



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Biogás por Digestión Anaerobia Termofílica de la Fracción
Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

(PROYECTO DE GRADUACIÓN)

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERA MECÁNICA

Presentado por:

Karina Giomara Santos Salazar

GUAYAQUIL-ECUADOR

2015

AGRADECIMIENTO

A mi director de Proyecto, Dr. Alfredo Barriga por su invaluable ayuda, al vocal, Dr. David Matamoros, al equipo de CIPAT y al Dr. Francis Loaiza por su apoyo en la realización de este trabajo.

A mis amigos-colegas por su ayuda incondicional.

A mi familia por haber sido un soporte importante en el trabajo.

DEDICATORIA

A mi padre y mi madre
que hicieron posible mi
educación y me guiaron
en todo momento.

A mis hermanos por ser
una parte importante de
mi vida.

A mis amigos por haber
sido una compañía
invaluable en este
periodo de estudios.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Jorge Duque R.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Dr. Alfredo Barriga R.
DIRECTOR DEL TFG

Dr. David Matamoros C.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido desarrollado en el presente Trabajo Final de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Karina Giomara Santos Salazar

RESUMEN

Recientemente el gobierno nacional y los gobiernos autónomos se han encontrado en la necesidad de impulsar cambios en el manejo de los residuos sólidos.

Este estudio nace como una alternativa en el manejo y disposición final de los desechos sólidos urbanos generados en una comunidad determinada, y a su vez, de la necesidad de aprovechar dichos residuos de manera sustentable.

En base a lo anterior, en este estudio se realizó un diseño viable de un sistema de digestión anaeróbica termofílica que genera biogás a partir de la fermentación de la fracción orgánica de los desechos sólidos urbanos, incluyendo la posibilidad del aprovechamiento energético a través de la generación y comercialización de energía eléctrica producida.

Como primera parte de este trabajo, se establecieron las bases del tratamiento de los desechos sólidos urbanos en el Ecuador y más concretamente en ciudad de Guayaquil, mostrando las ventajas y desventajas del mismo. Posteriormente, se indicaron las características de un modelo sustentable en el manejo de los residuos junto con las ventajas socio-económicas que esto acarrea.

El siguiente punto analizado fue la cantidad de residuos per-cápita a ser tratados, estableciendo una cantidad base de 100 t/d (as is), de esta cantidad, se estableció en base a estudios, el porcentaje biodegradable de residuos y por ende la cantidad final a ser tratada por la planta. Se indicaron además algunas características de estos residuos como humedad y temperatura. Una vez fijados estos parámetros, se procedió al dimensionamiento del sistema.

Para el diseño total de la planta, se identificaron cuatro aspectos importantes de análisis: química de la muestra y de la reacción, diseño mecánico de las partes que conforman el sistema, análisis fluido-térmico y finalmente el análisis de costos de un sistema colocado en nuestro medio.

En la química de la muestra se definió el proceso anaeróbico en el rango termofílico, se indicó las características, las variables y condiciones físico-químicas requeridas para llevar a cabo el proceso. Posteriormente se identificaron los residuos sólidos urbanos que se generan en la ciudad de Guayaquil, definiendo las características químicas de la fracción orgánica. Finalmente, en base a información bibliográfica se realizó una estimación teórica de la producción de biogás y se estableció la cantidad de efluentes remanentes del proceso.

Una vez definidas las variables del sistema, se fijaron las condiciones del pre-procesamiento, se establecieron los componentes necesarios para el sistema, concluyendo con un diseño de forma preliminar de la planta. En el siguiente paso, se procedió al diseño y/o selección de los componentes mecánicos que incluyen: desmenuzadoras, tanques de procesamiento, soldadura y tornillos sinfín, siguiendo normas de diseño establecidas; por último se indicaron las bases para el diseño del sistema de extracción del biogás generado, entre otros equipos auxiliares requeridos.

En el análisis fluido-térmico se definieron las características de recirculación requerido. En punto se seleccionó la bomba de lodos, diámetros de tuberías, caídas de presión, entre otros parámetros.

Por otro lado, el análisis térmico comprendió el mecanismo de calentamiento de la biomasa del proceso anaerobio. Se definieron además los aislantes, las pérdidas de energía en el sistema, la energía requerida, las temperaturas de operación de cada tanque de procesamiento y por último se calculó la cantidad remanente de energía que servirá para la generación eléctrica.

El estudio concluyó con un análisis de costos, el mismo que se realizó en base al modelo de proyección de proyecto, en donde se tomó en cuenta el periodo de duración y los costos principales que

se presentan durante el periodo de ejecución del proyecto. Los costos que se analizaron fueron: costos iniciales, costos operativos y valor de recuperación de inversión. Adicionalmente, se añadió una posible venta de electricidad generada por medio de biogás, se estableció además el valor económico de los lodos de fondo (abono) y del material reciclado, sin embargo no se tomaron en cuenta como ingresos en el cálculo final del proyecto. Finalmente, se determinó la viabilidad del sistema.

Como resultados finales del presente proyecto se presentó: el dimensionamiento y diseño de forma del sistema, el cálculo térmico con especificaciones del tipo de aislante y de las pérdidas de calor correspondientes, recomendaciones operativas para el sistema, esto como resultado del análisis teórico, una estimación de la cantidad de energía eléctrica que podría generarse en base a la productividad del biogás y a su energía remanente y por ultimo un análisis del cálculo económico que permitirá establecer la viabilidad del sistema.

Finalmente, todo lo anterior conllevará hacia un resultado global que definirá el grado de complejidad, la factibilidad y la viabilidad del sistema colocado en la ciudad de Guayaquil.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL	vi
ABREVIATURAS	ix
SIMBOLOGÍA	x
INDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
INDICE DE PLANOS.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Objetivos Generales y Específicos.....	7
1.3 Alcances.....	8
1.4 Justificación.....	9
1.5 Estructura del Estudio	10
CAPÍTULO 2	
2. MARCO TEÓRICO.....	13

2.1	Generalidades del tratamiento de los desechos sólidos urbanos ..	13
2.2	Definición del problema.....	19
2.3	Definición, descripción y características de la digestión anaerobia	20
2.4	Definición y características de condición de rango termofílico	30
2.5	Condiciones generales de la digestión anaerobia termofílica	33
2.6	Identificación de los desechos sólidos generados en la ciudad de Guayaquil	39
2.7	Características químicas de los desechos sólidos	46
2.8	Estimación teórica de la producción de biogás	55

CAPÍTULO 3

3.	SISTEMA ANAEROBIO	68
3.1	Diseño conceptual del sistema.....	68
3.2	Calculo de la capacidad del sistema.	74
3.3	Diseño y/o selección de los elementos mecánicos	82
3.4	Análisis hídrico del sistema.	112
3.5	Análisis térmico del sistema.....	123
3.6	Presupuesto de obra	139

CAPÍTULO 4

4.	ANALISIS DE COSTOS DEL SISTEMA.	143
4.1	Metodología	144

4.2	Costos iniciales	144
4.3	Costos operativos	145
4.4	Evaluación de posibles ingresos económicos del sistema.....	146
4.5	Análisis de costos totales y viabilidad económica	147

CAPÍTULO 5

5.	ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS.....	148
----	-------------------------------------	-----

CAPÍTULO 6

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	158
----	--------------------------------------	-----

	APÉNDICES.....	166
--	----------------	-----

	BIBLIOGRAFÍA.....	189
--	-------------------	-----

ABREVIATURAS

AGV	Ácidos Grasos Volátiles.
CELEC EP	Corporación Eléctrica del Ecuador
db, wb	Dry, Wet basis
DRANCO	Dry Anaerobic and Composting
EPA	Estudio de impacto ambiental
FORSU	Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos
LHV	Low Heating Value
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PNGIDS	Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos
PPC	Producción Per Cápita
RSLI	Relleno Sanitario "Las Iguanas"
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente

SIMBOLOGÍA

C/N	Relación Carbono-Nitrógeno
E_n	Energía residual neta
ρ_{CH_4}	Densidad del metano
E_d	Energía termoquímica disponible
E_r	Energía requerida en proceso
Tr	tiempo de retención
ρ_g	Densidad global
pH	Potencial de hidrogeno

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Esquema de la gestión de residuos en el Ecuador.....	17
Figura 2.2 Manejo de residuos sólidos en el Ecuador	17
Figura 2.3 Etapas de la digestión anaerobia.....	23
Figura 2.4 Crecimiento bacteriano vs temperatura de operación.....	30
Figura 2.5 Actividad de reciclaje informal en Guayaquil	46
Figura 2.6 Variación de la productividad del biogás con respecto al tiempo de residencia y temperatura	57
Figura 2.7 Planta de kompogas	60
Figura 2.8 Detalle planta de kompogas	61
Figura 2.9 Sistema de digestión anaerobia, proceso DRANCO.....	61
Figura 3.1 Esquema de la planta de biodigestión DRANCO.....	69
Figura 3.2 Vista de planta, componentes del sistema DRANCO	73
Figura 3.3 Comparación entre biomasa inicial y requerida al ingreso del biodigestor	76
Figura 3.4 Medidas generales del biodigestor (metros)	79
Figura 3.5 Simbología para tanques de sistema de dosificación	80
Figura 3.6 Sistema de dosificación	80
Figura 3.7 Máquina trituradora de residuos sólidos	85
Figura 3.8 Desgarradora de residuos, etapa 1 del sistema de trituración.....	85
Figura 3.9 Cortadora de residuos, etapa 2 del sistema de trituración.....	85
Figura 3.10 Tanque de almacenamiento API.....	90
Figura 3.11 Detalle del ángulo de compresión para techo.....	91
Figura 3.12 Tanque de almacenamiento de agua caliente, diseño de forma	92
Figura 3.13 Deformación total, tanque de almacenamiento de agua caliente	93

Figura 3.14 Esfuerzo equivalente de von mises, tanque de almacenamiento de agua caliente.....	93
Figura 3.15 Diseño de forma, tanque de pre-tratamiento	95
Figura 3.16 Diseño de forma, tanque de biodigestión.....	97
Figura 3.17 Esfuerzo máximo de von mises, tanque de biodigestión.	99
Figura 3.18 Esfuerzo máximo de von mises corte transversal, tanque de biodigestión.....	99
Figura 3.19 Deformación total, tanque de biodigestión.....	100
Figura 3.20 Deformación total corte transversal, tanque de biodigestión. ..	100
Figura 3.21 Factor de seguridad, tanque de biodigestión.....	101
Figura 3.22 Deformación total, tanque de biodigestión.....	101
Figura 3.23 Componente del gasómetro.....	105
Figura 3.24 Gasómetro de doble membrana	107
Figura 3.25 Transporte de biomasa, sistema dranco.....	109
Figura 3.26 Sistema de bombeo, vista frontal, caso 1 y 2	114
Figura 3.27 Sistema de bombeo, vista superior, caso 1 y 2	114
Figura 3.28 Curva de operación, caso 1	121
Figura 3.29 Curva de operación, caso 2	123
Figura 3.30 Esquema de las capas de aislamiento en tanques.....	125
Figura 3.31 Detalle de las capas de aislamiento de tanques (vista 1)	125
Figura 3.32 Diagrama de sankey, flujo de energía, sistema de digestión DRANCO.	138
Figura 3.33 Diagrama de sankey, flujo de masa, sistema de digestión DRANCO.	138

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Parámetros y condiciones del Sistema de Digestión Anaerobia Termofílica	37
Tabla 2 Concentración de inhibición y de toxicidad de los metales pesados en digestión anaerobia.....	38
Tabla 3 Pronóstico de la Generación de Residuos domésticos y PPC.....	42
Tabla 4 Estimación de la composición de Desecho.....	44
Tabla 5 Datos típicos de densidad y contenido de humedad para FORSU..	49
Tabla 6 Datos típicos análisis químico para FORSU	50
Tabla 7 Datos típicos del análisis elemental de la FORSU	51
Tabla 8 Datos típicos del contenido energético de la FORSU	52
Tabla 9 Fórmulas para la determinación del contenido energético en base seca.	53
Tabla 10 Productividad de Biogás en Plantas de digestión Anaerobia	58
Tabla 11 Parámetros de Comparación de Tecnologías Anaerobias.....	63
Tabla 12 Ponderación de los factores a evaluar en la matriz de decisión	66
Tabla 13 Matriz de decisión	67
Tabla 14 Parámetros de Dimensionamiento del Digestor.....	74
Tabla 15 Datos iniciales para producción de biogás.....	77
Tabla 16 Dimensionamiento de Tanques del Sistema de Dosificación.....	81
Tabla 17 Consideraciones iniciales para la selección de trituradora.....	83
Tabla 18 Características mecánicas de máquina trituradora seleccionada ..	86
Tabla 19 Parámetros de Diseño para Sistema de Dosificación	89
Tabla 20 Esfuerzos de diseño para Sistema de Dosificación, Norma API 650	90

Tabla 21 Características mecánicas de los tanques del sistema de dosificación	94
Tabla 22 Soldadura, Materiales y procesos seleccionados	103
Tabla 23 Estimación de la cantidad de soldadura.....	103
Tabla 24 Requerimientos iniciales para diseño de tornillo sinfín.	109
Tabla 25 Parámetros iniciales para el cálculo de tornillo sinfín.....	110
Tabla 26 Resultados finales, Diseño de tornillo sinfín.....	111
Tabla 27 Características de fluido de trabajo.....	115
Tabla 28 Propiedades de tubería seleccionada, Caso 1 y 2.....	115
Tabla 29 Propiedades de tubería seleccionada Datos para tramos 2, 3, 4.	116
Tabla 30 Condiciones de flujo, Caso 1 y 2.....	117
Tabla 31 Condiciones de flujo, Tramos en el Interior de digestor	117
Tabla 32 Equivalencia del Coeficiente de fricción en tuberías de diferentes flujos	119
Tabla 33 Pérdida de energía en el sistema y potencia de la bomba.....	121
Tabla 34 Datos iniciales para cálculo térmico	126
Tabla 35 Temperatura superficial y Pérdida de energía	128
Tabla 36 Temperaturas internas y pérdida de calor en sistema de transporte de biomasa	131
Tabla 37 Temperaturas internas y pérdidas de calor en tanques del sistema de dosificación	132
Tabla 38 Pérdidas y requerimientos de energía totales en el sistema de digestión	132
Tabla 39 Características del vapor para calentamiento	133
Tabla 40 Propiedades del metano	134
Tabla 41 Comparación del flujo de energía entre sistemas con o sin cogeneración	136
Tabla 42 Listado de materiales requeridos y precios para la construcción de la planta DRANCO, Caso 1	140

Tabla 43 Listado de materiales requeridos y precios para la construcción de la planta DRANCO, Caso 1	141
Tabla 44 Costos iniciales del sistema DRANCO.....	145
Tabla 45 Costos operativos anuales.....	146
Tabla 46 Flujo de Caja.....	147

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Layout de la Planta

INTRODUCCIÓN

A nivel Global, el incremento de la población urbana, el tamaño de las ciudades y el crecimiento económico han desarrollado una sociedad de consumismo, y este progreso continuo ha traído consigo el aumento indiscriminado de los desechos sólidos generados en las ciudades del mundo, trayendo como consecuencia principal el agotamiento de los recursos y disminución del tiempo de vida útil de los diversos botaderos o rellenos sanitarios existentes hoy en día.

Actualmente en el Ecuador existen dos formas de disposición de los desechos sólidos urbanos, entre estos están: rellenos sanitarios, en el caso de los municipios de las grandes ciudades y botaderos de basura, en el caso de municipios de las ciudades pequeñas. Sin embargo esta manera de disposición presenta problemas como: generación y emisiones descontroladas de metano y otros gases de efecto invernadero, generación de altas cantidades de lixiviado, disminución de la capacidad de almacenamiento así como el tiempo de vida útil de los vertederos municipales, entre otros.

Dentro de este contexto, la biodigestión anaerobia se presenta como una solución viable para manejo de los residuos sólidos urbanos, reduciendo la basura orgánica en un gran porcentaje, incluyendo la posibilidad de rehúso de los lodos efluentes del sistema en forma de abono para sembríos. Otra de las ventajas de este sistema, y a diferencia de los rellenos sanitarios, la biodigestión provee de una producción controlada de metano, lo que abre la posibilidad de aprovechar de una manera más eficiente dicho gas para generación eléctrica.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES.

En este capítulo se detalla los objetivos generales y específicos que se deberán seguir en el desarrollo de este proyecto.

1.1 Antecedentes.

Actualmente, los problemas medioambientales se encuentran enfocados en dos aspectos: emisión de gases de efecto invernadero que potencian el cambio climático así como el incremento de la generación de residuos.

En la ciudad de Guayaquil, la generación de residuos ha ido aumentando considerablemente, a partir de los estudios realizados en la década de los 90's, tiempo en que se construyó el Relleno Sanitario "Las Iguanas". Hoy en día, en esta ciudad se generan aproximadamente 7 900 ton por día, es decir, entre 1.2 a 1.5 kg por habitante al día, registrando un

incremento de un 30 a 40% con respecto a lo estimado en la década anterior. De toda esta cantidad de residuos, se estima además que un 50 a 60% está compuesto de desechos de naturaleza orgánica (1).

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son todos los que se originan en la actividad doméstica, comercial e industrial dentro de los perímetros de las ciudades y pueblos. Estos residuos están generalmente compuestos de materia orgánica, papel, cartón, plásticos, vidrio, metales, embalajes de diversos tipos y residuos de jardín. Las características del tipo de residuos dependen del desarrollo de una comunidad, siendo así que, una comunidad más desarrollada genera mayor cantidad de residuos inorgánicos, mientras que una comunidad menos desarrollada genera mucha más carga orgánica que cualquier otro tipo de residuos. Se ha demostrado que la inapropiada gestión de los residuos es un desperdicio de energía y una fuente de problemas ambientales, ocasionando entre otras cosas: malos olores, contaminación de tierras, aguas superficiales y subterráneas, enfermedades, emisión de gases, estos nombrando entre los problemas más comunes e importantes.

Observando la necesidad de sostenibilidad, en el Ecuador se han promulgado diversas normas, que son de alguna manera, instrumentos de regulación y gestión medioambiental, de esta forma se promueve una

gestión sustentable a base de procesos y tecnologías limpias en pro del bienestar común.

Recientemente en el año 2002, se ha contemplado en el Ecuador, la importancia de establecer regulaciones para la gestión de residuos sólidos, año en el cual se estableció un Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS), auspiciado por la OPS y la OMS, sin embargo no ha tenido mayores resultados ya que el 72% de los municipios, aún hoy en día, disponen sus desechos a cielo abierto, y los municipios restantes poseen lugar de disposición final parcialmente controlados. Cabe recalcar que el manejo de estos residuos es de competencia directa de cada municipio, responsabilizándolos de preservar la salud, el medioambiente y la calidad de vida de sus ciudadanos.

Dentro del marco legal propuesto por el Gobierno Nacional se proponen acciones de seguimiento de la gestión de residuos. El Ministerio del Ambiente es el organismo que emprende y vela por cumplimiento de dichas acciones, las mismas que se han basado en los artículos 46 y 125 del Libro VI referente a Calidad Ambiental, estipulados en el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), en conjunto con acciones actuales, basadas en políticas ambientales nacionales que el Ministerio del Ambiente emitió en el año 2009

relacionadas con el manejo de desechos. Cabe recalcar que el manejo de desechos propuesto no toma en cuenta el hecho que se debe prevenir la producción de residuos, como principal problema, para después dar paso a campañas que sirvan para promover la reducción, la utilización, el reciclaje, entre otros tipos de valorización.

En base a estas acciones, el Gobierno tiene como objetivo mejorar de manera integral y sostenible el manejo de los desechos a través de su disposición en rellenos sanitarios o en su defecto el aprovechamiento de los mismos a través de diversas tecnologías.

Es en este punto en donde aparece una bifurcación, en donde se muestran dos caminos interesantes para la gestión de residuos sólidos, el primero es la disposición final en rellenos sanitarios controlados y por otro lado el aprovechamiento energético de los residuos.

En la disposición en vertederos, un problema principal que los Gobiernos Autónomos de ciudades pequeñas han identificado, es la gran demanda de espacio requerido para su construcción y los problemas ambientales que estos pueden ocasionar, en la segunda opción en cambio, se requiere de una mayor inversión inicial y aunque los resultados finales fueran buenos, estos métodos no se consideran tan atractivos debido al desconocimiento y dificultad de control de los procesos que se llevan a cabo.

Una de las tecnologías alternativas que está empezando a sobresalir en el ámbito nacional se encuentra la digestión anaerobia, en donde se aprovecha el potencial energético a partir de la biodegradación de la biomasa con el objetivo de generar energía, reducir contaminación y disminuir el volumen de residuos. Así, la digestión anaerobia seca se considera actualmente como la opción más importante y comercial para los residuos de alto contenido de sólidos.

En el Ecuador, la idea del manejo controlado de residuos se encuentra en desarrollo, y más aún, el uso de esta tecnología se encuentra en estudios preliminares, pero que ofrece grandes ventajas en cuanto al tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.

1.2 Objetivos Generales y Específicos

Objetivo General.

Analizar la viabilidad de implantar una planta de generación de biogás proveniente de la digestión anaerobia seca en rango termofílico para el tratamiento de 100 t/d de residuos sólidos urbanos.

Objetivos específicos.

1. Identificación y selección de las variables de proceso que inciden en el sistema.

2. Determinación de los elementos y procesos requeridos para el sistema.
3. Diseño, selección y modelado de los mecanismos y elementos del sistema.
4. Determinación de la cantidad neta de energía producida
5. Determinación de la viabilidad del sistema e identificación de los puntos críticos operativos y socio-económicos. Identificación de los posibles problemas que se pueden presentar en la ejecución del proyecto.

1.3 Alcances.

- Definición de la producción per-cápita, identificación y caracterización de los residuos sólidos.
- Definición de las condiciones y características de la digestión anaerobia termofílica de la FORSU.
- Identificación y selección de las variables de proceso que inciden en el sistema.
- Determinación de los elementos y procesos requeridos para el sistema.
- Dimensionamiento de la planta para el manejo de 100 t/d de residuos,

- Diseño de los mecanismos y elementos del sistema.
- Modelado de las estructuras requeridas.
- Determinación de la viabilidad del sistema e identificación de los puntos críticos operativos y socio-económicos. Identificación de los posibles problemas que se pueden presentar en la ejecución del proyecto.

1.4 Justificación

Este proyecto tiene varias implicaciones sociales, económicas y ambientales.

Entre las implicaciones sociales se encuentran: la separación en la fuente y el reciclaje de la parte inorgánica de los residuos, esto ayudaría a la disminución de la producción de basura. Aunque no es parte del estudio, se insinúa que es un punto importante para el desarrollo de tecnologías más eficientes para el manejo y disposición final de los residuos.

Entre las implicaciones económicas se puede destacar el balance positivo de energía que se genera durante el proceso. Esta representa una ventaja significativa con respecto a otros sistemas ya que la producción y venta de energía neta producida ayuda a la

reducción del costo de tratamiento de la biomasa residual a la vez que alimenta el consumo requerido por la planta.

Entre las implicaciones ambientales se destaca la disminución de emisión de gases de efecto invernadero, en este caso del metano emitido en rellenos sanitarios, en su defecto, esta tecnología usa el biogás para aprovechamiento energético, emitiendo CO₂ y otros gases menos dañinos. El uso de esta tecnología para la producción de electricidad permitiría además desplazar plantas termoeléctricas y por ende disminuir el consumo de combustibles fósiles.

Por último, este proyecto es un desafío de ingeniería, ya que abarca diversas especialidades. En el caso del estudio de ingeniería mecánica, se aplican todos los conceptos enseñados en diversas áreas de la carrera. De esta forma, este estudio demuestra la importancia y la utilidad de la aplicación de los conocimientos impartidos en el desarrollo investigativo y profesional de los estudiantes.

1.5 Estructura del Estudio

En el capítulo 1 se indican las generalidades del estudio, esto incluye: antecedentes, objetivos, alcances y la justificación del estudio.

En el capítulo 2 se describe el proceso de tratamiento de los residuos sólidos en el Ecuador, identificación de las características de los residuos y se especifican las variables principales del proceso de digestión anaerobia termofílica. Los puntos principales que se analizan son: producción per-cápita, porcentaje de residuos biodegradables, características del proceso, condiciones del crecimiento bacteriano, variables que rigen la digestión anaerobia (ph en las etapas de proceso, relación C/N requerido, humedad inicial y requerida, tiempo de residencia, densidad, temperatura inicial y requerida, poder calorífico, viscosidad, calor específico, producción de biogás, entre otros. Luego se selecciona la tecnología más apropiada de digestión anaerobia en rango termofílico.

El capítulo 3 corresponde al dimensionamiento y diseño preliminar de la planta de digestión anaerobia. Se fija una cantidad base de 100 t/d de residuos, determinando: dimensiones generales del digestor y sistemas auxiliares, producción de biogás, masa afluente y efluente del sistema y cantidad de insumos requeridos; una vez obtenidos estos datos, se realiza el diseño y selección de los elementos como: trituración, sistema de dosificación, digestor anaerobio y mecanismo de movilización de la biomasa en donde se

identificará materiales a utilizar, volúmenes y tipo de soldadura según la norma API 650.

En la siguiente sección se analiza la parte hídrica del sistema en donde se seleccionarán: tuberías (materiales, tipos, etc), caudales, presiones de operación, las cargas del sistema, finalmente se selecciona el tipo de bomba a utilizar en el cada uno de los casos.

Luego se realiza un análisis térmico en donde se determina: espesores y tipo de aislante térmico, evaluación energética y un balance de energía por medio del diagrama de sankey. Al final de este capítulo se establece el presupuesto de obra.

En el capítulo 4 se procede el análisis de costos del sistema en donde se determina los valores totales y la viabilidad económica del proyecto a través del precio por tonelada de residuos.

En el capítulo 5 se efectúa un análisis general de resultados, en donde se ubica una tabla resumen con los principales datos obtenidos en los capítulos anteriores, se exponen las limitaciones del proyecto y se evalúa brevemente el caso de la ciudad de Guayaquil.

En el capítulo 6 se exponen conclusiones y recomendaciones en base al análisis teórico realizado en el presente informe.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Generalidades del tratamiento de los desechos sólidos urbanos

Definición de los desechos sólidos

Los desechos sólidos son todos aquellos elementos o compuestos que han dejado de ser útiles para las actividades del ser humano. Estos compuestos se pueden dividir en fracción orgánica y fracción inorgánica. (2)

La fracción orgánica de los residuos comprende restos alimenticios, papel, cartón, plásticos, textiles, cauchos y cuero; mientras que la fracción inorgánica comprende vidrio, hojalatas, aluminio entre otros metales.(3)

Elementos funcionales de la gestión de los desechos sólidos

El sistema de gestión de desechos sólidos está formado por un conjunto de actividades que se encuentran divididos en 6 etapas que son: generación de los residuos; manipulación, procesamiento y almacenamiento en la fuente; colección de residuos; transferencia y transporte; procesamiento y transformación; disposición final; al conjunto de estas actividades se las conoce como elementos funcionales de la gestión de los residuos (3). Estas actividades se describen a continuación.

La etapa de generación de residuos básicamente se analiza quien, como, cuanto y el tipo de basura que se genera.

La segunda etapa es el almacenamiento, separación y procesamiento de los de los residuos en la fuente de generación, en esta actividad se analiza principalmente el lugar destinado para el almacenamiento temporal de los residuos, si se realiza separación de los desechos, la forma de almacenamiento y por último el tipo de procesamiento primario que se efectúa. Esta actividad es realizada a pequeña escala por la persona que genera los desechos.

El siguiente paso es la recolección de los desechos, en donde se analizan los costos, la frecuencia y la forma de la recolección, además de la capacidad de los vehículos colectores al igual que la

institución contratada para la colección. La responsabilidad recae generalmente en las autoridades municipales.

El cuarto paso es el procesamiento y la transformación de los desechos. El procesamiento incluye: separación, cuantificación y recuperación del material utilizable o transformable. Luego se procede a la transformación de los residuos, en donde se analiza la cantidad, el tipo de proceso y los residuos provenientes de la transformación. En este punto se incluye además el lugar, el tipo de instalación necesaria, recursos económicos, demanda energética y el talento humano requerido.

El quinto paso a la transferencia y transporte de los desechos al lugar de disposición final. Este paso es opcional ya que la transformación puede estar ubicada en el mismo sitio de la disposición final.

El último paso corresponde a la disposición final de los desechos sólidos, en donde se define el lugar de destino final del desecho, el costo de la actividad, la tecnología y se analizan todos los posibles impactos ambientales que se pueden producir en el sitio.

Gestión de los desechos sólidos en el Ecuador.

Como se indicó en la sección anterior, la gestión de los residuos se encuentra a cargo de los gobiernos municipales, quienes deben

prestar los servicios de recolección y tratamiento de los desechos sólidos. Estas mismas entidades son las encargadas de desarrollar los programas de reducción, reciclaje y tratamiento de los estos residuos. Esto se dispone en la constitución actual, en los artículos 264 y 415 (4). Estas actividades están reguladas por el Ministerio de Ambiente, quien a través de la Ley de Gestión Ambiental controla el cumplimiento de las normas de calidad referentes a los desechos.

Las políticas nacionales para el manejo sustentable de los residuos se encuentran especificadas en el TULAS, Título II del Libro VI (5).

Por último, la gestión de los residuos está sujeta a las ordenanzas municipales de cada uno de los gobiernos seccionales.

En síntesis, la gestión de los residuos en el Ecuador está sujeta al cumplimiento de la ley ambiental, del TULAS y la ordenanza municipal.

En el Ecuador el esquema de la gestión de residuos se muestra en la figura 2.1.



FIGURA 2.1 ETAPAS DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS EN EL ECUADOR

Fuente:(6), Elaboración propia



FIGURA 2.2 ESQUEMA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL ECUADOR

Fuente: Elaboración propia

La generación de residuos es una etapa que se lleva a cabo dentro de los hogares. La pre-recogida incluyen las actividades del procesamiento en el origen hasta el punto de recogida. Ambas actividades son realizadas por el generador de los residuos.

Luego se procede a la recolección y transporte de los residuos, en donde los residuos son llevados a la disposición final. Por último se disponen dichos residuos en rellenos sanitarios, o vertederos al aire libre. Estas actividades son realizadas por las autoridades competentes.

A todo esto, en el Ecuador son muy pocos los residuos que son aprovechados, y son generalmente del tipo agrícola, como excrementos de animales, residuos agroindustriales y agroforestales a través de varios métodos como incineración, gasificación, digestión anaerobia en pequeña escala (granjas), biocombustible, etanol, biodiesel, entre otros.

Actualmente el Gobierno Nacional se encuentra impulsando la investigación en el aprovechamiento a gran escala de los residuos como una alternativa sustentable para producción de energía, generando ingresos a la vez que se promueve el cuidado del medio ambiente.

2.2 Definición del problema

El incremento de los residuos y el uso rellenos sanitarios y botaderos de basura como forma de disposición final de los residuos, se han convertido en un problema tanto ambiental como socio-económico para los municipios y la población en general. Uno de los inconvenientes más sobresalientes es el espacio requerido para un relleno sanitario, la contaminación por generación y emisión de biogás y la cantidad enorme de lixiviados que causan grandes daños al medio ambiente y a las personas que viven colindantes con dichos lugares. Entre los problemas ambientales más reconocidos se encuentran las emisiones atmosféricas de gases y polvos, así como infiltraciones contaminantes a cuerpos de aguas superficiales y sub-superficiales.

En base a lo anterior, el problema nace de la necesidad de dar un nuevo enfoque al modelo actual de gestión de residuos sólidos a través de la transformación eficiente y sustentable de su fracción orgánica, a la vez que se induce la separación y reciclaje de su fracción inorgánica.

En el este proyecto se presenta una forma de aprovechamiento de dichos residuos por medio de la digestión anaerobia. Este análisis se centra básicamente en encontrar la aplicabilidad de las nuevas

tecnologías para la transformación y el aprovechamiento de los residuos en nuestro medio.

Este análisis permitirá dar una idea sobre las ventajas, desventajas y complejidades del sistema, al mismo tiempo que permitirá establecer la posibilidad de sustituir el uso de rellenos sanitarios y botaderos de basura por un sistema de mayores beneficios.

2.3 Definición, descripción y características de la digestión anaerobia

Definición

La digestión anaerobia es un proceso biológico de fermentación catalizada (7) por bacterias específicas que transforman la biomasa degradando moléculas complejas en moléculas más simples de alta densidad energética en ausencia de oxígeno (2).

En este proceso, la materia orgánica se transforma en una mezcla de biomasa (lodo o fango) y biogás, el mismo que está compuesto de varios gases, entre los que principalmente se encuentran el dióxido de carbono y el metano.

El metano se encuentra en una concentración igual o superior al 60% del biogás y posee una calorífica de 5 500 Kcal/m³ (7). Debido a la energía contenida en el metano, el biogás posee un valor

económico significativo ya que puede ser aprovechado en usos energéticos (8).

Los microorganismos que actúan en estos procesos bioquímicos que se producen la descomposición de la biomasa, pueden estar ya contenidos en la biomasa o pueden ser añadidos durante el proceso. (2)

Mediante la digestión anaerobia pueden tratarse varios tipos de biomasa tales como (7):

- Residuos agrícolas y ganaderos
- Fangos de depuradoras biológicas
- Residuos orgánicos industriales
- Aguas residuales municipales e industriales
- Fracción orgánica de residuos sólidos (FORSU).

Descripción

La digestión anaerobia es un proceso que convierte totalmente las moléculas compuestas de la materia orgánica en moléculas más simples con altas cantidades de energía. Este proceso se lleva a cabo a través de diversos grupos bacterianos que reaccionan biológicamente entre sí (8). Estas reacciones se llevan a cabo tanto en serie como en paralelo, lo que ocasiona que este sistema sea difícil de controlar. (9)

En la digestión anaerobia se distinguen cinco grupos bacterianos diferentes que actúan catalizando dos procesos que son: formación de ácidos y formación de metano (7). En este punto se distinguen cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Estas etapas tienen características físicas, químicas y biológicas diferentes e intrínsecas de cada proceso y por tanto, pueden diferenciarse. (9)

En las 4 etapas mencionadas, se distinguen dos tipos de bacterias: bacterias productoras de ácidos (acetogénicas) y las bacterias productoras de metano (metanogénicas). En el primer grupo intervienen cuatro tipos de poblaciones bacterianas que son: bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y homo-acetogénicas, mientras que en el segundo grupo intervienen las bacterias metanogénicas-hidrogenófilas y las bacterias metanogénicas-acetoclásticas (7). El proceso se inicia a partir de la coordinación de los grupos bacterianos mencionados y se describe detalladamente en la figura 2.3.

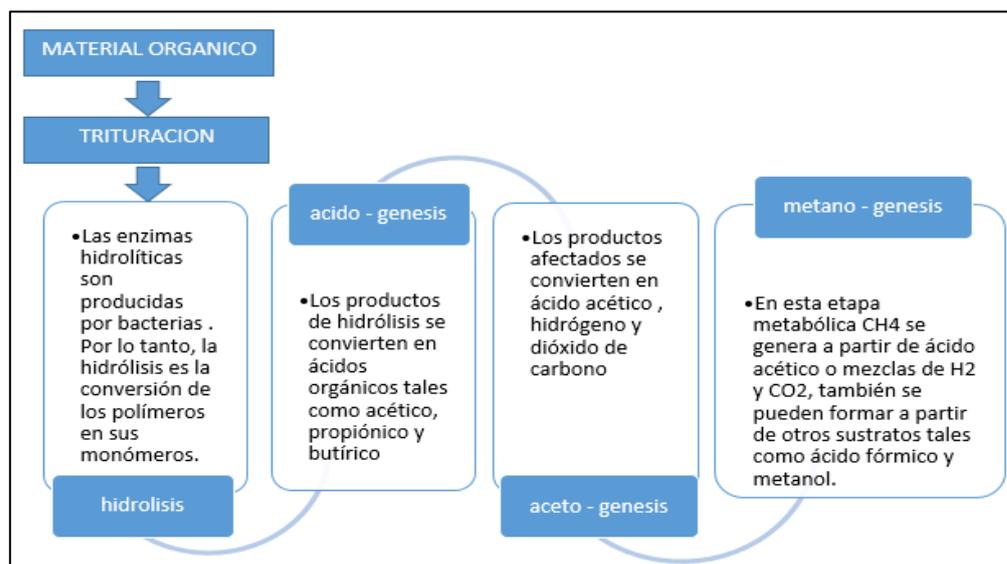


FIGURA 2.3 ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Fuente:(10), Elaboración Propia

En la figura 2.3 se muestra inicialmente el material orgánico se desintegra en moléculas más simples por medio de la trituración. Después de este paso inicial, se procede a las 4 etapas que son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis; las características de estas etapas se describen a continuación.

Hidrólisis

En esta etapa los compuestos orgánicos complejos son despolimerizados por la acción de enzimas hidrolíticas en moléculas solubles y degradables. Es un proceso enzimático extracelular (7).

Sus características son:

- Proporciona sustratos orgánicos para el proceso
- Los microorganismos hidrolíticos produce enzimas extracelulares claves para esta etapa.
- Esta etapa es limitante de la velocidad global del proceso.
- Depende de la temperatura, tiempo de retención hidráulico, composición bioquímica, tamaño de partículas, ph, concentración de iones amonios.
- Las bacterias en esta etapa son anaerobias facultativas, tienen un crecimiento poblacional alto.

Etapa acidogénica

Los compuestos solubles se transforman en AGV de cadena corta como el ácido acético, propiónico, entre otras (7). Sus características son:

- Fermentación de las moléculas orgánicas solubles y se compone de bacterias anaeróbicas formadoras de ácidos.
- Forman un compuesto orgánico que es usado directamente como alimento para las bacterias metanogénicas.
- Eliminan las trazas de oxígeno disuelto en el sistema.
- Las bacterias en esta etapa son facultativas, tienen un crecimiento poblacional alto.

Etapa acetogénica

Los compuestos intermedios son transformados en compuestos más simples por las bacterias acetogénicas (7). Sus características son:

- Pueden existir dos tipos de bacterias, las acetogénicas, y otras más especiales, llamadas homoacetogénicas.
- Los productos de la fermentación anterior que no son metabolizados por los organismos metanogénicos, deben ser transformados en productos sencillos por las bacterias acetogénicas.
- Las bacterias consumen hidrógeno como sustrato.
- Los productos finales de esta etapa son ácidos volátiles sencillos, que serán usados en la siguiente etapa.

Etapa Metanogénica

Es la etapa final del proceso en donde compuestos como el ácido acético son degradados por las bacterias metanogénicas acetoclásticas, mientras que el hidrógeno es degradado por las bacterias metanogénicas hidrogenófilas, transformándose en metano y dióxido de carbono.(7) Sus características son:

- Producen metano y eliminan todos los productos anteriores.(9)
- El CO₂ es una fuente de metano por medio de una reducción con hidrogeno. El 30% del metano proviene de este compuesto, mientras que el 70% proviene del ácido acético, producido por las bacterias metanogénicas acetoclásticas.(7)
- Las bacterias metanogénicas son estrictamente anaerobias.(8)
- La producción de metano está condicionada por la cantidad de bacterias metanogénicas.
- Las bacterias en esta etapa son estrictas, con una tasa de crecimiento 5 veces menor a las acidogénicas. Son muy sensibles a perturbaciones en el sistema.(7)

Frente a la diversidad de bacterias necesarias para el proceso, se puede concluir preliminarmente lo siguiente:

- La naturaleza y la composición del sustrato condicionan la composición cualitativa de la población bacteriana de cada etapa. En base a esto, se considera que el equilibrio es alterable en la presencia de tóxicos que inhiban el desarrollo de alguna de las poblaciones.

- Debido a todas las reacciones que se involucran en el proceso, el manejo de este sistema se puede considerar complicado e inestable.

En los países desarrollados se han realizado proyectos dirigidos a la aplicación de la digestión anaerobia a gran escala, dirigidos principalmente al tratamiento de los residuos sólidos municipales. La clave de los avances de esta tecnología es el conocimiento de la microbiología, cinética y bioquímica del proceso así como en aspectos relacionados con el aprovechamiento energético.

Las características del proceso son:

- La digestión anaerobia permite el tratamiento de la parte orgánica de los residuos provenientes de diferentes fuentes, especialmente la biomasa que posee alto contenido de humedad. (2)
- El proceso anaerobio requiere de una etapa inicial de puesta en marcha hasta conseguir equilibrio estable entre poblaciones bacterianas (7). Por su complejidad, esta etapa puede durar desde unas pocas semanas hasta varios meses (11).

- Los efluentes resultantes de este proceso son: biogás y lodo. El lodo se produce en pequeñas cantidades y es de consistencia pastosa con poca concentración de sólidos volátiles u orgánicos similar al compost producido en el proceso aeróbico. Este residuo es inerte, posee nutrientes y puede ser usado para la agricultura como abono. (8)
- Todo proceso de digestión anaerobia lleva parejo una eliminación/depuración de la carga orgánica. (7)
- Este proceso es capaz de depurar la materia eliminando o inactivando virus, bacterias, parásitos, organismos patógenos, ácidos volátiles; y contribuye además a la disminución de la relación de alcalinidad. Esta depuración dependerá de la temperatura en la que se realice el proceso. (8)
- Durante el proceso se desarrollan varias reacciones con rutas y mecanismos que no se conocen detalladamente. Estas reacciones pueden ser catalizadas por enzimas que se encuentran en desechos con alta carga orgánica.
- El sistema requiere de consumo energético (calor) dependiendo de la temperatura a la que se mantenga el sistema.

- Los procesos anaerobios generalmente se usan como estabilizadores de los sólidos resultantes de los procesos de aeróbicos de aguas residuales con altas cargas orgánicas.(8)

Los factores que controlan la digestión son: temperatura, tiempo de retención hidráulica, pH, composición, degradabilidad, tamaño de partícula y toxicidad de los desechos. Estos factores se describen a continuación.

El ph es un parámetro que varía con respecto a cada etapa de la digestión, sus valores son un indicativo claro del equilibrio y vitalidad de las bacterias necesarias para la biometanización. Cabe recalcar que el proceso es capaz de regular las diferencias que puedan existir en el ph del material de entrada.

La temperatura del sustrato determina la cantidad y el tiempo de producción de metano en el sistema. Para el proceso de digestión anaerobia el sustrato debe tener una temperatura inicial mínima de 4 a 5 °C y máxima de 70°C. Dentro de este rango, la digestión se divide en psicrófila (5 a 20 °C), mesófila (20 a 40 °C) y termófila (50 a 70 °C) (9) en otras palabras, mientras mayor sea la temperatura, mayor es la velocidad de crecimiento bacteriano. Esto se muestra en la figura 2.4.

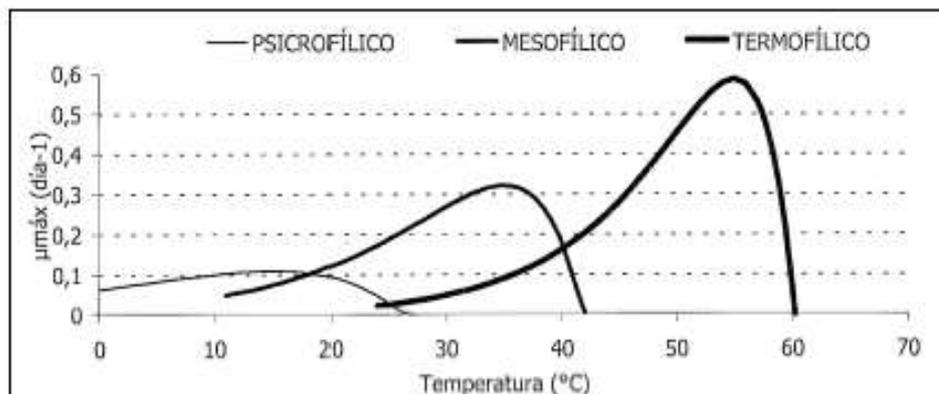


FIGURA 2.4 CRECIMIENTO BACTERIANO VS TEMPERATURA DE OPERACIÓN.

Fuente: (8)

La digestión anaerobia de alta carga orgánica se realiza en los rangos termofílico y mesofílico.

2.4 Definición y características de condición de rango termofílico

La digestión anaerobia termofílica se define específicamente por la temperatura a la que se opera el sistema. Esta temperatura se encuentra en un rango de entre 50°C y 70°C (8) como se observó en la figura 2.3. Algunos autores indican que a mayores temperaturas y en ausencia de inhibidores o sustancias tóxicas, puede producir mayores cantidades de biogás y por ende metano, que a temperaturas menores. La generación controlada de este gas

en biodigestores permite destinarlo a usos energéticos ya que se asegura el suministro.

Para mantener la temperatura termofílica se requiere de un aporte considerable de energía, es por esta razón que la mayoría de los tratamientos de residuos de alta carga orgánica se realizan en el rango mesofílico ya que requiere menores temperaturas para su operación. A pesar de esto, el rango termofílico presenta mayores ventajas frente al otro proceso.

Las características de la digestión anaerobia termofílica son:

- La velocidad de degradación mayor con respecto a la digestión en rangos mesofílico y psicofísicos. Esto posibilita el uso de reactores más pequeños o tiempos de retención más cortos. (8)
- Posee mayor eficacia en la reducción de la materia orgánica y destrucción de patógenos. (8)
- Se puede trabajar con altas velocidades de carga de residuos, lo que hace factible el uso de este tipo de sistemas para grandes cantidades de residuos.(9)
- Posee mayor producción de metano para la operación a igualdad de las restantes variables de operación. (2)

- La destrucción de virus y patógenos es superior en el rango termofílico, lo que ayuda a mejorar la calidad del efluente del sistema. Esto permite su uso en aplicaciones agrícolas como fertilizantes o mejoradores de suelos. (8)
- Genera cantidades inferiores de fangos que el proceso mesofílico.(8)
- La temperatura disminuye la viscosidad del sistema. En base a esta premisa, el rango termofílico favorece a una mayor disgregación de las partículas y disminuye la solubilidad de los gases (metano contenido en los líquidos) favoreciendo la cinética del sistema. (8)
- Reduce la formación de espumas. (8)
- Incrementa los niveles de AGV. Cabe recalcar que no solo la temperatura puede ocasionar esto, sino además la configuración del reactor, estrategia de arranque y la operación.(9)
- Requerimiento energético mayor con respecto a los demás rangos. Sin embargo el flujo neto de energía es mayor.
- Posee una alta sensibilidad a los cambios ambientales. (9)

2.5 Condiciones generales de la digestión anaerobia termofílica

El seguimiento de la digestión se realiza por medio de la medición de los diversos parámetros del proceso anaerobio. El control de estas variables facilita y promueve la acción de las bacterias termófilas que son claves para la biometanización de los residuos. A continuación se describen los parámetros más importantes y los rangos permitidos para el correcto funcionamiento de la digestión anaerobia en rango termofílico.

Temperatura.- La temperatura inicial del proceso termofílico debe ser mayor a 40°C siendo óptimo 55°C, y la temperatura final máxima de 70°C, siendo óptimo 65°C (8). La sensibilidad del sistema es de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ (9). Se debe indicar además que las bacterias termófilas pueden vivir en condiciones mesófilas. La importancia del control de la temperatura permite un ambiente adecuado para el correcto desarrollo de las bacterias.(9) Las ventajas de trabajar en un rango de temperaturas alto es la destrucción de patógenos, eliminación de larvas y huevos de insectos, lo que aporta higienización del sustrato.

Alcalinidad y pH.- La alcalinidad del proceso ayuda a controlar la generación excesiva de AGV y por ende, facilita la eliminación de

los mismos a través de las bacterias metanogénicas. Los equipos deben estar diseñados para operar con elevada alcalinidad para que tengan la capacidad de resistir los cambios repentinos del pH. Cada etapa de la digestión posee un pH distinto, esto es, para etapa hidrolítica el Ph está entre 7.2 y 7.4; en la etapa acetogénica entre 7. Y 7.2 y metanogénica entre 6.5 y 7.5. En base al control de este parámetro con agentes externos (aditivos), se puede regular el pH del sistema, dependiendo del tipo de residuos a tratar (7). Los valores óptimos de alcalinidad deben ser superiores a 3000 mg/l. Para esto, en este punto se puede considerar la adición extra de reactivos como factor de seguridad para evitar reducciones de pH, el cual debe estar siempre por encima de 6.5. (9)

Potencial redox.- Este valor debe ser bajo para asegurar el desarrollo de las poblaciones metanogénicas. En este caso, las bacterias requieren potenciales de óxido-reducción menores a -300 mV.

Nutrientes.- Los nutrientes favorecen el crecimiento de las poblaciones bacterianas. Estos nutrientes dependen del sustrato y de su procedencia. Para el funcionamiento de la digestión anaerobia, no es necesario tener altas concentraciones de

nutrientes, ya que perjudica la asimilación por parte de las bacterias.(9)

Los nutrientes que se pueden añadir al proceso son: potasio (k), calcio (Ca), zinc (Zn), hierro (Fe) y magnesio (Mg). El azufre es otro nutriente sin embargo este normalmente no se añade ya que la mayor parte de las biomasas lo contienen en cantidades adecuadas.(9)

Los parámetros que se deben tomar en cuenta para el conocimiento de cantidades adecuadas de nutrientes son: relación de C/N (carbono/nitrógeno), relación C/P (Carbono/fósforo). Se resalta que la FORSU no presenta problemas por falta de nutrientes. (7)

Contenido de sólidos.- La cantidad de sólidos implica a su vez la cantidad de alimento que tienen las bacterias para vivir. La falta o el exceso de sólidos pueden inhibir el crecimiento bacteriano a la vez que disminuye la eficiencia y la producción de biogás. Este parámetro determina además el tamaño del digestor y el tiempo de duración del proceso (9). En el caso más extremo es la digestión termofílica seca, en donde se puede tener una concentración de hasta un 35%(9).

Además, dependiendo de este parámetro se pueden seleccionar dos vías de digestión anaerobia que son: vía húmeda y vía seca. .

Las tecnologías para la digestión en vía húmeda o bajo contenido de sólidos se usa generalmente en rango mesofílico y si la digestión se realiza por vía seca, se trabaja en rango termofílico (12).

Tiempo de retención.- Esta relacionado con el tipo de sustrato y la temperatura de operación del sistema y define como la relación entre el volumen del digestor y la carga diaria de residuos.(9)

Velocidad de Carga.-es básicamente la velocidad de carga orgánica sobre la cantidad de biomasa. Este valor debe mantenerse debajo de 0.1 KgDQO/KgSVS/d (9).

Tamaño de partícula.- Esta propiedad implica el tamaño del residuo que ingresa al biodigestor. Es importante ya que de esto depende la velocidad de procesamiento, principalmente en la etapa de hidrólisis, la misma que es considerada como la fase limitante de este proceso y cuya velocidad depende de la superficie de las partículas (13). Para aumentar la velocidad se debe realizar un pre-tratamiento para disminuir el tamaño de las partículas. En el proceso anaerobio en el rango termofílico se usa un tamaño de entre 40 y 60 mm. (14)

Tipo de crecimiento celular.- Existen dos tipos de crecimiento: disperso o suspendido que se caracterizan por ser gránulos que se mantienen suspendidos en el reactor y soporte o adherido que se caracterizan por bacterias que se adhieren a un soporte inerte para favorecer su desarrollo (12).

Un resumen de los principales parámetros y sus valores máximos permisibles se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1 PARÁMETROS Y CONDICIONES DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TERMOFÍLICA

Parámetros y condiciones del Sistema de Digestión Anaerobia Termofílica		
Parámetros	Rango permisible	Recomendado
Temperatura (°C)	50 a 70	55 a 60
Ph	6.6 a 7.6	6.8 a 7.2
Ácidos volátiles (mg/l)	50 a 150	75
Alcalinidad (mg/l)	≥1500	2500 a 4000
Relación C/N	15/1-45/1	30/1
Relación C/P	150/1	--
Potencial de óxido-reducción (mV)	-500	--
sólidos totales y volátiles	4-10% (h) y 30-35% (s)	
CH₄	50-70% (h) y 55% (s)	60%
Tiempo de retención (días)	20 (h) y 16-20 (s)	
Producción de biogás (m³biogás/m³ de reactor)	1.5-2.5 (h) y 5 a 8 (s)	--
Ácidos volátiles (ppm)	3600≥	--

Fuente: (9)

En cuanto a la demanda bioquímica de oxígeno (DQO), en el proceso anaerobio se puede considerar un parámetro conservativo, esto es que la suma del DQO a la entrada debe ser igual al DQO de los efluentes.(7)

Los inhibidores dentro del proceso son: metales pesados, antibióticos, detergentes, disolventes y pesticidas; estos se pueden encontrar en los RSU, sin embargo se puede controlar sus concentraciones. (9)

Las desviaciones o grandes fluctuaciones de los parámetros normales rompen el equilibrio entre las bacterias y pueden inhibir el proceso.

En la tabla 2 se muestra las concentraciones de inhibición y de toxicidad de los metales pesados en digestión anaerobia.(7)

TABLA 2 CONCENTRACIÓN DE INHIBICIÓN Y DE TOXICIDAD DE LOS METALES PESADOS EN DIGESTIÓN ANAEROBIA

Metal	Concentración de inhibición (mg/l)	Límite de toxicidad (mg/l)
Cr	110	260
Cu	40	70
Ni	10	30
Zn	400	600

Fuente: (7)

Por otro lado, los ácidos volátiles también son inhibidores de la digestión cuando se encuentran en cantidades mayores de 3600 ppm en el rango termofílico. Un caso más grave se presenta cuando la concentración de sales minerales, oxígeno disuelto, nitrógeno y amoníaco es alta, aunque estos valores no estén definidos claramente, estos elementos destruyen a las bacterias metanogénicas. (9)

La climatización de las bacterias definen también las concentraciones críticas de estos inhibidores. (7)

2.6 Identificación de los desechos sólidos generados en la ciudad de Guayaquil

En este punto se establecerá la cantidad y el tipo de residuos producidos en la ciudad de Guayaquil. Esta información será clave para el dimensionamiento del sistema de digestión anaerobia.

Estimación presente y futura de la Cantidad de residuos producidos en la ciudad de Guayaquil

Una forma de establecer una cantidad cercana a la realidad de basura producida es determinar la tasa de generación de residuos por unidad, en kg/hab*día, que corresponde a la producción per cápita (PPC) que se indica en la siguiente expresión;

$$PPC = \frac{\text{peso total de desechos}}{\text{No. de habitantes}}$$

Existen 3 estudios que han realizado una proyección de residuos producidos en la ciudad de Guayaquil. Los resultados de dicha investigación se indican a continuación:

El impacto ambiental (EIA) realizado en el año 2007, en la ciudad de Guayaquil a la fecha se producen aproximadamente 1 119 288 toneladas por año de basura con un crecimiento anual del 2.4%. De esta cantidad, el 91% representa el desecho doméstico municipal y el 9% desecho inerte.(1) La cantidad presentada en este informe es obtenida en base a proyecciones del RSLI y no toma en cuenta la PPC.

El segundo estudio realizado por la consultora toma en cuenta la PPC y su proyección indica un valor de 1.14 Kg/día*hab para la zona urbana mientras que para la zona rural indica 0.69 Kg/día*hab para el año 2010 (15). Se desestima este estudio debido a que fue realizado en el 2001 y con datos proyectados del INEC para ese año y años posteriores que no corresponden a los valores actuales de población.

El tercer estudio realizado conducido por CIPAT-ESPOL considera las proyecciones del INEC hasta el 2020 y los datos de las

toneladas ingresadas al relleno sanitario hasta el 2013, En base a esto, se realizó una proyección 2014-2020, para el cálculo del PPC. En la tabla 3 se indica que para el año 2010 la producción per cápita de desechos, que fue de 1.31 Kg/hab*día y para el 2020, Guayaquil, producirá por persona al día alrededor de 1.66 Kg de desechos. Además se determina que solamente el 93.2% de la población guayaquileña disponen sus desechos por el carro recolector, aumentando de esta manera el PPC diario a 1.50 Kg para el 2010 y 1.84 Kg para el 2020. (16)

Contrarrestando los valores obtenidos en el EIA y el estudio realizado por CIPAT, se puede observar que la producción actual de basura es mucho más alta que la pronosticada en años anteriores. Esto se muestra en la tabla 3.

TABLA 3 PRONÓSTICO DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS DOMÉSTICOS Y PPC¹.

Año	Proyección INEC (hab)	Pronóstico CIPAT		Pronóstico EIA	
		Peso ingresado RSLI (t)	PPC (Kg/día*hab)	Peso ingresado RSLI (t)	PPC (Kg/día*hab)
2010	2440553	1166690	1,31	942410	1,06
2011	2471180	1273052	1,41	975395	1,08
2012	2501423	1331472	1,46	1009533	1,11
2013	2531223	1386908	1,5	1044867	1,13
2014	2560505	1373677	1,47	1081437	1,16
2015	2589229	1419850	1,5	1119288	1,18
2016	2617349	1466067	1,53	1158463	1,21
2017	2644891	1512330	1,57	1199009	1,24
2018	2671801	1558639	1,59	1240974	1,27
2019	2698077	1604992	1,63	1284408	1,30
2020	2723665	1651390	1,66	1329363	1,34

Fuente:(1) (16)

El Relleno Sanitario Las Iguanas posee 4 sectores destinados para el almacenamiento de la basura, estos sectores son: A, B, C, D. En el sector B se ingresan los desechos inertes que corresponden a residuos de edificaciones, mientras que en los sectores restantes se ingresan los residuos domésticos.

Actualmente solo se encuentra en funcionamiento el sector D del Relleno Sanitario, ya que los sectores A, B y C se encuentran

¹ En la tabla no se muestran los residuos inertes que se ingresaron en el sector B del RSLI, solo muestra residuos domésticos

totalmente saturados con una cantidad de 6 200 000 ton y 1 700 000 ton respectivamente. (1)

Los residuos sólidos se clasifican en fracción orgánica y fracción inorgánica. La fracción orgánica comprende los residuos de comida, papel, cartón, plásticos, textiles, goma, cuero, madera y residuos de jardín; la fracción inorgánica comprende vidrios, cerámica, latas, aluminio, metales, férreos y suciedad.(3)

Caracterización de los residuos sólidos.

Los desechos orgánicos se clasifican en putrescibles y no putrescibles. Los residuos putrescibles se refieren a los desechos de comida mientras que los residuos no putrescibles comprenden al papel, madera, cuero, plásticos y goma. Esto se define básicamente por la velocidad de biodegradabilidad de los residuos.(17)

De acuerdo con estudios realizados, el porcentaje estimado de producción según el tipo de desechos en residencias, se establece que el 75.51% de los desechos orgánicos son putrescibles y el 27.49% no putrescibles.(16)

La composición de los residuos según estudios en el RSLI se muestra en la tabla 4.

TABLA 4 ESTIMACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE DESECHO

Categoría de Desecho	Composición
Comida	58.9%
Papel y Cartón	9.7%
Plásticos	8%
Metal	2.6%
Vidrio	2.4%
Recorte de grama, abono	0%
Desecho de construcción y caucho	9.8%
Desecho de jardín	1.7%
Madera, leña, troncos de árboles	4.7%
Lodos de aguas residuales	No especifica

Fuente:(1)

Se puede observar que el porcentaje de desechos orgánicos es relativamente alto, por lo tanto se considera que aproximadamente el 60% de este residuo es altamente biodegradable.

Actividades de Reciclaje

En cuanto al reciclaje, este no existe de manera formal en el sitio de disposición final ni en la fuente de generación de los residuos.

Cabe mencionar que se están realizando esfuerzos por la vía jurídica para fomentar la cultura del reciclaje. Estos esfuerzos se ven reflejados en las leyes y disposiciones gubernamentales, refiriendo específicamente al llamado impuesto verde.

El impuesto verde ayuda a financiar tareas contra la contaminación.

Los sectores involucrados directamente con este impuesto son: el

sector automotor por la contaminación del aire y la industria de bebidas por la producción de botellas plásticas.(18)

En la industria de las bebidas se impuso una tasa de 2 ctvs. por cada envase plástico no retornable. Así mismo este impuesto retribuye económicamente el mismo valor por cada botella de plástico que puedan recolectar. El SRI ha dispuesto ciertos centros de acopio para estos residuos.(18)

En vista de esta oportunidad, existen en la ciudad varios recicladores informales que se benefician de la recolección de estas botellas y plásticos en general, y gracias a esto, se ha logrado en cierta forma separar los residuos biodegradables de los no biodegradables.

De esto no se tienen datos específicos de las cantidades exactas de recolección, lo que impide hacer un análisis más detallado del fraccionamiento de los residuos, sin embargo es claro que esto contribuye a disminuir el volumen y la cantidad de residuos que llegan al relleno sanitario. En la figura 2.5 se puede observar esta actividad informal en las calles de Guayaquil.



FIGURA 2.5 ACTIVIDAD DE RECICLAJE INFORMAL EN GUAYAQUIL

Fuente: Elaboración propia

2.7 Características químicas de los desechos sólidos

Entre las propiedades físicas se evaluarán principalmente la densidad y el contenido de humedad. Existen otras propiedades físicas como: el tamaño de partícula, la capacidad de campo y la permeabilidad de los residuos que no serán considerados en este estudio debido a que no son imprescindibles en el proceso de digestión anaerobia.

En cuanto a las propiedades químicas se analizarán: análisis físico, análisis elemental y el contenido energético.

En las propiedades biológicas determina básicamente la biodegradabilidad de los residuos. Este parámetro se evalúa en base al contenido de lignina, lignocelulosa y sólidos volátiles.

Estas propiedades se evaluarán exclusivamente en la FORSU y de forma teórica, en base a esto, se establecerán los valores iniciales con los que ingresan al proceso de digestión anaerobia y la posterior producción de biogás.

Propiedades físicas

La importancia de establecer la humedad, tamaño de partícula y la densidad en los residuos radica en que la determinación de sus valores, establece el pre-tratamiento necesario para dichos residuos para favorecer la biodigestión anaerobia. A continuación se describen ambas propiedades.(3)

Densidad.- Se define como el peso de un material por unidad de volumen. Las unidades en las que se puede expresar en kg/m^3 o en g/cm^3 . Cabe resaltar que este valor aumenta dependiendo del grado de compactación de los residuos (3).

Tamaño de partícula.- Para los residuos domésticos de comida, este valor se encuentra típicamente entre 0 y 15 cm típicamente (3).
(Véase gráfica Apéndice 1).

Contenido de humedad % (base húmeda).- este parámetro se puede expresar de dos formas: como porcentaje del peso del

material húmedo o como porcentaje del peso del material seco. En el primer se usa el método de medición de peso-húmedo y en el segundo caso se usa el método de peso-seco (3). El método de peso-húmedo es el más utilizado en residuos sólidos y su ecuación se expresa a continuación.

$$M = \left(\frac{w - d}{w} \right) * 100$$

Dónde:

M: contenido de humedad (%)

w: peso inicial de la muestra (kg)

d: peso de la muestra después de secarse a 150°C (kg)

Cabe recalcar que este contenido de humedad variará según la composición de residuos, la estación del año y las condiciones de humedad y meteorológicas (lluvias).(3)

Los residuos mostrados en la tabla 5 se indican los valores típicos de contenido de humedad y densidad para los residuos domésticos de comida (mezclada), residuos comerciales de comida y residuos agrícolas, todos sin compactación (3). Cabe mencionar que se han dejado de lado varios tipos de residuos debido al bajo grado importancia que tienen sobre este estudio.

TABLA 5 DATOS TÍPICOS DE DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD PARA FORSU.

Tipo de residuos	Peso específico (kg/m ³)		Contenido de Humedad (% en peso)	
	Rango	Típico	Rango	Típico
R. Domésticos				
Residuos de comida	131-481	291	50-80	70
R. Comerciales				
Residuos de comida (H)	475-950	540	50-80	70
R. Agrícolas				
Frutas mezcladas	249-751	359	60-90	75
Estiércol húmedo	899-1050	1000	75-96	94
Vegetales mezclados	202-700	359	60-90	75

Fuente: (3)

Propiedades químicas

La información sobre la composición química de los elementos que forman parte de la FORSU es importante para evaluar las opciones de procesamiento de los residuos (3). En el caso de la digestión anaerobia, por ser un proceso de conversión biológica, es incluso mucho más imprescindible, ya que no solamente es importante tener información sobre los elementos mayoritarios, sino además de las cantidades en trazas que se encuentran en los residuos.(3) Este análisis establece también la cantidad de biogás que teóricamente se puede producir en el proceso.

Las propiedades a evaluar serán: análisis físico, análisis elemental y el contenido energético.(3)

Análisis físico.- este análisis incluye:

Humedad.- medida de la pérdida de peso cuando se calienta la masa a 105°C durante una hora. Es parte también del análisis físico (3).

Ceniza.- Peso de rechazo después de la incineración en crisol abierto (3). La cantidad de cenizas disminuyen el contenido energético de los residuos.

Algunos de los valores típicos para la FORSU se muestran en la tabla 6.

TABLA 6 DATOS TÍPICOS ANÁLISIS QUÍMICO PARA FORSU

Tipo de residuos	Humedad (%)	Mat Volátil (%)	Carbono fijo (%)	No combustible (%)
R. de comida mezclada	70	21.4	3.6	5.0
R. frutas	78.7	16.6	4.0	0.7
R. de carne	38.8	56.4	1.8	3.1

Fuente:(3)

Análisis elemental de los componentes.- Implica la determinación de C (carbono), H (hidrogeno), O (oxigeno), N (nitrógeno), S

(azufre) y ceniza. De forma general los resultados se utilizan para caracterizar la composición química de la FORSU.

En la digestión anaerobia particularmente sirve para definir la mezcla correcta de residuos y establecer la relación C/N necesario para la conversión biológica, además se puede establecer la mezcla correcta con nutrientes para optimizar el proceso y por ende, la producción de biogás.

Algunos de los porcentajes típicos de análisis elemental para la FORSU se muestran en la tabla 7.

TABLA 7 DATOS TÍPICOS DEL ANÁLISIS ELEMENTAL DE LA FORSU

Tipos de residuos	Porcentaje en Peso (Dry basis)					
	C	H	O	N	S	Cenizas
Residuos de comida mezclada	48	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Residuos de frutas	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2	4.2
Residuos de carne	59.6	9.4	24.7	1.2	0.2	4.9

Fuente: (3)

Poder calorífico o Contenido energético².- Este parámetro se puede establecer por 3 métodos (3). El primer método es por medio de un balance energético en una caldera a escala real como calorímetro, el segundo es por medio de una bomba calorimétrica

² El contenido energético de la los productos al final del proceso nunca debe ser mayor que el contenido energético de los insumos que ingresan.

de laboratorio, y la última es por medio de cálculo usando los resultados del análisis elemental.

Los datos típicos del contenido energético de los componentes de los residuos de comida se muestran en la tabla 8.

TABLA 8 DATOS TÍPICOS DEL CONTENIDO ENERGÉTICO DE LA FORSU

Tipos de Residuos	Energía (Kcal/kg)			
	Como recogidos	Con tratamiento		
	Rango	Típico	Seco	Seco sin ceniza
Residuos de comida	833-1 667	1 111	3 324	3 989
Residuos de frutas		948	4 452	4 603
Residuos de carne		4 235	6.919	7 289 ³

Fuente: (3)

Se indica que por principio, la energía de los productos finales debe ser menor a la energía de los insumos iniciales. Para establecer la comparación ambos productos deben estar en la misma base, esto es, deben ser medidos en base seca, mas no en base húmeda, ya que puede encontrarse en diferente porcentaje imposibilitando una analogía productiva.

³ El alto contenido energético de residuos secos y sin cenizas de carne animal se debe a la posible presencia de grasa animal en la carne, la cual eleva un poco el contenido energético comparado con otros residuos.

Si se tiene el valor de energía en forma de residuos desechados, para obtener en base seca se aplican las fórmulas que se muestran en la tabla 9.

TABLA 9 FÓRMULAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ENERGÉTICO EN BASE SECA.

Sin tomar en cuenta cenizas	Tomando en cuenta cenizas
$\left(\frac{KJ}{Kg}\right)_{db} = \left(\frac{KJ}{Kg_{rd}}\right) * \left(\frac{100}{100 - \%h}\right)$	$\left(\frac{KJ}{Kg}\right)_{db} = \left(\frac{KJ}{Kg_{rd}}\right) * \left(\frac{100}{100 - \%h - \%ceniza}\right)$

Fuente:(3)

Dónde:

KJ/Kg: Unidad de energía

db: Dry basis (base seca)

rd: Residuos desechados

%h: Porcentaje de humedad

%c: Porcentaje de cenizas

Propiedades biológicas

Esta propiedad está íntimamente relacionada a la materia orgánica y a las diversas formas de vida, tales como microorganismos, lombrices e insectos. La característica biológica más importante de

la FORSU es que es capaz de convertir en gases y sólidos orgánicos e inorgánicos estabilizados (3). Esta capacidad de convertirse se llama biodegradabilidad.

La biodegradabilidad se refiere a la naturaleza putrefactible de los residuos sólidos y se mide con respecto a los valores de: sólidos volátiles y el contenido de lignina.(3)

La lignina es un componente que implica poca biodegradabilidad. Su alto valor disminuye la capacidad la biodegradabilidad del residuo ya que requiere mucho tipos de enzimas para convertirlos en especies solubles (19). Por otro lado, altos valores en el componente de sólidos volátiles contribuyen a la biodegradabilidad de los residuos.

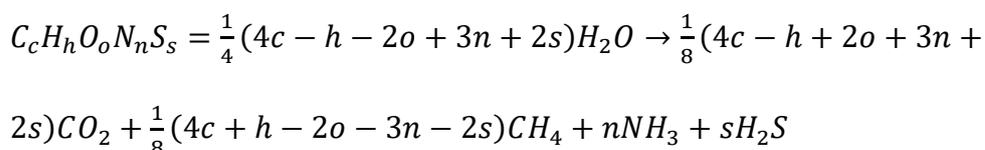
Un ejemplo de lo indicado es que los desechos de comida los sólidos volátiles (SV) se colocan entre 7-15% con respecto a sólidos totales (ST); el contenido de lignina tiene 0.4 %; la fracción biodegradable es de 0.82%. Para el papel con alto contenido de lignina (aprox 22%) y 94% aprox de SV, se puede observar que el factor de biodegradabilidad es de 0.22, mucho más bajo que los residuos de comida. (3)

2.8 Estimación teórica de la producción de biogás

La digestión es un proceso de producción de energía ya que más del 75% del sustrato se convierte en energía (dependiendo del proceso). El biogás contiene por naturaleza aproximadamente del 50% al 60% o incluso mayor en algunos casos, dependiendo de la calidad de los residuos. (20) Esto significa que la digestión genera una inter-conversión de energía, tomándola del sustrato y pasándosela a los productos de la digestión (biogás y efluente)⁴.

Para establecer la cantidad de energía del biogás, se necesita medir o predecir la cantidad de metano que contiene dicho biogás.

La estimación teórica se realiza por medio de la fórmula de Buswell (1952), quien predice la producción de biogás en base a la composición química del sustrato y los rendimientos de los componentes de los productos de la digestión (20). La fórmula se muestra a continuación:



Ecuación 2.1

⁴ Otra forma de indicar esto es que el proceso de digestión ocasiona que buena parte de la energía bioquímica contenida en el sustrato se convierta a energía termoquímica mayoritariamente contenida en el biogás.

Según la ecuación de Buswell, el biogás estará compuesto de aproximadamente 55% de CH_4 (metano) y 45% de CO_2 (dióxido de carbono) (20). Cabe mencionar que se debe realizar un análisis químico elemental de la muestra en el ingreso al reactor⁵.

En otras palabras esta ecuación predice la productividad de biogás en base a los componentes de la materia, tomando en cuenta variables como: contenido de sólidos, relación C/N, tóxicos y nutrientes; sin embargo, no hace referencia a otras variables que influyen también en la producción de biogás, entre ellas podemos mencionar: temperatura, tiempo de residencia y el grado de desmenuzamiento del sustrato. Un ejemplo de la variación de la productividad con respecto a la temperatura y tiempo de residencia se muestra en la figura 2.6.

⁵ En este punto no hay que olvidar en principio bioquímico que indica que no se puede obtener un producto final con porcentajes mayores de C, H, O, N y S que el sustrato que ingresa al reactor.

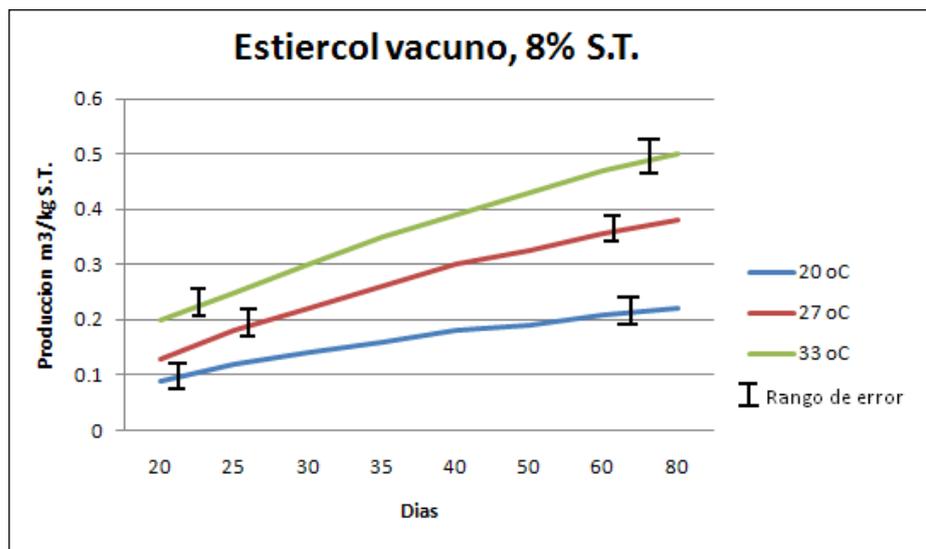


FIGURA 2.6 VARIACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DEL BIOGÁS CON RESPECTO AL TIEMPO DE RESIDENCIA Y TEMPERATURA

Fuente:(11)

Se puede observar que la producción de biogás aumenta con respecto a al aumento de la temperatura de operación y al tiempo de retención. Con respecto tamaño de partícula, se mencionó en la sección anterior que entre más pequeño sea, más facilita la degradación de la materia y por ende la producción de biogás, Este efecto no se muestra en la figura 2.6.

Si bien en la figura especifica solo el rango mesofílico, se puede intuir que la producción aumentará a temperaturas más altas, así mismo, el tipo de residuo analizado en el presente estudio se considera de menor calidad que el estiércol vacuno. Existen pocos

informes sobre la producción de biogás en rango termofílico de RSU, debido a la variabilidad y heterogeneidad de los mismos. Un resumen de los valores extraídos de diversas plantas de digestión anaerobia extranjeras se muestra en la tabla 10.

TABLA 10 PRODUCTIVIDAD DE BIOGÁS EN PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Productividad de Biogás de RSU en Rango Termofílico	
Planta 1 (RSU) (14)	150 m ³ /t residuos frescos
Planta 2 (RSU) (20)	125 m ³ /t residuos frescos
Planta 3 (RSU) (21)	180 m ³ /t residuos frescos
Planta 4 (RSU) (21)	200 m ³ /t residuos frescos
Planta 5 (RSU) (22)	200 m ³ /t residuos frescos

Fuente:(14)(20)(21)(22)

Referente a estos datos, y al análisis anterior, para el presente proyecto se estima una producción de biogás de 150 m³/t residuos frescos tratados.

Tecnologías para el tratamiento de residuos con digestión anaerobia termofílica.

Existen varias tecnologías para el tratamiento de los desechos orgánicos, las diferencias se centran básicamente en el tipo de digester utilizado. La selección de la tecnología más adecuada depende principalmente de los productos a tratar.

En el presente estudio no se realizará un análisis de los tipos de digestor, sino que se analizará tecnologías existentes enfocadas específicamente para el tratamiento anaerobio de los residuos orgánicos municipales, y en base a esta selección, se indicará el tipo de digestor y los requerimientos de la planta.

Para la selección del sistema más apropiado se realiza una pre-selección de las tecnologías aplicadas directamente al manejo de residuos orgánicos municipales. Posteriormente se realizará una matriz de decisión en donde se escogerá la tecnología más factible para el uso, operación, acoplamiento, entre otros.

Pre-selección de la tecnología

Según la literatura, para el tratamiento de la FORSU se requiere de un sistema de digestión anaerobia en rango termofílico para garantizar la depuración total de los residuos y aumentar la rapidez de biodigestión. Otra consideración a ser tomada en cuenta es la alta carga orgánica que se debe manejar, es por esta razón que se realiza en vía seca. En cuanto al tipo de reactores, en general estos cuentan con mecanismos de retención de biomasa, permitiendo la operación con bajos tiempos de retención hidráulico y altos tiempos de retención celular (θ_C).

Bajo estas especificaciones iniciales, existen dos tecnologías que se acoplan de la mejor manera a los requerimientos necesarios para el manejo de este tipo de residuos, estas son: Tecnología DRANCO, Tecnología de KOMPOGAS. Estas tecnologías se describen brevemente a continuación:

Kompogas.- El sistema de Kompogas es un sistema de fermentación continua en seco de los residuos orgánicos. Esta tecnología se caracteriza por tener un biodigestor horizontal con partes móviles que agitan el sustrato generando una tasa uniforme de producción de biogás. Esto se muestra en la figura 2.7 y 2.8.



FIGURA 2.7 PLANTA DE KOMPOGAS

Fuente:(20)

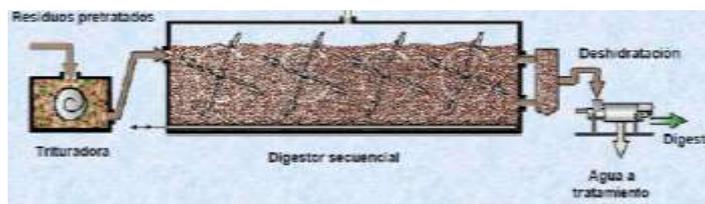


FIGURA 2.8 DETALLE PLANTA DE KOMPOGAS

FUENTE: (23)

Dranco.- La tecnología DRANCO (DRy ANaerobic COmposting) está diseñada y desarrollada para optimizar los parámetros de la digestión estática, espontánea y continua por vía seca, descomponiendo y generando biogás de forma controlada y eficiente mediante un proceso continuo en un periodo de 2 a 3 semanas. El biodigestor usado es de tipo vertical no posee partes mecánicas móviles y es capaz de manejar grandes concentraciones de sólidos, incluso mayores al 40%. Figura 2.9.

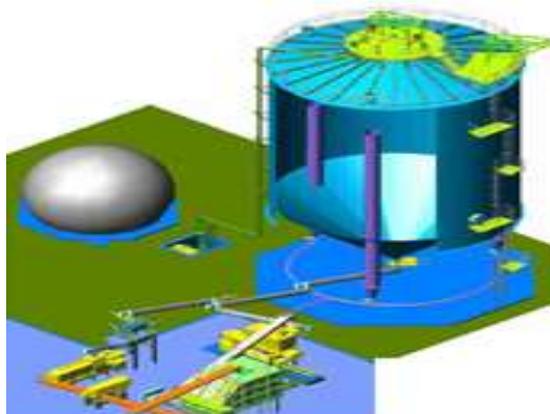


FIGURA 2.9 SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA, PROCESO DRANCO

Fuente: (20)

Los criterios⁶ que definen las tecnologías anaerobias son los siguientes:

- Tiempo de retención de biomasa en el reactor
- Contenido de sólidos de la fracción alimentada FORSU
- Periodo de puesta en marcha
- Tipo de agitación
- Frecuencia de mantenimiento
- Producción neta de energía
- Producción de biogás
- Tipo de flujo en el reactor
- Tipo de crecimiento celular

Ambas tecnologías descritas se contrastan en la tabla 11 de acuerdo a las características mencionadas.

⁶ Estas características están descritas en secciones anteriores.

**TABLA 11 PARÁMETROS DE COMPARACIÓN DE
TECNOLOGÍAS ANAEROBIAS**

Característica	Tecnología Dranco	Tecnología Kompogas
Tiempo de retención de biomasa en el reactor	16-20 días	15 días
Contenido de sólidos de la fracción alimentada FORSU	35-40% ST	25-30% ST
Periodo de puesta en marcha	6 meses aprox.	no se indica
Agitación	No tiene agitación	Agitación mecánica
Frecuencia de Mantenimiento	Poca frecuencia, no posee partes móviles	Mayor frecuencia. Posee partes móviles
Producción neta de energía	85-90%	70-80% de la E generada
Producción de biogas	120-150 m ³ /ton residuo	100-130 m ³ /ton residuo
Recirculación	1-6	se usa agitación
Tipo de flujo en el reactor	Flujo vertical tipo pistón	Flujo horizontal tipo pistón
Tipo de crecimiento celular	Crecimiento disperso, biomasa en suspensión	Crecimiento disperso, biomasa en suspensión

Fuente: (20)

La capacidad de depuración y las condiciones de operación son iguales en ambas tecnologías, ya que ambas se desarrollan en rango termofílico y deben poseer un pre-tratamiento de la biomasa entrante. El control y estabilidad del sistema es complicada en ambos casos ya que las bacterias se desarrollan en un medio que

es muy sensible a pequeños cambios que pudieran existir en el medio circundante.

Matriz de Decisión

Con la matriz de decisión se selecciona la tecnología que mejor se adapta a las condiciones de trabajo y a los requerimientos del proyecto.

Definición de los Ítems considerados en la matriz de decisión

a) Disponibilidad a variaciones en tipo de materia prima

Este es un parámetro imprescindible, ya que el sistema debe estar diseñado para soportar grandes variaciones en la FORSU entrante. El sistema debe tener estabilidad con respecto a estos cambios.

b) Operación y mantenimiento

En este punto se evalúa de manera general los requerimientos en cuanto a la operación y el mantenimiento del sistema para garantizar el buen funcionamiento. Este es un parámetro importante ya que permite establecer un valor de confiabilidad y la estabilidad en el proceso.

c) Vida útil

Este concepto responde a la interrogante sobre cuánto tiempo durará operando el sistema.

d) Producción neta de energía

La producción de energía se considera de suma importancia para establecer la viabilidad de la tecnología. La producción positiva neta de energía implica ganancias por ventas en electricidad, así como un posible ahorro en la energía necesaria para el funcionamiento de la planta.

e) Costos

Este ítem se considera el factor más importante en la selección del sistema, ya que por medio del cual, se indica la viabilidad del uso de la tecnología. En este punto se consideran los posibles costos de inversión, operación y el mantenimiento, así como los valores que pueden representar una ganancia en el sistema.

f) Rendimiento

En este ítem se pone énfasis en la productividad y en la eficiencia de la biodigestión.

A continuación se presenta en la tabla 12 la ponderación de los factores a evaluar, esta será la base de la selección del sistema.

TABLA 12 PONDERACIÓN DE LOS FACTORES A EVALUAR EN LA MATRIZ DE DECISIÓN

Factor evaluado		Comentarios	Ponderación
a)	Disponibilidad de variaciones en tipo de materia prima	a La FORSU disponible es cambiante en todo momento, el sistema debe dispuesto a estas variaciones.	15%
b)	Operación y mantenimiento	y Se desea que la operación sea relativamente simple, flexible y confiable. El mantenimiento debe poder realizarse en el menor tiempo posible y simple.	15%
c)	Vida útil	15 años es el promedio de vida útil de duración de este tipo de proyectos. Se resalta que será complicado reemplazar el sistema en corto o mediano plazo.	10%
d)	Producción neta de energía	La producción de energía debe ser considerablemente alta, esto considera que debe satisfacerse tanto la energía necesaria para el proceso, así como la producción de energía extra para la venta.	20%
e)	Costos	Se debe considerar aquella tecnología sea eficaz y eficiente en cuanto a la producción de biogás y por ende de energía, para tener una disminución significativa en la inversión inicial, operación y mantenimiento.	20%
f)	Rendimiento	El sistema debe estar diseñado para la biodigestión de una cantidad estable de residuos, de donde se deberá producir la mayor cantidad de biogás que teóricamente es posible.	20%
Calificación: 0=No aplica 1=suficiente 2=Regular 3=Regular 4=Bueno 5=Muy Bueno			100%

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 13 MATRIZ DE DECISIÓN

Proceso evaluado: Selección del sistema				
Ítem	Tecnología DRANCO		Tecnología KOMPOGAS	
	Calificación	Aceptación	Calificación	Aceptación
a	70	10.5	90	13.5
b	80	12	70	10.5
c	80	8	70	7
d	95	19	70	14
e	90	18	55	11
f	80	16	80	16
	TOTAL	83.5	TOTAL	72

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la matriz de decisión indican que la “Tecnología DRANCO” es la que más se ajusta al proyecto, por lo tanto este sistema será analizado en capítulos posteriores.

CAPÍTULO 3

3. SISTEMA ANAEROBIO

El sistema anaerobio para producción de biogás seleccionado fue el sistema DRANCO. El sistema comprende tanto el proceso químico así como la tecnología y los equipos que se requieren. El diseño de este proceso, el rendimiento, condiciones de funcionamiento, el tamaño básico de la planta se indicará en las siguientes secciones.

En cuanto al diseño del reactor anaerobio, se indicarán los componentes estructurales como: el cuerpo principal, aislamiento, soportes, entre otros. Este capítulo se centrará en el dimensionamiento del sistema de digestión anaerobia y el diseño de los implementos más importantes.

3.1 Diseño conceptual del sistema.

El proceso de digestión Dranco se define básicamente en 5 etapas que son: recolección, separación, pre-tratamiento, mezclado, bombeo, biodigestión y extracción de residuos. El esquema básico se describe a continuación en la figura 3.1

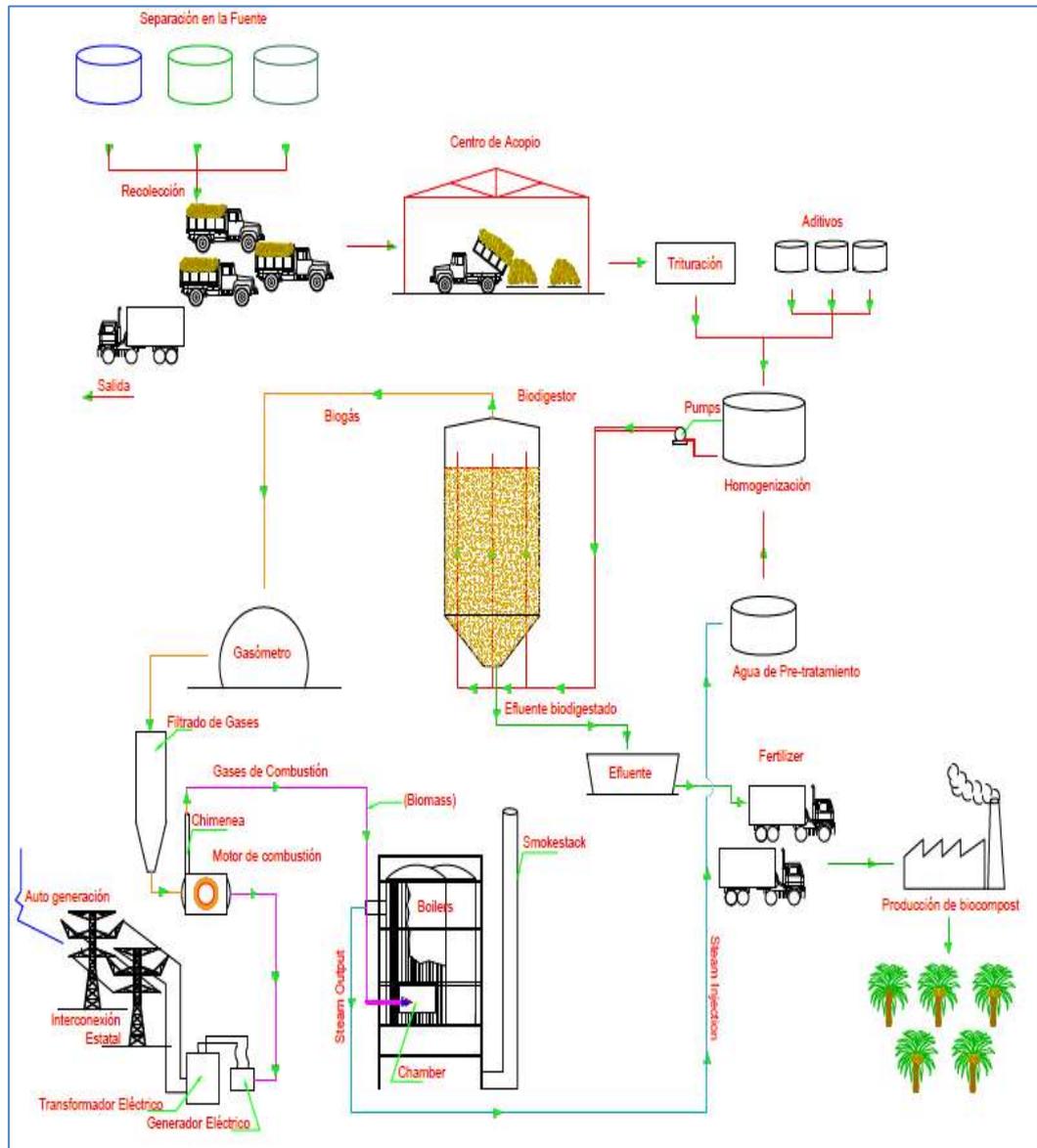


FIGURA 3.1 ESQUEMA DE LA PLANTA DE BIODIGESTIÓN DRANCO

Fuente: Elaboración Propia, (14), (24)

1. **Recolección y selección de residuos sólidos.**- la recolección de los residuos y la selección se puede realizar de manera conjunta a través de la separación en la fuente y recolección diferenciada, o en su defecto por medio de separación en

plantas de tratamiento de residuos. En la primera opción se debe realizar procesos de concientización en la población, un rediseño del proceso de recolección y además evaluar la eficiencia de la separación, aparte, en esta opción no se descarta una planta de separación final que garantice la calidad de los residuos en el digestor. En el segundo caso, se dispone de una planta de separación de residuos de mayor envergadura que en el caso anterior ya que no existe separación previa. En el presente estudio no se tomará en cuenta el diseño de esta planta, solo se tomará en cuenta el tratamiento de la parte orgánica de los residuos. Una descripción básica de la planta de separación se describe en el apéndice 3.

- 2. Pre-tratamiento de la FO-RSU.-** La fracción orgánica se reduce en un tamaño menor igual a 40 mm por medio de trituradores mecánicos. Cabe recalcar que la fracción orgánica comprende solo la parte biodegradable de los residuos sólidos municipales, se indica además que el proceso Dranco es capaz de manejar concentraciones considerables de agentes contaminantes, sin embargo se debe tener en cuenta que entre menos contaminantes existan, mejor será la producción de biogás y menor la cantidad de energía consumida. En el presente proyecto se analizarán residuos “limpios”.

- 3. Mezclado.-** después de la trituración, estos residuos se mezclan con una gran cantidad de residuo digerido proveniente del digestor. La relación de mezcla esta alrededor de 1 ton material alimentado con 6 a 8 ton de residuo digerido. A esta mezcla se le añade una cantidad de calor para llegar a la temperatura termofílica que tiene un rango de 50 a 60°C. Todo este proceso se realiza en una unidad de dosificación y mezclado la cual se complementa una bomba de alimentación.
- 4. Bombeo del sustrato al digestor.-** la mezcla pre-calentada de los residuos orgánicos frescos y digeridos, se bombea directamente hacia la parte superior del biodigestor por medio de tubos de alimentación. Estos tubos ingresan por el fondo del biodigestor y alcanzan una altura de 1 m por debajo del techo interior del biodigestor. Los tubos de alimentación se deberán construir con el diámetro apropiado, tal que reduzca las pérdidas por fricción y por ende el consumo de energía.
- 5. Producción de biogás en digestor.-** Una vez ingresada la mezcla por la parte superior del digestor, esta se tarda aproximadamente de 3 a 4 días (dependiendo de la tasa de alimentación) para descender por gravedad hacia el fondo del digestor. El digestor se encuentra aislado térmicamente para evitar pérdidas de calor. De esta manera se evita incorporar calentamiento alguno en el cuerpo del digestor. Así mismo no se

usa equipo de agitación, manteniendo de esa manera la identidad cronológica de cada porción de material en su paso vertical por el digestor. El biogás es extraído por medio de una tubería que se encuentra conectada en la parte superior del biodigestor.

- 6. Extracción del residuo de biodigestión.-** El residuo se extrae por medio de tornillo sinfín conectado en la parte inferior del biodigestor. El material extraído es llevado a tratamiento de compost. Una parte de este material se aplica como inóculo mejorador del proceso de digestión.

Todo este proceso se realiza en un tiempo de retención de 20 días.

Las partes de la planta que se tomarán en cuenta en este análisis son las zonas 1 y 2 que se muestran en la figura 3.2.

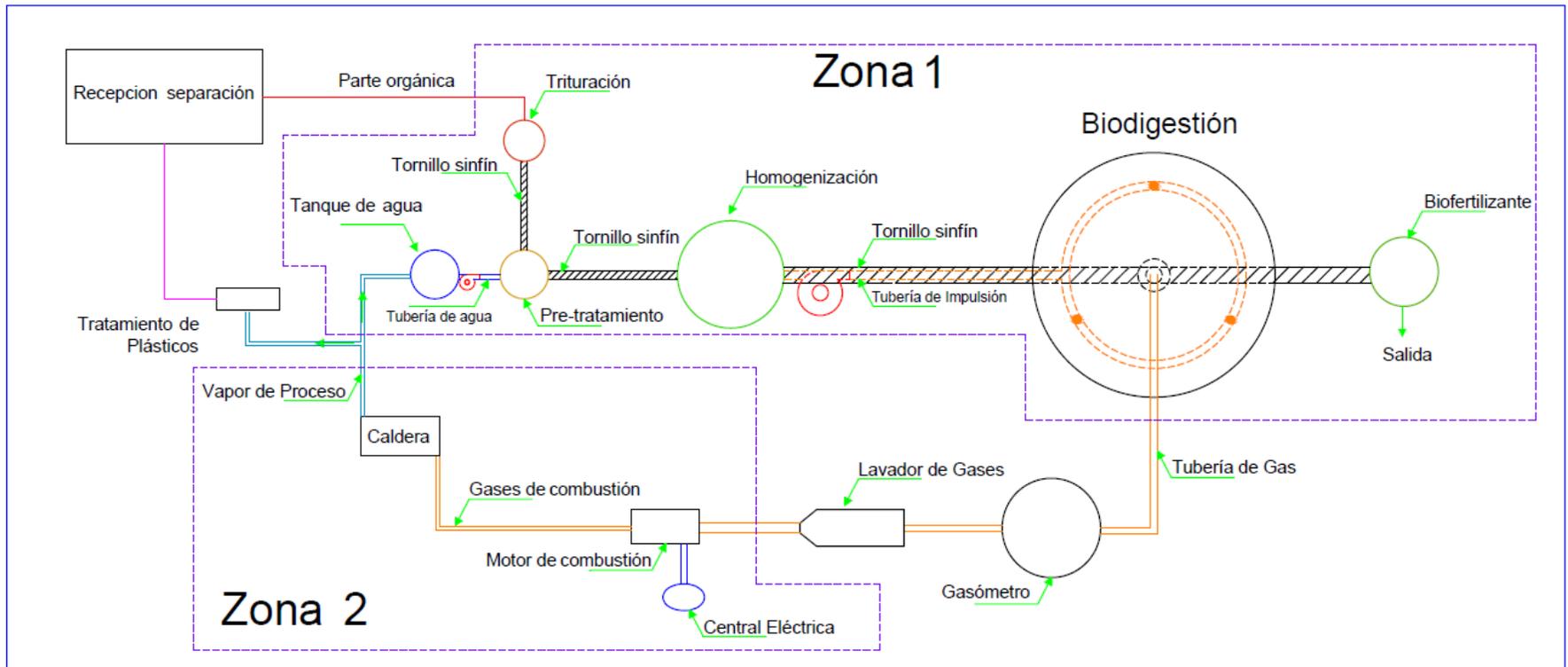


FIGURA 3.2 VISTA DE PLANTA, COMPONENTES DEL SISTEMA DRANCO

Fuente: Elaboración Propia

3.2 Cálculo de la capacidad del sistema.

Los datos iniciales para el dimensionamiento se indicaron en el capítulo 2. En esta sección se hará un resumen de aquellos datos, se establecerán las ecuaciones y el procedimiento de dimensionamiento del sistema, además de la producción total de biogás, de metano y la energía disponible que se puede producir a través de la biodigestión de estos residuos.

Para facilidad del estudio, se seleccionará una capacidad de operación base de 100 t/d de residuos frescos (as is) que implica un manejo anual de 36 500 t/año, y a través de esto, se podrá establecer un parámetro de comparación y extrapolar conclusiones para cálculos de sistemas de biodigestión de capacidades mayores.

Dimensionamiento del biodigestor

Los datos iniciales para el cálculo se resumen en la tabla 14⁷:

TABLA 14 PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO DEL DIGESTOR

Parámetros para el dimensionamiento del biodigestor	
Cantidad de residuos (t/d)	100
Fracción orgánica FO (%)	59%
Eficiencia de recolección (%)	90%
Humedad estimada en residuos (%)	30%
Humedad necesaria para biodigestión (%)	75%
Densidad de masa fresca (t/m ³)	1.2
Tiempo de residencia (d)	20

Fuente: (14)(1)(16)

⁷ Estos valores han sido analizados en el capítulo 2 en las secciones 2.6 y 2.7 del presente estudio.

Determinación de la cantidad de desechos orgánicos

$$\text{cant. de res. orgánicos} = \text{desecho total} \left(\frac{t}{d} \right) * \% \text{ de FO} * \eta_c \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$\text{cant. de residuos orgánicos (wb)} = 100 \left(\frac{t}{d} \right) * \frac{59}{100} * \frac{90}{100} = 53.1 \frac{t}{d}$$

La porción seca de los residuos es

$$\text{Cant. residuos orgánicos (db)} = \text{rso (wb)} \frac{t}{d} * \left(1 - \frac{\% \text{ de humedad}}{100} \right)$$

Ecuación 3.2

$$\text{Cant. residuos orgánicos (db)} = 53.1 \frac{t}{d} * \left(1 - \frac{30\%}{100} \right) = 37.17 \frac{t}{d}$$

Estableciendo la masa total fresca que ingresa al biodigestor (75%

MC wb):

$$m_{\text{fresca @75\%}} = m_{Tf}$$

$$m_{H_2O} + m_{\text{fresca@30\%}} = m_T$$

$$m_{T @75\%} = \frac{res_{db}}{1 - \frac{H}{100}} = \frac{37.17}{1 - \frac{75\%}{100}} = 148.68 \text{ [t/d]}$$

$$m_{H_2O} = 95.5 \text{ [t/d] añadida}$$

$$m_{TH_2O} = 16 \text{ [t/d] existente}$$

La diferencia entre la biomasa inicial y la biomasa que ingresa al digestor se muestra en la figura 3.3.

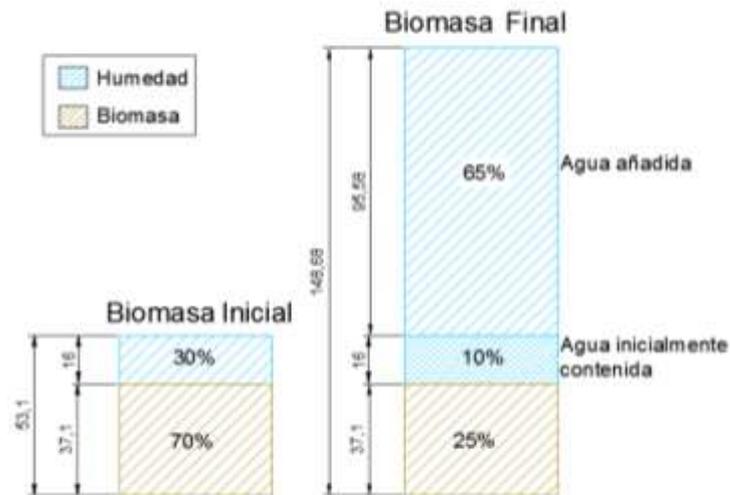


FIGURA 3.3 COMPARACIÓN ENTRE BIOMASA INICIAL Y REQUERIDA AL INGRESO DEL BIODIGESTOR

Fuente: Elaboración propia

Estableciendo la densidad global dentro del biodigestor, se tiene:

$$(m_{H_2O}/\rho_{H_2O}) + (m_{fresca}/\rho_{H_2O}) = V_T \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$V_T = (95.58/1) + (53.1/1.2) = 154.58 [m^3]$$

$$\rho_G = \frac{m_T}{V_T} = \frac{148.68}{139.83} = 1.06 [t/m^3]$$

Tamaño del biodigestor:

$$volumen\ del\ reactor(m^3) = \frac{rs\ db\ \left[\frac{t}{d}\right] * tr\ [días]}{\left(1 - \frac{\% de\ humedad}{100}\right) * \rho_g\ \left(\frac{t}{m^3}\right)}$$

Ecuación 3.4

$$volumen\ del\ reactor(m^3) = \frac{148.68\ \left(\frac{t}{d}\right) * 20\ (días)}{1.06\ \left(\frac{t}{m^3}\right)} = 2\ 800\ m^3$$

Este valor representa el volumen total de la masa dentro del reactor.

Producción de biogás

Los datos que se usarán para este propósito, se resumen en la tabla 15.⁸

TABLA 15 DATOS INICIALES PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Parámetros para establecer la producción de biogás	
Producción específica de biogás* (Nm ³ /t) wb	150
Composición de biogás (%)	60% CH ₄
	40% de CO ₂

*Estos datos se encuentran especificados con respecto a residuos sólidos frescos.

Fuente: Elaboración Propia

Producción de biogás⁹:

$$Prod. de biogás = \frac{Biogás}{rs(wb)_e} \left[\frac{Nm^3}{t} \right] * rs(wb)_e \left[\frac{t}{d} \right] \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$Prod. de biogás = 150 * 53.1 = 7965 \left[\frac{Nm^3}{d} \right]$$

La producción de metano (CH₄):

$$Prod. de CH_4 = Prod. de biogás \left[\frac{Nm^3}{d} \right] * \frac{60\% de (CH_4)}{100} = 4779 \left[\frac{Nm^3}{d} \right]$$

Ecuación 3.6

En términos de TOE (toneladas equivalentes de petróleo):

$$TOE = 4779 \left[\frac{m^3 CH_4}{d} \right] * \frac{1 TOE}{1172 m^3 CH_4} = 4.07 \left[\frac{TOE}{d} \right]$$

⁸ Estos Datos han sido analizados en la sección 2.7.

⁹ La producción de biogás se analiza en condiciones normales (Nm³) a 15°C y a 1 Bar.

Esta cantidad de energía puede ser aprovechada para generación eléctrica o para consumo térmico de la misma planta.

Tasa de extracción de biogás:

$$Prod. de biogás = \frac{7\,965}{24} = 332 \left[N \frac{m^3}{h} \right]$$

Dimensionamiento del tanque de digestión

El tipo de digestor seleccionado es de flujo pistón, y está conformado por un cilindro en la parte superior unido a un cono en la parte inferior, (ver figura 3.4). Según la bibliografía, las medidas generales recomendadas para esta capacidad es de 15 m de diámetro y 25 m de altura total aproximadamente. En base a estas medidas generales, se dimensionará el tanque.

$$2800 \, m^3 = (A_{b \, cil} * h_{cil}) + \left(\frac{1}{3} * A_{b \, cono} * h_{cono} \right) \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$2800 \, m^3 = (A_{b \, cil} * (H_t - r)) + \left(\frac{1}{3} * A_{b \, cono} * h_{cono} \right); \quad A_{b \, cono} = A_{b \, cil}$$

$$2800 \, m^3 = \pi * r^2 \left[(H_t - r) + \left(\frac{1}{3} * r \right) \right] \therefore r = 7.5 \, m$$

$$H_t = 20.84 \, m \sim 21 \, m$$

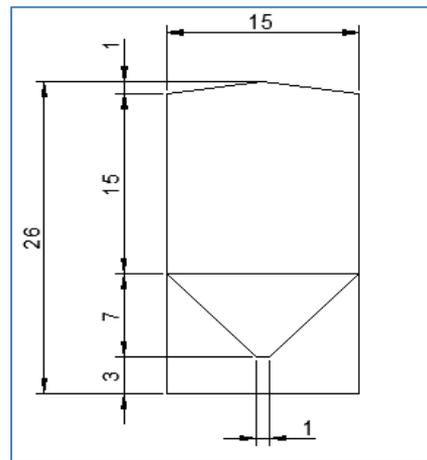
$$H_{cono} = 7 \, m$$

$$H_{cil} = 14 \, m$$

Para efectos de diseño, se considerará una altura de 1 m de forma cónica para la cámara de biogás con una presión manométrica máxima de 2.5 psi, además, para el caso del cilindro, se considerará

añadir 1 m más para dejar un pequeño margen por encima del sustrato.

Por debajo del tanque se deberá dejar una altura de 3 m. por lo tanto las medidas generales del proyecto serían las mostradas en la figura 3.4.



**FIGURA 3.4 MEDIDAS GENERALES DEL BIODIGESTOR
(METROS)**

Fuente: Elaboración propia

Tiempo de vaciado del tanque de biodigestión

$$m_{Ting} = m_{fresca} + m_{recirculada} - m_{sale} \quad \therefore m_{sale} = m_{fresca}$$

$$m_{Ting} = 892.08 \text{ [t/d]}$$

$$V_{Ting} = \frac{892.08}{1.06} = 841.585 \text{ [m}^3\text{/d]}$$

$$\#días = \frac{V_{bd}}{V_{Ting}} = \frac{2800}{841.585} = 3.32 \text{ [d]}$$

El tiempo total es de aproximadamente 3 días y 8 hrs aproximadamente. Esto significa que una porción dada de masa se separa una sexta parte y se mezcla con una sexta parte fresca. De

esta manera en 6 ciclos de recirculación la masa se habrá renovado completamente y esto corresponde a 20 días.

Dimensionamiento de la unidad de dosificación

La unidad de dosificación y homogenización está compuesto de: tanque de calentamiento de agua, de pre-mezclado, de homogenización y de efluentes del sistema (ver figuras 3.5 y 3.6). Estos tanques, por ser de paso, deberán tener un volumen suficiente para almacenar momentáneamente la masa durante el proceso continuo de homogenización. Se ha fijado un tiempo de 2 horas de operación continua. El dimensionamiento de los componentes del sistema se muestra en la tabla 16.

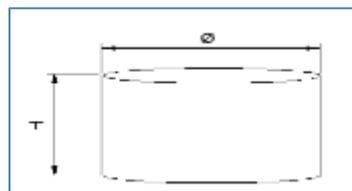


FIGURA 3.5 SIMBOLOGÍA PARA TANQUES DE SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Fuente: Elaboración propia



FIGURA 3.6 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Fuente: Elaboración propia

TABLA 16 DIMENSIONAMIENTO DE TANQUES DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

	Almacenamiento de agua para pre-tratamiento	Pre- tratamiento	Homogenización	Bio-fertilizante (Efluente)
Masa total (t/d)	96	149	1 041 ¹⁰	149
densidad (t/m³)	1	1.06	1.06	1.06
Caudal de llenado (m³/h)	4	6	41	6
Tiempo de almacenamiento (hr)	2	2	2	3
Volumen del tanque (m³)	8	11.7	81.6	17.5
Volumen de diseño (m³)	10	15	100	20
Altura (m)	1.5	2	3.5	2
Diámetro (m)	3	3	6	3.5

Fuente: Elaboración propia

¹⁰ Esta masa representa la suma entre la masa fresca @75% y el recirculado que es 6 veces esa cantidad

Nota: Aplicando el apéndice e de la norma api 650, se puede observar que los tanques con una relación $d/h > 1,33$ son más estables y para condiciones sísmicas similares. Para la relación citada no se requieren de anclajes, mientras que para una relación $d/h < 1,33$ pueda ser diferente.

3.3 Diseño y/o selección de los elementos mecánicos

En esta sección se diseñará o seleccionará los implementos mecánicos más importantes de la planta de tratamiento de residuos sólidos. Entre lo que se va a realizar se encuentra: diseño de los tanques del sistema de dosificación y el biodigestor y se seleccionará el sistema de trituración en base a lo que se encuentra en el mercado. Se indicarán además los parámetros principales para el diseño de los sistemas de transporte de biomasa, así como los sistemas de depuración de gases y almacenamiento final de biogás.

Selección de Trituradora de residuos sólidos orgánicos

Como se indicó en capítulos anteriores, la trituradora recibe la materia orgánica en un rango de 10 a 20 cm, sin embargo, al ingreso del biodigestor se requiere un tamaño máximo de 40 mm. Otros de los parámetros que hay que tomar en cuenta para la selección de esta máquina son: la composición de los RSU,

cantidad de residuos procesados, en la tabla 17 se indican las características que se tomarán en cuenta para la selección de la máquina trituradora.

TABLA 17 CONSIDERACIONES INICIALES PARA LA SELECCIÓN DE TRITURADORA

Consideraciones para la selección de trituradora	
Parámetros	Características
Composición de los residuos sólidos a triturar	Residuos puramente orgánicos, materiales blandos y dúctiles
Cantidad de residuos procesados	53.1 t/d
Tamaño inicial de los sólidos	8-50 mm
Tamaño final de los residuos	Menor igual a 40 mm
Tipo de operación	Continuo
densidad	1.2 (kg/m ³)
humedad	30%
forma del material	irregular
horas de uso diario	4 hrs
Temperatura ambiente	22 °C

Fuente: Elaboración Propia

La trituradora además debe ser seleccionada de acuerdo a los materiales con los cuales es construida para optimizar su rendimiento y minimizar el desgaste de corte en la superficie.

En base a esto, en el mercado existen dos categorías de trituradoras, estas son: trituradoras de alta velocidad (HALT) trituradoras de alta torsión (HSLT) para corte junto con la nueva variante LSHT.

En las trituradoras de alta velocidad reducen de tamaño a residuos de material frágil y duro ya que dependen de la fuerza del impacto que genera la velocidad para aplastar la basura. Esto no funciona para materiales fibrosos, blandos o dúctiles ya que pueden enroscarse o trabar la máquina, al mismo tiempo que absorbe la energía disminuyendo la intensidad de la fuerza de impacto.

En cuanto a las trituradoras de alta torsión, existe un mayor desarrollo tecnológico. Este tipo de trituradoras tienen una mayor eficiencia para el desmenuzamiento de residuos orgánicos. Los tamaños se pueden encontrar de hasta 150 t/h para las máquinas más grandes y su consumo energético varía de entre 3 a 11 KWh/t y depende directamente tanto de la composición como del tamaño final de los residuos.

En base a esto, la trituradora seleccionada es del tipo LSHT (alto torque), la velocidad del eje debe ser regulable y debe estar provisto de cuchillas que generen el cizallamiento necesario. El efluente se hace pasar por medio de un tamiz para garantizar la consistencia en el tamaño.

Observando en catálogos, y en base a estos conceptos y requerimientos del sistema mostrados en la tabla 17, la máquina seleccionada se muestra en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9.



FIGURA 3.7 MÁQUINA TRITURADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS

Fuente: (25)



FIGURA 3.8 DESGARRADORA DE RESIDUOS, ETAPA 1 DEL SISTEMA DE TRITURACIÓN

Fuente:(25)



Figura 3.9 CORTADORA DE RESIDUOS, ETAPA 2 DEL SISTEMA DE TRITURACIÓN.

Fuente: (25)

Las características de esta máquina se presentan en la tabla 18.

**TABLA 18 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE MÁQUINA
TRITURADORA SELECCIONADA**

Características de la máquina trituradora	
Tamaño de salida de los residuos	30 mm
No. de etapas	2, Pre shredder y post shredder
Capacidad	10 t/h
Serie	XR2000C
Consumo eléctrico	7.5 kW
Velocidad de rotación	0-35 rpm
Diámetro de rotor	1000 mm
peso	1 t

Fuente: (25)

La regulación de la velocidad del eje, las fuerzas de impacto, cuchillas de corte y las propiedades del material tienen un efecto sobre el tamaño de partícula del material efluente. En este caso, la velocidad se puede variar hasta lograr en el tamaño preciso de la materia, esto solo se podrá realizar y comprobar con pruebas experimentales en sitio.

Existen más tipos de trituradoras e incluso pueden fabricarse en Ecuador, su costo puede resultar mucho más bajo y además pueden tener la ventaja de ser fabricadas en el tamaño y características requeridas.

Diseño de los tanques de almacenamiento y biodigestión

La selección de los elementos mecánicos se realizará en base a la capacidad que el sistema maneja, mientras que para el diseño de los tanques, se empleará la norma STD API 650 ya que todos los tanques se encuentran a presión atmosférica o poseen una presión manométrica menor a 2.5 psig o 17,237 kPa permitido por la norma. (26)

Factores de diseño: Temperatura y densidad de diseño, tolerancia a corrosión de material contenedor, cargas externas del sistema, capacidad del tanque, nivel de diseño del líquido (Apéndice L de la norma) (26).

Otras consideraciones especiales son:

- Ancho mínimo de las láminas de fondo: 1800 mm
- Espesor mínimo de láminas de fondo: 6 mm
- Esfuerzo de diseño máximo admisible (S_d) es el menor valor de entre $(2/3)S_y$ o $(2/5)S_u$ del material.

Cabe recalcar que no se tomarán en cuenta las cargas de viento, ya que se consideran despreciables (27). Algo muy diferente sucede con la carga sísmica, en donde se indica que el promedio nacional

se ubica en una aceleración de 0.5G (28), valor que si se tomará en cuenta para efectos de estabilidad principalmente en el tanque de biodigestión.

Diseño de la unidad de dosificación

Como se indicó en la sección anterior, la unidad de dosificación comprende los tanques de: almacenamiento de agua caliente, pre-tratamiento, homogenización y bio-fertilizante. En esta sección se indicarán los materiales para construcción, los espesores de la plancha seleccionada, el factor de seguridad, el tipo de soldadura, entre otras. Esto se realizará en base a las normas API 650 para tanques atmosféricos.

A continuación, en la tabla 19 se muestra las medidas principales que son tomadas en cuenta para el diseño de tanques de almacenamiento.

TABLA 19 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Parámetro	Tanques de almacenamiento			
	Agua caliente	Pre-tratamiento	Homogenización	Biofertilizante
Diámetro (m)	3	3	6	3,8
Altura (m)	1,6	2	3,5	2
Gravedad específica	0,97	1,06	1,06	1,06
Capacidad (m ³)	11,31	14,14	98,96	22,68
Temperatura °C	70	69	57	53
Altura de diseño (fluido) (m)	1,13	1,65	2,88	1,54
Nivel alto (m) altura de sobrellenado	1,36	1,82	3,19	1,77
Nivel normal (m)	0,68	0,91	1,60	0,89
Horas de operación	2	2	2	3
Material utilizado	ASTM A36	ASTM A36	AISI 304/A36	ASTM A36
Tipo de techo a usar	techo fijo	techo fijo	techo fijo	techo fijo
Pintura	no incluye	no incluye	no incluye	anticorrosiva
P _{sup} de diseño (Kpa) (g) ¹¹	12,91	19,01	33,27	18,45
P _{inf} de diseño (Kpa)	0	0	0	0
T _{sup.} de diseño (°C)	80	75	65	60
T _{inf.} de diseño (°C)	75	71	58	54
P _{sup} de diseño(g) (Kpa)	12,91	19,01	33,27	18,45

Fuente: Elaboración Propia

La especificación de los niveles de diseño de los tanques de almacenamiento basados en la norma API se muestra en la figura 3.10.

¹¹ Indica la presión hidrostática manométrica existente en el fondo del tanque.

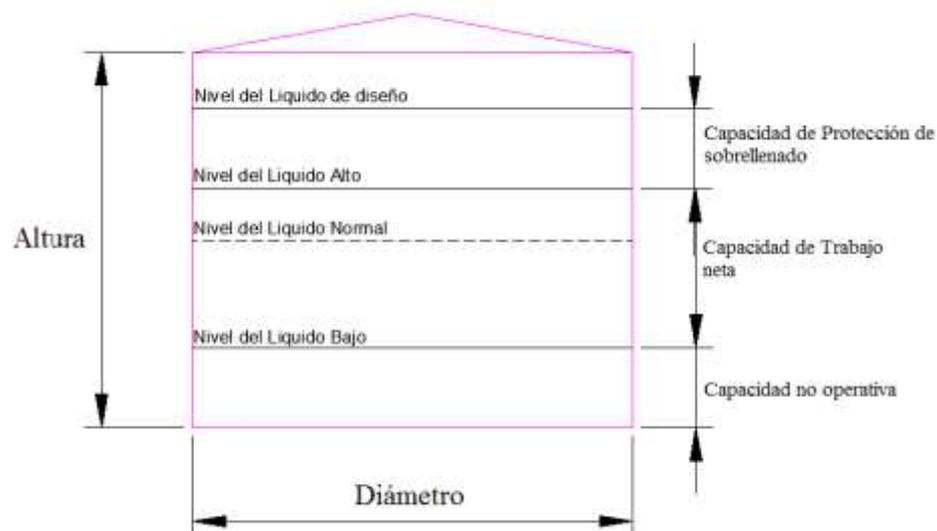


FIGURA 3.10 TANQUE DE ALMACENAMIENTO API

Fuente: (29), (26), Elaboración propia

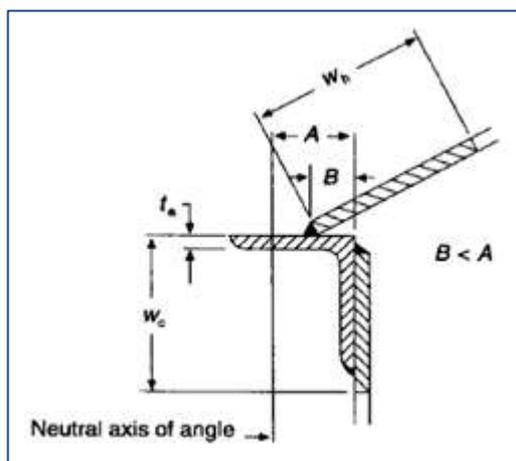
Una vez seleccionados los materiales, se indica en la tabla 20 las propiedades y los esfuerzos de diseño según la norma.

TABLA 20 ESFUERZOS DE DISEÑO PARA SISTEMA DE DOSIFICACIÓN, NORMA API 650

Material y propiedades	Agua caliente	Pre-tratamiento	Homogenización	Biofertilizante
Material usado	ASTM A36	ASTM A36	AISI 304	ASTM A36
Esfuerzo min de fluencia (MPa)	250	250	205	250
Esfuerzo min de tracción (MPa)	400	400	520	400
σ de diseño máx.	167	167	137	167
	160	160	208	160
σ diseño (prueba hidrostática)	188	188	154	188

Fuente: (26), (30), (31), Elaboración propia

La norma indica además que según el diámetro, se puede estimar el espesor mínimo de las planchas. el espesor de las planchas del cuerpo y fondo de todos los tanques será de 5 mm y es el espesor más bajo permitido por la norma. De igual forma, el ángulo de coronamiento mínimo es de 50.8 mm x 50.8 mm x 4.76 mm para todos los tanques. El techo será de tipo fijo con un espesor de entre 5 mm y 6.35 mm, más el espesor por corrosión (26). El techo estará fijado al cuerpo como se indica en el apéndice F del diseño de tanques para pequeñas presiones interna (figura 3.11).



**FIGURA 3.11 DETALLE DEL ÁNGULO DE COMPRESIÓN PARA
TECHO**

Fuente:(26)

Las cargas que se considerarán para la simulación son: peso de estructura, peso del material, y la presión hidrostática en las paredes.

Estos valores junto con los espesores indicados según la norma son teóricos y serán usados para una primera aproximación. Se analizará la deformación total, esfuerzos máximos de Von Mises y el factor de seguridad en ANSYS®.

Análisis de Tanque de Almacenamiento de Agua Caliente

El tanque está diseñado con planchas de acero ASTM A36. El cuerpo está formado con planchas de 5 mm de espesor y se encuentra unido al techo por medio de un ángulo de 50.8 mm x 50.8 mm x 4.76 mm. (Figura 3.12).

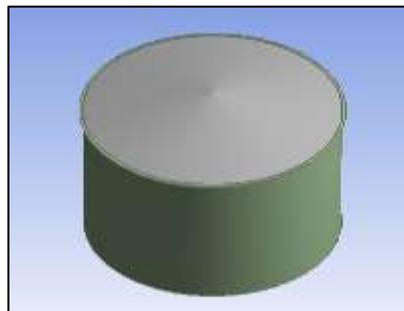


FIGURA 3.12 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA CALIENTE, DISEÑO DE FORMA

Fuente: Elaboración propia

La deformación total es de 1.1 mm y se ubica en la parte inferior, esto se muestra en la figura 3.13.

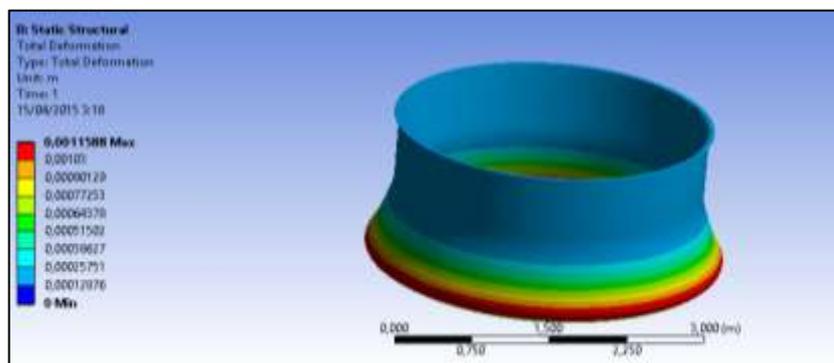


FIGURA 3.13 DEFORMACIÓN TOTAL, TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA CALIENTE

Fuente: Elaboración propia

El esfuerzo máximo de Von Mises se encuentra de igual manera en la parte de abajo de tanque, y es de 1.69×10^2 MPa, esto se muestra en la figura 3.14.

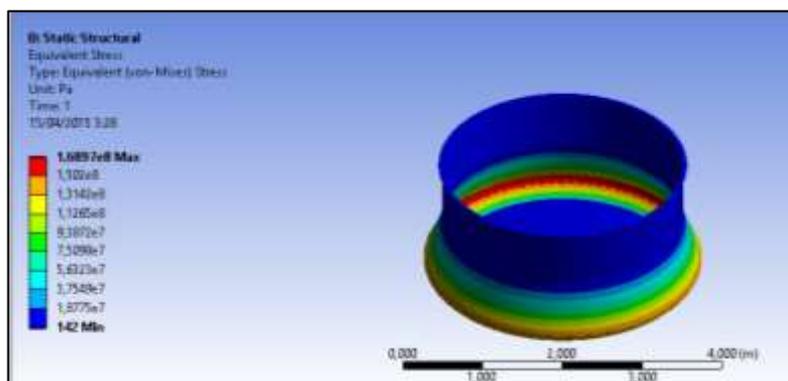


FIGURA 3.14 ESFUERZO EQUIVALENTE DE VON MISES, TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA CALIENTE

Fuente: Elaboración propia

El factor de seguridad es de 10. Este valor se considera demasiado alto, por lo tanto se debe reducir el espesor del material hasta obtener un factor de seguridad de 3, valor que se considera óptimo para el diseño. El espesor recomendado para el tanque es de 3 mm.

De la misma forma se analizan el tanque de homogenización y el tanque de biofertilizante, las especificaciones se muestran en la tabla 21.

TABLA 21 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS TANQUES DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Datos técnicos de tanques de sistema de homogenización			
	Calentamiento de agua	Homogenización	Biofertilizante
e de cuerpo (mm)	3	3	3
Deformación Total (mm)	0.00347	0.055	0.228
Esfuerzo equivalente de von mises (MPa)	0.084	1.56	4.12
Factor de seguridad	4	3	3

Fuente: Elaboración Propia

El tanque de pre-tratamiento es un poco diferente a los demás, su análisis se detalla a continuación.

Tanque de pre-tratamiento

El tanque está diseñado con planchas de acero ASTM A36. El cuerpo está formado con planchas de 3 mm y se encuentra unido al techo por medio de un ángulo de 50.8 mm x 50.8 mm x 4.76 mm al igual que en la parte inferior. El cono está hecho con una inclinación de 22° y está soportado por columnas de perfil C de material ASTM A36. (Figura 3.15).

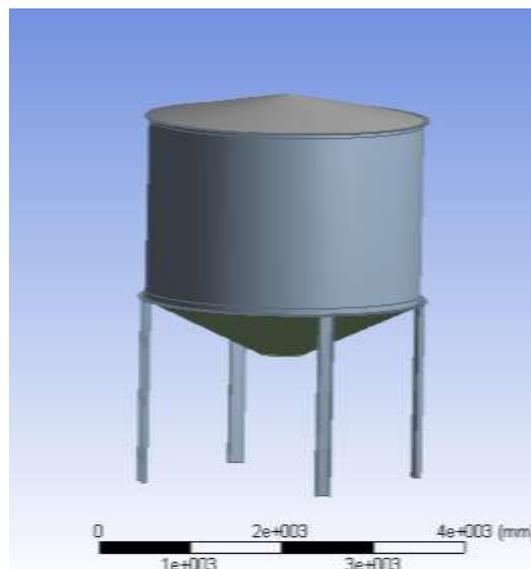


FIGURA 3.15 DISEÑO DE FORMA, TANQUE DE PRE-TRATAMIENTO

Fuente: Elaboración propia

La deformación total es de 3.1 mm y el factor de seguridad es de 4.

Los tanques del sistema de dosificación deben estar diseñados a temperaturas de entre 60 y 70°C, esto significa, que a los tanques debe añadirse una capa de aislante, que en este caso será de espuma de poliuretano y sellarse con una chapa de zinc. Esto se analizará más profundamente en la sección 3.4.

Diseño del tanque de biodigestión

Una vez establecidas las medidas generales requeridas en la sección 3.2 (ver figura 3.4), ahora se establecerá: el material, el espesor de las planchas, la cantidad de planchas, el soporte para el tanque, el techo, boquillas, entre otros.

Esto se realizará seleccionando un espesor inicial en el fondo de acuerdo a la norma, y posteriormente se comprobará mediante una simulación de los esfuerzos máximos, estabilidad y factor de seguridad según en el programa ANSYS®. Se observaran además los lugares de mayor concentración de esfuerzos, las máximas deformaciones y el punto crítico en donde se puede iniciar una falla, en base a este análisis, se podrá comprobar la fiabilidad del diseño.

Diseño de Forma

El tanque de digestión es básicamente un silo de almacenamiento, con una base y un techo de forma cónica y el cuerpo en forma de cilindro. El tanque está conformado por 3 anillos circulares de

diferente espesor (figura 3.16). El primer anillo se conforma con 3 hileras de planchas de espesor de 15 mm; el segundo anillo estará conformado por 5 hileras de espesor de 10 mm y el tercer anillo estará conformado por 5 hileras de plancha con un espesor de 6 mm. El tamaño de las planchas que se encuentran a la venta es de 2440 mm de largo y 1220 mm de ancho.

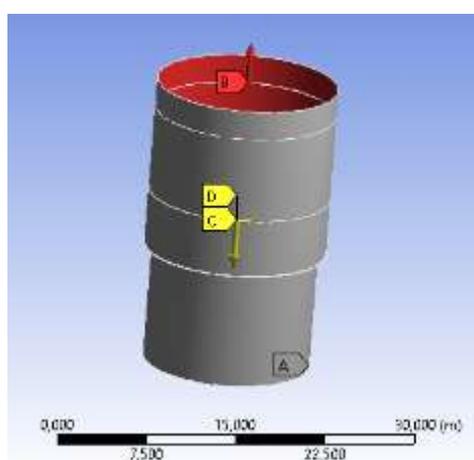


FIGURA 3.16 DISEÑO DE FORMA, TANQUE DE BIODIGESTIÓN
Fuente: Elaboración propia

Los posibles materiales a usar son acero inoxidable AISI 304 o ASTM A36. El tipo de reacción química que se lleva a cabo dentro del tanque, la inestabilidad del proceso con respecto a la presencia de impurezas y a la variación del pH durante el proceso, son características limitantes al momento de seleccionar material. Por tanto, en el primer caso, el acero inoxidable se considera el más

idóneo, sin embargo el precio y la escasez en cuanto a espesores en el mercado no se considera viable, mientras que con el ASTM A36, el problema no es tan crítico en cuanto a costos, sin embargo no se conoce el efecto que pueda tener la corrosión con las bacterias del proceso. Dependiendo del material que se seleccione, se debe considerar un espesor extra por corrosión.

La base que sostiene al tanque está conformada por plancha de acero estructural ASTM A36 de las mismas medidas y con un espesor de 15 mm. El techo es de forma cónica de tipo flotante externo con un ángulo de coronación de 50.8 mm x 50.8 mm x 6.35 mm y en la parte superior por seguridad se colocará una válvula de salida para alivio.

Debido a que el biogás es inflamable, se debe incluir un sistema de seguridad contra-explosión.

Las cargas que se consideran en el tanque son: peso de estructura, peso del material correspondiente, presión hidrostática en las paredes y carga sísmica. Para esta simulación se considerará el acero inoxidable AISI 304, aunque los resultados para ambos son similares ya que las características de los materiales no cambian significativamente.

Con estas indicaciones, se evalúan los resultados obtenidos en la simulación en ANSYS®.

Esfuerzo máximo: En el programa se evalúa el esfuerzo equivalente de Von-Mises. Se indica en la figura que el esfuerzo máximo es de 112.32 MPa, y se produce en partes puntuales ubicadas en la base del tanque y del cono. Esto se muestra en las figuras 3.17 y 3.18.

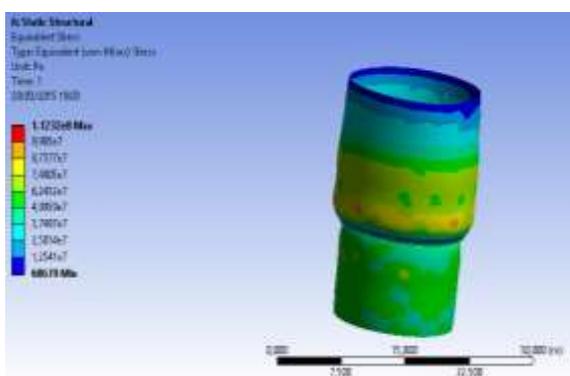


FIGURA 3.17 ESFUERZO MÁXIMO DE VON MISES, TANQUE DE BIODIGESTIÓN.

Fuente: Elaboración propia

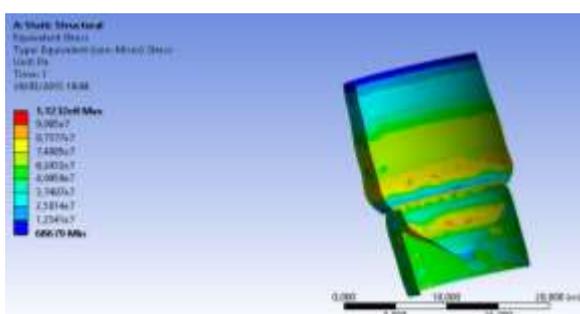


FIGURA 3.18 ESFUERZO MÁXIMO DE VON MISES CORTE TRANSVERSAL, TANQUE DE BIODIGESTIÓN.

Fuente: Elaboración propia

Deformación Total.- Se puede observar que la deformación máxima se da en la base del cono con un valor máximo de 8 mm, este valor está por debajo de lo permitido por la norma, Se puede observar además que en ningún lado de la estructura se producen deformaciones considerables. Figura 3.19 y 3.20.

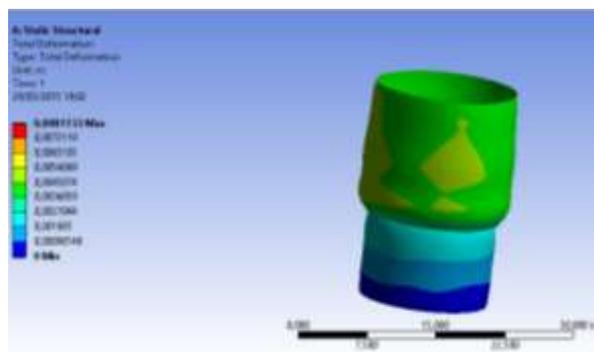


FIGURA 3.19 DEFORMACIÓN TOTAL, TANQUE DE BIODIGESTIÓN.

Fuente: Elaboración propia

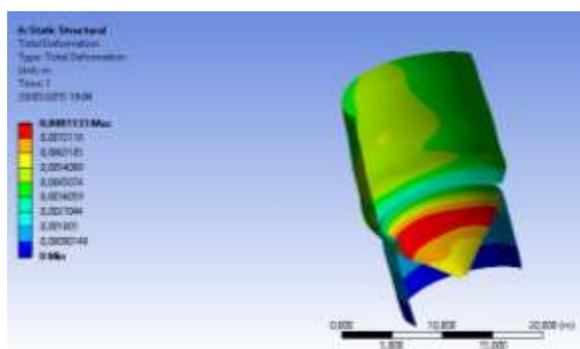


FIGURA 3.20 DEFORMACIÓN TOTAL CORTE TRANSVERSAL, TANQUE DE BIODIGESTIÓN.

Fuente: Elaboración propia

Factor de seguridad.- el factor de seguridad del tanque se encuentra en el orden de 2.2 y el valor crítico se localiza en la intersección entre la parte cilíndrica y el cono. El factor de seguridad calculado comprueba la fiabilidad del diseño. Esto se puede observar en las figuras 3.21 y 3.22.

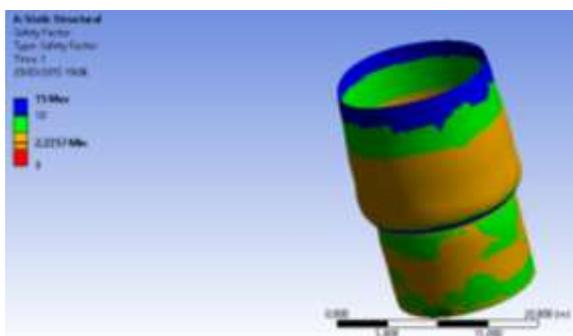


FIGURA 3.21 FACTOR DE SEGURIDAD, TANQUE DE BIODIGESTIÓN.

Fuente: Elaboración propia

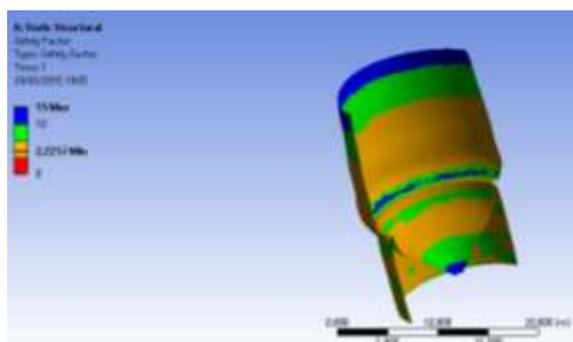


FIGURA 3.22 DEFORMACIÓN TOTAL, TANQUE DE BIODIGESTIÓN.

Fuente: Elaboración propia

El biodigestor está diseñado para una temperatura de operación de 55°C, esta temperatura no debe cambiar en lo posible debido a la supervivencia de las bacterias anaerobias, por lo tanto en este caso se colocará un enchaquetado de aislante térmico de poliuretano con una capa exterior de plancha de zinc de aproximadamente 2 mm. Las pérdidas en este tanque se analizarán con más detalle en la sección 3.4.

Soldadura en tanques

Se desea usar dos tipos de materiales en los tanques, estos son: ASTM A36 y el AISI 304 L austenítico.

Los tanques de acero ASTM A36 seleccionados de manera definitiva son 3: tanque de agua caliente, tanque de pre-tratamiento y el tanque de biofertilizante; mientras que el tanque de homogenización y el tanque de biodigestión pueden ser de ASTM A36 o de acero inoxidable AISI 304 junto con el ASTM A36¹². Para cualquiera de los casos, los electrodos y el proceso de soldadura seleccionado se muestran en la tabla 22.

¹² La decisión final de selección de material se evaluará en base al costo y la oportunidad de encontrar los materiales en el medio. Esto se realizará en la sección 3.6 al final del presente capítulo.

**TABLA 22 SOLDADURA, MATERIALES Y PROCESOS
SELECCIONADOS**

Proceso y material de electrodo de soldadura seleccionados			
Tipo de material	Proceso	Electrodo	Corriente
A36-A36	SMAW	E-6011	CC
AISI 304L-AISI 304L	SMAW	ER-308 L	CC
A36-AISI 304	SMAW ¹³	ER-309	CC

Fuente: (32), Elaboración propia

Las características de los electrodos de soldadura seleccionados se indican con más detalle en el apéndice 4.

La cantidad de soldadura a consumir corresponde al 3%¹⁴ del peso de toda la estructura, con esta relación, la cantidad de cada tipo de soldadura a utilizaría se muestra en la tabla 23.

TABLA 23 ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE SOLDADURA

Tipo de soldadura	Peso de la obra		Cantidad de soldadura	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
E- 6011	150 t	62.9 t	4500 kg	1887 kg
ER- L308	0	87.6 t	0	2630 kg
ER- 309	0	0.52 t	0	16 kg

Fuente: Elaboración propia

¹³ Para los procesos con acero inoxidable dependiendo de la calidad que se desee, se pueden seleccionar soldadura TIG o MIG, esto se representa en el costo de la obra.

¹⁴ Este valor es empírico referencial a nivel profesional.

Sistema de almacenamiento y limpieza del biogás

El diseño del gasómetro no es parte del análisis del presente proyecto, sin embargo es de importancia nombrarlo ya que es una de las partes claves del sistema de generación eléctrica.

En esta sección se indicarán las partes del sistema de tratamiento de biogás y las especificaciones del gasómetro, indicando: componentes, principio de funcionamiento y los materiales requeridos.

Componentes del sistema.

El sistema de almacenamiento y uso del biogás posee los siguientes componentes (figura 3.2).

1. Gasómetro para acumulación de biogás
2. Sistema de filtrado de biogás

Almacenamiento de biogás (gasómetro)

El biogás de baja presión procedente del digestor será almacenado en un gasómetro de doble membrana. Este equipo es utilizado para garantizar un flujo de gas constante desde el digestor hasta el equipo que será utilizado para el aprovechamiento energético, garantizando el suministro. De esta forma se evitan los cambios bruscos, ya sea depresiones o picos en la producción de biogás.

Los componentes del gasómetro son los siguientes (figura 3.23):

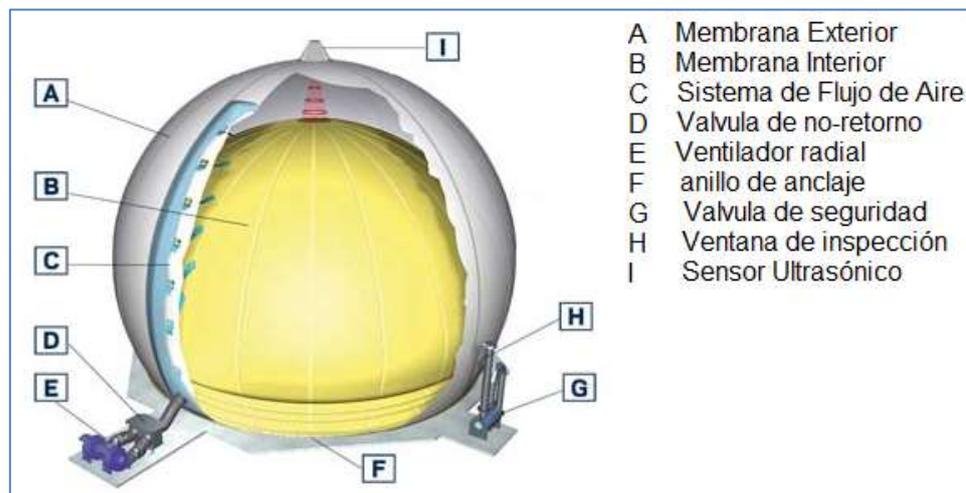


FIGURA 3.23 COMPONENTE DEL GASÓMETRO

Fuente: (33)

Funcionamiento

El tanque de biogás consta de una membrana exterior que forma el contorno visible, y una membrana interna que es donde se almacena el biogás (figura 27, ítems A y B). (33) (34).

Para regular la variación de entrada y salida del biogás, se proporciona un flujo de aire al espacio entre membranas, esto ayuda a mantener constante la presión del gas dentro del tanque, aparte que mantiene rígida la parte externa para evitar eventualidades climatológicas (figura 27, ítems C y E). El aire de apoyo inyectado se regula por medio de válvula de compuerta de aire (figura 27, ítem D).(33)

En vista que hay un espacio lleno de aire entre las dos membranas interior y exterior, y visto que hay metano en la campana interior, se

deberá colocar sensores de metano (sensores “anti-explosión”) para detectar la presencia de fugas que pudieran generar una mezcla explosiva de metano-aire en ese espacio confinado. Así mismo deberá haber anclaje continuo a tierra para evitar cargas eléctricas Finalmente existe un dispositivo que ayuda a medir las variaciones del volumen en la cámara interna, este dispositivo envía señales a la planta para la regulación del flujo (figura 27, ítem I).(33)

Las tuberías de suministro y descarga de biogás se encuentran ubicados por debajo de los cimientos de hormigón y sellados herméticamente a la membrana inferior de la instalación. Este sistema estará sujeto al suelo por medio de un anillo de anclaje (figura 27, ítem F).(33)

El material utilizado para las membranas es de polietileno de alta densidad (HDPE) con un tratamiento superficial de PVC y barniz. Por fuera (membrana externa) será pintada de color blanco para efectos reflectantes; por último, la resistencia a la temperatura oscila entre -30°C a 60°C. (33)



FIGURA 3.24 GASÓMETRO DE DOBLE MEMBRANA

Fuente: (33)

Proceso de filtrado

El proceso de filtrado de biogás se realiza mediante cloruro férrico y secado por medio de un intercambiador de calor de agua fría, esto ayudará a extraer el ácido sulfhídrico y el vapor de agua que se pudiera encontrar disuelto. El sistema no acepta estos tipos de componentes, por esta razón, este proceso es necesario ya que el biogás se debe encontrar en condiciones óptimas para el sistema de aprovechamiento energético.

Las concentraciones de estos gases son controladas por medio de un cromatógrafo de gases.

Sistema de transporte de masa

En este punto, se analizará el transporte de biomasa sólida o semisólida que se realiza a través de los tornillos sinfín. Se indicarán solo los requerimientos del sistema y se dará una breve descripción de los pasos a seguir para el diseño.

Existen 4 conexiones que se deben realizar por medio de tornillos sinfín (ver figura 3.25), estas son:

1. Entre la trituradora y el tanque de pre-tratamiento (Tramo 1-2).
2. Entre el tanque de la mezcla pre-tratamiento y el tanque de homogenización. (Tramo 2-3)
3. Entre el tanque de digestión y el tanque de homogenización. (Tramo 3-4)
4. Entre el tanque de digestión y el tanque de biofertilizante. (Tramo 4-5).

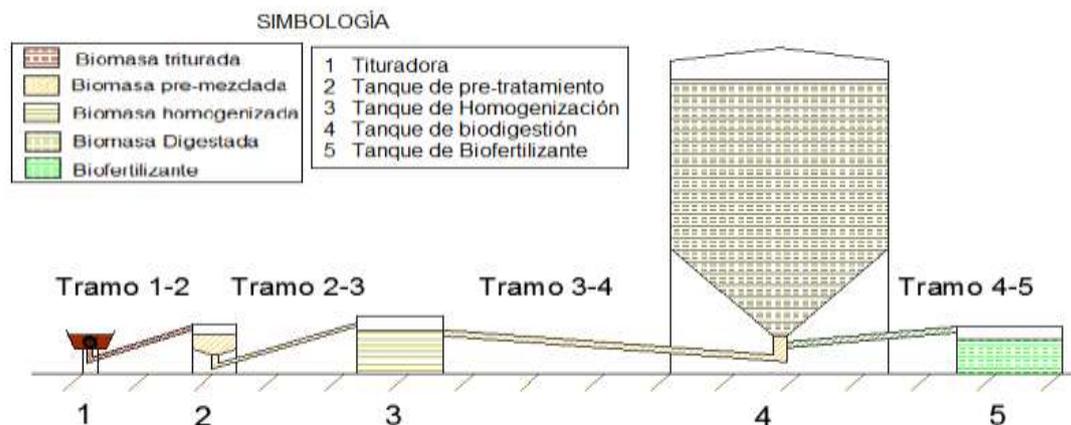


FIGURA 3.25 TRANSPORTE DE BIOMASA, SISTEMA DRANCO

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño del tornillo sinfín se debe especificar los requerimientos del sistema, estos parámetros son: flujo másico y el tipo de material que se transportará en cada una de las conexiones. Estos valores se muestran en la tabla 24.

TABLA 24 REQUERIMIENTOS INICIALES PARA DISEÑO DE TORNILLO SINFÍN.

Parámetros iniciales para diseño de tornillo sinfín		
Conexión	Flujo másico transportado	Tipo de masa
Tramo 1-2	0.62 kg/s	Residuos orgánicos triturados
Tramo 2-3	1.72 kg/s	Residuos orgánicos a 69° C, con 75% de humedad
Tramo 3-4	10.33 kg/s	Bio-digesto recirculado, 75% de humedad.
Tramo 4-5	1.72 kg/s	Bio-digesto efluente 75% de humedad.

Fuente: Elaboración Propia

Los parámetros de diseño se seleccionaron de acuerdo al tipo de material que se transporta y a la geometría de la instalación. Los valores resultantes se muestran en la tabla 25.

TABLA 25 PARÁMETROS INICIALES PARA EL CÁLCULO DE TORNILLO SINFIN

Parámetro	TRAMOS			
	1-2	2-3	3-4	4-5
Tipo de carga λ	0.125	0.25	0.25	0.25
Paso del tornillo (P) (m)	0.6 \emptyset	0.6 \emptyset	0.6 \emptyset	0.6 \emptyset
Tamaño de partícula a transportar T_p (mm)	40	40	40	40
\emptyset De tornillo (m)	6 T_p	6 T_p	10 T_p	10 T_p
Velocidad recomendada (rpm)	70	100	155	130
Inclinación de canalón	20°	20°	20°	20°
Coefficiente de inclinación	0.6	0.6	0.6	0.6
Longitud de transporte (m)	9	12	24	13
Densidad (t/m ³)	1,2	1,06	1,06	1,06
Coef de resistencia de material ¹⁵	4	4	4	4

Fuente: Elaboración Propia

Para el diseño sinfín se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$s = \lambda \frac{\pi \emptyset^2}{4} \quad [m^2] \quad \text{Ecuación 3.8}$$

$$v = \frac{t \cdot n}{60} \quad [m/s] \quad \text{Ecuación 3.9}$$

$$Q = 3600 * s * v * \rho * \kappa \quad [t/hr] \quad \text{Ecuación 3.10}$$

¹⁵ Este valor es obtenido de forma empírica. Por motivos de cálculo, se ha tomado como referencia el valor del cemento. Más detalle de estos parámetros se encuentra en el apéndice 6.

$$P = P_H + P_N + P_{St} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$P_H = c_0 \frac{QL}{367} [kW] \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$P_N = \frac{\phi L}{20} [kW] \quad \text{Ecuación 3.13}$$

$$P_{St} = \frac{QH}{367} [kW] \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Según lo anterior, las velocidades recomendadas y potencia requerida por el sistema de tornillo sinfín para cada caso se muestra en la tabla 26.

TABLA 26 RESULTADOS FINALES, DISEÑO DE TORNILLO SINFÍN

Resultados obtenidos	TRAMOS			
	1-2	2-3	3-4	4-5
Tipo de tornillo sinfín	helicoidal	helicoidal	helicoidal	helicoidal
Área de relleno del canalón (m ²) s	0,0057	0,0113	0,0314	0,0314
Diámetro de tornillo (m)	0,24	0,24	0,4	0,4
Paso del tornillo (m)	0,144	0,144	0,24	0,24
Velocidad de desplazamiento (m/s)	0,168	0,24	0,62	0,52
Flujo de material transportado	2,46	6,21	44,60	37,40
Potencia de desplazamiento del material (kW)	0.24	0.81	11.67	5.30
Potencia de accionamiento en vacío (kW)	0.108	0.144	0.48	0.26
Potencia de inclinación (kW)	0.02	0.07	0.4	0.31
Potencia de accionamiento TOTAL (kW)	0.37	1.02	12.51	5.87

Fuente: Elaboración propia

Para el sistema de transporte de biomasa por medio de tornillos sinfín, se requiere una potencia total de 20 kW. El consumo energético del sistema es de 310 kWh que es la energía nominal requerida en la operación.

Al utilizar este sistema hay que tomar en cuenta la gran área de contacto que existe entre la biomasa y el tornillo sinfín. Este contacto es una desventaja importante en el sistema ya que puede contaminar el material, por lo tanto se deben seleccionar los materiales adecuados principalmente en los tramos 2-3 y 3-4, ya que es la biomasa que se utiliza para el proceso de biodigestión. Se pueden proponer materiales de características inoxidable.

3.4 Análisis hídrico del sistema.

En esta sección se analizará el sistema de transporte del material desde el tanque homogenizador hasta el biodigestor y entre el tanque de almacenamiento de agua al tanque de pre-tratamiento. Para cada caso, se seleccionará el tipo de tubería y se determinará: la velocidad de flujo, el régimen, las pérdidas, la caída de presión y por último la potencia requerida para el funcionamiento del sistema. Una vez analizados estos puntos, se seleccionarán los tipos de bombas a utilizar en cada caso.

Selección de tubería y Velocidad de flujo

En el transporte de la biomasa triturada al biodigestor se requiere una tubería en la que no existan problemas de corrosión y que soporte un rango de temperatura superior a 55°C, mientras que en el transporte agua, se debe seleccionar una tubería que pueda soportar temperaturas de entre 70 y 75°C. Estas tuberías deberán estar correctamente aisladas para evitar pérdidas de energía.

Para iniciar el análisis se deben especificar algunos parámetros referentes a características de fluido, condiciones de flujo y propiedades del material de la tubería seleccionada.

Con respecto a lo anterior, en la tabla 27 se indica las características del fluido y en tabla 28 se indican las propiedades de la tubería, estos parámetros serán importantes para la determinación de las condiciones de flujo y la potencia requerida.

En ambas tablas se especifica caso 1 y los tramos, estos puntos son los que analiza el bombeo de la biomasa triturada mientras que el caso 2 analiza el suministro de agua caliente para el pre-tratamiento como se muestra en la figura 3.26 y 3.27.

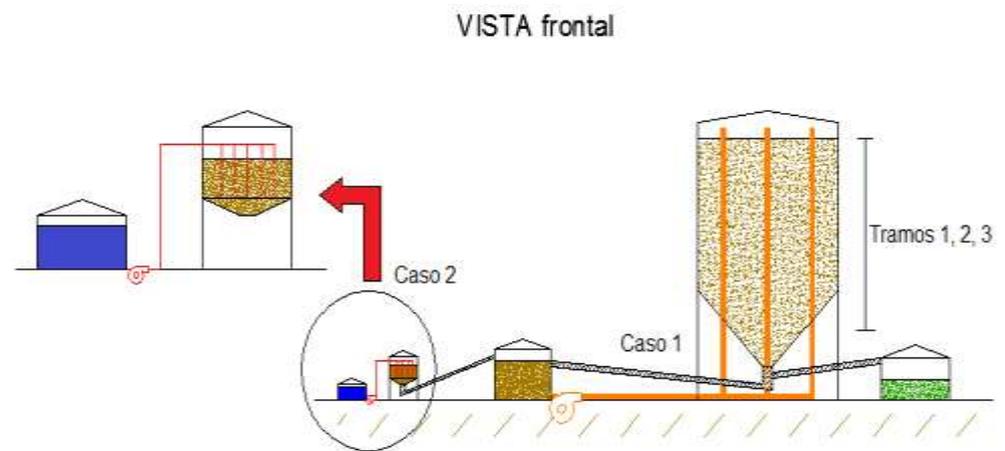


FIGURA 3.26 SISTEMA DE BOMBEO, VISTA FRONTAL, CASO 1 Y 2

Fuente: Elaboración propia

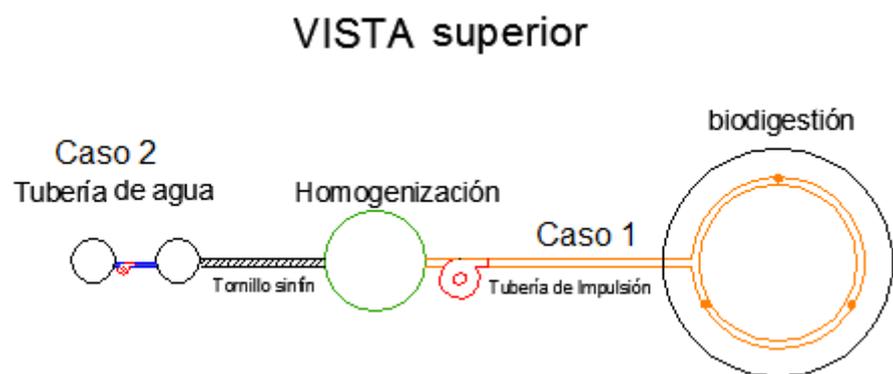


FIGURA 3.27 SISTEMA DE BOMBEO, VISTA SUPERIOR, CASO 1 Y 2

Fuente: Elaboración propia

TABLA 27 CARACTERÍSTICAS DE FLUIDO DE TRABAJO

Características de fluido		
Parámetro	Caso 1	Caso 2
Densidad (t/m ³)	1.06	0.97
viscosidad (Pa-s) ¹⁶	1	4.02 x10 ⁻⁴
pH	6.5 - 7.5	7 (neutro)
Temperatura (°C)	55	70

Fuente: (8), (35), (3)

En el primer caso se puede seleccionar una tubería de acero inoxidable ASTM A 409 tipo 304L para efectos de corrosión, el material de soldadura sería el E308L, se puede seleccionar además ASTM A53 que es un tubo de acero galvanizado y cuyo material de soldadura puede ser 6010 o 7018; la selección de este material será analizado con más detalle en la sección 3.6. En el segundo caso, la tubería utilizada será de polipropileno. A continuación en la tabla 28 se indican los detalles de ambos casos.

TABLA 28 PROPIEDADES DE TUBERÍA SELECCIONADA, CASO 1 Y 2

Selección de tubería y velocidad de flujo		
Parámetro	Caso 1	Caso 2
Material de tubería	ASTM A409/A53	Polipropileno
diámetro nominal de tubería (mm)	609.6	33.7
diámetro nominal de tubería (in)	24	1
No. de cedula	80	10
espesor (mm)	30.96	3.7
Longitud (m)	47	10
presión de operación	4530	14
factor de fricción (nuevo) (mm)	0.05	0.02
factor de fricción (usado) (mm)	0.25	0.1

Fuente: (36),(37), (38), Elaboración propia

¹⁶ Este parámetro no se encuentra establecido, sin embargo según la literatura indica que se puede aproximar a 1 Pa s.

En los 4 tramos dentro del biodigestor, se tienen los siguientes datos mostrados en la tabla 29.

**TABLA 29 PROPIEDADES DE TUBERÍA SELECCIONADA
DATOS PARA TRAMOS 2, 3, 4**

Parámetros	
Material de tubería	A409 ¹⁷ /A53
diámetro nominal de tubería (mm)	406.4
diámetro nominal de tubería (in)	16
No. de cedula	80
espesor (mm)	21.44
Longitud (m)	24.5
factor de fricción (nuevo) (mm)	0.05
factor de fricción (usado) (mm)	0.25

Fuente: (36), (38) Elaboración propia

La velocidad de flujo en tubería se calcula por medio de la siguiente expresión (35):

$$v = \frac{q}{A} = 1273.2 * 10^3 \frac{q}{d^2} [m/s]$$

Donde

q: m³/s en las condiciones de flujo

d: diámetro interior de la tubería en mm

El diámetro nominal corresponde al diámetro exterior en tuberías cuyo diámetro es igual o mayor a 12 in (30.5 cm). En tuberías de menor diámetro, sus dimensiones precisas están dadas en tablas

¹⁷ El tipo de material no influye en los cálculos de la tubería ya que el coeficiente de fricción depende únicamente del número de Reynolds para flujos laminares.

normalizadas (39). Los datos utilizados y los resultados se muestran en la tabla 30.

TABLA 30 CONDICIONES DE FLUJO, CASO 1 Y 2

Parámetros	Caso 1	Caso 2
diámetro interno (mm)	578.64	30
caudal (m ³ /s)	0.0113	0.0011
velocidad (m/s)	0.042	1.57

Fuente: Elaboración propia

Para los tramos de tubería de recirculación dentro del digestor, los resultados se muestran en la tabla 31.

TABLA 31 CONDICIONES DE FLUJO, TRAMOS EN EL INTERIOR DE DIGESTOR

Parámetros	Resultados
diámetro interno (mm)	384.96
caudal (m ³ /s)	0.00283
velocidad (m/s) tramo 1, 2, 3, 4	0.0236

Fuente: Elaboración propia

A continuación se calcula el número de Reynolds para determinar el régimen del sistema. (35)

$$Re = \frac{dv\rho}{\mu}$$

Si $Re < 2\,000$ el flujo es laminar, si $Re > 4\,000$ el flujo es turbulento, y si $2\,000 < Re < 4\,000$ (35) el flujo se encuentra en zona crítica

donde el régimen es impredecible, es decir o bien turbulento, laminar o transición.

Según los datos iniciales indicados en las tablas anteriores, el Re para la tubería de agua es de 114 000, la tubería principal de transporte de biomasa es de 26, y en los tramos es de 10. Estos resultados indican que la tubería que transporta la biomasa tendrá un flujo laminar, mientras que la tubería de agua tendrá un flujo turbulento. En base a estos resultados, se determinan las pérdidas, la caída de presión y la potencia requerida para cada caso.

Determinación de los cabezales de pérdidas y determinación de la potencia requerida

Para determinar la potencia de la bomba se requiere aplicar la ley de la conservación de la energía. En este caso se utilizará dicha expresión para evaluar la energía que requiere el sistema para contrarrestar los cambios en la tubería por presión, fricción, cambios de nivel y velocidad.

La ecuación de la energía para el caso de flujo estable en tuberías de un solo ramal, se define de la siguiente forma:

$$E_i = E_f + h_L$$

Las ecuaciones utilizadas para pérdidas de energía en tuberías en cada caso, se muestran en la tabla 32:

TABLA 32 EQUIVALENCIA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN TUBERÍAS DE DIFERENTES FLUJOS

Formula/Parámetros	Caso 1: transporte de biomasa	Caso 2: Tubería de agua
Tipo de flujo	Laminar	Turbulento
Factor de fricción	$f = \frac{64}{Re} = \frac{64\mu}{dv\rho}$	$f = 0.02 - 0.1$

Fuente:(35)

Para el caso 1 la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$\dot{m}_1 H_1 + Pot = (\dot{m}_1 H_2 + \dot{m}_1 h_{L1}) + \left(\frac{1}{4}\dot{m}_1 H_{R1} + \frac{1}{4}\dot{m}_1 h_{R1}\right) + \left(\frac{1}{4}\dot{m}_1 H_{R2} + \frac{1}{4}\dot{m}_1 h_{R2}\right)$$

$$+ \left(\frac{1}{4}\dot{m}_1 H_{R3} + \frac{1}{4}\dot{m}_1 h_{R3}\right) + \left(\frac{1}{4}\dot{m}_1 H_{R4} + \frac{1}{4}\dot{m}_1 h_{R4}\right)$$

$$\dot{m}_1 H_1 + Pot = (\dot{m}_1 H_2 + \dot{m}_1 h_{L1}) + 4 \left(\frac{1}{4}\dot{m}_1 H_{R1} + \frac{1}{4}\dot{m}_1 h_{R1}\right)$$

$$\dot{m}_1 H_1 + Pot = (\dot{m}_1 H_2 + \dot{m}_1 h_{L1}) + \dot{m}_1 (H_{R1} + h_{R1})$$

$$Pot = \dot{m}_1 (H_2 + h_{L1}) + \dot{m}_1 (H_R + h_R) - \dot{m}_1 H_1$$

$$Pot = g\dot{m}_1 (H_2 + h_{L1} + H_R + h_R - H_1) \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Dónde:

$$H_1 = Z_1 + \frac{P_{atm}}{\rho_1 g} ; H_2 = \frac{v_2^2}{2g} ; H_R = Z_R + \frac{P_{atm} + P^{18}_{diseño}}{\rho_1 g} + \frac{v_R^2}{2g}$$

$$h_{L1} = 3263 \frac{L_1 v_1 \mu}{d^2_{1\rho}} ; h_R = 3263 \frac{L_R v_R \mu}{d^2_{R\rho}} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

Reemplazando:

$$Pot = \dot{m}_1 \left(\frac{v_2^2}{2g} + 3263 \frac{L_1 v_1 \mu}{d^2_{1\rho}} + Z_R + \frac{P_{atm} + P_{diseño}}{\rho g} + \frac{v_R^2}{2g} \right. \\ \left. + 3263 \frac{L_R v_R \mu}{d^2_{R\rho}} - Z_1 - \frac{P_{atm}}{\rho_1 g} \right)$$

$$Pot = \dot{m}_1 g \left(\frac{v_2^2 + v_R^2}{2g} + (Z_R - Z_1) + \frac{P_{diseño}}{\rho g} + 3263 \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{L_1 v_1}{d^2_{1\rho}} + \frac{L_R v_R}{d^2_{R\rho}} \right) \right)$$

Ecuación 3.18

Mientras que para el caso 2 la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$Z_1 + H_b = Z_2 + \frac{v_1^2}{2g} + h_L \quad \text{Ecuación 3.19}$$

$$H_b = (Z_2 - Z_1) + \frac{v_2^2}{2g} + f_L \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v_2^2}{2g} \right)$$

$$Pot = \dot{m} g \left[(Z_2 - Z_1) + \frac{v_2^2}{2g} + f_L \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) \right] \quad \text{Ecuación 3.20}$$

En la tabla 33 se muestran los resultados obtenidos para cada caso.

¹⁸ La presión de diseño corresponde la presión interna con el cual el tanque ha sido diseñado, en este caso es 2.5 psi.

**TABLA 33 PÉRDIDA DE ENERGÍA EN EL SISTEMA Y
POTENCIA DE LA BOMBA**

Parámetros	Caso 1: transporte de biomasa	Caso 2: Tubería de agua
Tipo de flujo	Laminar	Turbulento
P_p de fricción (W)	18.23	48.37
P_p de altura (W)	2892.21	54.21
P_p de velocidad (W)	0.01474	1.45
P_p de presión (W)	195.27	0
P_i (W)	117.6	10.83
P_R (KW)	2.987	0.104
Eficiencia de la bomba	40%	60%
Potencia real de la bomba (Hp)	10	0.25

Fuente: (35), (40), Elaboración propia

Las curvas de operación se muestran en las figuras 3.28 y 3.29

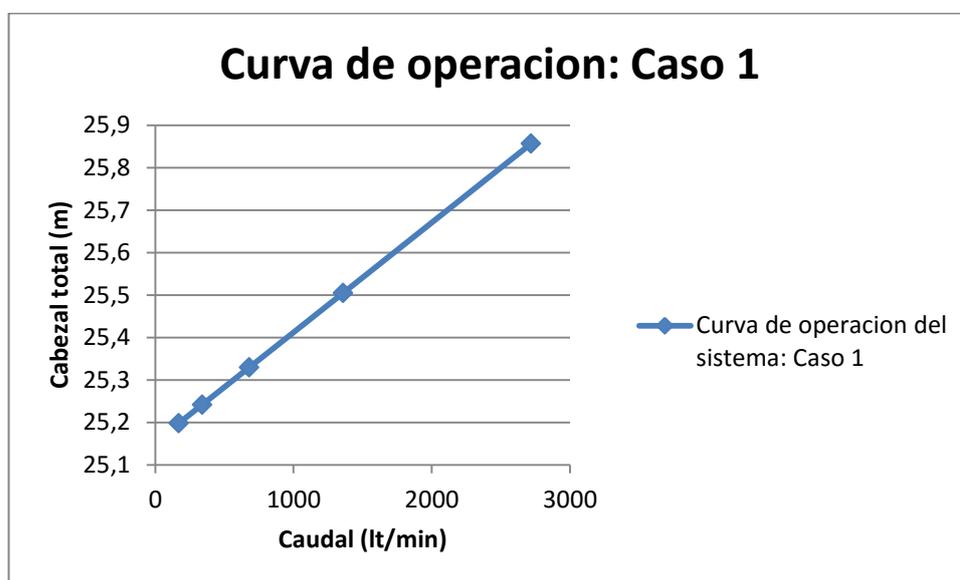


FIGURA 3.28 CURVA DE OPERACIÓN, CASO 1

Fuente: Elaboración propia

Analizando la gráfica, se puede observar que la caída de presión causada por la velocidad, presión y la fricción es muy pequeña en comparación con la caída de presión debida a la altura, por esa razón, la gráfica luce casi lineal.

Por otro lado, debido a la gran cantidad de sólidos, se requiere una bomba de tipo pistón. La potencia necesaria es de aproximadamente 10 HP con una eficiencia de 40%, sin embargo este valor es solo representativo y está en función de las características del material de trabajo. En capítulos anteriores, se indicó que el triturador de sólidos debe desmenuzar la masa hasta un tamaño máximo de 40 mm, este tamaño es relativamente grande y compromete el funcionamiento de la bomba.

Visto que la bomba propuesta utiliza pistones para entregar energía al fluido, y funciona mediante un sistema de apertura y cierre de válvula, al contener sólidos de tamaño considerable, estas válvulas tienden a tupirse y puede no cerrar de manera correcta, por lo tanto pierde presión y por ende capacidad de bombeo, disminuyendo la eficiencia.

En conclusión, los sólidos grandes interfieren en el funcionamiento de la bomba, requiriendo demanda más alta de energía, conexiones más flexibles que amortigüen el impacto con los sólidos y por ende materiales que soporten la abrasión.

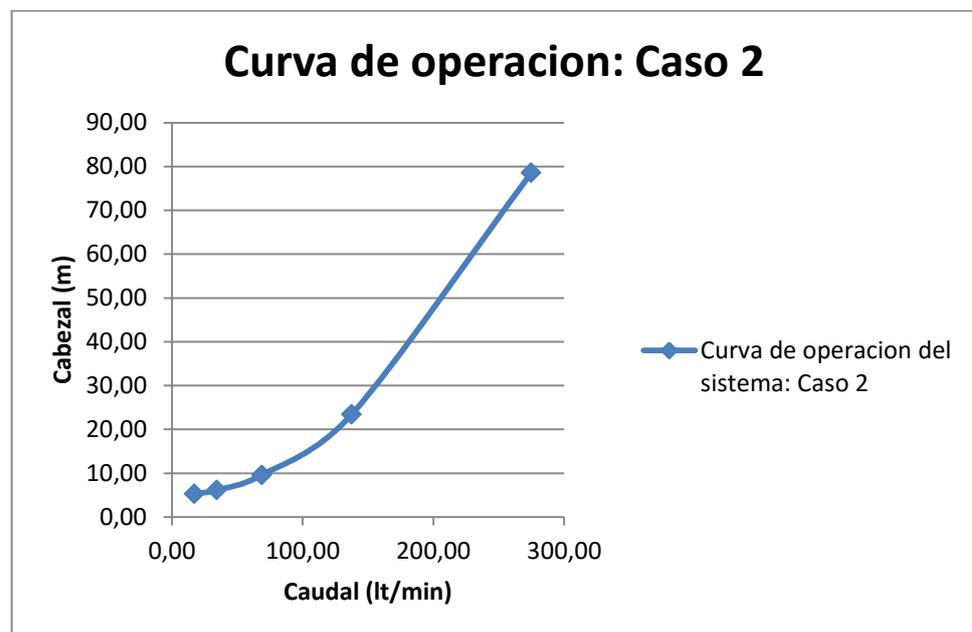


FIGURA 3.29 CURVA DE OPERACIÓN, CASO 2

Fuente: Elaboración propia

3.5 Análisis térmico del sistema.

El análisis térmico del sistema comprende el cálculo de la energía requerida para el funcionamiento del sistema, determinación de la cantidad de energía disponible, las pérdidas de energía, determinación de los aislamientos requeridos, y determinación de

los equipos necesarios para el aprovechamiento de la energía, como calderas y motores de combustión interna.

A continuación se analizarán los siguientes aspectos:

1. Determinación pérdidas en el sistema y aislamientos requeridos
2. Energía requerida para calentamiento de sustrato
3. Energía disponible
4. Equipos auxiliares (calderas y motores de combustión interna)

Determinación de pérdidas térmicas en el sistema y aislamientos requeridos

Primero se planteará el cálculo para establecer las pérdidas en el biodigestor, a partir de esto, se obtendrán conclusiones válidas para calcular de forma directa las pérdidas en los demás tanques.

Pérdidas térmicas en el digestor

Como se indicó en la sección 3.2 y 3.3, el digestor tiene 15 m diámetro x 26 m de altura; y está conformado por capas de: acero inoxidable, aislante de poliuretano y una plancha fina de zinc. Esta configuración se puede observar en las figuras 3.30 y 3.31.

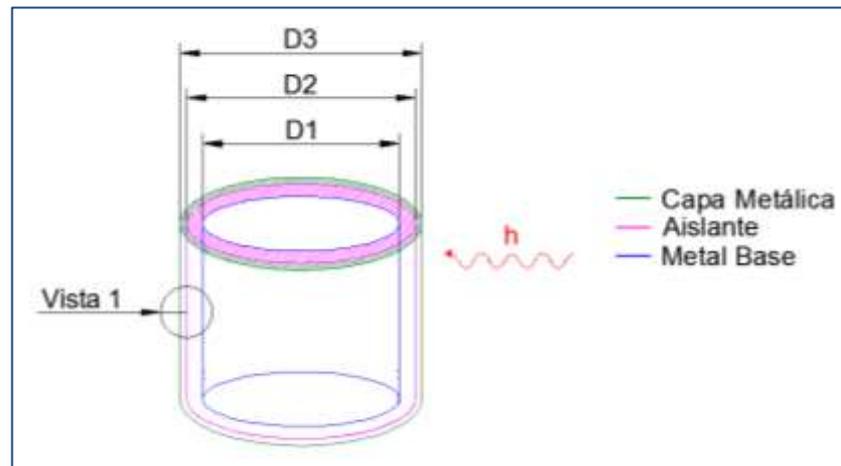


FIGURA 3.30 ESQUEMA DE LAS CAPAS DE AISLAMIENTO EN TANQUES

Fuente: Elaboración Propia

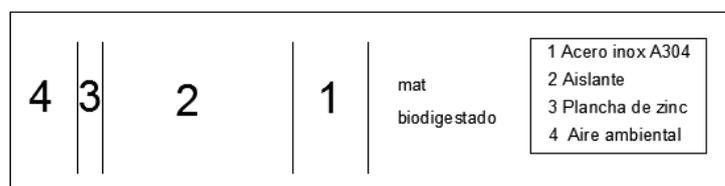


FIGURA 3.31 DETALLE DE LAS CAPAS DE AISLAMIENTO DE TANQUES (VISTA 1)

Fuente: Elaboración propia

Los datos a utilizar se muestran en la tabla 34.

TABLA 34 DATOS INICIALES PARA CÁLCULO TÉRMICO

Datos iniciales	
L_{acero}	6 mm
$L_{aislante}$	150 mm
L_{zinc}	2 mm
k_{acero}	16.3 W/mK
$k_{aislante}$	0.023 W/mK
k_{zinc}	112.2 W/mK
T_o	55 °C ¹⁹
T_f	22 °C
h_{aconv}	10 W/m ² K

Fuente: (41), Elaboración propia

Para este cálculo, se considerará transferencia de calor en pared plana.

$$U_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{L_{acero}}{k_{acero}}\right) + \left(\frac{L_{aislante}}{k_{aislante}}\right) + \left(\frac{L_{zinc}}{k_{zinc}}\right) + \left(\frac{1}{h_T}\right)} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Obteniendo el coeficiente equivalente de convección h_T :

$$h_T = h_{aconv} + h_{equiv rad} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

$$h_{equiv rad} * A * (T_o - T_a) = \sigma * \epsilon * FF * A * (T_o^4 - T_a^4)$$

$$\text{Ecuación 3.23}$$

En este punto, se asumirá una temperatura de la pared expuesta al ambiente de 35°C, luego este valor se iterara hasta llegar al valor

¹⁹ Se evalúa el caso crítico en donde no existe resistencia convectiva (h_i) en la parte interior del tanque, y la temperatura es la misma que el líquido que lo contiene.

correcto de la temperatura. Siguiendo con el cálculo, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & h_{equiv\ rad} * A * (35^{\circ}C - 22^{\circ}C) \\
 & = 5.66 \times 10^{-3} * 0.6 * 1 * A \\
 & \quad * ((35 + 273)^4 - (22 + 273)^4) \\
 h_{equiv\ rad} & = \frac{5.66 \times 10^{-8} * 0.6 * 1 * ((308)^4 - (295)^4)}{(35^{\circ}C - 22^{\circ}C)} \\
 & = 3.72 \ [W/m^2k] \\
 h_T & = 3.72 + 10 = 13.72 \ [W/m^2k]
 \end{aligned}$$

Determinando el coeficiente global, se tiene:

$$\begin{aligned}
 U_T & = \frac{1}{\left(\frac{6 \times 10^{-3}}{16.3}\right) + \left(\frac{150 \times 10^{-3}}{0.023}\right) + \left(\frac{2 \times 10^{-3}}{112.2}\right) + \left(\frac{1}{13.72}\right)} \\
 & = 0.1516 \ [W/m^2k]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_p & = U_t * A * (T_o - T_f) = 0.15 * (659.73) * (55 - 22) = 3\ 266 \left[\frac{J}{s}\right] \\
 & = 282.18 \left[\frac{MJ}{d}\right]
 \end{aligned}$$

Realizando la primera iteración obtenemos T_s :

$$Q = h_T * A * (T_s - T_\infty) \quad \text{Ecuación 3.24}$$

$$T_s = \frac{Q}{h_t * A} + T_\infty = \frac{3\,266}{13.72 * 659.73} + 22 = 22.36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con este valor se realiza la primera iteración, en donde se obtiene un nuevo $h_{equiv\ rad}$, h_t , Q_p y una T_s . Los valores resultantes de dos iteraciones se muestran en la tabla 35.

TABLA 35 TEMPERATURA SUPERFICIAL Y PÉRDIDA DE ENERGÍA

Determinación de T_{sup} y pérdida total de energía		
T_s ($^\circ\text{C}$)	22.36	22.37
$h_{equiv\ rad}$ ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	3.49	3.4939
U_T ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	0.15165	0.15160
Q_p (J/s)	3300.55	3 300.56
T_s ($^\circ\text{C}$) nuevo	22.37	22.37 (converge)

Fuente: Elaboración propia

Realizando una segunda iteración, se obtiene una $T_s = 22.37^\circ\text{C}$ y una pérdida de calor de $Q_p = 3300.56 \text{ J/s}$ que representan aproximadamente **285.17 MJ/d**.

Con respecto a este cálculo, se concluye que:

- El caso más crítico se produce cuando la resistencia térmica en el interior del tanque es la menor, lo que implica que la temperatura de la pared interior es la misma que la del fluido (55°C). Según esto, se puede considerar que la resistencia térmica por la convección en el interior es muy pequeña comparada con los otros términos, y por tanto puede despreciarse. Algo parecido sucede con la resistencia de las paredes metálicas, en donde se observa que la suma de resistencias es $0.39 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$.
- En el caso de la convección externa, se puede demostrar que para vientos relativamente altos (hasta 10 m/s) y tomando en cuenta las pérdidas por radiación hacia el exterior, el coeficiente combinado convección-radiación externa se encuentra en un rango de entre 12 y 14 ($\text{W/m}^2\text{K}$). Esto significa que en promedio el coeficiente convectivo equivalente de radiación se encuentra entre 2 a 4 ($\text{W/m}^2\text{K}$).
- Por tanto y como una primera aproximación, si se toma una capa de aislante de poliuretano de 0.15 m de espesor con conductividad térmica de 0.023 (W/mK) para el biodigestor, la

resistencia térmica sería de $6.5 \text{ m}^2\text{k/W}$. En otras palabras, la única resistencia que es predominante e influye directamente en el sistema es la que oponga el aislante. (Véase figura 3.30)

- En la ecuación de resistencia térmica solo se tomará en cuenta el aislante y la convección equivalente externa.

En base a esto, se procederá a establecer las relaciones que se usarán para determinar las pérdidas de calor en los tanques del sistema de dosificación.

Pérdidas de calor en el sistema de dosificación

La ecuación de resistencia térmica que se usará en esta sección es la siguiente:

$$U_T = \frac{1}{\left(\frac{L_{\text{aislante}}}{k_{\text{aislante}}}\right) + \left(\frac{1}{h_T}\right)} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

Además de esta ecuación, se requiere conocer la temperatura interna de cada tanque del sistema, para esto se debe realizar el equilibrio térmico en cada uno de los tanques así como las pérdidas en la tubería, para lo cual se utilizarán las siguientes formulas:

$$m_1 C_{p1} T_{i1} + m_2 C_{p2} T_{i2} = m_m C_{pm} T_m$$

$$\dot{q}_r = \frac{(T_i - T_e) * A}{\frac{r_i}{k_c} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{1}{h}} \quad [J/s] \quad \text{Ecuación 3.26}$$

Realizando de igual forma los cálculos que en el caso anterior, en la tabla 36 y 37 se muestran los resultados de las temperaturas internas y las pérdidas de calor que se producen en el sistema de transporte de biomasa (tubería principal y tornillos sinfín), así como en los tanques que componen el sistema de dosificación.

TABLA 36 TEMPERATURAS INTERNAS Y PÉRDIDA DE CALOR EN SISTEMA DE TRANSPORTE DE BIOMASA

Parámetro	Tubería	Tornillos sinfín	
		1er Tramo	2do Tramo
L de aislante [mm]	150	150	150
Tipo de aislante	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
h_t [W/m ² K]	13.5	13.5	13.5
T_{interior} [°C]	55		
T_{ambiente} [°C]	22	22	22
L de la tubería [m]	45	24	9
r exterior [mm]	762	750	590
r interior [mm]	625	600	440
q_p [MJ/d]	42.56	21.87	7.53

Fuente: Elaboración propia

TABLA 37 TEMPERATURAS INTERNAS Y PÉRDIDAS DE CALOR EN TANQUES DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Parámetro	Tanques		
	Agua pre-tratamiento	Pre-tratamiento	Homogenización
L de aislante (mm)	150	150	150
Tipo de aislante	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
h_t (W/m ² K)	13.5	13.5	13.5
$T_{int \text{ tanque}}$ (°C)	73.38	62.01	55.1
$T_{ambiente}$ (°C)	22	22	22
$T_{ext \text{ tanque}}$ (°C)	23.0	23.0	22.5
área (m ²)	15	18.85	65.97
q_p (MJ/d)	10.21	9.88	28.62

Fuente: Elaboración propia

La cantidad total de energía perdida se muestra en la tabla 38.

TABLA 38 PÉRDIDAS Y REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA TOTALES EN EL SISTEMA DE DIGESTIÓN

Tanque	Calor perdido (MJ/d)
Biodigestión	285.17
Agua de pre-tratamiento	10.21
Pre-tratamiento	9.88
Homogenización	28.62
Tubería de conexión	42.56
Tornillo sinfín No.1	21.87
Tornillo sinfín No.2	7.53
Calor requerido	20624.44
TOTAL	21029.65

Fuente: Elaboración propia

El calor total perdido es de aproximadamente 21 030 MJ/d o 1817 J/s. Para mantener la temperatura deseada en el digestor, este calor será la energía que deberá ser suministrada al sistema.

Energía para calentamiento

El calentamiento del sustrato se realizará por medio de inyección de vapor directamente al agua que será la encargada de suministrar toda la energía que servirá para vencer las pérdidas, así como para el calentamiento del sustrato. El proceso inicia en el calentamiento del agua en el primer tanque, luego se mezclará a los residuos triturados y posteriormente al material recirculado para que la mezcla por medio de tubería, sea enviada al digestor.

A continuación, en la tabla 39 se indican las características del vapor suministrado por una caldera típica de vapor saturado.

TABLA 39 CARACTERÍSTICAS DEL VAPOR PARA CALENTAMIENTO

Características de vapor de inyección		
Parámetro	Condición de caldera	Condición de salida
Condición	Saturación	Saturación
Presión (kPa)	1000.00	101.32
Temperatura (°C)	183	55
Entalpía (MJ/t)	2 777.2	230.0

Fuente: (42)

Según los datos, el vapor requerido teóricamente es:

$$m_v = \frac{q_p}{h_v - h_f} = \frac{21\,030 \text{ [MJ/d]}}{(2\,777.2 - 230.0) \text{ [MJ/t]}} = 8.26 \left[\frac{t}{d} \right]$$

En el choque del vapor con el agua fresca a 22°C se crea un vapor instantáneo que disipa calor, para este fenómeno se asumirá una eficiencia de 70%, por lo tanto la cantidad real de vapor requerido será de 11.8 t/d.

Energía disponible en el sistema

La cantidad de energía disponible se basa únicamente en la cantidad de metano producido. Los datos requeridos para el cálculo de la energía se muestran en la tabla 40.

TABLA 40 PROPIEDADES DEL METANO

Parámetros para calculo energético	
LHV-Metano (MJ/m ³)	47
Densidad del Metano (kg/m ³)	0.70
Producción de biogás (Nm ³ /d)	7 965

Fuente:(42), Elaboración propia

Cantidad de energía por cada m³ de biogás:

$$LHV_b = LHV * \% CH_4 * \rho_{CH_4} = 47 * 60\% * 0.7 = 19.74 \left[\frac{MJ}{Nm^3} \right]$$

Energía contenida en biogás:

$$E = LHV_b * P_{bg} = 19.74 * 7\ 965 = 157\ 229 \left[\frac{MJ}{d} \right]$$

La energía neta es:

$$E_n = E_d - E_r = 157\ 229 - 21\ 030 = 136\ 199 \left[\frac{MJ}{d} \right]$$

En cifras redondas, la cantidad de energía que se genera diariamente es de aproximadamente 157 200 MJ/d termoquímicos mientras que la energía neta termoquímica es de 136 199 MJ/d. Esta energía resultante será la cantidad que se podrá convertir en energía eléctrica que posteriormente puede ser comercializada en el sector eléctrico del país.

Nota: Si se genera electricidad con Cogeneración se podrá adicionar parte del calor residual para las pérdidas del sistema. Esto se evaluará en la siguiente sección.

Selección de equipos para aprovechamiento energético

En esta sección se indicarán los equipos necesarios tanto para generación eléctrica así como para generación de vapor con sistema de cogeneración, de esta forma se aprovechará de mejor manera la energía procedente del biogás producido. Finalmente en la figura 3.32 se mostrará un balance de energía a través de un diagrama de sankey.

Aprovechamiento del biogás para generación eléctrica

Para la generación eléctrica se utilizará un motor de combustión interna ya que se trata de tamaños moderados de bajo 1 MW. Además existe suficiente experiencia previa en electro-generadores

de ciclo Diesel. Este calor residual servirá para ser aprovechado en el calentamiento del sustrato y para diversos usos dentro de la misma empresa.

Dentro de un motor de combustión interna la energía transformada en electricidad representa solo el 35% de la energía entrante, el 50% se transforma en calor y un 15% en pérdidas. Según esto, los valores netos de energía se muestran en la tabla 41.

TABLA 41 COMPARACIÓN DEL FLUJO DE ENERGÍA ENTRE SISTEMAS CON O SIN COGENERACIÓN

Flujo de energía en el motor de combustión interna				
Sistema	$E_{\text{disponible}}$ (MJ/d)	$E_{\text{eléctrica}}$ (KWh/d)**	E_{residual} (MJ/d)	E_{perdida} (MJ/d)
Sin cogeneración	136 199.1	13 241.58	68 099.5	20429.9
Cogeneración	157 229.1	15 286.2	78 610.0	23 600

**1 KWh=3.6 MJ

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se pueden notar dos cosas muy importantes, la primera es que la cantidad de energía residual es suficientemente alta para cubrir las pérdidas en el sistema (21 030 MJ/d) y que aun existiría un remanente que puede utilizarse para otros insumos dentro de la misma planta. Lo segundo es que al comparar un sistema sin cogeneración con un sistema de cogeneración, se produce una pérdida de generación eléctrica de 2 MWh/d, que

anualmente representa 730 MWh, un rubro que es económicamente representativo. La ganancia por electricidad se analizará con más detalle en el capítulo siguiente.

Seleccionando el sistema de cogeneración con un factor de planta de 0.90, la potencia del sistema es de 0.64 MW netos.

Generación de vapor para calentamiento de sustrato

Como se observó en la sección anterior, la cantidad de vapor requerido es de 11.8 t/d, en condiciones de caldera de 10 bares, 183°C, y P_{sat} . Para producir este vapor se utilizará los gases efluentes del motor de combustión interna.

Para este propósito se ha seleccionado una caldera típica de tubos de fuego con sistema de recuperación de vapor HRSG (Heat Recovery Steam Generator).

En el diagrama de sankey se ilustra el flujo de energía producida, auto-consumida y disponible de la planta, para este caso, el diagrama se muestra en la figura 3.32.

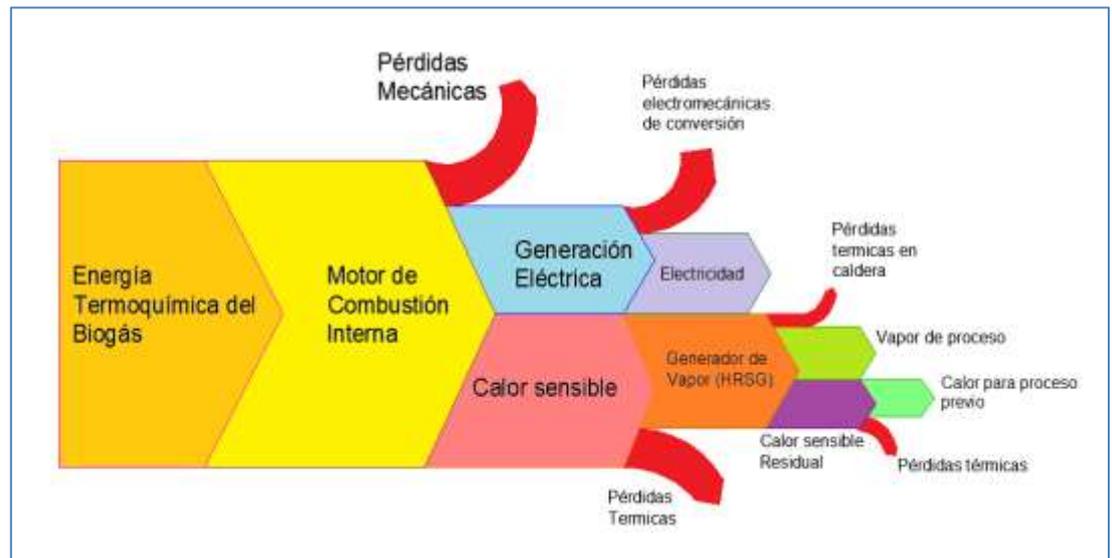


FIGURA 3.32 DIAGRAMA DE SANKEY, FLUJO DE ENERGÍA, SISTEMA DE DIGESTIÓN DRANCO.

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, el diagrama sankey para la biomasa se muestra en la figura 3.33.

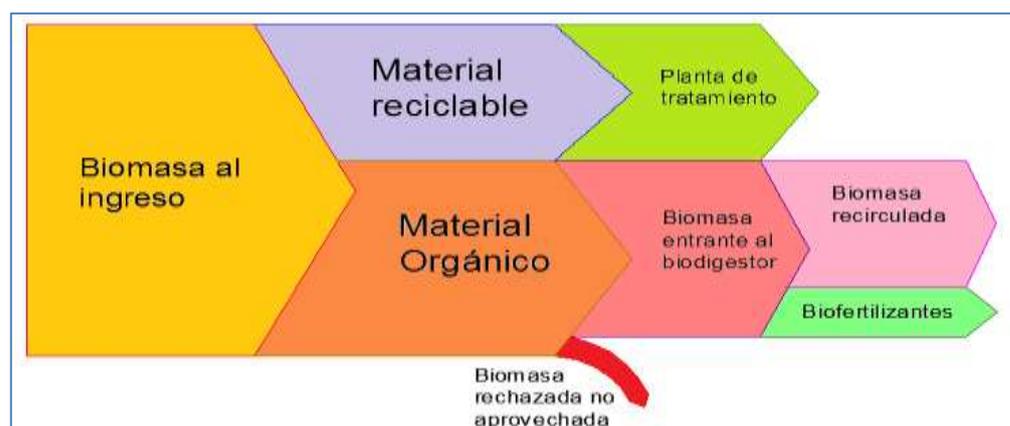


FIGURA 3.33 DIAGRAMA DE SANKEY, FLUJO DE MASA, SISTEMA DE DIGESTIÓN DRANCO.

Fuente: Elaboración propia

3.6 Presupuesto de obra

El presupuesto de obra comprende todos los gastos correspondientes a la construcción de la obra. En este caso, se evaluarán los costos de todos los sistemas que se diseñan en el presente proyecto y los necesarios para la construcción, entre estos están: precio de la maquinaria requerida, materiales para la construcción de los tanques, la bomba de lodos y de agua, accesorios y el sistema de generación. Bajo este concepto, se evaluarán dos casos, el primero calculará el costo usando solo acero al carbono ASTM A36, mientras que el segundo caso se calculará con el uso del acero inoxidable AISI 304 en los casos en donde se recomiendan.

Los costos en el primer caso se muestran en la tabla 42 y para el segundo caso propuesto, se muestran en la tabla 43.

**TABLA 42 LISTADO DE MATERIALES REQUERIDOS Y
PRECIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DRANCO,
CASO 1**

Listado de Materiales			
Detalle	Cantidad	Precio	Total
Plancha de 1200x2440x15mm A36	304	\$413,73	\$ 125.772,83
Plancha de 1200x2440x10mm A36	97	\$275,82	\$ 26.754,31
Plancha de 1200x2440x6mm A36	86	\$165,49	\$ 14.232,19
Plancha de 1200x2440x4mm A36	19	\$110,33	\$ 2.096,21
Plancha de 1200x2440x3mm A36	104	\$82,75	\$ 8.605,51
Plancha de 1200x2440x2mm A36	19	\$55,16	\$ 1.048,11
Angulo 50,8x50,8x6,35 mm A36	16	\$32,42	\$ 518,72
Angulo 50,8x50,8x4,76 mm A36	9	\$26,06	\$ 234,50
Soldadura E6011, SMAW	4500 kg	\$4,56/kg	\$ 20.520,00
Soldadura E7018, SMAW	1124 kg	\$5/kg	\$ 5.620,00
Espuma de polipropileno	1500	\$50/m2	\$ 75.000,00
tubería de impulsión 16" A53	15569 kg	\$1,30/kg	\$ 20.239,70
tubería de impulsión 24" A53	21883 kg	\$1,30/kg	\$ 28.447,90
Trituradora 10 t/h	1	\$ 800.000	\$ 800.000,00
Equipo de generación de vapor	1	\$ 400.000	\$ 400.000,00
Moto-generador	1	\$ 1.600.000	\$ 1.600.000,00
sistema de bombeo principal	1	\$ 30.000	\$ 30.000,00
bomba centrifuga 1/4 Hp	1	\$ 120	\$ 120,00
Pintura anticorrosiva	100 gal	\$ 15	\$ 1.500,00
tubería de agua caliente	10	\$ 3	\$ 25,00
Costo total			\$ 3.160.734,97

Fuente:(30), Elaboración propia

**TABLA 43 LISTADO DE MATERIALES REQUERIDOS Y
PRECIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DRANCO,
CASO 1**

Listado de Materiales			
Detalle	Cantidad	Precio	Total
Plancha de 1200x2440x15mm AISI304	143	\$1.405,44	\$ 200.977,92
Plancha de 1200x2440x10mm AISI304	97	\$936,96	\$ 90.885,12
Plancha de 1200x2440x6mm AISI304	86	\$562,18	\$ 48.347,14
Plancha de 1200x2440x4mm AISI 304	10	\$374,78	\$ 3.747,84
Plancha de 1200x2440x3mm AISI304	23	\$281,09	\$ 6.465,02
Plancha de 1200x2440x2mm A36	19	\$55,16	\$ 1.048,11
Angulo 50,8x50,8x6,35 mm A36	16	\$32,42	\$ 518,72
Angulo 50,8x50,8x4,76 mm A36	9	\$26,06	\$ 234,54
Soldadura E6011, SMAW	1887 kg	\$4,56/kg	\$ 8.604,72
Soldadura E308L, SMAW	3754 kg	\$22,84/kg	\$ 85.741,36
Espuma de polipropileno	1500	\$50/m2	\$ 75.000,00
tubería de impulsión 16" A409	15569 kg	\$4/kg	\$ 62.276,00
tubería de impulsión 24" A409	21883 kg	\$4/kg	\$ 87.532,00
Trituradora 10 t/h	1	800000	\$ 800.000,00
Equipo de generación de vapor	1	400000	\$ 400.000,00
Moto-generador	1	1600000	\$ 1.600.000,00
sistema de bombeo principal	1	30000	\$ 30.000,00
bomba centrifuga 1/4 Hp	1	120	\$ 120,00
tubería de agua caliente	10	2,5	\$ 25,00
Plancha de 1200x2440x15mm A36	161	413,7264	\$ 66.609,95
Plancha de 1200x2440x4mm A36	9	110,32704	\$ 992,94
Plancha de 1200x2440x3mm A36	81	82,74528	\$ 6.702,37
Soldadura ER 309, SMAW	16 kg	\$22,84/kg	\$ 365,44
Costo total²⁰			\$ 3.576.194,19

Fuente: Elaboración Propia

²⁰ Este costo incluye nacionalización de los equipos como: bomba principal, moto-generador y el equipo de generación de vapor.

Se puede observar que con respecto al precio de los materiales, existe un incremento de aproximadamente \$ 400 000 dólares en el caso de que se utilizare acero inoxidable.

El costo obtenido en materiales es referencial. No está presupuestado el maquinado, como el rolado y corte de las planchas.

Considerando todos estos rubros extras, se puede decir que el costo de una planta diseñada solo con acero al carbono se encuentra entre 4 a 4.5 MUSD, y en el segundo caso, el valor sería de 5 a 5.5 MUSD aproximadamente.

Este valor total obtenido será parte del costo inicial de la planta que se analizará en el capítulo 4 sección 4.2.

CAPÍTULO 4

4. ANALISIS DE COSTOS DEL SISTEMA.

Este análisis dará una visión clara de la magnitud de la inversión requerida para el tratamiento de una cantidad específica de materia orgánica. Se establecerá la viabilidad del sistema en base a los costos iniciales, operativos y a los ingresos que se puedan llevar a cabo en el sistema.

En esta sección se indicará en primera instancia la metodología de cálculo económico a seguir, posteriormente se analizarán cada uno de los costos involucrados en el sistema, luego se establecerán las posibles ganancias junto con las limitaciones en cada caso y finalmente se establecerá el costo por tonelada de basura tratada del proyecto de donde se obtendrán conclusiones sobre la viabilidad del sistema.

Este capítulo se centrará exclusivamente a los costos y a la viabilidad económica del proyecto en general.

4.1 Metodología

El cálculo económico se basa en el modelo de evaluación de proyectos, en donde se considera una duración en años de operación del proyecto, un interés anual, reparaciones mayores, costos anuales y valor de salvataje al final del proyecto.

En el presente proyecto, el análisis se realiza para una operación de 15 años con reparaciones mayores cada 5 años y representarán el 20% del costo inicial total del equipo puesto en sitio, un interés anual del 10% y un valor de rescate final del proyecto representará el 10% del valor inicial del equipo. Estos datos se toman de forma referencial de acuerdo a experiencias previas y conversaciones con expertos relacionados a temas económicos.

En base a estos datos, se realizará un análisis del costo por tonelada de basura tratada.

4.2 Costos iniciales

Los costos iniciales corresponden a: equipos y maquinarias necesarias para la construcción, materiales y equipos de la planta, la infraestructura física, el transporte de materia prima, los estudios

previos del proyecto, las licencias de funcionamiento y nacionalización de los productos que se requieran en el extranjero. Aparte de estos precios, se considerarán también en este rubro las reparaciones mayores a tiempo presente cada 5 años incluyendo los repuestos y la mano de obra que se requieran. Finalmente de igual forma, se considerará un salvataje al final del proyecto del 15% del costo inicial a tiempo presente.

Los rubros aproximados se muestran en la tabla 44:

TABLA 44 COSTOS INICIALES DEL SISTEMA DRANCO

Costos Iniciales	
Maquinaria	\$ 0.3 MUSD
Materiales y equipos ²¹	\$ 4.5 MUSD
Supervisión y mano de obra técnica	\$ 0.5 MUSD
Infraestructura	\$ 0.2 MUSD
Estudios técnicos de diseño	\$ 0.4 MUSD
Estudios previos pre-factibilidad	\$ 0.4 MUSD
Licencias	\$ 0.1 MUSD
Repuestos y reparaciones mayores	\$ 1.0 MUSD
Salvataje	\$ 0.7 MUSD
Total	\$ 6.7 MUSD

Fuente: Elaboración Propia

4.3 Costos operativos

En los gastos operativos anuales se pueden dividir en 3 grupos que son:

²¹ Este precio incluye nacionalización de equipos.

- a) Personal de planta
- b) Operación y mantenimiento
- c) Electricidad y Combustible
- d) Administración, seguros y contratos externos

Cada uno de estos rubros se describe en la tabla 45.

TABLA 45 COSTOS OPERATIVOS ANUALES

Gastos operativos anuales		
Personal de Planta	\$ 0.09	MUSD
Costo Administrativo	\$ 0.06	MUSD
Operación y mantenimiento	\$ 0.05	MUSD
Combustibles y electricidad ²²	\$ 0.05	MUSD
Contratos externos	\$ 0.08	MUSD
Licencias operativas anuales	\$ 0.05	MUSD
Total	\$ 0.38	MUSD

Fuente: Elaboración propia

4.4 Evaluación de posibles ingresos económicos del sistema.

Según las características del presente proyecto, se reconocen tres valores que pueden representar ingresos en el sistema, estos son:

1. Venta de electricidad producida a través del biogás
2. Venta de compost efluente generado en el sistema
3. Venta de plástico recaudado en la fase de separación inicial

²² Corresponde al Back up de un generador dual fuel de

Debido a que el análisis del presente proyecto se centra únicamente en la planta de producción de biogás, el único ingreso que se tomará en cuenta, será el de la generación eléctrica.

En base al capítulo 3 sección 5, se señala que la producción eléctrica es de 5780 MWh/año, restando a este número la energía auto consumida de 400 MWh/año, el valor resultante es de aproximadamente 5380 MWh/año que se vende al sistema nacional. Según la ley actual del CONELEC, el precio por MWh es de 96.7 \$/MWh, por lo tanto se puede percibir una ganancia aproximada neta de \$ 520 000 dólares.

4.5 Análisis de costos totales y viabilidad económica

A continuación, en la tabla 46 se indicarán los flujos de caja anuales para el presente proyecto.

TABLA 46 FLUJO DE CAJA

Flujo anual de costos	
Anualidad de costo inicial	\$ 6.70 MUSD
Costo operativo anual	\$ 0.38 MUSD
Ganancia de electricidad	(\$ 0.52) MUSD
Costo total anual	\$ 0.73 MUSD

Fuente: Elaboración propia

En base a este resultado, y con una capacidad de manejo de residuos de 100 t/día (36 500 t/año), el costo por tonelada de basura es de 20 dólares aproximadamente.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS

En esta sección se presenta un resumen de los resultados generales más representativos obtenidos en el sistema de producción de biogás realizando un breve análisis de los mismos.

Al final del capítulo se indican unas consideraciones generales para un proyecto implantado en la ciudad de Guayaquil.

Análisis de los resultados generales representativos

Con respecto a los resultados mostrados se pueden destacar los siguientes puntos:

- La productividad del biogás varía con respecto a la temperatura y al tiempo de residencia. En el análisis de la productividad realizada en este estudio en base a la

información teórica, se ha encontrado que para este tipo de sistema la producción de biogás se encuentra en un rango de entre 125-200 Nm³/t de residuo fresco, por seguridad, se ha tomado una cantidad de 150 Nm³/t de residuo fresco.

- El dimensionamiento del digestor se realizó en base a la cantidad de residuos, humedad, densidad y tiempo de residencia de los mismos dentro del digestor. Con estos parámetros, se obtuvo un volumen final de reactor de 2800 m³ para el manejo de 100 t/d. obteniendo las medidas generales mostradas en la figura 3.4, se cree que por seguridad en el diseño, 100 t/d es la máxima capacidad a la cual se puede construir un digestor de la forma propuesta. Si se deseara manejar cantidades mayores de residuos, se propone construir una batería de biodigestores de la misma capacidad.
- Para el dimensionamiento de la unidad de dosificación, para todos los tanques se estableció un tiempo de almacenamiento base de dos horas, ya que se consideró que son tanques de paso y no requieren de mayor control. Si en algún momento el sistema tenga una eventual para, se debe controlar la salida del digestor, la entrada de materia triturada

y el suministro de agua, por lo tanto es en estos puntos en donde se tendría el control del sistema.

- La Norma API para el dimensionamiento de estos tanques se aplicó en la relación altura-diámetro mayor a 1.33, esto por condiciones sísmicas, estabilidad y facilidad de cálculo. Sin embargo se considera que para tanques pequeños y con cargas sísmicas no muy considerables esta relación puede ser ligeramente menor, esto queda a criterio del diseñador.
- En la aplicación de la Norma API para tanques atmosféricos es adecuada para el diseño de tanques de volúmenes de almacenaje considerables. Al aplicar la norma en los tanques del sistema de dosificación, los espesores recomendados resultaron estar sobredimensionados, dando como resultado un factor de seguridad de 15 calculado por medio del programa ANSYS®. Esto significa que se está sobredimensionando el sistema con espesores mucho mayores de los necesarios y ocasionando un costo redundante que pueda afectar a la economía del proyecto. Debido a esto, se consideró que se debe disminuir este espesor hasta obtener un factor de seguridad de 3 que se considera óptimo para el diseño.

- Para el digestor, el ángulo de 45° en el cono ha sido seleccionado a consideración del diseñador para facilitar la descarga de material en la base del digestor. No se deben colocar ángulos menores ya que pueden obstruir la salida ocasionando grandes problemas en la operación del sistema.
- Debido a que las temperaturas de operación en cada tanque no son considerables teniendo un máximo de 73°C , este parámetro no es representativo en la selección del material.
- En cuanto a la trituradora, se ha seleccionado una cantidad de procesamiento de 10 t/h que representan 240 t/d que es casi 4.5 veces mayor a la necesaria este sobredimensionamiento solo ocasionará que la máquina solo esté en funcionamiento cierta cantidad de horas al día, lo que puede ser una ventaja, que para aprovecharla, debe tener un tanque de almacenamiento extra de material triturado que ayude a dosificar la cantidad entrante en el sistema. El costo colocado en el análisis de resultados es representativo a esta cantidad de residuos triturados, por lo que si se desea una capacidad menor, el precio puede disminuir. Por otro lado se debe tomar en cuenta que si se desea manejar cantidades mayores de residuos en una unidad de baterías de

digestores, según sea el caso, se puede triturar la cantidad de residuos requerida.

- En cuanto al tipo de soldadura, se han seleccionado de dos tipos, la soldadura convencional y la soldadura para acero inoxidable. La selección final del mismo se representa en el incremento del costo que pudiera ocasionar la selección de la soldadura. Para el proceso con soldadura de acero inoxidable, se recomienda TIG, sin embargo el costo es muy elevado y no se consideró este proceso en el presente estudio, por otro lado, depende también de las características del grado de calidad que se requiera en la unión de los tanques, esto queda a consideración del diseñador.
- En cuanto al sistema de transporte de biomasa, se han tomado en cuenta dos mecanismos, el tornillo sinfín para el transporte de sólidos, y el bombeo para el ingreso al digestor.
- En cuanto al diseño del tornillo sinfín se consideró el tipo de carga, el flujo másico transportado, la inclinación del canalón, la longitud de transporte y las horas de operación del mismo. En base a esto, se obtuvo un consumo energético de 310 kWh/d con una potencia requerida de 20 kW.
- Las tuberías de impulsión en el sistema son dos, la tubería de suministro de agua caliente y la tubería principal de

suministro de biomasa dentro del digester. Para la selección de las tuberías se han determinado las características del fluido y la temperatura de operación.

Con respecto a la tubería principal se obtuvo un flujo laminar, esto significa que el factor de fricción es independiente del material seleccionado de las tuberías y es directamente proporcional al valor de la viscosidad del fluido. Este parámetro es desconocido en el presente estudio y se ha tomado un valor representativo de 1 Pa-s, este parámetro puede afectar en gran medida a la potencia requerida de la bomba. Por lo tanto se considera que el modelo de cálculo usado en el presente estudio es correcto, pero que estos valores deben ser determinados por medio de pruebas experimentales.

En cuanto a la tubería de agua, todos los valores son conocidos y la potencia necesaria es de 0.25 HP. En este punto lo que debe tomarse en cuenta es la temperatura del agua, esto puede ser un problema ya que si es muy alta, puede formarse vapor en el momento de la succión y por lo tanto generar problemas de cavitación. En los libros ingenieriles, se recomienda que la temperatura máxima a la cual se debe transportar el agua sea de 70°C.

- En el análisis térmico se determinaron las pérdidas en todas las partes del sistema (tanques de almacenamiento y biodigestión y en el sistema de transporte de biomasa), y la cantidad de energía requerida que se debe suministrar, que suma un total de 21 030 MJ/d con una cantidad de vapor de 11.8 t/d. Para evitar las pérdidas de calor se ha tomado un espesor de aislante de 150 mm en todo para disminuir al máximo dichas pérdidas y evitar que la temperatura del agua, quien lleva toda la energía requerida, sea menor o igual a 70° por los problemas mencionados anteriormente.
- La energía disponible en el sistema es de 157 000 MJ/d y se refiere únicamente en la producción de biogás. Es en este punto que se bifurcan dos opciones, generar energía a base de cogeneración o sin cogeneración esto se define en cuanto a los ingresos que se dejan de percibir con respecto a la energía generada. En este estudio se calculó que la diferencia de energía producida en el sistema es de 2 MWh/d que representa una pérdida de 70 591 \$/año. Este valor puede afectar en gran forma la viabilidad del proyecto.
- La cantidad de energía residual proveniente del motor de combustión interna, que ingresa a la caldera es de 68 000 MJ/d, y con un 70% de eficiencia, se puede producir una

cantidad total de vapor de 18.71 t/d, restando de la cantidad requerida, se obtiene un remanente de vapor de 7 t/d, que servirá para consumo dentro de la misma planta.

- En cuanto al costo del sistema, la diferencia entre construir con material de acero inoxidable y acero estructural es de 500 000 dólares. Este no es el único problema, en nuestro medio, el encontrar acero inoxidable en planchas de los espesores requeridos en el digestor no es factible lo que se convierte en un problema en el momento de la construcción del sistema. Bajo esta consideración se debe decidir finalmente lo que se usará, pero se debe tomar en cuenta que el mantenimiento del sistema puede encarecerse por la corrosión del acero estructural y que además puede causar problemas por la contaminación del sustrato que puede inhibir la producción de biogás.
- La viabilidad económica del sistema considera los flujos de caja que existen anualmente por concepto del costo inicial, los costos operativos y los ingresos en el sistema. Con respecto a estos valores, se determinó que el costo por tonelada aproximado se encuentra en 20 dólares sin contabilizar con los costos por la recolección de los residuos. Este costo contrarrestando con los costos del manejo de un

relleno sanitario como el de la ciudad de Guayaquil, es menor, por lo tanto el proyecto se considera viable.

- Este costo puede disminuir si se considera la posibilidad de una batería de digestores y que además se aproveche la energía existente en el efluente del proceso. Estas posibilidades no se evalúan en el presente estudio.

Consideraciones al proyecto en la ciudad de Guayaquil

Para el dimensionamiento de una planta colocada en la ciudad de Guayaquil, se debe establecer la producción total y la ubicación de residuos sólidos urbanos de la ciudad. Posteriormente se toma en cuenta el crecimiento de la producción de dichos residuos en el periodo de años de duración del proyecto. En base a estas cantidades, se establecerán los porcentajes de desechos orgánicos disponibles e utilizables para el presente sistema.

Luego se procede a establecer la capacidad de diseño del reactor y así como las demás partes mecánicas del sistema.

Los datos requeridos son: producción de basura en el periodo de ejecución del proyecto, porcentaje de residuos orgánicos biodegradables, la humedad de los residuos, la humedad requerida en el biodigestor y la densidad del sustrato.

Un ejercicio demostrativo del dimensionamiento de la planta se encuentra especificado en el apéndice 2

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se ha establecido el dimensionamiento de una planta de generación de biogás proveniente de la digestión anaerobia seca de 100 t/d de residuos sólidos urbanos (RSU). Dentro de este análisis se ha establecido: un diseño de forma con los componentes principales de la planta, el diseño final de cada uno de sus componentes y cantidad aproximada neta de la cantidad de energía producida.
- La proporción del componente orgánico y biodegradable en los residuos sólidos urbanos-RSU que se producen en el Ecuador está en el orden de 60%; para la ciudad de Guayaquil, este porcentaje es del 59%.
- El proceso de digestión anaerobia termofílica es un proceso microbiológico en el cual los microorganismos descomponen la materia biodegradable en condiciones establecidas generando biogás y lodos efluentes.

- La productividad promedio de biogás se encuentra en el rango de 100-200 Nm³ de biogás por tonelada de RSU frescos. La composición máxima de biogás depende de la calidad de los residuos.
- En el proceso anaerobio, la climatización de las bacterias definen las concentraciones críticas de los inhibidores.
- La literatura técnica considera a la lignina como inhibidor de proceso de biodigestión anaeróbica. Esto implica, que no se debe incluir en el proceso ciertos sustratos orgánicos que contengan este componente, tales como: residuos de jardín, hojarasca, tallos de cosecha, papel, cartón, cascaras, etc.
- El proceso requiere de una etapa inicial de puesta en marcha hasta conseguir una operación estable. Esta etapa puede durar desde unas pocas semanas hasta varios meses.
- La digestión anaerobia como proceso químico tiene un conjunto de pasos secuenciales, cada uno de los cuales imponen requerimientos específicos tales como: temperatura, pH, tamaño de partícula, composición de sustrato, presencia de inhibidores (amonio, metales pesados), tiempo de retención. Estas características deben ser controladas apropiadamente en el diseño y la operación para un apropiado desempeño del sistema.

- La acidificación dentro de un digestor anaerobio es la acumulación de AGV. Esto se debe a que las bacterias metanogénicas no convierten a tiempo aquellos ácidos a medida que las bacterias acetogénicas lo producen, por ende causan un desequilibrio generalizado en el sistema.
- El digestor debe poseer un sistema de homogenización de temperatura. El buen funcionamiento del sistema de calentamiento pueden ser claves para el éxito o el fracaso del sistema.
- Sensibilidad de la digestión anaerobia puede ser reducida mediante una etapa de aclimatación del residuo y microorganismos.
- El sistema de digestión anaerobia de proceso DRANCO puede ser implementado en el Ecuador, tomando en cuenta los caminos, limitaciones y requerimientos analizados en el presente estudio.
- El presente estudio se centra en un diseño global de todos los componentes de una planta de digestión anaerobia, se da una forma concisa y concreta del conjunto de componentes que forman un proceso en el cual no hay mucha experiencia en el medio. Existe experiencia particular en los componentes del sistema, pero no en el conjunto.

- La mecanización del proceso de digestión requiere de pasos preliminares y secuenciales, estos pasos son: separación en la fuente; refinamiento de la separación en sitio final; pre-tratamiento de la parte orgánica que incluye: trituración, tamizado a tamaño específico, dilución en agua (calentada por medio de vapor), adición de inóculo, homogenización con masa recirculada; luego re-inserción de la masa en digestor, proceso de digestión a lo largo del reactor, extracción de biogás y de residuos en cantidad similar a la que ingresa.
- Los componentes básicos necesarios para el sistema son: trituradora, tanques para dosificación, biodigestor y gasómetro; entre los sistemas utilizados están: sistema de bombeo y el sistema de transporte de masa a través de tornillo sinfín. Es claro que el componente más importante es el reactor biológico o tanque de biodigestión, en el cual se logra la transformación biológica micro-bacteriana del componente orgánico de la basura a un componente digerido y biológicamente estable junto con producción de biogás.
- De los componentes mencionados, existe mucha experiencia en el Ecuador en cuanto al diseño de tanques de almacenamiento, tornillos sinfín, sistemas de bombeo, uso de motores generadores de baja potencia, cogeneración y aprovechamiento energético. En base a esto, se considera

que no debe existir inconvenientes en cuanto al diseño e instalación de la planta.

- Se identifican y se establecen las variables de diseño, entre estas están: temperatura de operación de la digestión y del sustrato inicial, cantidad de residuos a procesar, la humedad inicial de la materia prima, el pH, las dimensiones recomendadas, número y dimensiones de tubos, volumen de la cámara de biogás, tasa de recirculación, tiempo de residencia y recirculación dentro del reactor. En base a estas variables, se procedió al diseño de la parte estructural.
- Se requieren comprobar en laboratorio o planta piloto algunos parámetros importantes para el diseño, tales como: productividad de biogás, tasas de conversión, efecto de temperatura, tamaño máximo de sustrato, tipología de nutrientes, efecto de la toxicidad en el sustrato, etc. Adicionalmente para el digester DRANCO, la tasa de mezclado y recirculación.
- Los materiales utilizados en la parte estructural son seleccionados para evitar: el desgaste de los materiales por corrosión y las posibles interacciones con el sustrato. Esto se realiza para disminuir la posibilidad de que las impurezas producidas por la corrosión inhiban la reacción química.

- El factor más importante que se debe determinar es la cantidad de biomasa que se tratará por día y a las horas de operación de cada una de las partes del sistema, de ahí se deriva el tamaño del digestor y de los demás componentes del sistema.
- Para determinar la capacidad operativa de trabajo se tomó en cuenta las siguientes variables: altura de la boca de ingreso de producto a tu tanque, capacidad de respuesta de los operadores de la planta para el caso que los sistemas automáticos de cierre de válvulas no funcionen y la operación se deba hacer manualmente.
- El diámetro del digestor DRANCO fue tomado en base a literatura, en donde se aconseja que para la cantidad de residuos que se maneja en el presente proyecto, la medida debe ser de 15 m.
- Para el diseño de los tanques se ha tomado como referencia la Norma API 650. Según el Apéndice E de la Norma, se indica que los tanques con una relación $D/H > 1,33$ son más estables para condiciones sísmicas. Para esta relación no se requiere de anclajes. Otra consideración importante que se tomó en cuenta en el diseño es que mientras más alto sea el tanque, el nivel de diseño del producto es más alto, aumentando la presión hidrostática y por ende el espesor de

los anillos se hace más grande. Esto causa problemas en cuanto a la mano de obra, adquisición de materiales, así como el trabajo de construcción o montaje.

- Una base importante de este estudio ha sido el uso de herramientas de cálculo y diseño computacional. En este punto se ha utilizado: ANSYS®, SOLIDWORKS®, Inventor Pro® y AutoCAD®. El uso de estas herramientas ha facilitado el dimensionamiento, realizando simulaciones con cargas estáticas y cíclicas de las partes que conforman el sistema.
- En principio y de acuerdo a los resultados se puede tener un digestor que sea energéticamente autosuficiente para operar en el rango termofílico. El digestor genera suficiente biogás como para suministrar el calor necesario para el proceso, así como para vencer las pérdidas térmicas. Adicionalmente se puede generar electricidad por un proceso de cogeneración. (calor y trabajo combinados-CHP).
- Se está considerando que se ha logrado dominar la tecnología de digestores DRANCO. Esto implica que deberá dedicarse tiempo y recursos para captar apropiadamente la tecnología, implementarla en sus fases iniciales. Este proceso podría tomar entre uno a varios años incluyendo la fase de planta piloto y planta demostrativa.

- Este proceso requiere de capacitación y actualización continua de los operarios debido a las implicaciones y refinamientos de la tecnología.
- Para el análisis solo se parte de la materia orgánica puesta en sitio y debidamente separada de los componentes no orgánicos. No se ha considerado ni las tecnologías ni los costos envueltos en la recolección, separación ni el transporte al sitio de operación.
- Se recomienda que el análisis económico incluya la calidad y el valor del aislante con respecto a la cantidad de energía perdida. Este cálculo contribuirá al análisis de costo-beneficio del proyecto.
- La rentabilidad del sistema depende claramente de los costos de construcción y operación.
- Existen limitaciones en cuanto a los ingresos que se pueden percibir en el sistema. El ingreso por generación de energía así como de los plásticos dependen exclusivamente de las leyes gubernamentales. Esto se encuentra detallado en el apéndice 5.

APÉNDICES

Apéndice 1 Datos típicos sobre la distribución de tamaño de los componentes de los RSU.

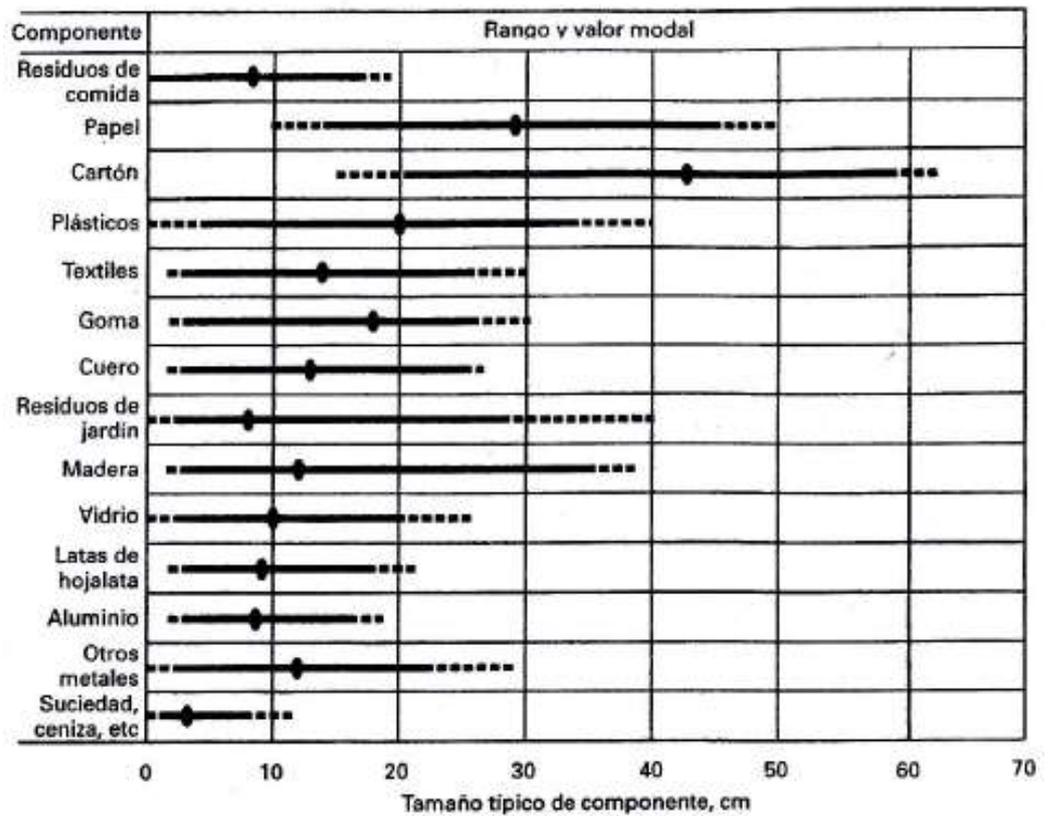


FIGURA A. 1 DATOS TÍPICOS DE TAMAÑO DE LOS COMPONENTES DE LOS RESIDUOS

Fuente: (3)

Apéndice 2 Ejemplo de cálculo de sistema DRANCO para la ciudad de Guayaquil 2015- 2030.

Producción de residuos en el periodo 2015-2030

Para establecer la cantidad total de basura que puede ser tratada, se debe conocer la cantidad de años en que el sistema va a estar en fase operativa y en base a esto, se estima la cantidad de residuos per cápita producidos en cada año de duración del proyecto, finalmente con este punto se obtiene la cantidad total de residuos a tratar en el año 2030, para el cual se debe diseñar el digestor.

Datos iniciales

Analizando los datos de producción per cápita de basura, se calcula el ingreso de residuos en el periodo comprendido entre el año 2015 al 2030, se indica además la cantidad de residuos sólidos orgánicos húmedos y secos. Esta información se puede observar en la tabla A.1 ²³.

²³ Estos datos han sido obtenidos en base a los datos de la tabla A.1 y a las formulas indicadas en la sección 3.1

**TABLA A. 1 ESTIMACIÓN DE LA PODUCCIÓN DE RESIDUOS SECOS EN TONELADAS POR AÑO
PARA LA CIUDAD DE GUAYAQUIL**

Año	Población	Basura ingresada (t/año)	PPC	Residuos orgánico Húmedo (t/año)	Residuos orgánico Secos (t/año)
2015	2589229	1419850	1,50237773	837712	586398
2016	2617349	1466067	1,53461457	864980	605486
2017	2644891	1512330	1,566556	892275	624592
2018	2671801	1558639	1,59826418	919597	643718
2019	2698077	1604992	1,62976756	946945	662862
2020	2723665	1651390	1,66112799	974320	682024
2021	2756452	1691879	1,68161244	998208	698746
2022	2784802	1735297	1,70720876	1023825	716678
2023	2813151	1778715	1,73228919	1049442	734609
2024	2841501	1822133	1,75686916	1075059	752541
2025	2869851	1865551	1,78096351	1100675	770473
2026	2898200	1908969	1,80458649	1126292	788404
2027	2926550	1952388	1,82775179	1151909	806336
2028	2954900	1995806	1,85047259	1177525	824268
2029	2983249	2039224	1,87276156	1203142	842199
2030	3011599	2082642	1,8946309	1228759	860131

Fuente: (16)

En base a esto, el digestor debe estar diseñado de tal forma que pueda tratar todos los residuos que puedan ser generados hasta el año de operación del proyecto (2030), que en este caso sería una cantidad de residuos igual a 860 131 t/año que en otros términos sería una cantidad de 2 357 t/d (residuo orgánico base seca).

Siguiendo los datos de la tabla A.1 y realizando los cálculos que se encuentran detallados en la sección 3.1, para esta cantidad de residuos generados en el año 2030, el volumen obtenido para el biodigestor es de 158 000 m³ para un manejo de residuos frescos de aproximadamente 1 228 759 toneladas anuales.

Es claro que diseñar un biodigestor para el manejo de grandes cantidades de residuos como las generadas en Guayaquil, resulta en un diseño complicado de los elementos de la planta y para el control y la operación del sistema. Sería tal vez más apropiado desde el punto de ingeniería y de proyectos, el utilizar concepto modular, empezando con digestores de tamaño moderado. De esta manera se va creciendo en capacidad y al mismo tiempo incluyendo las modificaciones de ingeniería que la experiencia inicial fuere indicando.

Por otro lado, se han realizado los cálculos respectivos para un sistema que maneja 100 t/d de residuos sólidos urbanos (Véase sección 3.1). Esta cifra servirá como base para establecer las dimensiones del digester o de las baterías de digestores según los requerimientos de Guayaquil.

Poniendo esta cantidad de residuos en el contexto del Cantón Guayaquil y considerando los puntos mencionados, en este estudio se propone lo siguiente:

- Considerar un biodigestor que maneje la basura que se genere por secciones o parroquias de la ciudad de Guayaquil y descentralizar la disposición final de los desechos. Con esta opción, se puede disminuir el costo de transporte de la basura al acortar la distancia al lugar de disposición final. a la vez que se manejarían valores más bajos de residuos.
- Se observa que el biodigestor trabajará a máxima carga solo el último año de operación, esto en términos de optimización de recursos se puede considerar inviable ya que se gastaría una alta cantidad de recursos son un solo año de máxima producción de biogás. Una opción que se puede considerar

es que el biodigestor sea diseñado para una cantidad de basura en el décimo año de diseño, esto asegurará una producción máxima de biogás durante los 5 años restantes de duración del proyecto.

Siguiendo los lineamientos expuestos, se establecerá la producción de basura en un sector determinado de Guayaquil, esto con la cantidad de habitantes del sector y el pronóstico de PPC de basura por persona al año 10 del proyecto. Una vez establecido estos valores, se determinará el volumen del bio-reactor de la misma forma que en el cálculo anterior.

Selección de los posibles sectores para colocación del biodigestor

La selección se realiza de acuerdo a la cantidad de personas, la producción aproximada de residuos y a la cercanía de las parroquias en donde se puede instalar el sistema. Los valores y la selección del lugar se analizarán a continuación.

Estimación de la población por parroquias existentes en la ciudad de Guayaquil

En la cabecera cantonal de Guayaquil existen 16 parroquias urbanas y 5 parroquias rurales. En las parroquias que se

encuentran dentro del recinto urbano de la ciudad poseen el 97% de la población total de Guayaquil, el otro 3% pertenecen a las parroquias rurales. En la tabla A. 2 se muestra la distribución de la población en porcentaje en cada una de las parroquias, su ubicación y la cantidad estimada de población con respecto a la cantidad actual de personas de la ciudad.

TABLA A. 2 DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LA POBLACIÓN DEL CANTÓN GUAYAQUIL

Parroquia	Población (%)	Cant. aprox de personas
Tarqui	27,96%	682379
Ximena	21,81%	532285
Febres cordero	20,91%	510320
Letamendi	6,62%	161565
Garcia Moreno	4,68%	114218
Pedro Carbo y concepción	2,95%	71996
Urdaneta	2,20%	53692
Pascuales	1,65%	40269
Sucre	1,49%	36364
Ayacucho	1,44%	35144
Olmedo	1,35%	32947
Rocafuerte	1,27%	30995
Bolívar y sagrario	1,21%	29531
Francisco Roca	1,16%	28310
9 de octubre	1,05%	25626
Chongón	0,43%	10494
Posorja*	0,72%	17572
Tenguel*	0,40%	9762
Juan Gomez rendon*	0,32%	7810
Puná*	0,26%	6345
Morro*	0,12%	2929
Total	100,00%	2440553

Población total Guayaquil (2010)	2440553
---	---------

***Parroquias rurales del cantón Guayaquil**

Fuente: (43)

La ubicación de las parroquias en el mapa del Cantón Guayaquil se muestra en la figura A.4.



FIGURA A. 2 UBICACIÓN DE LAS PARROQUIAS DE LA CABECERA CANTONAL GUAYAQUIL

Fuente:(44)

Según esta información se puede concluir que las parroquias Tarqui, Ximena y Febres Cordero son las más numerosas de la cabecera cantonal de Guayaquil, por lo tanto no se considera que sean las más adecuadas para el sistema.

Las características que se deben tomar en cuenta son: que las parroquias seleccionadas sean pequeñas y que se encuentren contiguas entre sí. La cercanía de estas parroquias permitirá disminuir los costos en la recolección de la basura y permitirá un mejor control en cuanto a la separación en la fuente.

Según la ubicación y el tamaño de las parroquias (Figura A.4) se puede considerar un biodigestor para los siguientes grupos:

1. Urdaneta, Nueve de Octubre, Sucre.
2. Ayacucho, Olmedo, Bolívar
3. Francisco Roca, Rocafuerte, Pedro Carbo.

A continuación en la tabla A.3 se presentan los valores aproximados de la cantidad de personas²⁴, producción total de residuos, producción de residuos orgánicos húmedos y secos al año 10 de operación del proyecto, esto es al año 2025, para las opciones seleccionadas.

²⁴ Estos datos están basados en datos extrapolados tanto del consejo nacional electoral y del INEC para cantidad de pobladores. La producción global de residuos utilizados en este apartado, no está individualizada ni por parroquia ni por habitante.

TABLA A. 3 PRODUCCIÓN DE RESIDUOS PARA PARROQUIAS SELECCIONADAS

Opciones	Población (%)	Producción de residuos (t/año)	FORSU (h) (Kg/d)	FORSU (s) (t/d)
Opción 1	4,74%	88427,13	142.94	100,05
Opción 2	4,00%	74622,05	120.62	84,44
Opción 3	5,38%	100366,66	162,24	113,57

*Estos resultados se basan en los datos de la PPC de la tabla A. 1

Fuente: Elaboración propia

Según estos resultados y lo analizado en este estudio, se considerará la implantación del sistema para el manejo de los residuos producidos en las parroquias Ayacucho, Olmedo y Bolívar (opción 2).

Apéndice 3 Descripción de una planta de separación de residuos.

Una planta de separación de residuos incluiría los siguientes procesos, equipos y máquinas:

- a) Proceso de pesaje, control y descarga RSM.-** Para esta etapa se requieren de balanzas electrónicas a la entrada de los vehículos y personal calificado.

- b) Clasificación de material voluminoso y la apertura de bolsas.-** Esto se lleva a cabo a través de personal que por medio de una pequeña cargadora selecciona los materiales voluminosos visibles, los residuos restantes se envían a una máquina abridora de bolsas.
- c) Trómel de cribado.-** Este equipo separa materia orgánica e inorgánica en función del tamaño.
- d) Separador balístico.-** Este equipo separa la materia inorgánica en función del tamaño, densidad y forma por medio movimientos oscilatorios.
- e) Clasificación manual.-** En este punto se procede a una inspección visual y separación de residuos inorgánicos, la velocidad de revisión es de aproximadamente 1-5 Kg/min, la selección del valor óptimo queda en consideración del diseñador. La cantidad de personas depende de la cantidad de residuos que ingresan en este punto del sistema. La banda transportadora debe ser de velocidad regulable.
- f) Separación magnética de materiales ferrosos.-** La separación magnética clasifica materiales ferrosos finos que salen del proceso de cribado, separador balístico y de la banda transportadora de la clasificación manual. Los requerimientos para el dimensionamiento son: capacidad (t),

velocidad de bandeja (m/min) y el tamaño de la materia (mm).

g) Separador inductivo.- El separador inductivo separa materiales no ferrosos como el aluminio, cobre, entre otros, por medio de corrientes de Foucault.

h) Separación por aire.- Es un sistema de impulsión por aire que por diferencia de altura, el plástico fino es captado.

i) Separación óptica.- Este proceso separa a los plásticos por medio de las propiedades de reflexión de onda de luz generada por lámparas halógenas. Se pueden diferenciar los materiales por medio de su color, textura, densidad entre otras propiedades.

j) Acondicionamiento de residuos orgánicos.- El material clasificado resultante de todos los procesos, se dirigen hacia el acondicionamiento de los residuos. Este acondicionamiento incluye: triturado, lavado de agentes tóxicos y separación, secado y paletizado, estos procesos se realizan siguiendo normas.

Apéndice 4 Características de la soldadura seleccionada para los tanques del sistema de dosificación y biodigestión.

Electrodo E-6010, Norma AWS (32)

Aplicación: Recomendada para aceros al carbono en cordones circulares en: tubería, tanques, calderas, estructuras de puentes y edificios, construcción naval, etc.

Características de soldadura: alta velocidad de aporte y gran penetración. Se puede soldar en todas las posiciones, sobretodo descendente y trabajos de fondeo.

Propiedades Mecánicas

Resistencia a la tracción: 470 N/mm²

Límite de Elasticidad: 390 N/mm²

Alargamiento: 28%

Tenacidad: 82 J

Instrucciones para soldar

Limpiar zona y manejar el electrodo ligeramente inclinado en la dirección del avance con arco corto. La escoria se elimina entre pases.

Para la corriente se tiene (Tabla 23):

**TABLA A. 4 DIÁMETRO, LONGITUD Y CORRIENTE,
SOLDADURA E-6010**

Electrodos	Diámetro (mm)	3.2	4.0	5.0
Longitud	mm	350	350	350
Amperaje	A	75-140	120-280	180-240

Fuente: (32), Elaboración propia

Electrodo ER-308 L, Norma AWS (32)

Nombre: CTG-308 L

Aplicación: Recomendada para aceros inoxidable de soldadura de unión y revestimiento en industrias químicas. Soporta temperaturas de servicio desde -196°C hasta 350°C.

Características de soldadura: Alambre resistente a la corrosión y a los ácidos para procesos MIG y TIG.

Propiedades Mecánicas

Resistencia a la tracción: 540-640 N/mm²

Límite de Elasticidad: >315 N/mm²

Alargamiento: > 40%

Tenacidad: > 70J

Forma de varillas TIG de 1000 mm de largo: 2.4

Electrodo ER-309, Norma AWS (32)

Nombre: CTG-309

Aplicación: Recomendada para soldaduras de unión y revestimiento en aceros austeníticos sobre todo cuando se usan contenido de gases. Temperatura de servicio es de 1100°C.

Características de soldadura: Alambre resistente a la corrosión y a los ácidos para procesos MIG y TIG.

Propiedades Mecánicas

Resistencia a la tracción: 550-700 N/mm²

Límite de Elasticidad: >400 N/mm²

Alargamiento: > 25%

Tenacidad: > 70J

Forma de varillas TIG de 1000 mm de largo: 2.0

Apéndice 5 Descripción de las limitaciones de los ingresos al proyecto

Limitaciones gubernamentales

En la venta de electricidad producida depende exclusivamente de la ley del sector eléctrico ecuatoriano, la limitación principal es el cambio de dichas leyes, esto es desfavoreciendo el pago de la electricidad producida a través de biomasa, cuyo valor actualmente se encuentra en 9.6 ctvs/KWh, a la menor variación de este precio,

el proyecto puede tener resultados muy desfavorables en cuanto a su viabilidad económica.

Otra de las leyes que pueden afectar este tipo de proyectos es la máxima capacidad de generación de biomasa implantada por el gobierno nacional que es de 100 MW instalados. En el país, este cupo lo abarcan principalmente las empresas azucareras que realizan cogeneración a través del bagazo de caña de azúcar, dejando un porcentaje muy bajo de disponibilidad a otros proyectos.

Otra de las limitaciones gubernamentales abarca de igual forma a la venta del plástico recuperado. Como se indicó en el capítulo 2 sección 6, el gobierno ofrece un pago de por kilo de plástico recuperado, el llamado impuesto verde, esto es importante mencionar si se considera al plástico como una fuente de ingresos, sin embargo de igual forma que en el sector eléctrico, esto es un valor que depende exclusivamente del estado y de la permanencia de la ley.

Limitaciones de mercado

En cuanto a las limitaciones de mercado, se implica directamente al compost o bio-abono producido en la planta. Se conoce que en el Ecuador no existe un mercado establecido para este tipo de insumo, lo que hace muy difícil su venta. Para considerar este valor

como una entrada fija, se debe conocer el mercado, el modo de abastecimiento y la capacidad máxima de venta de este producto. El costo máximo de la venta de este producto es de \$ 5 dólares aproximadamente.

Limitaciones por responsabilidad de productor

Esta sección recae exclusivamente en la venta del plástico recuperado. Con las leyes actuales que actúan en favor del medio ambiente y con los valores extras que el gobierno ha impuesto a las empresas nacionales y multinacionales por el tipo de plástico que ingresa al país. Las empresas cada vez están dejando de traer los plásticos que son realmente reciclables, dejando solo materiales no reciclables o plásticos de menor calidad, por ende el plástico reciclado final no posee el mismo valor, quedando solo para incineración.

Esto significa que al igual que el bio-abono, la venta del plástico recolectado no se debe considerar como un valor fijo a largo plazo.

Considerando estas limitaciones, en el presente proyecto se colocarán valores representativos y prudentes de estos ingresos. Se indicarán los valores críticos para establecer un margen de ganancias en donde el proyecto sea viable económicamente.

Apéndice 6 Parámetros de diseño del tornillo sinfín

Según el tipo de Carga

**TABLA A. 5 PARÁMETROS DE DISEÑO DE TORNILLO SIN FÍN,
CONSTANTE SEGÚN EL TIPO DE CARGA**

Tipo de Carga	Constante λ
Pesada y abrasiva	0.125
Pesada poco abrasiva	0.25
Ligera poco abrasiva	0.32
Ligera no abrasiva	0.4

Fuente:(45)

Según la inclinación del canalón

**TABLA A. 6 PARÁMETROS DE DISEÑO DE TORNILLO SIN FÍN,
CONSTANTE SEGÚN LA INCLINACIÓN DEL CANALÓN**

Inclinación del Canalón	Constante λ
0°	1
5°	0.9
10°	0.8
15°	0.7
20°	0.6

Fuente:(45)

TABLA A. 7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA DEL MATERIAL

Material	Empírico
Harina, Aserrín, productos granulosos.	1.2
Turba, sosa, polvo de carbón	1.6
Andracita, cabón, sal de roca	2.5
Yeso, arcilla seca, tierra fina, cemento, cal, arena.	4

Fuente:(45)

Apéndice 7 Tablas de agua y vapor saturado

SATURATED STEAM - TEMPERATURE TABLE									
T °C	P bar	Spec. vol. m ³ =kg		Int. Ener. kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		Entropy kJ=(kg°K)	
		Sat. liq. v _f X1000	Sat. vap. v _g	Sat. liq. u _f	Sat. vap. u _g	Sat. liq. h _f	Sat. vap. h _g	Sat. liq. s _f	Sat. vap. s _g
0.01	0.0061	1.0002	206.1	0.01	2376	0.01	2501	0	9.156
4	0.0081	1.0001	157.2	16.79	2381	16.79	2509	0.061	9.051
5	0.0087	1.0001	147.1	21.00	2383	21	2511	0.0762	9.026
6	0.0093	1.0001	137.7	25.21	2384	25.21	2512	0.0912	9.000
8	0.0107	1.0001	120.9	33.61	2387	33.61	2516	0.1212	8.950
10	0.0123	1.0001	106.4	42.01	2389	42.01	2520	0.151	8.901
11	0.0131	1.0007	99.86	46.19	2391	46.19	2522	0.1658	8.876
12	0.0140	1.0007	93.79	50.40	2392	50.4	2523	0.1806	8.852
13	0.0150	1.0007	88.13	54.59	2393	54.59	2525	0.1953	8.828
14	0.0160	1.0007	82.85	58.80	2394	58.8	2527	0.2099	8.805
15	0.0170	1.0007	77.93	62.99	2396	62.99	2529	0.2245	8.781
16	0.0182	1.0013	73.34	67.17	2397	67.17	2531	0.239	8.758
17	0.0194	1.0013	69.05	71.36	2399	71.36	2533	0.2535	8.735
18	0.0206	1.0013	65.04	75.57	2400	75.57	2534	0.2679	8.712
19	0.0220	1.0013	61.30	79.76	2401	79.76	2536	0.2823	8.690
20	0.0234	1.002	57.79	83.94	2403	83.94	2538	0.2966	8.667
21	0.0249	1.002	54.52	88.13	2404	88.13	2540	0.3108	8.645
22	0.0264	1.002	51.45	92.32	2406	92.32	2542	0.3251	8.623
23	0.0281	1.0026	48.58	96.50	2407	96.5	2544	0.3392	8.601
24	0.0298	1.0026	45.89	100.7	2409	100.7	2545	0.3533	8.579
25	0.0317	1.0032	43.36	104.9	2410	104.9	2547	0.3673	8.558
26	0.0336	1.0032	41.00	109.0	2411	109.0	2549	0.3814	8.537
27	0.0357	1.0032	38.78	113.2	2412	113.2	2551	0.3953	8.515
28	0.0378	1.0038	36.69	117.4	2414	117.4	2553	0.4093	8.495
29	0.0401	1.0038	34.73	121.6	2415	121.6	2554	0.4231	8.474
30	0.0425	1.0045	32.90	125.8	2416	125.8	2556	0.4369	8.453
31	0.0450	1.0045	31.17	130.0	2418	130.0	2558	0.4507	8.433
32	0.0476	1.0051	29.54	134.1	2419	134.1	2560	0.4644	8.413
33	0.0503	1.0051	28.01	138.3	2421	138.3	2562	0.478	8.393
34	0.0532	1.0057	26.57	142.5	2422	142.5	2563	0.4917	8.373
35	0.0563	1.0057	25.22	146.7	2423	146.7	2565	0.5053	8.353
36	0.0595	1.0063	23.94	150.8	2425	150.8	2567	0.5188	8.333
38	0.0663	1.007	21.60	159.2	2427	159.2	2571	0.5457	8.295
40	0.0738	1.0076	19.52	167.5	2430	167.5	2574	0.5725	8.257
45	0.0959	1.010	15.26	188.4	2437	188.4	2583	0.6386	8.165
50	0.1235	1.012	12.03	209.3	2443	209.3	2592	0.7037	8.076
55	0.1576	1.015	9.569	230.2	2450	230.2	2601	0.7679	7.991
60	0.1994	1.017	7.671	251.1	2457	251.1	2610	0.8311	7.910
65	0.2503	1.020	6.197	272.0	2463	272.0	2618	0.8934	7.831
70	0.3119	1.023	5.042	293.0	2470	293.0	2627	0.9549	7.755
75	0.3858	1.026	4.131	313.9	2476	313.9	2635	1.016	7.682
80	0.4739	1.029	3.407	334.8	2482	334.9	2644	1.075	7.612

FIGURA A. 3 TABLA DEL VAPOR SATURADO, TABLA DE LA TEMPERATURA

Fuente:(42)

SATURATED STEAM - TEMPERATURE TABLE (Continued)									
T °C	P bar	Spec. vol. m ³ /kg		Int. Ener. kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		Entropy kJ=(kg ⁰ K)	
		Sat. liq. v _f X1000	Sat. vap. v _g	Sat. liq. u _f	Sat. vap. u _g	Sat. liq. h _f	Sat. vap. h _g	Sat. liq. s _f	Sat. vap. s _g
85	0.5783	1.033	2.828	355.8	2488	355.9	2652	1.134	7.544
90	0.7013	1.036	2.361	376.8	2494	376.9	2660	1.193	7.479
95	0.8455	1.039	1.982	397.9	2501	398.0	2668	1.250	7.416
100	1.013	1.044	1.673	418.9	2507	419.0	2676	1.307	7.355
110	1.433	1.052	1.21	461.1	2518	461.3	2691	1.418	7.239
120	1.985	1.060	0.892	503.5	2529	503.7	2706	1.528	7.130
130	2.701	1.069	0.669	546.0	2540	546.3	2720	1.634	7.027
140	3.613	1.080	0.509	588.7	2550	589.1	2734	1.739	6.930
150	4.758	1.091	0.393	631.7	2559	632.2	2746	1.842	6.838
160	6.178	1.102	0.307	674.9	2568	675.5	2758	1.943	6.750
170	7.916	1.114	0.243	718.3	2576	719.2	2769	2.042	6.666
180	10.02	1.127	0.194	762.1	2584	763.2	2778	2.140	6.586
190	12.54	1.141	0.157	806.2	2589	807.6	2786	2.236	6.508
200	15.54	1.156	0.127	850.6	2596	852.4	2793	2.331	6.432
210	19.06	1.172	0.104	895.5	2600	897.8	2798	2.425	6.358
220	23.18	1.190	0.086	940.8	2603	943.6	2802	2.518	6.286
230	27.95	1.209	0.072	986.7	2603	990.1	2804	2.610	6.215
240	33.44	1.229	0.06	1033	2603	1037.3	2804	2.702	6.144
250	39.73	1.251	0.05	1080	2603	1085.3	2802	2.793	6.073
260	46.88	1.275	0.042	1128	2600	1134.4	2797	2.884	6.002
270	54.98	1.302	0.036	1177	2592	1184.5	2790	2.975	5.930
280	64.11	1.332	0.03	1227	2587	1236.0	2780	3.067	5.857
290	74.36	1.365	0.026	1279	2573	1289.0	2766	3.159	5.782
300	85.81	1.403	0.022	1332	2560	1344.0	2749	3.253	5.704
320	112.7	1.499	0.015	1445	2531	1461.5	2700	3.448	5.536
340	145.9	1.638	0.011	1570	2462	1594.1	2622	3.659	5.336
360	186.5	1.893	0.007	1725	2351	1760.5	2481	3.915	5.053
374.14	220.9	3.155	0.003155	2030	2030	2099.3	2099	4.430	4.430

FIGURA A. 4 TABLA DEL VAPOR SATURADO, TABLA DE LA TEMPERATURA

Fuente:(42)

Apéndice 8 Glosario

Biodegradabilidad.- Propiedad de una sustancia a descomponerse en los elementos químicos que lo conforman debido a la acción de agentes biológicos y bajo condiciones naturales.

Biogás.- Compuesto de gas metano con gas carbónico producido por la digestión anaerobia.

Biomasa.- Grupo de materia orgánica energética que haya tenido un origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico.

Biometanización.- Transformación de la materia orgánica mediante ayuda de los microorganismos para generar biogás como producto principal y un digerido que puede ser usado como acondicionador de suelos.

Celulosa.- Es un producto de condensación de glucosa de azúcar con seis carbonos.

Conducción.- Transferencia de calor por contacto directo entre superficies sin intercambio de materia

Convección.- Transferencia de calor a través de un fluido que transporta calor entre zonas con diferentes temperaturas.

DBO.- Mide la materia prima susceptible a ser oxidada por medio biológicos. Se usa para medir el grado de contaminación de la muestra.

Digestión anaerobia.- Descomposición de materia biodegradable en ausencia de oxígeno.

DQO.- Mide principalmente la concentración de la materia orgánica susceptibles a ser oxidadas por medios químicos.

Hemicelulosa.- Es un producto de condensación de glucosa de azúcar con cinco carbonos.

Inóculo.- Suspensión de microorganismos que se transfieren de un ser vivo a otro.

Lignina.- Material polímero que contiene anillos aromáticos con grupos metoxi y cuya fórmula química exacta no se conoce. Este componente se encuentra en productos de papel, periódico, tablas de aglomerados, etc. Este compuesto disminuye la biodegradabilidad de los residuos.

Lignocelulosa.- Es una mezcla entre la lignina y la celulosa.

Lixiviados.- Líquido producido por agua contaminada por una gran cantidad de solutos provenientes de la disposición y descomposición de los residuos.

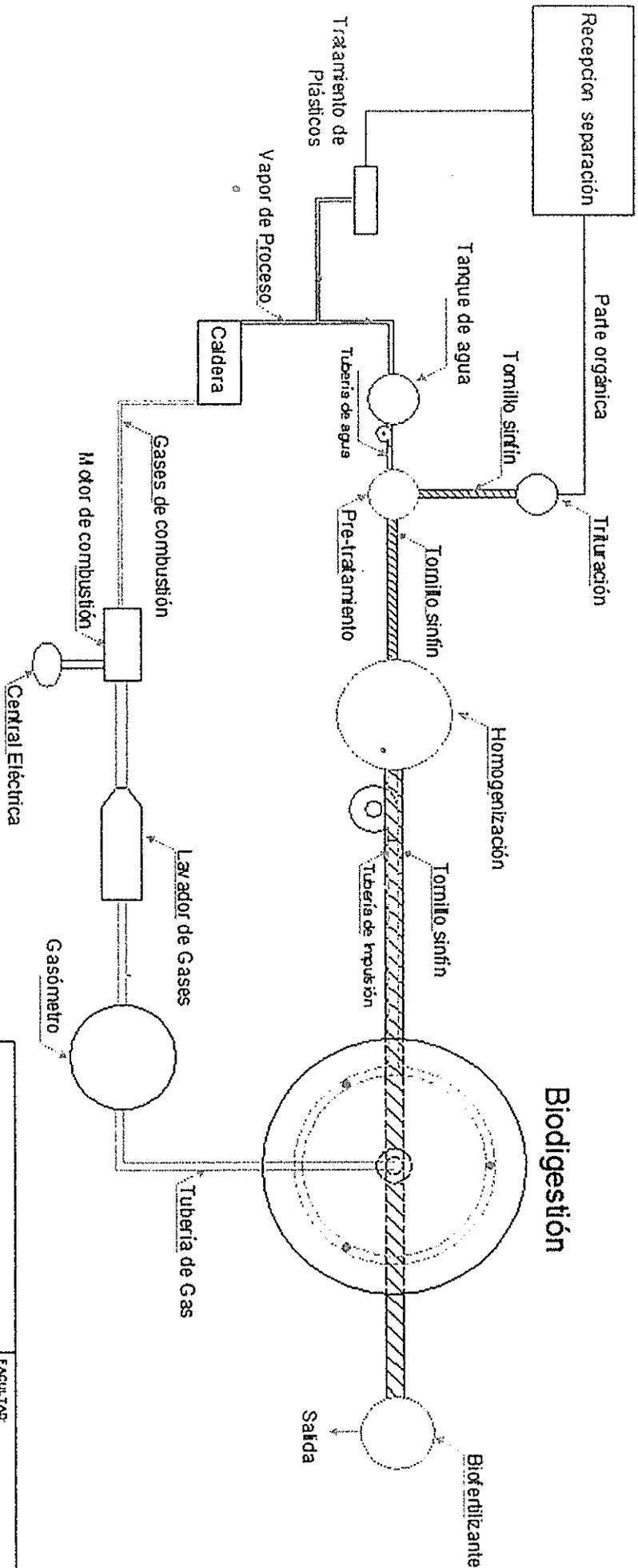
pH.- Medida de la actividad de los electrones.

Potencial Redox.- Es una medida de la actividad de los electrones presentes en la reacción química, es análogo al pH.

Radiación.- Transferencia de calor por radiación electromagnética emitida por un cuerpo debido a su temperatura.

Residuos.- Materiales generados en actividades de producción, transformación y consumo que no han alcanzado ningún valor económico en el contexto en que son generados.

Sustrato.- Medio alimenticio por medio del cual se desarrolla vida.



ESPOL		FACULTAD	FIMCP	
		CARRERA	INGENIERÍA MECÁNICA	
FECHA	31/03/2015	TEMA	"Layout de Planta de Digestión Anaeróbica"	
NOMBRE	K. Santos	TÍTULO:	"Parte de Decisión Análisis y detalles en FIMCP"	
	Dibujado por:	Aprobado por:	Escala: SN	Laminas: 1/1

BIBLIOGRAFÍA

1. Eastern Research Group, Inc. CT Ltd. Estudio de Pre factibilidad del Potencial de Biogás: Relleno Sanitario Las Iguanas". 2007.
2. Briceño Bueno Yolanda. Biogás.pdf. 2012 Sep; Bogotá (Colombia).
3. George Tchobanoglous T y SV. Gestión Integral de Residuos Sólidos. 2nd ed. México: McGraw-Hill; 1998. 604 p.
4. Constitucional T. Constitución de la República del Ecuador. Regist Of N° [Internet]. 2008 [cited 2015 Apr 13];449. Available from: http://bivicce.corteconstitucional.gob.ec/site/image/common/libros/constituciones/Constitucion_2008+_enmiendas.pdf
5. Presidencia de la República del Ecuador. Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria. Sect. Sección VI, De la Calidad Ambiental 2003 p. 24.
6. Verence Simón-Vermot. Modelo para el Manejo de los Residuos Sólidos Generados por el Recinto Chiriboga y sus Alrededores. [Quito-Ecuador]: Universidad Internacional Sek; 2010.
7. Xavier Elías Castells. Tratamiento y Valorización Energética de los Residuos. Madrid, España: Días de Santos; 2012. 684 p.
8. Forster Carneiro T. Digestión Anaerobia Termofílica seca de Residuos Urbanos: Estudio de las variables del proceso en el arranque y estabilización del bioreactor.pdf. [España]: Universidad de Cadiz; 2005.
9. Yolanda Briceño Bueno. Aspectos Bioquímicos y Microbiológicos de la Digestión Anaerobia. 2012 Sep; Valladolid, España.
10. PhD. Alfredo Barriga Rivera. Thermo and Bio-chemical conversion of biomass.pptx. Tecnologías para la conversión de la biomasa; 2011 Sep; Quito-Ecuador.
11. PhD. Alfredo Barriga Rivera IOA. Tecnologías de Transformación de Biológicas de la Biomasa. 2011.
12. Tratamiento mediante Reactores Anaerobios. Tratamiento de Aguas Residuales; 2002; Uruguay.

13. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Besel. Biomasa. Madrid: IDAE; 2007.
14. De Baer L. The Dranco Technology: A unique digestion technology for solid organic waste. Org Waste Syst OWS Pub Bruss Belgium [Internet]. 2010 [cited 2015 Feb 6]; Available from: <http://www.ows.be/wp-content/uploads/2013/02/The-DRANCO-technology-2012.pdf>
15. NYLIC SB. Estudios Preliminares y diseños definitivos del proyecto; áreas de ampliación adyacentes al Relleno Sanitario Las Iguanas para la disposición final de los residuos sólidos que genera la ciudad de Guayaquil y sus parroquias rurales. 2001.
16. Ph D. David Matamoros. Informe de análisis de datos de operación registrados y estudio de la demanda futura en el Relleno Sanitario Las Iguanas, Guayaquil. 2014.
17. Ph D. David Matamoros. Fuentes, Tipos y Composición de los Desechos Sólidos. Gestión Integral de los Residuos Sólidos; 2014 Jun; ESPOL, Instituto de Ciencias Químicas.
18. Msc. Nicolás Oliva Pérez EARA. Impuestos verdes, Una alternativa viable para el Ecuador. 2011.
19. Bill Scanlon, NREL. Enzyme could create biofuels 14 times faster than current methods. 2015.
20. Charles Banks. Optimizing anaerobic digestion. Evaluating the Potential for Anaerobic Digestion to provide Energy and Soil amendment; 2014 Mar 25; University of Southampton.
21. Norma S. Mc Donald. Experiences with Anaerobic Digestion of Energy Crops and High Solids Manures. Organic Waste Systems; 2011 May; Estados Unidos.
22. Lucía de Baere. OWS y la Biometanización. Organic Waste Systems; 2013 Mar 7; UNAM, México DF.
23. Yolanda Briceño Bueno. Digestores Tipos y Características, Tecnologías. Tecnologías para el aprovechamiento de Biogás; 2012 Sep; Parque Tecnológico Boecillo, Valladolid España.
24. Sistema de Biodigestión DRANCO y Generación de Energía. Basura Frente a la Energía Limpia, Biofertilizantes y materias Primas; 2015 Mar; Quito-Ecuador.

25. UNTHA Co. UNTHA Shredding technology. 2014.
26. American Petroleum Institute. API Standart 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage.
27. Comité ejecutivo de la norma ecuatoriana de la construcción. Norma Ecuatoriana de la construcción, Cargas y Materiales. de Abril del, 2011 p. 37.
28. Comité ejecutivo de la norma ecuatoriana de la construcción. Norma Ecuatoriana de la construcción NEC-11 Peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente. de Abril del, 2011 p. 79.
29. Almacenaje de fluidos | Textos Científicos [Internet]. [cited 2015 Apr 15]. Available from: <http://www.textoscientificos.com/quimica/almacenaje/almacenaje-fluidos>
30. Aceros Otero. Productos, planchas de acero carbono ASTM A36. [Internet]. [cited 2015 Apr 11]. Available from: http://www.acerosotero.cl/planchas_acero_carbono_astm_a36.html
31. Aceros Otero. Productos, planchas de acero inoxidable AISI 304/304L. [Internet]. [cited 2015 Apr 11]. Available from: http://www.acerosotero.cl/planchas_acero_inoxidable_aisi_304_304l.htm
32. INDURA S.A. Manual de Sistemas y materiales de soldadura Indura.pdf. 1era Edición. Ograma; 2013. 162 p.
33. Gas Holders | Double Membrane Gas Holders | Utile Engineering [Internet]. [cited 2015 Apr 17]. Available from: <http://www.utileengineering.co.uk/gas-holders/>
34. ENYA. La basura, fuente de energía limpia. biofertilizantes y materias primas. Energías Limpias; 2015 Mar 11; Quito-Ecuador.
35. Crane. Flujo de Fluidos en Válvulas, accesorios y tuberías. Clemente Reza García. México: Mc Graw Hill; 1993. 110 p.
36. Metodología para selección de diámetro de tubería por el criterio de [Internet]. [cited 2015 Apr 8]. Available from: <https://es.scribd.com/doc/87239499/Metodologia-para-seleccion-de-diametro-de-tuberia-por-el-criterio-de>
37. DIPAC. Catálogo de Tubería. 2015.

38. Grindex. Manual de Bombas y tuberías. 2015.
39. Theodore Baumeister EAA. Manual del Ingeniero Mecánico. Octava. Estados Unidos: McGraw-Hill; 1990. 320 p.
40. Kenneth McNaughton. Bombas: Selección, uso y mantenimiento. Mexico: McGraw-Hill; 1993. 371 p.
41. Frank P. Incropera DPDW. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th Edición. Estados Unidos: McGraw-Hill; 2007. 984 p.
42. Yunos A. Cengel MAB. Termodinámica. 5ta Edición. Mexico: McGraw-Hill; 2006. 985 p.
43. Tapia JM. Capital social: las redes sociales y su impacto sobre el desarrollo socio-económico [Internet]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil; 2010 [cited 2015 Mar 22]. Available from: http://biblioteca.utec.edu.sv/siab/virtual/elibros_internet/55750.pdf
44. Duran [Internet]. [cited 2015 Mar 22]. Available from: <http://durancyty.blogspot.com/2014/06/duran-ubicacion-geografica-el-canton.html>
45. Universidad Carlos III de Madrid. Diseño de tornillos sinfín.pdf. 2013.