guía para estudiantes y profesionales que se desarrollen dentro de las disciplinas de la gestión de desechos industriales y la gestión energética. Además, podrá ser analizado y estudiado por empresas del ramo y otras industrias que tengan oportunidades similares para aprovechar los desechos disponibles, en lugar de disponer de ellos en una forma tradicional.

Las universidades e instituciones del estado podrán usar este ejemplo para ilustrar y poner en marcha proyectos para aprovechar la gestión integral de los residuos generados en las actividades de origen doméstico e industrial. Esto puede tener un impacto en la forma en que se disponen los desechos en la sociedad actual.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Legislación nacional que regula el tratamiento de residuos sólidos y líquidos

Se denomina legislación ambiental a la compilación de normas que trata de la relación entre las personas de la sociedad con el medio ambiente. Existen dentro de la legislación ambiental varias leyes, clasificadas de acuerdo a la fuente de generación así como también por su amplitud en su campo de acción. Se tienen leyes generales y específicas, además hay decretos legislativos, acuerdos gubernativos, ministeriales, ordenanzas municipales y normas técnicas que regulan los aspectos relacionados al medio ambiente, la utilización y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales (Defensores de la Naturaleza, 2014, pág. 2).

En Guatemala existen leyes y decretos legislativos y acuerdos gubernativos que regulan la relación entre las diferentes actividades que se realizan dentro del territorio y el medio ambiente. Entre las más importantes para el campo de acción de este trabajo se menciona:

7.1.1. Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente

Emitida en 1986 esta ley marco es un antecedente importante. Está mencionado en varios trabajos del medio nacional (Aldana Paiz, 2011) (Batres Quevedo, Jayes Reyes, & Del Cid Pérez, 1993) (Defensores de la Naturaleza, 2014).

Esta ley marco, emitida bajo el Decreto 68-86, inició el proceso de legislación en el tema ambiental. Su principal función es garantizar que el desarrollo del país se realice en un marco de sostenibilidad con el fin de asegurar que los recursos naturales sean utilizados de forma tal que asegure un ambiente propicio para generaciones futuras. (Defensores de la Naturaleza, 2014, págs. 2-3).

El contenido de la ley se resume de la siguiente manera:

- Objetivos generales y ámbito de la aplicación de la ley: se describen los principios fundamentales.
- Disposiciones preliminares: trata el objeto de la ley.
- Sistemas y elementos ambientales: incluyendo el sistema atmosférico, el sistema hídrico, sistemas lítico y edáfico. Elementos de prevención y control de la contaminación por ruido o auditiva, elementos de prevención y control de la contaminación visual, elementos de la conservación y protección de los sistemas bióticos.
- Órgano encargado de la aplicación de la ley.
- Infracciones, sanciones y recursos.
- Disposiciones transitorias y derogativas.

7.1.2. Política Nacional para el Manejo Integral de los Residuos y Desechos Sólidos

En Guatemala aún no existe una ley vigente que trate la disposición de los residuos y desechos sólidos, pero hay una política general que trata el Manejo Integral de Residuos y Desechos Sólidos, conocida como el Acuerdo Gubernativo 111-2005.

Esta política busca la participación e involucramiento de todos los entes de la sociedad guatemalteca, generando la conciencia que se requiere. Esto para que el manejo integral de los desechos y residuos urbanos sólidos sean conocidos como los procedimientos para la separación, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los mismos y de esta forma promover el establecimiento de una gestión integral que sea compatible ambiental y económicamente con el modelo de desarrollo del país, implementando prácticas de producción más limpia.

La política comprende los siguientes aspectos:

- Visión compartida de la política: se exponen los objetivos de la misma en los ámbitos de político institucional, social, económico, ambiental y de salud.
- Principios y valores que norman la política.
- Programas y actividades estrategias a realizar, programas de fortalecimiento de las instituciones del estado, programa de fomento de las inversiones, programa de comunicación y participación social.
- Monitoreo de la política: establecer las líneas base, establecer los indicadores para seguimiento del avance, auditoría y responsable del seguimiento.

Existe además una propuesta de ley en el Congreso de la República que trata acerca del manejo integral de los desechos y residuos sólidos. Sin embargo, se encuentra pendiente de aprobación desde el 23 de noviembre de 2010, sin que a la fecha se vislumbre una aprobación en el corto plazo.

7.1.3. Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos

Identificado como el Acuerdo Gubernativo 236-2006 es un reglamento orientado al cuidado del recurso hídrico del país. Se establece dentro de su contenido disposiciones que deben cumplirse por todos aquellos entes o personas que generen, dispongan y reutilicen las aguas residuales y aquellas que dispongan de los lodos que se producen en el tratamiento de las aguas de este tipo.

El objetivo principal de este reglamento es establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales, así como la disposición de lodos que permita la protección de los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana. También recuperar aquellos cuerpos que sufren de eutrofización y promover el desarrollo del recurso hídrico con un enfoque integral en su gestión.

El reglamento posee varias secciones entre la cuales se destacan:

- Disposiciones generales: objetivos y ámbito de aplicación del reglamento.
- Definiciones: glosario con los principales términos que comprende el reglamento.
- Estudio técnico: establece el requerimiento de un estudio técnico obligatorio del impacto sobre el recurso hídrico, previo al inicio de cualquier actividad que produzca o utilice aguas residuales dentro del desarrollo de su actividad. Además establece el contenido mínimo del estudio, así como las disposiciones para su administración como instrumento de gestión.

- Caracterización del efluente: establece que toda actividad que se genere, utilice y disponga aguas residuales y lodos. Estos deberá caracterizar su tipo a fin de aplicar los parámetros definidos en el reglamento.
- Parámetros para descarga en cuerpos receptores: se establecen 2 niveles, el primero es para usuarios actuales, es decir aquellos que ya se encontraban operando previo al establecimiento de este reglamento y el segundo es para los nuevos usuarios. En el caso de los primeros, los parámetros son graduales con plazos de 5 años.
- Parámetros para descarga en esteros, mismo caso del anterior.
- Parámetros para descarga en cuerpos receptores para aguas residuales municipales no conectadas al alcantarillado público: maneja de igual forma dos niveles, usuarios existentes y usuarios nuevos.
- Parámetros para descarga en alcantarillado público: acá cabe mencionar que además de las dos clasificaciones de usuarios se menciona que el tratamiento se hace efectivo de dos formas, por medios propios o pagando por el tratamiento a las municipalidades.
- Parámetros para reúso de aguas residuales: acá se establecen las diferentes calidades de agua que pueden reutilizarse y en los usos autorizados para las mismas.
- Parámetros para lodos residuales: describe los parámetros que los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales deben cumplir previo a su disposición final, así como los métodos sugeridos para disponer finalmente de los mismos.
- Seguimiento y evaluación.
- Prohibiciones y sanciones.
- Disposiciones transitorias y finales.

Como se ve en el listado anterior este reglamento es bastante específico. Por ello constituye una de las legislaciones vigentes más importantes en materia ambiental en el país.

7.2. Medio ambiente y desarrollo sostenible

La definición de sostenibilidad se refiere al equilibrio que existe entre una especie con el entorno circundante de esta. Utilizar los recursos para no rebasar el límite de renovación de los mismos. Desde el punto de vista de la humanidad la sostenibilidad es concebida como la capacidad de satisfacer las necesidades de la actual generación sin perjudicar la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades. (Aldana Paiz, 2011, pág. 3).

“El medio ambiente es todo aquello que rodea a los seres vivos, desde la perspectiva humana es todo aquello que afecta y condiciona la vida de las personas” (Couto Benítez, 2008, pág. 141).

“El hombre y los animales han utilizado los recursos naturales desde tiempos ancestrales, dicha práctica conlleva la producción de desechos que originalmente no necesitaron de mayor control debido a que el tamaño de la población era pequeño y a que la disponibilidad de tierra para la asimilación de los desechos era grande. Sin embargo, este hecho se ha visto alterado con la explosión de la población mundial así como con la explotación sin control de los recursos del planeta, esto ha provocado que la brecha existente entre población y disponibilidad de recursos para asimilar el impacto provocado va disminuyendo cada vez más.” (Batres Quevedo, Jayes Reyes, & Del Cid Pérez, 1993, págs. 10-11).

7.2.1. Características de un desarrollo sostenible

Entre las características más importantes que tiene un desarrollo sostenible se mencionan las siguientes:

- La actividad económica debe mantener o mejorar el sistema ambiental.
- El desarrollo económico debe mejorar la calidad de vida de todos y no solo de algunos sectores.
- Los recursos se deben usar de forma eficiente.
- El reciclaje y reutilización de los residuos deben promoverse.
- Se debe Invertir en el desarrollo de tecnologías limpias.
- Se deben restaurar los ecosistemas dañados.
- Se debe buscar la autosuficiencia regional.
- Reconocer la importancia de la naturaleza para el bienestar humano (Aldana Paiz, 2011, p. 5).

7.2.2. Economía ambiental

Trata del estudio de los problemas ambientales con la perspectiva del impacto económico que se genera, este como producto del impacto ambiental ocasionado por el desarrollo de las actividades de la humanidad. La economía ambiental expone tres alternativas para lograr la reducción del consumo de materias primas provenientes del aprovechamiento de los recursos naturales y que a la vez disminuyen la cantidad de residuos y desechos descargados o vertidos. (Morales Aravena, 2005, p. 20).

- “Reducir la cantidad de bienes y servicios que produce la economía. Se basa la premisa teórica de no crecimiento poblacional, sin embargo, el crecimiento económico en si genera mayor cantidad de bienes y por lo

tanto de desechos independientemente del crecimiento poblacional”. (Morales Aravena, 2005, p. 20).

- “Producción limpia, al reducir la cantidad de residuos producidos por la generación de bienes y servicios ya sea a través de nuevas tecnologías o mejorar la eficiencia de los procesos que producen los bienes”. (Morales Aravena, 2005, p. 20).
- “Incrementar la reducción el reúso y el reciclaje de materiales, esta alternativa modifica hábitos de consumo de los recursos y mejora la calidad de los productos”. (Morales Aravena, 2005, p. 20).

7.2.3. Efectos provocados por los residuos en el medio ambiente

Entre los efectos negativos que se producen en el medio ambiente está la disposición final de los residuos generados por el desarrollo de las actividades del ser humano, estas perjudican la calidad del agua, el aire, contaminación visual, contaminación del manto freático. (Batres Quevedo, Jayes Reyes, & Del Cid Pérez, 1993, p. 51).

Adicionalmente la descarga de efluentes no tratados de aguas industriales o de origen domiciliario puede acarrear la contaminación del agua con sustancias de difícil degradación además de metales pesados y microorganismos patógenos que pueden propagar enfermedades. (Migliavacca, 2011, p. 62).

La disposición de residuos sólidos de tipo orgánico en vertederos a cielo abierto contribuye a generar vectores que transmiten enfermedades hacia los mismos habitantes de la zona que generan los desechos. (Couto Benítez, 2008, p. 7).

Uno de los impactos ambientales que a menudo se desprecia del manejo tradicional de los desechos sólidos, es el transporte hacia los lugares de disposición final. Esto provoca efectos secundarios que además del impacto de emisiones que esta actividad provoca tienen una incidencia en los recursos económicos de quien debe disponer de los mismos dado que parte de ellos se deben utilizar para el pago de este servicio. (Morales Aravena, 2005, p. 25).

7.3. Tratamiento de aguas residuales

En general se refiere al conjunto de tratamientos de tipo físico, químico y biológico que remueven los contaminantes, que están presentes en las aguas provenientes de la realización de actividades domésticas e industriales, hasta niveles aceptables de acuerdo a su propósito de reúso o disposición. En Guatemala, el tratamiento está normado por el reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y disposición de lodos del Ministerio de Ambiente de la República de Guatemala. (Tartón Otzoy, 2014, p. 5).

7.3.1. Tratamiento preliminar

Es un pretratamiento que se realiza al agua por medio de una separación física de los sólidos que se encuentran en las agua de procedencia industrial. Para remover los sólidos se usan rejillas, tamices y mallas que permiten la separación de objetos de gran tamaño y arenas no disueltas que podrían dañar los equipos de bombeo que se usan en etapas posteriores del tratamiento. (Tartón Otzoy, 2014, p. 5).

7.3.2. Tratamiento primario

Es la primera fase del tratamiento y su objetivo es separar todos los sólidos suspendidos que son sedimentables que se encuentran en el agua. Para este propósito se sirve de procesos químicos y físicos para lograr esta separación, entre los que se pueden mencionar:

- **Floculación:** es el proceso por medio del cual, agregando compuestos químicos llamados coagulantes al agua, se logra incrementar gradualmente el tamaño de las partículas suspendidas por medio de la colisión de las mismas y transformarlas en compuestos más grandes para separar por medio de la filtración y la sedimentación. Los coagulantes actúan eliminando las cargas presentes en los sedimentos provocando que se unan en compuestos más pesados, que son sedimentados por la acción de la gravedad. Los compuestos más usados son los sulfatos férrico y de aluminio y poli electrolitos. (Tartón Otzoy, 2014, p. 6).
- **Sedimentación Primaria:** este método requiere que el agua quede totalmente estática dentro de un tanque durante un período determinado de tiempo, en el cual la mayoría de los sólidos sedimentables se precipitarán hacia el fondo, por la acción de la gravedad. En este caso no se utilizan químicos, es por esto que requiere de mayor tiempo que el proceso de floculación y normalmente solo se pueden remover entre el 50 y 70 % de los sólidos suspendidos. (Tartón Otzoy, 2014, p. 6-7).

7.3.3. Tratamiento secundario

El objetivo de este tratamiento es eliminar la mayor cantidad posible de materia orgánica en suspensión que no pudo ser eliminada por medio del tratamiento primario. Para ello, en esta etapa del tratamiento, se utilizan principalmente 2 tipos de tratamiento que ayudan a sedimentar dicha materia y así lograr la separación del agua:

- **Tratamiento aeróbico:** este tipo de tratamiento se realiza con microorganismos que descomponen la materia orgánica presente en el agua, en compuestos orgánicos, que precipitan al fondo del estanque donde se hace el tratamiento y de allí son separados por medio de la acción de la gravedad. Los microorganismos utilizados necesitan grandes cantidades de oxígeno para acelerar su crecimiento y por ende la velocidad a la que degradan la materia orgánica presente en el agua. La mayoría de plantas de tratamiento utiliza en la actualidad este mecanismo dado que reduce la necesidad de espacio físico para lograr el tratamiento. Los lodos que se generan en esta etapa generalmente contienen un alto contenido de materia orgánica, por lo que deben disponerse de ellos de forma adecuada para evitar la contaminación. (Tartón Otzoy, 2014, p. 8).
- **Tratamiento anaeróbico:** el mismo proceso que se realiza con microorganismos aeróbicos se puede realizar con microorganismos anaeróbicos. Sin embargo, este proceso tiene la particularidad que por el tipo de proceso intervienen mayor cantidad de variables que hacen difícil el control. Además el proceso tiene una velocidad menor comparada con el tratamiento aeróbico por lo que en plantas de gran volumen no es el tratamiento preferido por el nivel de inversión requerido. Como puntos a

favor este tipo de tratamiento logra una reducción en al menos un 20 % en la producción de lodos, además de que el lodo tiene mucho menor demanda de oxígeno que el lodo de un tratamiento aeróbico. Adicionalmente este proceso conlleva la producción de un gas rico en metano que al purificarlo puede usarse como fuente de energía. (Tartón Otzoy, 2014, p. 8-9).

7.3.4. Tratamiento terciario

Es la última fase del tratamiento y tiene como objetivo remover los sólidos suspendidos presentes en el agua, luego del tratamiento secundario. Para este fin usualmente se utilizan filtros de arena, arcilla y carbón activado además de la adición de químicos para lograr la potabilización del agua para el consumo. (Tartón Otzoy, 2014, p. 7).

7.4. Otras alternativas de gestión de los residuos sólidos

“Los residuos sólidos son todos los materiales sobrantes que provienen de actividades humanas, de animales y vegetación que son normalmente sólidos y que se desechan como inútiles o indeseados” (Batres Quevedo, Jayes Reyes, & Del Cid Pérez, 1993, p. 9).

7.4.1. Clasificación de los residuos urbanos

Existen tres clasificaciones de residuos basadas en su estado, origen y tipo de manejo que se les debe dar (Jaramillo Henao & Zapata Marquez, 2008, p. 25).

- Clasificación por estado: esta se basa en el estado físico en el que se encuentren los residuos, por lo tanto hay tres posibles clasificaciones, sólido, líquido y gaseoso. Este tipo de clasificación es de tipo descriptivo y puede asociarse con la forma de manejo. (Jaramillo Henao & Zapata Marquez, 2008, p. 25).
- Clasificación por su origen: se basa en la procedencia de los residuos, es decir, si los residuos provienen de las residencias urbanas pues se denominan como residuos sólidos urbanos, si los mismos provienen de la industria se denominan industriales. Los residuos radiactivos son aquellos que producen radioactividad. Los residuos tóxicos y peligrosos son considerados así por los riesgos que representan para la salud y el medio ambiente. Los residuos de minería son aquellos que provienen de dicha actividad y los residuos hospitalarios son aquellos que provienen de los hospitales. (Jaramillo Henao & Zapata Marquez, 2008, p. 25-26).
- Clasificación de acuerdo al manejo: es aquella que los clasifica acorde a las características que se tienen que seguir para su manipulación. Aquellos residuos que representan un peligro inherente a su manejo se denominan peligrosos. Los residuos que son estables en el tiempo y no interactúan con el medio ambiente se denominan inertes. (Jaramillo Henao & Zapata Marquez, 2008, p. 26-27).

7.4.2. Gestión de residuos sólidos

El crecimiento de la población y el desarrollo de una conciencia ambiental que promueve el convivir en un medio ambiente libre de contaminación han provocado que se cambie el modelo de gestión tradicional de los desechos

sólidos urbanos a un modelo de gestión integral de los mismos. (Morales Aravena, 2005, p. 22-23).

El modelo de gestión integral se diferencia principalmente del sistema tradicional de manejo y disposición de residuos sólidos al implementar una estrategia de manejo de residuos de forma de jerarquía, donde el mejor criterio es prevenir, evitando la generación de un residuo que no es necesario. El segundo criterio es si no es posible evitar se debe buscar minimizar. El tercero es si no es posible minimizar se debe buscar el tratamiento adecuado para los residuos y quedando como última opción la disposición final del residuo. (Morales Aravena, 2005, p. 23).

7.4.3. Alternativas para disposición de desechos orgánicos

Desde que los residuos sólidos se convirtieron en un problema, especialmente en el paso de la disposición final, el ser humano ha ideado diversos métodos para resolver el problema. Algunos de estos en la actualidad ya no se utilizan, pero a inicios del siglo XX eran prácticas comunes para atender esta necesidad. (Batres Quevedo, Jayes Reyes, & Del Cid Pérez, 1993, p. 11).

El primero de los métodos consistía en tirar en el suelo los mismos, esto aunque pareciera algo del pasado es algo que aún hoy con toda la conciencia ambiental existente y aún es una práctica común. Otro método similar era el de tirarlos en el agua, aunque hoy existe legislación contra esto en la mayoría de países desarrollados, aún hoy hay empresas y comunidades que usan las aguas como un medio de disposición de los desechos que producen. (Batres Quevedo, Jayes Reyes, & Del Cid Pérez, 1993, p. 11-12).

El tercer método era enterrar con el arado en el suelo los desechos, este es quizás el único que hoy no se utiliza como tal. Sin embargo, existen variaciones en donde sí se sepultan los desechos bajo la tierra. Otra práctica que se mantiene hasta la actualidad es usarlos como alimento para animales, la limitante de esto es que no se pueden disponer de esta forma todos los desechos especialmente aquellos que representan riesgos para la salud. (Batres Quevedo, Jayes Reyes, & Del Cid Pérez, 1993, p. 12).

El quinto método se denominaba como reducción. Este método tampoco se utiliza debido a su alto costo para separar la grasa de los desechos sólidos para su reutilización y posteriormente descartar la parte líquida. El último de los métodos usados a inicio del siglo XX consistía en la incineración o quema de los desechos. Esto es algo que hoy se continúa utilizando, pero como una alternativa del aprovechamiento energético de los residuos. (Batres Quevedo, Jayes Reyes, & Del Cid Pérez, 1993, p. 12).

- Compostaje: “Es un proceso controlado en el cual a través de microorganismos se descompone la materia orgánica presente en los residuos a un material uniforme denominado compost. El proceso tiene como objetivo descomponer la materia orgánica para minimizar su impacto en el medio ambiente. El compost es un material con olor a tierra que tiene alto contenido de nutrientes para poder ser usado como fertilizante de los suelos.” (Morales Aravena, 2005, p. 26).
- Fermentación anaeróbica: se pueden someter los residuos orgánicos a un proceso de digestión anaeróbica dentro de un biodigestor. Esto producirá dos subproductos que pueden ser aprovechados el primero es biogás, un combustible alternativo de baja emisión de contaminantes. El segundo es un abono orgánico similar al compost con alto contenido de

nutrientes para el suelo (Jaramillo Henao & Zapata Marquez, 2008, p. 44).

7.4.4. Elementos necesarios para la gestión de residuos sólidos

Para resolver el problema que representa el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos urbanos en la actualidad es necesario contar con los distintos elementos del sistema de gestión integral de residuos, el cual comprende cuatro elementos básicos: (Morales Aravena, 2005, p. 24).

- Producción de desechos y almacenamiento: corresponde a la etapa en que el residuo es generado y luego almacenado temporalmente en el mismo lugar de su generación. (Morales Aravena, 2005, p. 25).
- Recolección y transporte: es la etapa en que se recoge y trasladan los residuos desde el punto de generación y almacenamiento hacia su destino de disposición. Esta etapa es clave para establecer las condiciones técnicas de funcionamiento de este servicio, tales como: rutas de recolección óptimas, características de los camiones recolectores y frecuencia de recolección mínima por sector. Esta etapa representa un 60 a 70 % del costo total del manejo de los residuos. (Morales Aravena, 2005, p. 25).
- Minimización: esta es la mayor diferencia entre el ciclo tradicional y el integral en el manejo de los residuos sólidos urbanos. En el ciclo tradicional se reduce al hecho de reducir los desechos y reciclar. En el ciclo integral este elemento es el que inicia el ciclo. (Morales Aravena, 2005, p. 25).

- Tratamiento de residuos: modifica física y químicamente los residuos con el fin de reducir su impacto hacia el medio ambiente. En esta etapa existen varias formas de hacerlo, las más utilizadas son el compostaje, digestión anaeróbica, incineración. (Morales Aravena, 2005, p. 25).
- Disposición final: consiste en depositar los residuos en un sistema que asegura que su interacción con el medio que lo rodea, no afecta la calidad de vida de las personas que viven en sus alrededores y tampoco representa un riesgo para el medio ambiente. (Morales Aravena, 2005, p. 25).

Figura 1. **Ciclo de gestión de residuos sólidos**



Fuente: MORALES, V. *Ciclos de gestión*. p. 24.

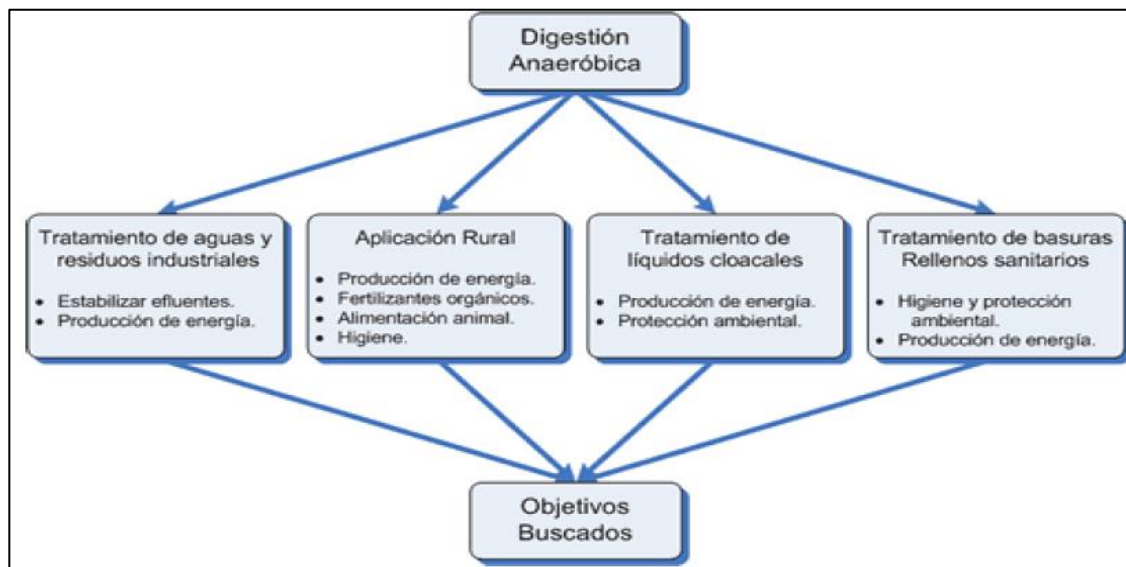
7.5. Generalidades de biodigestor

En su forma más general un biodigestor, conocido también como digestor anaerobio, es un sistema que aprovecha el proceso de fermentación llevado a cabo por bacterias en ausencia de oxígeno, que están presentes en la materia orgánica. Los productos derivados de esta fermentación son dos, un gas combustible compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, conocido como biogás y un efluente compuesto por una fase líquida y otra sólida, conocido como biol y que puede utilizarse como fertilizante. (Avenidaño Allen-Perkins, 2010, p. 3).

Dentro de las aplicaciones viables para un biodigestor está su utilización para el tratamiento alternativo de los desechos sólidos de origen orgánico con un porcentaje de humedad alta. Generalmente proveniente de procesos donde se generan grandes cantidades excretas animales, desechos de alimentos y aguas con alto contenido de material orgánico en suspensión. (Silva Jiménez, 2009, p. 13).

La siguiente figura muestra de forma condensada los principales usos que se pueden dar a la digestión anaeróbica.

Figura 2. **Usos de la digestión anaeróbica**



Fuente: MIGLIAVACCA. *Digestión Anaeróbica*. p. 16.

Los objetivos que pueden buscarse al utilizar este tipo de tratamiento son varios, pero los más relevantes son los siguientes:

- Disminuir la demanda biológica y química de oxígeno (DBO y DQO) para la degradación natural de los residuos, previniendo así la contaminación de las aguas y suelos y reducir significativamente su tiempo de degradación en el medio ambiente natural.
- Generar gas combustible que permita su transformación en una forma alternativa de baja emisión de dióxido de carbono que pueda sustituir una fuente tradicional no renovable.
- Disminuir la contaminación visual y odorífera derivada de la descomposición al aire libre que sufren los desechos orgánicos en los botaderos tradicionales.
- Utilizar el efluente final del biodigestor como una fuente de nutrientes rica en Nitrógeno como fertilizante del suelo y cultivos. (Migliavacca, 2011, p. 16-17).

7.5.1. El proceso de digestión anaeróbica

Toda materia orgánica que puede ser fermentada contiene una serie de bacterias que la convierten en otros productos, en el caso de la digestión anaeróbica estos productos son el biogás y el biol. La digestión anaeróbica es un proceso sucesivo de diferentes etapas en donde el sustrato (alimento de los microorganismos) se va degradando hasta convertirse en compuestos más simples químicamente. (Avendaño Allen-Perkins, 2010, p. 8).

Previo al inicio del proceso se deben establecer ciertas condiciones con el fin de lograr una correcta fermentación. Este proceso requiere de microorganismos específicos que se desarrollan en total ausencia de oxígeno gaseoso, por lo tanto no basta con colocar materia orgánica en un medio ambiente carente de oxígeno, se debe contar con la presencia de al menos tres grupos de bacterias. Las bacterias que producen el metano del biogás

participan en la última etapa, pero no pueden hacerlo hasta que los otros dos grupos de bacterias hagan su proceso de digestión. (Migliavacca, 2011, p. 18-19).

El proceso de digestión anaeróbica se produce en 4 etapas, las cuales se describen brevemente a continuación:

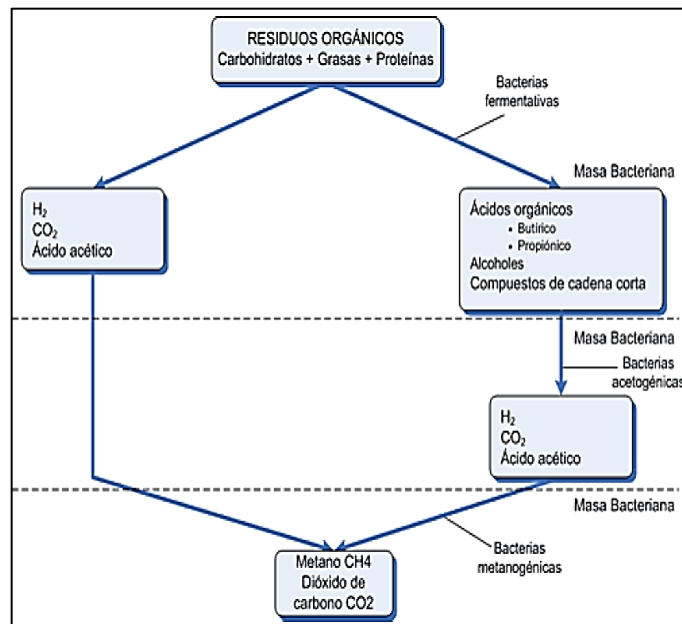
- Hidrolisis: en esta fase la materia orgánica compuesta por largas cadenas de estructuras de carbono (polímeros) es transformada en compuestos de cadenas más cortas (azúcares, aminoácidos, ácidos grasos volátiles de bajo peso y alcoholes) (Avendaño Allen-Perkins, 2010, p. 8). Los organismos que intervienen en esta fase son principalmente anaerobios facultativos, los cuales producen enzimas que hidrolizan los polímeros en biopolímeros solubles. (Migliavacca, 2011, p. 19).
- Acidogénesis: los biopolímeros son degradados en esta etapa a ácidos grasos de cadena corta (5 carbonos o menos). Además de alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono (Avendaño Allen-Perkins, 2010, p. 8). Las bacterias que participan en esta etapa son denominadas acidogénicas. (Migliavacca, 2011, p. 19).
- Acetogénesis: en esta etapa se produce principalmente ácido acético e hidrógeno (Avendaño Allen-Perkins, 2010, p. 8). Este paso es necesario dado que los productos de la etapa de acidogénesis no pueden convertirse directamente a metano por las bacterias metanogénicas. En este paso se incrementa la producción de hidrógeno lo cual inhibe la acción de las bacterias acetogénicas. El hidrogeno, luego se convertirá en metano en la metanogénesis, por lo que ambos procesos corren en paralelo y se activan conforme varía la presión parcial del hidrógeno

dentro de la mezcla gaseosa sobre el sustrato. (Migliavacca, 2011, p. 20).

- **Metanogénesis:** es la etapa final en donde el sustrato y los subproductos de las etapas anteriores se transforman en metano (Avendaño Allen-Perkins, 2010, p. 8). Las bacterias que intervienen en este paso son las arqueobacterias. Estas poseen características específicas, lo cual las hace diferentes de los otros grupos de bacterias. Esta etapa es la más lenta de todo el ciclo y es ampliamente influenciada por las condiciones de operación del biodigestor, el índice de alimentación, la temperatura y el pH. El desbalance de alguno de estos parámetros puede detener la producción de metano. (Migliavacca, 2011, p. 20-21).

El esquema completo del proceso se resume en la siguiente figura

Figura 3. **Fases de la digestión anaeróbica**



Fuente: MIGLIAVACCA. *Fases de la digestión*. p. 21.

Tabla I. **Características de las bacterias que intervienen en las fases de digestión anaeróbica**

Fase acidogénica	Fase metanogénica
Bacterias facultativas (pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno).	Bacterias anaeróbicas estrictas (No pueden vivir en presencia de oxígeno).
Reproducción muy rápida (alta tasa reproductiva).	Reproducción lenta (baja tasa reproductiva).
Poco sensibles a los cambios de acidez y temperatura	Muy Sensibles a los cambios de acidez y temperatura.
Principales metabolitos, ácidos orgánicos.	Principales productos finales, metano y dióxido de carbono.

Fuente: MIGLIAVACCA. *Características de las fases*. p. 22.

7.5.2. Criterios para considerar en el diseño de un biodigestor

Un biodigestor puede ser considerado como un reactor en donde ocurren reacciones que involucran microorganismos que en conjunto trabajan para descomponer la materia orgánica en metano, dióxido de carbono, agua, sulfuro de hidrógeno y amoníaco. La acción de las bacterias actúa en una forma simbiótica, es decir manteniendo un equilibrio bastante delicado. (Campero Rivero, 2011, p. 43).

Por lo tanto al considerar el diseño de un biodigestor y lograr una operación estable es necesario tomar en cuenta varios aspectos claves para mantener el equilibrio dinámico y armónico de las condiciones dentro del biodigestor. Los cambios de las condiciones pueden romper con dicho equilibrio e inhibir el proceso de degradación y por ende la producción de biogás. Entre los factores a tomar en cuenta en el diseño deberán considerarse los siguientes: (Doroteo Otlica, 2012, p. 5).

- Tipo de sustrato: la calidad del gas que se produce de un proceso de digestión anaeróbica depende en gran medida del tipo de materia que se alimentará en el biodigestor. Este sustrato deberá contener los elementos necesarios no solo para alimentar a los microorganismos (carbono y Nitrógeno), si no también contener elementos minerales que contribuyan al equilibrio del proceso (azufre, fosforo, magnesio, potasio, calcio, manganeso, hierro, zinc, molibdeno, selenio, cobalto, níquel, tungsteno, y otros en menor cantidad) (Migliavacca, 2011, p. 23).

A pesar de este hecho los biodigestores pueden alimentarse con una gran variedad de materias primas. Entre ellos se enumeran estiércol de animales y humanos, purines, residuos agrícolas, excedentes de cosechas, aguas residuales con alta carga orgánica. Es importante destacar que se debe evitar cargar aquellos materiales que sean muy duros o que posean estructuras muy complejas de digerir como las vísceras ya que esto incrementaría considerablemente el tiempo de digestión. Los estiércoles que más gas producen son los de cerdo y humano. (Avendaño Allen-Perkins, 2010, p. 12).

- Temperatura del sustrato: es el parámetro que más influencia tiene en la velocidad de producción de gas, dado que la actividad microbiológica disminuye o se incrementa proporcionalmente con la temperatura. Los rangos de operación están situados entre los 4 a los 70° C. Dentro de este rango existen 3 grupos principales de acuerdo al tipo de bacterias predominantes. En el siguiente cuadro se presentan sus principales características: (Migliavacca, 2011, p. 24).

Tabla II. **Clasificación de bacterias acorde al rango de temperatura donde se desarrollan**

Bacterias	Rango de Temperaturas	Sensibilidad
Psicrofílicas	Menos de 20 °C	± 2 °C / hora
Mesofílicas	Entre 20 °C y 40 °C	± 1 °C / hora
Termofílicas	Más de 40 °C	± 0,5°C / hora

Fuente: MIGLIAVACCA. *Clasificación de bacterias*. p. 24.

Siendo la temperatura del sustrato una variable importante, tanto para mantener la actividad microbiana como la estabilidad en la velocidad de producción de gas, es importante considerar al momento de diseñar el biodigestor una forma de mantener la temperatura del sustrato lo más estable posible. Esto a fin de mantener un equilibrio térmico tanto al momento de hacer la recarga como durante los cambios de temperatura ambiente que rodea el biodigestor. (De La Merced Jimenez, 2012, p. 30).

- Tiempo de retención hidráulico: este parámetro puede ser definido claramente solo en los sistemas discontinuos o tipo *batch*, y es el tiempo que se requiere para que la materia orgánica sea digerida. Para los sistemas semicontinuos o continuos viene determinado por dos factores, el volumen del sustrato que se ingresa en el biodigestor al día y el tiempo de residencia que se requiere para que el material sea degradado. Este tiempo también es dependiente de la temperatura de trabajo a mayor temperatura menor el tiempo. (Avendaño Allen-Perkins, 2010, p. 18).

Tabla III. **Tiempo de retención en función a la temperatura del sustrato**

Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días) sin mejora de fertilizante	Tiempo de retención (días) con mejora de fertilizante
10	70	87
15	51	63
20	32	40
25	27	34
30	20	25

Fuente: AVENDAÑO, Allen-Perkins. *Temporalidad*. p. 21.

- Nivel de acidez (pH): este parámetro es de importancia para mantener la estabilidad del proceso de fermentación, una vez se alcanza la estabilidad el valor del mismo permanece en el rango entre 7 y 8,5. La presencia de compuestos como amoníaco, bicarbonato de sodio y dióxido de carbono brinda un efecto *buffer* que a menudo permite amortiguar el pH de la carga diaria del biodigestor. Fluctuaciones en este valor a menudo son indicativo de desequilibrio entre las poblaciones de bacterias acidogénicas y metanogénicas. (Migliavacca, 2011, p. 26).
- Relación carbono/nitrógeno: este parámetro viene determinado por el tipo de sustrato que se dispone para trabajar en el proceso de digestión. Esta es la principal causa de que las cantidades de gas varíen de un sustrato a otro. Una relación C/N menor de 8 inhibe el proceso de digestión debido a que se produce un excedente de amonio. (Campero Rivero, 2011, p. 47).
- Concentración del sustrato: este parámetro se refiere a la cantidad de sólidos presentes en el sustrato, cabe destacar que este parámetro es especialmente importante para la movilidad de las bacterias metanogénicas, y puede afectar la eficiencia y la producción de biogás.

No existe una regla a seguir en este caso, la concentración óptima dependerá del tipo de sustrato. En el caso de los estiércoles el valor oscila entre 8 y 12 %. (Migliavacca, 2011, p. 26).

- Agitación o mezclado: el contenido del biodigestor debe agitarse para distribuir las bacterias, los sustratos y los nutrientes a lo largo del biodigestor, así como mantener una temperatura de trabajo más uniforme. Adicionalmente existen ventajas de hacer el proceso de agitación. El mezclado puede hacerse a través de medios mecánicos o recirculando el gas. (Aguilar Alvarez, 2013, p. 22-23).
- Presencia de compuestos inhibidores: la presencia de ciertos productos en el efluente pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso de fermentación. Algunos de los más comunes son los detergentes, antibióticos y algunos metales pesados. En el siguiente cuadro se muestran algunos de los compuestos y su respectiva concentración a la cual provocan un efecto inhibitor. (Migliavacca, 2011, p. 28).

Tabla IV. **Sustancias inhibidoras de la digestión anaeróbica**

Inhibidores	Concentración Inhibidora
SO ₄	5 000 mg/lit
NaCl	40 000 mg/lit
Nitrato (según contenido de nitrógeno)	0,05 mg/lit
Cu	100 mg/lit
Cr	200 mg/lit
Ni	200-500 mg/lit
CN	25 mg/lit
ABS (detergente sintético)	20-40 mg/lit
Na	3 500-5 500 mg/lit
K	2 500-4 500 mg/lit
Ca	2 500-4 500 mg/lit
Mg	1 000-2 500 mg/lit

Fuente: MIGLIAVACCA. *Sustancias*. p. 29.

- Saneamiento: este es un parámetro importante cuando se utilizan como sustratos las excretas de animales o humanos. Esto debido a que se pueden encontrar microorganismos y virus patógenos, además de parásitos que pueden ser propagados por los diferentes sistemas. Es importante en este caso incluir un tratamiento previo que asegure la eliminación de la mayoría de estos vectores de enfermedades. La legislación europea exige como medida de saneamiento del sustrato de este tipo, un tiempo de retención mínimo de 1 hora en un tanque a 70 °C. (Aguilar Alvarez, 2013, p. 24).

7.5.3. Tipos de biodigestores

De acuerdo a la bibliografía consultada existen al menos dos tipos de clasificación de los biodigestores. La primera se basa en el tipo de alimentación del biodigestor, de acuerdo a este tipo se clasifican en alimentación por lotes y alimentación continua. (Doroteo Otlica, 2012, p. 22).

La otra se hace en función de los diferentes avances que se han hecho en el diseño de los biodigestores y los clasifica en diferentes generaciones de acuerdo a la época en que fueron desarrollados. (Campero Rivero, 2011, p. 51).

Tabla V. **Generaciones de biodigestores**

Reactores de 1ª generación	Reactores de 2ª generación	Reactores de 3ª generación
<ul style="list-style-type: none"> • Tanque séptico • Tanque imhoff • Lagunas anaerobias • Reactor convencional • Reactor de contacto 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro anaerobio • Reactor anaerobio de flujo ascendente y capa UASB. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reactor anaerobio de lecho fluidizado. • Reactor anaerobio de lecho expandido.

Fuente: CAMPERO, Rivero. *Generaciones*. p. 51.

- Biodigestores de primera generación: este tipo de biodigestores mantienen la biomasa en suspensión. Son los más antiguos y en su mayoría son de tipo discontinuo o por carga de lotes. Aunque existen algunas variantes que se desarrollaron para hacer un proceso continuo. La característica principal es que el tiempo de digestión necesario es el mismo que el tiempo de retención hidráulico. Esto se ve reflejado directamente en el tamaño del mismo, especialmente cuando se deben tratar grandes volúmenes de líquido. (Campero Rivero, 2011, p. 51-52).
- Biodigestores de segunda generación: los digestores de este tipo se desarrollaron a partir de mantener los microorganismos dentro del biodigestor utilizando un soporte fijo dando lugar a poseer capacidad de sedimentación. El material de apoyo funciona como medio de crecimiento para los microorganismos, es deseable entonces que el material inerte tenga una gran superficie por unidad de volumen. (Campero Rivero, 2011, p. 53).
- Biodigestores de tercera generación: son los más recientes y básicamente, los caracteriza el medio de soporte para los microorganismos, que es expandible y debe tener una gran área de contacto para permitir el crecimiento de los mismos. Además de tener buenas características de sedimentación para mantener la biomasa en el reactor. (Campero Rivero, 2011, p. 53-55).
- Biodigestores de bajo costo: son biodigestores que se hacen con el objetivo de tratar un volumen relativamente bajo de residuos, (generalmente entre 5 a 20 m³). Debido a que son de bajo costo no poseen elementos de agitación y regulación, se conocen 3 tipos principales: chino, indio y tubular. (Campero Rivero, 2011, p. 55-56).

7.6. Generalidades del biogás

Es el nombre común que recibe una mezcla de varios gases que se producen como producto del proceso de digestión anaeróbica de materia orgánica. Su composición depende de la composición de la materia orgánica de donde se deriva. En la siguiente tabla se muestran algunos valores típicos de la composición de los gases que se encuentran presentes en el biogás en función de la fuente generadora de los residuos. (Avendaño Allen-Perkins, 2010, p. 6).

Tabla VI. **Composición del biogás**

Componente	Formula	Unidad	Aguas residuales	Residuos agrícolas y ganaderos	Gas de vertedero
Metano	CH ₄	% V	65 - 75	45 – 75	45 – 55
Dióxido de carbono	CO ₂	% V	25 - 35	25 – 55	25 – 30
Monóxido de carbono	CO	% V	< 0,2	< 0.2	< 0,2
Hidrógeno	H ₂	% V	Trazas	0.5	0
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	mg/Nm ₃	< 8 000	10 – 30	< 8 000
Amoníaco	NH ₃	mg/Nm ₃	Trazas	0,01 – 2,50	Trazas
Nitrógeno	N ₂	% V	3,4	0,01 – 5,00	10 – 25
Oxígeno	O ₂	% V	0,5	0,01 – 2,00	1 – 5
Compuestos orgánicos		mg/Nm ³	< 0,1 – 5,0	Trazas	< 0,1 – 5,0

Fuente: AVENDAÑO, Allen-Perkins. *Composición*. p. 6.

Los gases dominantes son el metano y el dióxido de carbono que en conjunto componen más del 95 % del volumen total. Además contiene

hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. Además de trazas de ácido sulfhídrico amoníaco y otros. (Migliavacca, 2011, p. 14).

7.6.1. Contenido energético

El metano, principal componente del biogás, es un gas incoloro e inodoro, cuya combustión produce dióxido de carbono y agua. Cuando la combustión es completa el color de llama producida es azul. Cuando se utiliza el biogás como sustituto de la leña el contenido de energía equivalente en 1 m³ de biogás a otras fuentes se muestra en la tabla VII. (Avendaño Allen-Perkins, 2010, p. 6).

Tabla VII. **Equivalencias de otros combustibles para biogás**

1 m³ de biogás equivale a	
Madera	1,3 kg
Alcohol	1,1 lt
Gasolina	0,75 lt
Gasoil	0,65 lt
Gas Natural	0,76 m ³
Carbón	0,7 kg
Electricidad	2,2 kWh

Fuente: AVENDAÑO, Allen-Perkins. *Equivalencias de combustibles*. p. 7.

Los valores de combustión medios del biogás comparados con otros combustibles se muestran en la tabla VIII:

Tabla VIII. **Valor calorífico de diferentes combustibles**

Combustible	Valor Calorífico (kCal)
Biogás (m ³)	5 432
Keroseno (lt)	9 100
Carbón (kg)	6 900
Leña (kg)	4 700
Butano (kg)	10 900
Estiércol Vacuno (kg)	2 100
Propano (m ³)	22 052
Petróleo (kg)	11 357
Gasolina (kg)	10 138

Fuente: BAERLOCHER. *Valores caloríficos*. p. 15.

7.6.2. Purificación del biogás

Por su alto contenido de metano el biogás puede utilizarse básicamente como sustituto del gas natural o del GLP. Antes de utilizarlo para motores de combustión o equipos de alta presión es necesario purificarlo con el fin de eliminar la mayor parte del dióxido de carbono y de ácido sulfhídrico para lograr una buena combustión. (De La Merced Jimenez, 2012, p. 34).

El proceso de purificación se lleva a cabo en un tanque a presión donde el biogás entra en contacto con una solución de cal. Esto remueve el dióxido de carbono, a continuación en otro tanque se pone en contacto con limaduras de hierro para remover el sulfuro de hidrógeno. Este paso es de suma importancia para proteger las instalaciones de la corrosión por el flujo de gas, como último paso el gas pasa a través de un filtro de cloruro de calcio que remueve el exceso de agua. (Campero Rivero, 2011, p. 79).

8. HIPÓTESIS

La digestión anaerobia es una alternativa viable para el tratamiento alternativo de los residuos sólidos y líquidos de origen orgánico proveniente de una planta textil.

9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

- 1.1. Legislación ambiental
- 1.2. Medio ambiente y desarrollo sostenible
- 1.3. Tratamiento de aguas residuales
- 1.4. Gestión de desechos sólidos
- 1.5. Otras alternativas para el tratamiento de los desechos sólidos
- 1.6. Generalidades del biodigestor
- 1.7. Generalidades del biogás

2. ESTUDIO TÉCNICO

- 2.1. Tamaño
- 2.2. Tipo de biodigestor
- 2.3. Diseño
- 2.4. Calendarización de actividades
- 2.5. Análisis de costos

3. ASPECTOS AMBIENTALES

- 3.1. Identificación de impactos potenciales al medio afectado
- 3.2. Balance del impacto ambiental entre estado actual y estado futuro
- 3.3. Medidas de mitigación

4. ESTUDIO FINANCIERO

- 4.1. Inversión
- 4.2. Costos de funcionamiento
- 4.3. Ingresos
- 4.4. Estado de resultados
- 4.5. Evaluación financiera
- 4.6. Análisis de sensibilidad

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

10. METODOLOGÍA

Este es un estudio de tipo tecnoeconómico donde se evaluará una alternativa para el tratamiento de desechos sólidos y líquidos, basados en tecnologías usadas actualmente para este fin. Se evalúa al final si la combinación de estas es una alternativa factible técnica y económicamente para el tratamiento tradicional de los mismos.

Para cumplir con los objetivos planteados para este trabajo. El método para realizarlo estará basado en la determinación de los indicadores financieros y variables técnicas que determinen la factibilidad del proyecto.

Para llevar acabo se proponen las siguientes fases:

10.1. Investigación preliminar

En esta etapa se evaluará el proceso actual de generación de desechos sólidos y líquidos de la actividad de la planta de manufactura textil. Se determinará el volumen potencial de desechos disponibles para llevar a cabo el proyecto. Las variables a identificar en esta etapa son las siguientes:

Tabla IX. **Variables preliminares**

Variables	Método	Insumos
Cantidad de sustratos disponibles y velocidad de producción.	Análisis de información histórica disponible de producción de residuos, toma de datos puntuales de cantidad de residuos producidos.	Datos históricos. Toma de datos.
Captación.	Determinar puntos de generación y acumulación. Análisis de las rutas de transporte interno dentro de las instalaciones.	Recorridos por la planta Planos de instalaciones hidráulicas.

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente durante esta etapa se revisará el Estudio de Impacto Ambiental del proyecto para identificar las medidas de mitigación que fueron propuestas, así como la magnitud de los impactos establecidos en este. Para identificar el cumplimiento del proyecto dentro de las medidas de mitigación planteadas.

10.2. Pruebas de campo y recolección de información documental

Durante esta fase se llevarán a cabo la medición de los parámetros que servirán para dimensionar y definir el tipo de biodigestor. Entre los aspectos más importantes en esta fase están.

10.2.1. Caracterización de los residuos disponibles

Se tomarán muestras aleatorias de los diferentes sustratos disponibles para estudiar las siguientes variables de interés y determinar las características principales.

Tabla X. Variables del estudio

Variables	Método	Equipos
Porcentaje de humedad en el sustrato	Desecación en horno de temperatura controlada, basado en Norma UNE 77030:1982	Horno, balanza, recipientes de aluminio para 1 kg de muestra de capacidad.
Porcentaje de sólidos volátiles, porcentaje de cenizas	Gasificación en horno de temperatura controlada, basado en norma UNE 77034:2002	Horno, crisol
Densidad real de los sólidos	Picnómetro	Picnómetro, balanza
pH	Potenciómetro	Potenciómetro
DQO	Colorimetría	Colorímetro
Carbono total	Análisis de laboratorio externo	Analizador de carbono
Nitrógeno total	Análisis de laboratorio externo	Analizador de nitrógeno
Caracterización de aguas residuales	Análisis de laboratorio externo	Diferentes equipos para realizar las mediciones de los 20 parámetros establecidos en el reglamento 236-2006.

Fuente: elaboración propia.

10.2.2. Determinar el potencial de generación de biogás

Para ello se realizarán pruebas a escala y se construirán 3 biodigestores de bajo costo, con el objetivo de medir el comportamiento de la producción de gas y el tiempo de retención esperado. Estos datos servirán para validar las premisas publicadas e investigadas para sustratos similares y condiciones que se han encontrado a lo largo de la investigación bibliográfica del tema e inferir si

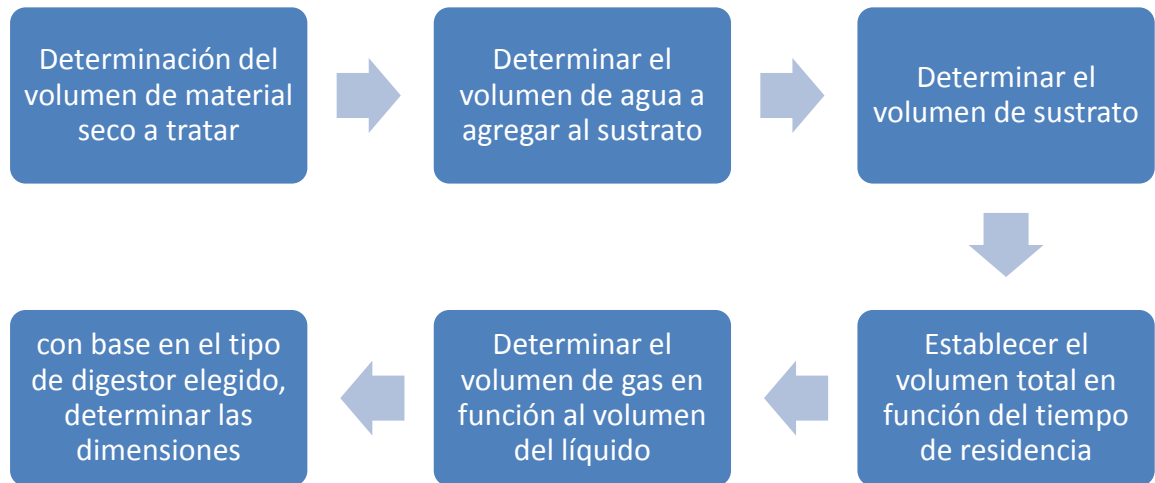
los datos son o no necesarios para el cálculo del volumen de gas y el tamaño necesario del biodigestor.

10.3. Análisis de información y cálculos técnicos

En esta etapa se procederá a utilizar los datos recabados en la fase de campo, para definir el tipo de biodigestor a usar basado en las variables analizadas y en las consideraciones técnicas como: espacio disponible y necesidad de recursos para la realización del proyecto. Se harán inferencias de algunos parámetros anteriormente establecidos en trabajos anteriores y que fueron investigados como parte del marco teórico de este trabajo. Además se revisarán las recomendaciones técnicas establecidas para los tipos de sustratos empleados a fin de determinar el tipo de biodigestor a construir, así como los equipos auxiliares necesarios para realizar el proyecto.

También se determinará la capacidad productora de biogás en función de los residuos disponibles y el tamaño del biodigestor a construir. Para esto se utilizarán los datos obtenidos de la caracterización de los sustratos, los resultados de las pruebas a escala de producción de gas y las ecuaciones generales de dimensionamiento del biodigestor. A continuación se explica este proceso de una forma general.

Figura 4. **Esquema para determinar la dimensión de un biodigestor**



Fuente: elaboración propia.

10.4. Impacto ambiental y análisis económico

Para llevar a cabo este objetivo deben establecerse los indicadores ambientales actuales que se producen, producto de la disposición actual de los residuos y cuál sería el impacto sobre esos mismos indicadores al implementar la medida. Para conocer estos indicadores es necesario revisar el Estudio de Impacto Ambiental de la empresa y determinar qué indicadores aparecen reflejados. En la factibilidad técnica del proyecto dependerá que el balance neto sobre estos indicadores sea positivo. La evaluación se hará, siguiendo la metodología propuesta por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) para la evaluación del impacto ambiental de los proyectos.

10.5. Revisión de resultados y presentación de caso

Luego de determinar la factibilidad técnica del proyecto se debe determinar si económicamente el mismo es viable para presentarlo a los inversionistas que proveerán el capital. Para ello se utilizarán los métodos de evaluación de proyectos de análisis de retorno de inversión y valor presente neto. Estos dos indicadores darán la validación final para el proyecto. El proceso para llegar a estos dos análisis es determinar los siguientes parámetros:

10.5.1. Inversión

La cantidad de dinero necesaria para construir las instalaciones del biodigestor se determinará utilizando proyecciones de instalaciones similares que incluyan todos los equipos auxiliares necesarios que garantizando una operación adecuada de la planta de generación del biogás. Para estimar la inversión del biodigestor se utilizarán los parámetros encontrados en la bibliografía, cotizaciones de empresas dedicadas a la construcción de estos sistemas.

10.5.2. Flujo de costos de operación y mantenimiento del proyecto

Con base en los equipos a instalar y su tiempo de vida útil estimado, parámetros de operación y estándares de operación sugeridos por los fabricantes, se estimará el flujo de costos de mantenimiento necesarios para su operación normal. Es importante hacer notar que debido a la naturaleza del proceso es posible que sea necesario considerar que parte del biogás generado se utilice para abastecer las necesidades energéticas del proyecto. Con esto se

reducirían los costos operativos, pero a la vez también lo haría el beneficio económico que el mismo produce.

10.5.3. Flujo de ingresos proyectados

En función de la cantidad de biogás que sustituiría la utilización actual de GLP para el proceso de secado de prendas de la empresa: con los datos de consumo actual, costo del insumo, proyección del costo a futuro y el volumen potencial de biogás a producir, se estimará el ahorro en combustible que se produciría como parte de los ingresos del proyecto.

10.5.4. Flujo de efectivo

Representa beneficios cuantificables en función del impacto ambiental generado: en este caso incluyen los mecanismos ambientales de bonos de carbono.

10.5.5. Flujo de amortización del capital invertido

Esto se deberá determinar en función a la fuente de financiamiento, preliminarmente este proyecto se estima realizarlo con fondos propios de la empresa. Sin embargo, se sabe que instituciones como el Banco Centroamericano de Desarrollo proveen préstamos a una tasa preferencial para este tipo de proyectos, por lo que dentro de la consideración de las fuentes debe analizarse la utilización de las mismas.

Luego de realizar estas actividades se podrá determinar si la utilización de los residuos sólidos provenientes de la planta es posible que a través del tratamiento dentro de un biodigestor, además de producir una mejora en el

impacto ambiental, sea capaz de producir un beneficio económico para ser una alternativa viable de tratamiento autosustentable.

11. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Las técnicas de análisis de los datos incluyen las siguientes:

11.1. Análisis estadístico descriptivo de las muestras

Esto aplica para la obtención de valores promedio y desviaciones estándar de los valores determinados de los parámetros de interés para el diseño del biodigestor. Para ello se tomarán diferentes muestras de los sustratos existentes, a fin de obtener valores representativos de los siguientes parámetros. Se utilizará software para hacer los análisis y gráficos de cada parámetro y determinar la variabilidad de los mismos a lo largo de las muestras.

- Porcentaje de sólidos
- Composición del sustrato
- pH
- Temperatura
- Volumen de producción de gas

11.2. Análisis de varianza

Con el objetivo de establecer la sensibilidad del sistema a parámetros específicos se utilizará un análisis de varianza, para el análisis de diferentes tratamientos de los experimentos y determinar cuál de los factores de interés influyen la velocidad de producción de gas y el tiempo de retención hidráulico. Los factores a analizar son los siguientes:

- Tipo de sustrato
- Porcentaje de composición de cada tipo de sustrato (peso en mezcla)

11.3. Análisis de impacto ambiental

Para el análisis del impacto ambiental se utilizarán los elementos evaluados en el diagnóstico de impacto ambiental vigente de la planta de acuerdo con el numeral 12 del Documento de Términos de Referencia del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Este aparece en la parte de los anexos de este protocolo.

Se valuarán los aspectos de la matriz de Leopold enumerados en el diagnóstico ambiental, referentes a los compartimientos ambientales de suelo y agua. Adicionalmente dentro del diagnóstico se plantea la construcción de un sistema de tratamiento para las aguas residuales de tipo doméstico que se producen dado que en la actualidad se descargan al drenaje. El objetivo de este trabajo conlleva determinar si es posible proponer un biodigestor como medio tratante de dichas aguas.

11.4. Análisis económico

Para este proyecto se utilizará la construcción de un análisis financiero básico, de un proyecto de inversión, el cual se muestra en la figura 5.

Figura 5. Flujo de caja de un proyecto

Flujo de Caja Mensual (en soles)				
Período	¹Mes 0	Mes 1	Mes 2	Sgtes...
+ ² Ingresos				
- ³ Egresos de Inversión				
Activos Fijos				
Capital de Trabajo ⁴				
- Egresos de Operación				
Costos de Operación				
Costos de Administración				
Costos de Vtas.				
- Impuestos				
- Otros				
- Imprevistos				
FLUJO DE CAJA ECONÓMICO				

FLUJO DE CAJA ECONÓMICO = Ingresos – Egresos de Inversión – Egresos de Operación.

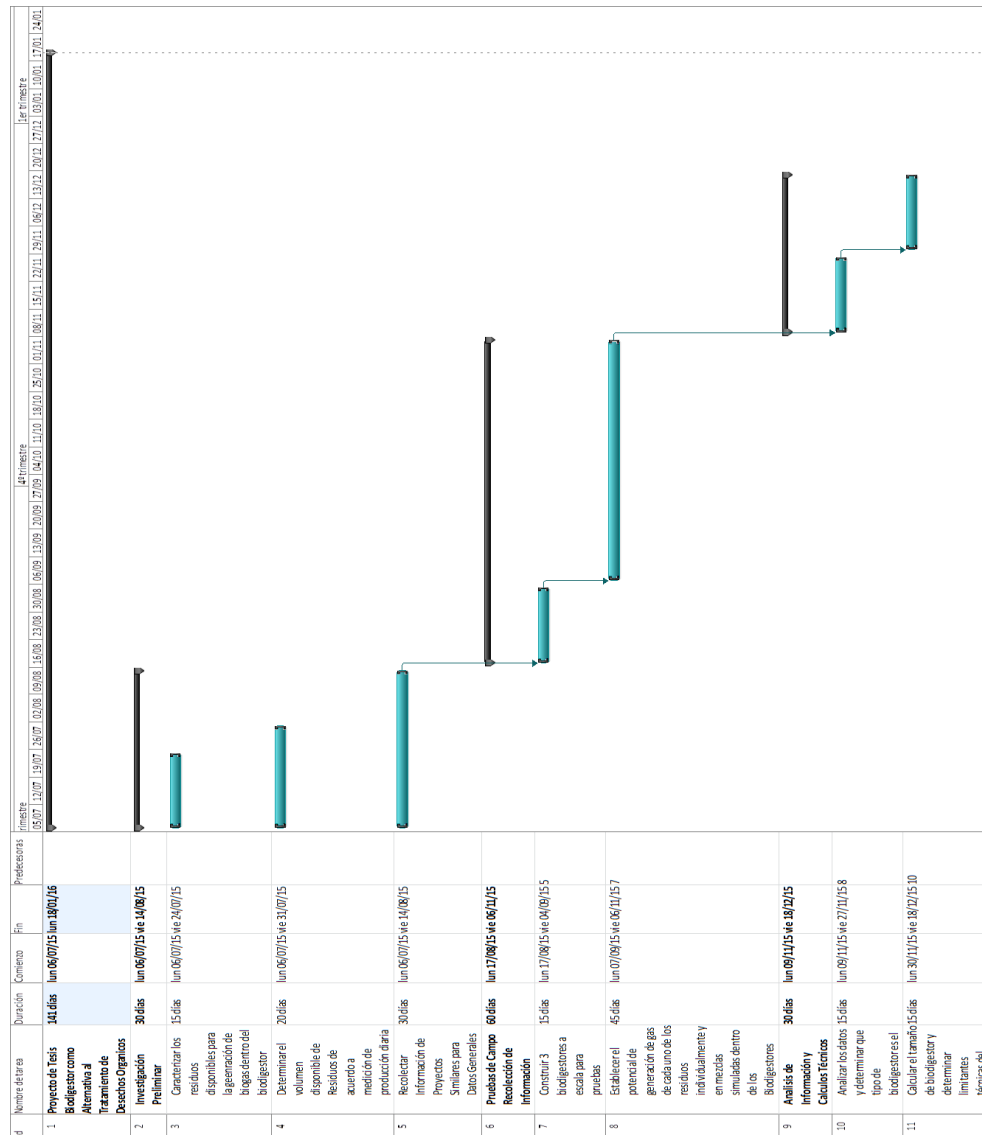
Fuente: Gestión empresarial. *Plan de Negocios - Esquema/Evaluación económica y financiera del proyecto*. p. 5.

Con este flujo de caja del proyecto se construirá un análisis financiero preliminar, para el cual se utilizarán las fuentes consultadas estimando los valores de los flujos de egresos y para los ingresos la fracción de biogás que sustituiría el uso del GLP dentro del proceso.

Los parámetros a obtener son la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN) con los cuales se determinaría la viabilidad económica del proyecto.

12. CRONOGRAMA

A continuación, en el siguiente cronograma se muestra una lista de todos los elementos terminales del proyecto con sus fechas previstas de comienzo y final.



13. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Los tipos de recursos a utilizar se describen de forma general a continuación.

13.1. Financieros

A continuación en la tabla XI se muestra el presupuesto de recursos financieros necesarios a utilizar en el proyecto de graduación.

Tabla XI. **Recursos financieros necesarios**

Rubro	Monto aproximado
Análisis composición de residuos	Q 5 000,00
Análisis de porcentaje de sólidos en residuos	Q 2 500,00
Caracterización de aguas residuales	Q 1 500,00
Equipo para medición de pH (alquiler)	Q 250,00
Material para construcción de biodigestores a escala	Q 3 000,00
Computadora (alquiler)	Q 300,00
Software Minitab (Licencia)	Q 500,00
Impresiones	Q 100,00
Recurso humano para pruebas	Q 3 500,00
Asesor	Q 2 500,00
Revisor	Q 2 500,00
TOTAL	Q 21 650,00

Fuente: elaboración propia.

Estos recursos serían proporcionados por la empresa para financiar el estudio.

13.2. Tecnológicos

Se utilizarán los equipos actualmente existentes en el Laboratorio de Análisis de Agua como: potenciómetro, cristalería, reactivos, entre otros.

Adicionalmente se dispondrá de equipo de cómputo para la tabulación y análisis de datos utilizando un programa especializado estadístico llamado Minitab.

Se requiere de contar con medidores de flujo y presión de gas los cuales están disponibles en la empresa para determinar el volumen de gas y presión generada en los digestores a escala.

13.3. Humanos

La empresa accedió a brindar las facilidades para realizar el estudio. Por ello habrá dos personas disponibles a tiempo parcial, para el monitoreo de las pruebas y preparación de las muestras necesarias para llevar a cabo el estudio.

Adicionalmente se cuenta con el apoyo del asesor de este trabajo en cuyos datos aparecen en el anexo.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR ALVAREZ, G. (2013). *Control de Temperatura y pH Aplicado en Biodigestores Modulares De Estructura Flexible Con Reciclado de Lodos a Pequeña Escala*. Queretaro, Mexico: Universidad Autonoma de Queretaro.
2. ALDANA PAIZ, M. R. (2011). *Manual Para Pequeños y Medianos Productores Finca Ganadera Ecologica*. Chiquimula, Guatemala: USAC.
3. AVENDAÑO Allen-Perkins, D. (2010). *Diseño y Construcción de un Digestor Anaerobio Tipo Piston que Trate los Residuos Generados en una Explotación Ganadera en la Localidad de Loja, Ecuador, Empleando Tecnologías Apropriadas*. Universidad Politécnica de Madrid. Loja, Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja.
4. Baerlocher, F. (2004). *Análisis de Factibilidad y de Sostenibilidad de una Planta de Biodigestión Anaerobica en la Región de Uraba, Colombia*. Bogotá, Colombia: EMPA.
5. BATRES QUEVEDO, J. A., Jayes Reyes, P. G., & Del Cid Pérez, G. (1993). *Estudio de Factibilidad para el Manejo de Desechos Solidos Domiciliares en las Colonias Tierra Nueva I y II de Chinautla Departamento de Guatemala*. Guatemala: USAC.

6. CAMPERO Rivero, O. (2011). *Monitorización y Evaluación Comparativa de la tecnología de Biodigestión Anaerobia Como Fuente de Energía Renovable*. Huelva, España: Universidad Internacional de Andalucía.
7. Couto Benítez, I. (2008). *Evaluación de la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos en la Frontera Norte: Los Casos de Juarez, Reynosa y Tijuana*. Tijuana, México: CICESE.
8. DE LA MERCED JIMENEZ, D. (2012). *Evaluación de los Parámetros de un Biodigestor Anaerobio Tipo Continuo*. Xalapa, Mexico: Universidad Veracruzana.
9. Defensores de la Naturaleza. (6 de Agosto de 2014). *Legislación Ambiental Resumen 2012*. Obtenido de defensores.org.gt: <http://www.defensores.org.gt/sites/default/files/Legislaci%C3%B3n%20ambiental%20RESUMEN.pdf>.
10. Doroteo Otlica, J. C. (2012). *Aprovechamiento de Biogas Proveniente del Abono de Ganado Vacuno en un Establo Ubicado en Ixtapaluca Estado de Mexico*. México: Instituto Politecnico Nacional.
11. JARAMILLO Henao, G., & Zapata Marquez, L. M. (2008). *Aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos En Colombia*. Antioquia, Colombia: Universidad de Antioquia.
12. Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, Decreto 68-86 (Congreso de La Republica de Guatemala 1986).

13. Migliavacca, J. (2011). *Tratamiento Anaerobico de Efluentes Citricos con Captación de Biogas para la Reducción de Gases Efecto Invernadero*. Tucuman, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
14. MORALES Aravena, V. I. (2005). *Efecto Ambiental del Uso de Las Composteras en el Manejo Integral de los Residuos Sólidos Domésticos En Una Comuna Urbano Rural*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
15. MURILLO Marchena, E. (2007). *Cambios Ambientales, Sociales y Ecóconomicos Por Biodigestores en Granjas Porcinas, Cuenca del Rio Tempisque, Costa Rica*. San José, Costa Rica: Escuela Estatal a Distancia.
16. Política Nacional para el Manejo Integral de los Residuos y Desechos Sólidos., Acuerdo Gubernativo 111-2005 (Presidencia de La República de Guatemala 2005).
17. Reglamento de Descargas de Aguas Residuales y Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales 2006).
18. SILVA JIMÉNEZ, J. R. (2009). *Factibilidad de Inversión en un Proyecto de Producción*. Guatemala: USAC.

19. Tartón Otzoy, M. W. (2014). *Clasificación del lodo efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales de un proceso discontinuo de acuerdo a la regulación USEPA título 40 y rendimiento de biogás*. USAC, Facultad de Ingeniería. Guatemala: USAC.

20. VERA ROMERO, I. (2011). *Desarrollo Metodológico Para el Análisis de la Viabilidad de Un Proyecto de Microgeneración*. Mexico D.F.: Universidad Autónoma de México.

APÉNDICE

Árbol del problema

A continuación se muestra la técnica que permitirá registrar y organizar la problemática que se intenta resolver o investigar con mayor profundidad. Esta técnica incluye la identificación de los elementos que se vinculan con el proyecto.

Apéndice 2. **Matriz de correspondencia**

Pregunta	Objetivo	Variables	Plan de acción
¿Es la digestión anaeróbica una alternativa para el tratamiento integral de residuos sólidos orgánicos de una industria textil? (Pregunta Central)	Determinar la factibilidad de la utilización de un biodigestor anaeróbico como fuente de tratamiento para el manejo integral de desechos procedentes de una planta textil.	ROI VAN Volumen de Gas a Producir Balance de Impacto Ambiental	1. Calcular y dimensionar los recursos a invertir en la implementación del biodigestor 2. Realizar el análisis de factibilidad técnica y económica
¿Cuál sería el impacto económico de implementar esta medida?	Determinar la factibilidad económica de implementar un biodigestor para el tratamiento de desechos de origen orgánico en una planta de manufactura de Jeans.	VAN ROI Porcentaje de Reducción del Costo	1. Determinar el flujo de efectivo neto del proyecto 2. Establecer si es una alternativa de inversión que tenga un retorno que permita su implementación 3. Calcular el ahorro generado por otros rubros que se dejarían de utilizar para la disposición final de los desechos.
¿Cuál es el impacto ambiental que producirá la medida?	Establecer cuál es el balance del impacto ambiental generado al implementar la obtención de biogás.	Impacto Ambiental Actual Impacto Ambiental Proyectado Medidas de Mitigación	1. Determinar el impacto ambiental actual (línea base) 2. Calcular el impacto que produciría la implementación del proyecto sobre la línea base 3. Determinar la disposición del efluente del biodigestor.
¿Qué volumen de los residuos disponibles se podría tratar si se implementa esta medida?	Determinar que volumen de los residuos disponibles es posible tratar	Tipo de Biodigestor Tamaño de Biodigestor Volumen de Residuos que es posible tratar	1. Calcular las necesidades de espacio y presupuesto para tratar el total de los desechos. 2. En base a las restricciones existentes de espacio y presupuesto determinar que volumen es posible tratar.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Guía de Términos de Referencia para el Instrumento de Diagnóstico Ambiental

Núm	Tema	Explicación
1	ÍNDICE	Presentar contenido o índice completo indicado capítulos, cuadros, mapas anexos, acrónimos y otros, señalando números de página.
2	RESUMEN DEL DIAGNÓSTICO AMBIENTAL	Resumen que incluya introducción (objetivos, localización, entidad propietaria justificación), descripción del Proyecto, obra o actividad (fases, obras complementarias, entre otros); características ambientales del área de influencia; impactos del proyecto, obra o actividad al ambiente; y viceversa; acciones correctivas o de mitigación así como un resumen del plan de Gestión Ambiental del mismo y resumen de compromisos ambientales.
3	INTRODUCCIÓN	Sus componentes principales incluyendo: a) descripción del proyecto, b) alcances, c) objetivos, d) metodología, e) localización y justificación.
4	INFORMACIÓN GENERAL	Requisitos de presentación incluidos en la hoja de requisitos.
4.1	Documentación legal	Incluir documentos legales de acuerdo a hoja de requisitos.
4.2	Información sobre el equipo profesional que elaboró el DA	Incluir listado de profesionales participantes en la elaboración del Diagnostico Ambiental e indicar la especialidad de cada uno. Núm. de colegiado activo. Núm. de Registro ante el MARN, así como la respectiva Declaración Jurada, sobre el tema en el que se participo.
12	Identificación de Impactos ambientales y determinación de medidas de mitigación	Debe incluirse matriz o conjunto de matrices utilizadas para la identificación y cuantificación de los impactos. (Lista de chequeo y Causa Efecto, entre otros).
12.1	Identificación y valoración de impactos ambientales	Aplicar una metodología convencional que confronte las actividades impactantes del proyecto, obra, industria o actividad, con respecto a los factores de Medio Ambiente que son afectados, y las valore, analizando las diferentes etapas del proyecto (construcción, operación y abandono).
12.2	Análisis de impactos	Analizar los impactos ambientales que afectan a: a) aire, b) suelo, c) subsuelo, d) aguas, e) aguas subterráneas, f) flora y fauna, g) biotopos acuáticos y terrestres, h) medio socioeconómico, i) recursos culturales e históricos, j) paisaje, k) otros. Señalar la fuente generadora del impacto (descripción y análisis), y definir el conjunto de medidas preventivas, correctivas, de mitigación, de compensación, si se trata de un impacto negativo, o bien para optimizarlas si se tratan de un impacto positivo.

Continuación de apéndice 3.

12.3	Evaluación de Impacto Social	Efectuar una evaluación de impacto social que estime las consecuencias sociales que altere el ritmo de la vida de las poblaciones y que afecte la calidad de vida de sus habitantes.
12.4	Síntesis de la evaluación de impactos ambientales	Elaborar un resumen, indicando todos los impactos ambientales que produce el proyecto, en sus diferentes etapas y el resultado de la valoración de la importancia del impacto ambiental, incluyendo aquellos impactos que generan efectos acumulativos. Hacer una comparación de la calificación de los impactos ambientales, en particular el balance entre los impactos negativos y positivos; y resumir cuáles son los impactos más importantes.

Fuente: elaboración propia.

