



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO BIOENERGÉTICO, EMPLEANDO RESIDUOS
SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Smile Rigoberto Barillas de León

Asesorado por los Ings. Jorge Gilberto González Padilla y
Alberto Arango Sieckavizza

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO BIOENERGÉTICO, EMPLEANDO RESIDUOS
SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

SMILE RIGOBERTO BARILLAS DE LEÓN

ASESORADO POR LOS INGS. JORGE GILBERTO GONZÁLEZ PADILLA Y
ALBERTO ARANGO SIECKAVIZZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE UN PROTOTIPO BIOENERGÉTICO, EMPLEANDO RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 22 de septiembre de 2014.

Smile Rigoberto Barillas de León

Guatemala, 12 de septiembre de 2016

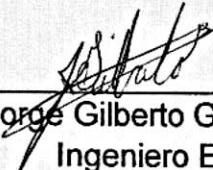
**Ingeniero
Gustavo Benigno Orozco Godinez
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala**

Estimado Ingeniero:

Reciba un atento saludo de mi parte, la razón de la presente es para comunicarle que he revisado y asesorado el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante **Smile Rigoberto Barillas de León** con número de carné **2001-17135**, titulado **DISEÑO DE UN PROTOTIPO BIOENERGÉTICO EMPLEANDO RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, y luego de haber realizado las revisiones y correcciones correspondientes, he encontrado que el mismo ha sido concluido satisfactoriamente, por lo que procedo a notificar por este medio su aprobación final.

Atentamente,

Jorge Gilberto González Padilla
INGENIERO ELECTRICISTA
No. DE COLEGIADO 9055



Jorge Gilberto González Padilla
Ingeniero Electricista
Colegiado: 9055



Ref. EIME 65 2016.

Guatemala, 12 de OCTUBRE 2016.

Señor Director
Ing. Francisco Javier González López
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**DISEÑO DE UN PROTOTIPO BIOENERGÉTICO EMPLEANDO
RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA,** del estudiante Smile
Rigoberto Barillas de León, que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
DID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
Coordinador Área Potencia



sro

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 65. 2016.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; SMILE RIGOBERTO BARILLAS DE LEÓN titulado: DISEÑO DE UN PROTOTIPO BIOENERGÉTICO EMPLEANDO RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 2 DE NOVIEMBRE 2016.

Universidad de San Carlos
De Guatemala

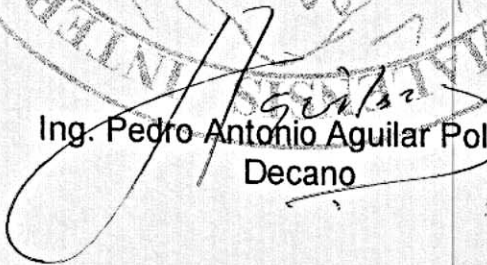


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.D.084.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN PROTOTIPO BIONERGÉTICO, EMPLEANDO RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Smile Rigoberto Barillas de León**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, febrero de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- A Dios** Ser supremo, omnipresente, omnipotente y omnisciente creador del universo.
- A mis padres** María Magdalena De León Celada y Rigoberto Barillas Salazar por su amor, sus consejos, comprensión y apoyo incondicional. Gracias por creer en mí, este es mi regalo por el trabajo y sacrificio realizado, para que yo pudiera estudiar. Dios me los bendiga siempre.
- A mi hermana** Magda Lorena Barillas De León, por su cariño, paciencia, comprensión y motivación para seguir estudiando una carrera universitaria.
- A mis abuelos** Por dar la oportunidad a mis padres para poder estudiar y sobresalir en esta vida.
- A mis familiares** Por permitirme formar parte de esta gran familia.
- A mi esposa** Karin Sucely Figueroa Jeréz, por formar parte de mi vida.
- A mi hija** Jessica Paola Barillas Figueroa, por darme el último empuje para concluir mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por haber sido mi segundo hogar, donde logre formarme como profesional.

Facultad de Ingeniería

Por proporcionarme el conocimiento necesario y permitirme ser parte de una generación autodidacta para llegar a ser un profesional productivo para mi país.

Catedráticos

Por sus enseñanzas, consejos, dedicación, humildad y entrega a la docencia.

Amigos y compañeros

Por su apoyo incondicional en los momentos de estudio vividos, alegrías, tristezas y paciencia al explicarme algún tema no comprendido.

Mis asesores

Por sus consejos, tiempo invertido, dedicación y apoyo incondicional, Dios los bendiga.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
1.1. Energía.....	1
1.2. Biomasa.....	3
1.2.1. Clasificación de la biomasa	4
1.2.2. Potencial de la biomasa.....	4
1.2.3. Fuentes de la biomasa	6
1.2.4. Procesos de la biomasa	6
1.2.5. Riesgos por el mal manejo de la biomasa	10
1.3. Proceso de biodigestión	11
1.3.1. Características del biodigestor.....	11
1.3.2. Tipos de biodigestor	12
1.3.3. Proceso aerobio.....	14
1.3.4. Proceso anaerobio.....	14
1.3.4.1. Proceso de biodigestion anaerobio.....	15
1.3.4.2. Reacciones bioquímicas en la generación de biogás	16
1.3.4.3. Reacciones biológicas (digestión anaeróbica).....	17

1.3.4.4.	Bacterias que intervienen en el proceso de biodigestión	19
1.3.4.5.	Descripción de las fases del proceso ...	23
1.3.4.5.1.	Hidrólisis.....	23
1.3.4.5.2.	Acidogenesis.....	24
1.3.4.5.3.	Metanogenesis.....	25
1.3.4.6.	Factores que afectan la biodigestión	26
1.3.4.6.1.	Temperatura.....	26
1.3.4.6.2.	pH	27
1.3.4.6.3.	Tiempo de retención	28
1.3.4.6.4.	Sustancias inhibidoras de la reacción.....	29
1.3.4.6.5.	Alcalinidad.....	29
1.3.4.6.6.	Agitación	30
1.3.4.6.7.	Otros factores.....	30
1.4.	Biogás	31
1.4.1.	Propiedades del biogás	32
1.4.2.	Componentes.....	33
1.4.3.	Usos del biogás.....	34
2.	PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE BIOMASA DE DESECHOS SÓLIDOS URBANOS	37
2.1.	Sistemas de obtención de energía	37
2.1.1.	Digestión anaeróbica.....	37
2.1.2.	Purificación de gas	42
2.2.	Sistema de combustión	43
2.3.	Sistema de gasificación.....	43
2.4.	Conversión de energía calorífica a eléctrica	49
2.4.1.	Motor de combustión interna alterna (MCIA).....	51
2.4.1.1.	Tiempo de ciclo de combustión	52

	2.4.2.	Generador síncrono (GS)	53
A.		Operación del generador sincrónico (GS), parte eléctrica	54
B.		Operación del generador sincrónico (GS), parte de construcción	56
	2.4.2.1.	Velocidad de rotación	57
	2.4.2.2.	Circuito equivalente	59
	2.4.2.3.	Eficiencia del generador síncrono.....	63
2.5.		Generación de energía eléctrica a partir de biogás	67
	2.5.1.	Principio de generación de energía eléctrica a partir de una turbina.....	68
	2.5.2.	Tipos de generadores.....	69
	2.5.3.	Generación de energía eléctrica a partir de biogás	70
	2.5.4.	Características técnicas de una turbina de biogás	73
2.6.		Aspectos de la producción de electricidad por biogás.....	74
	2.6.1.	Combustión de biomasa	74
	2.6.2.	Transformación de biomasa	76
	2.6.3.	Sistema de cogeneración por medio de motores de combustión interna (MCI).....	78
3.		RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).....	87
	3.1.	Sistemas de recolección selectiva.....	87
	3.1.1.	Recolección selectiva de desechos orgánicos.....	101
	3.2.	Fases de la gestión de residuos sólidos urbanos.....	104
	3.2.1.	Prerrecolecta	106
	3.2.2.	Recogida	107
	3.2.3.	Tratamiento.....	113
	3.2.4.	Disposición final.....	113
	3.3.	Reutilización y reciclaje de desechos	117

3.3.1.	Sistematización del reciclaje	119
3.3.2.	Separación de RSU.....	121
3.4.	Importancia sanitaria de los desechos sólidos	123
3.5.	Manejo integral de los desechos sólidos.....	125
3.6.	Educación y la concientización ambiental para la gestión de residuos.....	127
4.	PROPUESTA DEL DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR	129
4.1.	Parámetros de diseño	129
4.1.1.	Volumen requerido del biodigestor.....	137
4.1.2.	Sustrato	143
4.1.3.	Condiciones de operación	144
4.1.4.	Geometría	148
4.1.5.	Espesor del estanque.....	150
4.1.6.	Espesor de diseño.....	153
4.1.7.	Espesor hídrico	156
4.2.	Diseño del sistema de bombeo	156
4.2.1.	Parámetro de diseño	156
4.2.2.	Cálculo del diámetro de tuberías.....	157
4.2.3.	Espesor mínimo de tuberías.....	160
4.2.4.	Cálculo de potencia de operación de la bomba.....	160
4.2.5.	Selección de la bomba	164
4.3.	Equipos complementarios	165
4.3.1.	Antorcha	165
4.3.2.	Agitador.....	166
4.3.2.1.	Parámetro de diseño	166
4.3.2.2.	Cálculo del agitador.....	167
4.3.3.	Pérdidas y aportes de calor.....	169
4.3.3.1.	Calor aportado al fluido	169

4.3.3.2.	Pérdida de calor por las paredes	170
4.3.4.	Balance energético	174
4.4.	Especificación del generador.....	177
4.5.	Estimación de costos.....	179
CONCLUSIONES		185
RECOMENDACIONES.....		187
BIBLIOGRAFÍA.....		189
ANEXOS.....		191

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Proceso de digestión anaeróbica.....	38
2. Ejemplo del contenedor con gasificación variable.....	49
3. Ciclo de combustión del motor de combustión interna alterna (MCIA)	52
4. Generador sincrónico.....	54
5. Curva de magnetización del generador síncrono.....	59
6. Circuito equivalente de la máquina síncrona.....	60
7. Conexión trifásica del generador (Y y Δ).....	63
8. Principio de una turbina de gas.....	69
9. Partes de turbina Elliot, modelo YR.....	73
10. Esquema de cogeneración con motores de combustión.....	79
11. Ciclo Otto	81
12. Ciclo Diésel	82
13. Esquema de cogeneración con turbina de gas	83
14. Esquema de cogeneración con turbina de vapor sistema Rankine.....	84
15. Dimensiones del contenedor.....	89
16. Pregunta No.7 encuesta en edificios “M”	90
17. Pregunta No.7 encuesta en edificios “S”	91
18. Pregunta No.7 encuesta en edificios “T”	91
19. Pregunta No.7 encuesta en edificios de administración.....	92
20. Pregunta No.7 encuesta en edificios de EPFEM	93
21. Baño portátil	96
22. Interior baño portátil	97

23. Centro de acopio.....	98
24. Ubicación del biodigestor	99
25. Metodología para la recolección selectiva de RSU	100
26. Jerarquización de la gestión de los residuos sólidos	104
27. Sistema de gestión de RSU	105
28. Modelo del camión de reciclaje.....	108
29. Modelo de picop especial	108
30. Separación RSU	122
31. Diseño del biodigestor	130
32. Medidas generales del biodigestor (metros)	132
33. Sistema de tanque dosificador.....	134
34. Comparación entre biomasa inicial y la requerida en el biodigestor ...	140
35. Componente del sistema	147
36. Diseño del tanque de biodigestión	149
37. Esfuerzo máximo de MPa corte transversal del tanque.....	150
38. Deformación total del tanque de biodigestión	151
39. Forma de tanque de pretratamiento.....	152
40. Proceso de transporte de biomasa	155
41. Agitador de hélices	166
42. Capas de aislamiento en tanques.....	170
43. Generador de gas ORIPO	179

TABLAS

I.	Procesos de conversión de la biomasa en energía.....	9
II.	Componentes del biogás.....	33
III.	Principales reacciones metanogénicas	40
IV.	Ecuación gasificador ascendente.....	47
V.	Ecuación gasificador descendente.....	47
VI.	Calculo de energía generada	51
VII.	Ecuación frecuencia eléctrica.....	57
VIII.	Ecuación tensión interna generada	58
IX.	Ecuación constante en radianes	58
X.	Ecuación constante en radianes por segundos.....	58
XI.	Ecuación de caída de tensión por reacción de armadura	61
XII.	Ecuación voltaje en terminales.....	61
XIII.	Ecuación general de voltaje en terminales.....	61
XIV.	Ecuación reactancia síncrona	62
XV.	Ecuación final de voltaje en terminales	62
XVI.	Ecuación tensión del terminal	62
XVII.	Pérdidas en la máquina eléctrica	64
XVIII.	Pérdidas del generador síncrono	65
XIX.	Eficiencia total	66
XX.	Potencia de entrada	66
XXI.	Potencia de salida	67
XXII.	Poder calorífico del biogás	72
XXIII.	Modelo YR marca ELLIOT TURBINES	74
XXIV.	Procesos de transformación de la biomasa	77
XXV.	Proceso del ciclo Otto	80
XXVI.	Proceso del ciclo de Diésel	82
XXVII.	Colores de los contenedores.....	88

XXVIII.	Materia orgánica promedio	96
XXIX.	Ingreso preliminar contenedor azul.....	109
XXX.	Ingreso preliminar contenedor amarillo.....	110
XXXI.	Ingreso preliminar contenedor blanco.....	111
XXXII.	Ingreso preliminar contenedor café.....	112
XXXIII.	Metodología de las 4 erres	118
XXXIV.	Sistematización del reciclaje	120
XXXV.	Dimensión del tanques para el sistema de dosificación.....	135
XXXVI.	Parámetros y condiciones del Sistema de Digestión Anaerobia.....	136
XXXVII.	Inhibición y toxicidad de los metales pesados en el proceso de digestión anaerobia.....	137
XXXVIII.	Parámetros de diseño del biodigestor.....	138
XXXIX.	Requerimientos para el diseño de tornillo sinfin	155
XL.	Características de fluido	157
XLI.	Ecuación flujo en tubería	158
XLII.	Estimación de flujo.....	158
XLIII.	Estimación de flujo, tramos en el interior del digestor.....	158
XLIV.	Ecuación de flujo turbulento.....	159
XLV.	Espesor de las tuberías y velocidad del flujo	160
XLVI.	Ecuación de potencia de la bomba	161
XLVII.	Tipo de flujo del coeficiente de fricción en tuberías	161
XLVIII.	Ecuación transporte de biomasa.....	162
XLIX.	Pérdida de energía en el sistema y potencia de la bomba	164
L.	Ecuación cálculo del agitador requerido	167
LI.	Cálculo del agitador requerido	169
LII.	Cálculo del calor aportado al digestor.....	170
LIII.	Ecuación transferencia de calor.....	171
LIV.	Ecuación equivalente de convección	172
LV.	Temperatura superficial y pérdida de energía	173

LVI.	Características del vapor de inyección.....	175
LVII.	Ecuación vapor de inyección.....	175
LVIII.	Propiedades del metano	176
LIX.	Ecuación sobre la cantidad de energía disponible	176
LX.	Generador de gas ORIPO	178
LXI.	Costo del biodigestor.....	180
LXII.	Costo Mantenimiento por día	181
LXIII.	Costo de mano de obra planta de biodigestion	182

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
DQO	Altas concentraciones de demanda química de Oxígeno
H	Altura
NH ₄ ⁺	Amonio
HP	Caballo de fuerza
C	Carbono
NADH ₂	Cofactor enzimático nicotinamida adenindinucléotido acarreador de electrones o iones de hidrógeno
IF	Corriente de campo en amperio [A]
∅	Diámetro
H ₂	Dihidrógeno
SO ₂	Dióxido de azufre
CO ₂	Dióxido de carbono
SOD	Enzimas superóxido dismutasa
ϕ	Flujo magnético en weber [Wb]
f _e	Frecuencia en Hertz
°	Grados
g	Gramo
H	Hidrógeno
K	Kelvin
Kcal	Kilo calorías
KJ	Kilo Joule
KPa	Kilo pascal

Kw	Kilo watt/Kilo vatio
Kg	Kilogramo
KWh	Kilovatio-hora/Kilo watt-hora
L	Litro
PH	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución
mol	Medida de la cantidad de sustancia
MJ	Mega Joule
Mw	Mega watt/Mega vatio
CH₄	Metano
m	Metro
m³	Metro cúbico
m²	Metros cuadrados
mm	Milímetro
CO	Monóxido de carbono
N₂	Dinitrógeno
N	Nitrógeno
H₂O	Óxido de hidrógeno [agua]
O	Oxígeno
O₂	Oxígeno diatómico
Pa	Pascal
φ	Phi/fi
%	Porcentaje
Q	Quetzales
C/N	Relación carbono-nitrógeno
s	Segundo
H₂S	Sulfuro de hidrógeno
TM	Tonelada métrica
W	Watt/Vatio

GLOSARIO

Archea	Criaturas unicelulares que se unen a las bacterias para compensar una categoría de la vida que produce gas metano, como producto de desecho de su “digestión” o proceso de elaboración de energía.
Biogás	Mezcla gaseosa que se obtiene de la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas.
Biomasa	Materia o sustancia orgánica renovable de origen vegetal o animal.
Bujía	Es el elemento que produce el encendido de la mezcla de combustible y oxígeno en los cilindros, mediante una chispa, en un motor de combustión interna.
Cigüeñal	Es un eje acodado, con codos y contrapesos presentes en ciertas máquinas que, aplicando el principio del mecanismo de biela-manivela, transforma el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa.

Combustión	Reacción química de oxidación en la cual, generalmente, se desprende una gran cantidad de energía en forma de calor y luz.
Culata	Tapa de cilindros, cabeza del motor o tapa del bloque de cilindros; es la parte superior de un motor de combustión interna que permite el cierre de las cámaras de combustión.
Dosificador	Aparato o mecanismo que sirve para suministrar cantidades determinadas de un producto o sustancia.
Electroimán	Es un imán, en donde su campo magnético se produce mediante el flujo de una corriente eléctrica.
Factores	Aquellos elementos que pueden condicionar una situación, volviéndose los causantes de la evolución o transformación de los hechos.
<i>Higher Heating Value</i>	La cantidad máxima de energía potencialmente recuperable dada una fuente de biomasa determinada.
<i>Lower Heating Value</i>	Valor apropiado para considerar la potencialidad de uso de la biomasa como combustible.
Parámetro	Es una constante o variable que aparece en una expresión matemática y cuyos distintos valores dan lugar a distintos casos en un problema.

Reluctancia magnética Es la resistencia que este posee al paso de un flujo magnético cuando es influido por un campo magnético.

Voltaje Es una magnitud física, con la cual se puede cuantificar o “medir” la diferencia de potencial eléctrico o la tensión eléctrica entre dos puntos, y es medible mediante un aparato llamado voltímetro.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación desarrolla el diseño de un prototipo bioenergético, empleando residuos sólidos orgánicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Aprovechando los recursos orgánicos existentes en el campus central, para la generación de energía eléctrica renovable.

Para la realización de este trabajo se necesitó comprender conceptos básicos de energía como su clasificación. Definir claro el concepto de biomasa, potencial, fuentes, procesos, riesgos, reacciones químicas, reacciones biológicas, bacterias, factores, temperatura, ph, tiempo, sustancias, agitación, biogás, propiedades, componentes y sus respectivos usos.

Con los conceptos claros se inicia el estudio en la producción de energía eléctrica a través de la biomasa de desechos sólidos orgánicos. Los sistemas de obtención de energía, digestión anaeróbica, purificación de gas, sistemas de combustión, sistemas de gasificación servirán de base para proponer un prototipo eficiente.

Así se logra una propuesta del diseño de construcción del biodigestor utilizando: parámetros de diseño, cálculo del diámetro de tuberías y equipos complementarios.

Por último, se realiza la recolección de residuos sólidos orgánicos (USAC) para lo cual se desarrollaron diferentes subtemas como la concientización ambiental para la gestión de residuos.

OBJETIVOS

General

Realizar el diseño de un prototipo bioenergético, empleando residuos sólidos orgánicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Específicos

1. Producir biogás empleando residuos sólidos orgánicos.
2. Procesar los residuos orgánicos contribuyendo a la disminución de la contaminación ambiental.
3. Desarrollar el proyecto dejando elementos de referencia para posteriores investigaciones.
4. Aplicar los conocimientos obtenidos en diferentes asignaturas de la carrera iniciando el desarrollo de la ingeniería aplicada.
5. Realizar un análisis crítico y reflexivo sobre la eficiencia del aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Guatemala.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se necesita reducir la dependencia de los combustibles fósiles, debido a que esa fuente de energía ha generado dos tipos de preocupaciones: el cambio climático y el agotamiento de los combustibles. Centroamérica produce menos del 0,5 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel global. Es señalada como “punto caliente” vulnerable al cambio climático entre regiones tropicales del mundo. Guatemala y Honduras son responsables del 76 % de emisiones GEI en el istmo, principalmente por el mal uso del suelo y quema excesiva de hidrocarburos y leña.

El presente trabajo de investigación contribuye a la producción de energía renovable, realizando un diseño de un prototipo bioenergético, empleando residuos sólidos orgánicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Al aprovechar estos recursos se reduce la dependencia de combustibles fósiles, con la finalidad de dotar de una herramienta técnica para el uso de futuras investigaciones. Consta de cuatro capítulos, los cuales se describen a continuación.

En el capítulo 1 se dan a conocer los fundamentos teóricos de energía, biomasa, proceso de biodigestión y biogás.

En el capítulo 2 se detalla la producción de energía eléctrica a través de biomasa de desechos sólidos urbanos para lo cual se desarrollaron los siguientes subtemas: sistemas de obtención de energía, sistema de combustión, sistema de gasificación, conversión de energía calorífica a eléctrica, generación de energía eléctrica a partir de biogás y aspectos de la producción de electricidad por biogás.

En el capítulo 3 se realiza la recolección de residuos sólidos orgánicos (USAC) para lo cual se desarrollaron los siguientes subtemas: sistemas de recolección selectiva, fases de la gestión de residuos sólidos orgánicos, reutilización y reciclaje de desechos, importancia sanitaria de los desechos sólidos, manejo integral de los desechos sólidos, educación y la concientización ambiental para la gestión de residuos.

Por último, en el capítulo 4 se presenta la propuesta de diseño y construcción del biodigestor. Se tratan los siguientes subtemas: parámetros de diseño, cálculo del diámetro de tuberías, equipos complementarios y un análisis económico del costo de este proyecto.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Energía

Es la capacidad para realizar un trabajo y se presenta de diversas formas, entre las más comunes están: energía mecánica, energía eléctrica, energía electromagnética, energía química, energía nuclear, energía térmica, energía cinética.

Entre otras, la energía generada a partir de los recursos biomásicos, puede ser comercializada como “energía verde”, pues no contribuye al efecto invernadero por estar libre de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Este tipo de energía puede ofrecer nuevas opciones al mercado, ya que su estructura de costos permitirá a los usuarios soportar mayores niveles de inversión en tecnologías eficientes, lo cual incrementará la industria bioenergética.

De acuerdo al origen de las fuentes de energía, estas se pueden clasificar en:

- Renovables
- No renovables

La energía de fuentes renovables, es cada vez más necesaria e importante, en vista de los efectos generados por el uso de los derivados del petróleo, tales como el efecto invernadero, la destrucción de la capa de ozono, la contaminación de suelos, el cambio climático, problemas políticos entre naciones, entre otros.

Para elegir una determinada tecnología en el tratamiento de residuos, se deben considerar las características de la materia prima, siendo la biodigestión, ampliamente aplicada, para el tratamiento de residuos orgánicos, que son fácilmente biodegradables, y que tienen contenidos relativamente altos de humedad, superando el 60 %.

Desde el punto de vista del control de contaminación, los alimentos son residuos de gran volumen que se generan a diario, ocupan espacios valiosos en los vertederos. Las características físicas (procesos físicos, presión, aceites vegetales, energía mecánica-eléctrica), y bioquímicos (anaeróbicos y aeróbicos) de los residuos de alimentos, constituyen información importante para el diseño y operación de residuos de digestores anaeróbicos, que generan biogás.

“Existen características comunes de los desechos de alimentos: a) grandes cantidades de materiales orgánicos, tales como proteínas, carbohidratos y lípidos, b) altas concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO), y nitrógeno, y c) altas variaciones en pH.”¹

La composición de la materia prima, es uno de los principales factores que afecta la producción de biogás y la estabilidad del proceso durante la digestión, que se encuentran en pleno desarrollo y estudio, para dar respuesta a la significativa demanda de energía.

¹ WALDRON, Keith. *Advances in biorefineries biomass and waste supply chain exploitation*. p. 20.

Por eso la digestión de biomasa humedecida por bacterias, en un ambiente sin oxígeno (anaeróbico), produce un gas combustible llamado biogás. En el proceso, se coloca la biomasa (generalmente desechos de animales como el estiércol de vaca, estiércol de cerdo y gallinaza), en un contenedor cerrado (el digestor) y allí se deja fermentar. Después de unos días, dependiendo de la temperatura del ambiente, se habrá producido un gas, que es una mezcla de CH_4 y CO_2 .

1.2. Biomasa

Es el conjunto total de los organismos vivientes, animales y vegetales, o bien, se le define como materia o sustancia orgánica renovable de origen vegetal o animal. Esta fuente de energía se ha utilizado desde la época preindustrial (antes de 1 800), cuando se empleó la energía de la biomasa en la forma más artesanal: quemando la leña en hogueras para la cocción de alimentos. Al pasar el tiempo se le dio otro tipo de aplicaciones como el forjar metales, cubrir necesidades en calderas, de calefacción, producción de vapor, transporte y, por último, en la generación de electricidad, hasta llegar a ser la fuente energética más importante para la humanidad.

Los recursos biomásicos, incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como desechos agrícolas y forestales, plantas acuáticas, desechos animales como el estiércol de vaca, de cerdo y la basura urbana. Ahí se puede obtener de la materia viva o masa, el tipo de energía renovable, que puede ser transformada en otro tipo de energía, al someterla a determinados procesos conocidos como procesos de conversión energética de la biomasa.

1.2.1. Clasificación de la biomasa

Según el aprovechamiento energético, son las propiedades inherentes de la biomasa, las que determinan el proceso de conversión y las consecuentes dificultades del proceso que puedan surgir, en los procesos de conversión para la biomasa, dentro de las cuales se encuentran:

- a) **Biomasa natural:** aquella que se produce de forma espontánea en la naturaleza, sin intervención humana.
- b) **Biomasa residual:** es aquella que se genera en cualquier actividad humana. Se distingue entre biomasa residual seca (procedente de recursos generados de actividades agrícolas y forestales, en industrias agroalimentarias e industrias de transformación de madera), y biomasa residual húmeda.
- c) **Biomasa residual húmeda:** entre estos están los vertidos biodegradables, formados por aguas residuales urbanas e industriales, los residuos ganaderos, y también los residuos sólidos urbanos, como los materiales biodegradables, sobrantes del ciclo de consumo humano.
- d) **Biomasa marina:** consideradas en este grupo las algas, hierbajos marinos, juncos, entre otros. En donde el punto de controversia encontrado es el uso de la biomasa como fuente de energía primaria, la que reside principalmente en la competitividad con el abastecimiento de comida humana.

1.2.2. Potencial de la biomasa

Es una expresión del contenido energético liberado cuando el mismo se quema en el aire. La que se expresa de dos formas:

- HHV (*Higher heating value*): energía total liberada cuando el combustible es quemado, incluyendo la del calor latente² contenido en el vapor de agua. Por tanto, representa la cantidad máxima de energía potencialmente recuperable dada una fuente de biomasa determinada.
- LHV (*Lower Heating Value*): contenido energético sin contar el calor latente en el vapor de agua, por lo que el uso efectivo del LHV, será el valor apropiado para considerar la potencialidad de uso de la biomasa como combustible.

Aunque la biomasa como fuente de energía limpia se hace bajo nuevos criterios, y enfoques, no debe olvidarse que el balance de CO₂, es neutro. La combustión de biomasa, si se realiza en condiciones adecuadas, produce agua y CO₂, pero la cantidad emitida de este último gas, se transforma como el principal responsable del efecto invernadero, al ser captada por medio de las plantas durante su crecimiento, pero también se puede producir CO (monóxido de carbono). Es decir, el CO₂, de la biomasa viva forma parte de un flujo de circulación continuo entre la atmósfera y la vegetación, sin que suponga el incremento de ese gas en la atmósfera, de tal forma que la vegetación va a la misma velocidad que se degrada.

² Calor latente: cambio de estado de las sustancias, en el cual, ellas cambian de un sólido a un líquido sin algún incremento de temperatura. Es en este punto donde la sustancia está en estado líquido y el calor se retira de ella, la sustancia se solidificará sin un cambio en su temperatura. El calor envuelto en uno u otro de estos (cambio de un sólido a un líquido, o de un líquido a un sólido), sin un cambio de temperatura se conoce como calor latente de fusión.

1.2.3. Fuentes de la biomasa

Son aquellas que pueden ser usadas para la producción de energía cubriendo un amplio rango de materiales y fuentes, de tal forma que se puede decir que la naturaleza y las actividades de los seres vivos, son una fuente inagotable, sin embargo, se puede decir que sus principales fuentes son:

- Los residuos de la industria forestal y la agricultura.
- Los residuos orgánicos, que se usan en la industria de bebidas, piscicultura, industria de papel, industria alimenticia.
- Los desechos urbanos y las plantaciones energéticas que se usan generalmente para procesos modernos de conversión, los cuales involucran la generación de energía a gran escala, enfocados hacia la sustitución de combustibles fósiles.

1.2.4. Procesos de la biomasa

Son aquellos residuos o cultivos energéticos (el caso de los residuos forestales, residuos agrícolas, residuos industriales agrícolas, residuos industriales forestales y los residuos sólidos urbanos), que son transformados en calor, combustibles o electricidad, que conducen a la forma de energía útil requerida en cada caso, haciéndose necesario tratarla de manera adecuada. A menudo, la biomasa es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad.

Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra. A continuación se presentan los procesos de conversión de biomasa más relevantes, los cuales se pueden clasificar en tres categorías:

- Procesos de combustión directa: considerada como la forma más antigua y más común, hasta hoy, para extraer la energía de la biomasa produciendo CO_2 y CO . Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente para el secado de productos agrícolas.
- Procesos termo-químicos: estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un valor calorífico mayor,³ los cuales hacen más conveniente su utilización y transporte. Cuando la biomasa es quemada en condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. Dependiendo de la tecnología, el producto final es un combustible sólido (carbón vegetal), gaseoso, o combustible líquido (gasificación constituido por una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, con proporciones menores de dióxido de carbono y nitrógeno).

³ Valor calorífico mayor: es una indicación de la energía químicamente combinada en el combustible referente a un ambiente estandarizado, el estado de referencia del agua es su estado líquido. La estandarización implica la temperatura, el estado del agua (vapor o líquido), y los productos de la combustión (CO_2 , H_2O , etc.). La energía químicamente combinada en el combustible está dada por el valor calorífico del combustible en energía (j) y por la cantidad de la materia (kilogramo).

- Procesos bio-químicos: estos procesos utilizan las características bio-químicas de la biomasa (como la digestión anaeróbica, combustibles alcohólicos, biodiesel, gas de rellenos sanitarios, entre otros) y la acción metabólica de organismos microbiales para producir combustibles gaseosos y líquidos.

Son más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termo-químicos. Los cuales servirán de base para la presente investigación, empleando el método de digestión anaeróbica.

A continuación, en la tabla I, se muestra una distribución de los procesos de conversión aplicables, de acuerdo con las características físicas, tipos de biomasa, producto final así como los posibles usos finales de la energía convertida.

Tabla I. **Procesos de conversión de la biomasa en energía**

Tipo de biomasa	Características físicas	Procesos de conversión aplicables	Producto final	Usos
Materiales orgánicos de alto contenido de humedad.	Estiércol, residuos de alimentos, efluentes industriales, residuos urbanos.	Digestión anaeróbica y fermentación alcohólica	Biogás, metanol, etanol, biodiesel	Motores de combustión, turbinas de gas, hornos y calderas, estufas domésticas
Materiales lignocelulosicos (cultivos energéticos, residuos forestales de cosechas y urbanos)	Polvo, astillas, pallets, leños, carbón vegetal	Densificación, ⁴ combustión directa, pirolisis, ⁵ gasificación	Calor, gas pobre, ⁶ hidrógeno, ⁷ biodiesel	Estufas domésticas, hornos y calderas. motores de combustión, turbinas de gas

Fuente: elaboración propia.

⁴ Densificación: proceso de compactar la biomasa en “briquetas”, para facilitar su utilización, almacenamiento y transporte. Las briquetas son para usos domésticos, comerciales e industriales. La materia prima puede ser aserrín, desechos agrícolas y partículas de carbón vegetal, el cual se compacta bajo presión alta.

⁵ Pirolisis: proceso de descomposición química que se obtiene por calor requiere altas inversiones en infraestructura y capacidad técnica, además de un elevado consumo de materia prima muy específica.

⁶ Gas pobre: también llamado gas de gasógeno, se obtiene mediante una gasificación de biomasa sólida (leña o residuos agrícolas, con un contenido en humedad inferior al 20 %), haciendo pasar a gran velocidad una pequeña cantidad de aire a través de una gran masa en combustión.

⁷ Hidrógeno: es un simple asfixiante, no tóxico, pero es extremadamente inflamable, necesario para reducir las concentraciones del oxígeno.

1.2.5. Riesgos por el mal manejo de la biomasa

De manera general, el mal manejo de la biomasa, o bien llamados residuos sólidos, pueden producir impactos sobre las aguas, el aire, el suelo, la flora y la fauna y ecosistemas tales como:

- Contaminación de los recursos hídricos: residuos sólidos sin tratamiento que pueden contaminar las aguas superficiales o subterráneas, usadas para el abastecimiento público, además de ocasionar inundaciones por obstrucción de los canales de drenaje y del alcantarillado.
- Contaminación atmosférica: los principales impactos asociados a la contaminación atmosférica, son los olores molestos en las proximidades de los sitios de disposición final y la generación de gases asociados a la digestión bacteriana de la materia orgánica, y la quema al aire libre, de los residuos o su incineración sin equipos de control adecuados.
- Contaminación del suelo: la descarga y acumulación de residuos en sitios periurbanos, urbanos o rurales producen impactos estéticos, malos olores y polvos irritantes. Además, los desechos sólidos depositados en un botadero a cielo abierto o en un relleno sanitario, contamina el suelo que subyace con microorganismos patógenos, metales pesados, sustancias tóxicas e hidrocarburos que están presentes en el lixiviado de los desechos.
- Amenazas a la flora y la fauna: los impactos ambientales directos sobre la flora y fauna se encuentran asociados, en general, a la remoción de especímenes de la flora y a la perturbación de la fauna nativa.

1.3. Proceso de biodigestión

Es un proceso biológico de fermentación natural, en el que una comunidad entrelazada de bacterias cooperan para formar una fermentación estable, auto regulada, la cual se puede dar de dos formas en presencia de oxígeno (biodigestión aerobia), y sin la presencia de oxígeno (biodigestión anaerobia),

“Es un proceso anaeróbico de descomposición (proceso de fermentación anaeróbica). La materia prima está constituida por materia orgánica, como desechos agrícolas, residuos animales (véase tabla I), residuos humanos (véase tabla I), etc. Es decir, en el biodigestor tal como indica su nombre, sucede una digestión de la materia prima, luego de la cual se obtiene biogás, biol (fracción líquida resultante del fango proveniente del fermentador o biodigestor) y bioabono (fertilizante sólido similar al compost, llamado también biosol, resultado de separar la parte sólida del fango, resultante de la fermentación anaeróbica dentro del fermentador o biodigestor)”.⁸

1.3.1. Características del biodigestor

El biodigestor de desechos orgánicos, contará con las siguientes características:

- Tiene un sistema hermético con el fin de evitar la entrada de aire, el que interfiere con el proceso, y fugas del biogás producido.
- Debe estar térmicamente aislado para evitar cambios bruscos de temperatura.

⁸ BRAVO G., J. *Construcción de un biodigestor en ferrocemento*. p. 30.

- El contenedor primario de gas, debe contar con una válvula de seguridad aun no siendo un recipiente de alta presión.
- Debe contar con medios para efectuar la carga y descarga del sistema.
- Debe tener acceso para el mantenimiento.
- Debe contar con un medio para romper las natas que se formen, durante el proceso.

1.3.2. Tipos de biodigestor

Los tipos de digestores están determinados por los procesos de digestión para producir biogás, los cuales se pueden dividir en:

- Por la forma de alimentación
 - De fermentación continua: cuando comienza la digestión normal, y la producción del biogás después de cierto período, a partir de una carga inicial, se agregan materiales continuamente al digestor y el efluente se descarga en forma simultánea en la misma cantidad en que entra el material. De esta manera la fermentación en el digestor es un proceso interrumpido. El proceso se caracteriza por una fermentación constante, una producción uniforme de gas y de fácil control, aplicándose comúnmente en zonas con materias residuales ricas y digestores de mediano y gran tamaño. Interviene variables como: temperatura, potencial de hidrógeno (pH), tiempo de residencia o retención, alcalinidad, ácidos grasos volátiles, Inhibidores de la digestión anaerobia, relación carbono-nitrógeno (C/N), agitación, y carga volumétrica.

- De fermentación semi-continua: la primera carga consta de gran cantidad de materiales. Cuando va disminuyendo gradualmente el rendimiento de gas, se agregan nuevas materias primas, y el efluente se va descargando en la misma cantidad.
 - De fermentación discontinua o por lotes: los digestores se cargan con material en un solo lote. Cuando el rendimiento de gas decae a un bajo nivel después de un período de fermentación, se vacían los digestores por completo y se alimentan una vez más.
- Por la temperatura
 - Fermentación termófila: este proceso se emplea para eliminar excrementos humanos y otros residuos por sus mejores características de desinfección. Es necesario para este proceso, una temperatura de trabajo alta entre 323,15 y 333,15 °K, y se caracteriza por una digestión rápida, alto rendimiento de gas y un corto tiempo de retención. Este proceso se emplea para eliminar excrementos humanos y otros residuos por sus mejores características de desinfección.
 - Fermentación mesófila: es el proceso de descomposición de la carga haciéndola más lenta. En este caso son los organismos cuya fermentación necesitan una temperatura menor de 303,15 y 313,15 °K.
 - Fermentación psicrófila o a temperatura ambiente: organismos capaces de vivir a temperaturas óptimas de desarrollo entre 285,15-288,15 °K. La temperatura de fermentación varía según las condiciones atmosféricas, por lo cual el rendimiento de gas fluctúa marcadamente según la estación.

1.3.3. Proceso aerobio

Está formado principalmente por metano, y aunque tiene bajo poder calorífico puede utilizarse en las propias instalaciones, donde es generado para producir tanto electricidad como calor. La gasificación también conlleva la producción de un gas combustible rico en hidrógeno y, sobre todo, en carbono.

Llevando microorganismos que precisan de oxígeno atmosférico o disuelto en el agua. La materia orgánica es fermentada a partir de un aporte energético, dando lugar a una reacción exotérmica. Se obtienen como productos finales CO_2 y H_2O .

1.3.4. Proceso anaerobio

Es el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos urbanos mediante bacterias anaerobias, que se han empleado para transformarla en una mezcla de gases combustibles, donde predomina el metano.

Es por ello que la producción de biocombustibles gaseosos, se mide a partir de procesos biológicos anaerobios, y es una opción de muchos beneficios.

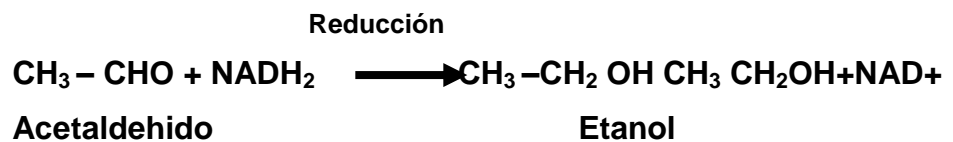
El gas obtenido está formado principalmente por metano, y aunque tiene bajo poder calorífico pero podría variar entre 16 500 Kj/Kg y 21 000 Kj/Kg, o bien puede utilizarse en las propias instalaciones donde es generado para producir tanto electricidad como calor. La gasificación también conlleva el producir un gas combustible rico en hidrógeno y, sobre todo, en carbono.

1.3.4.1. Proceso de biodigestion anaerobio

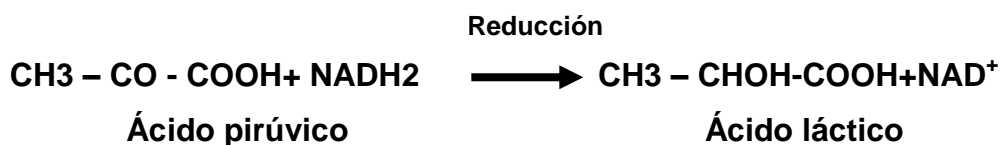
El proceso de biodigestión anaeróbica, es biológico natural, en el que una comunidad entrelazada de bacterias, coopera para formar una fermentación estable, autoregulada, que convierte materia orgánica residual, en una mezcla de metano y dióxido de carbono, por lo que la biodigestión anaeróbica es un proceso microbiano, que incluye microorganismos metanogénicos bacteriáceos que degradan la materia orgánica en ausencia del oxígeno.

Es por ello que la ausencia de oxígeno en el medio, obliga a los diferentes organismos, a trasladar, durante la glucólisis (encargada de oxidar la glucosa con la finalidad de obtener energía para la célula), el hidrógeno (del NADH₂-cofactor enzimático nicotinamida adenindinucléotido acarreador de electrones o iones de hidrógeno) a otra sustancia (diferente del oxígeno), como las levaduras que produce la fermentación etanólica, el NADH₂ intercambio de electrones e hidrógenoides, al acetaldehído y lo reduce a etanol.

Mediante la reacción:



En el caso de las bacterias lácticas, el NADH₂, cede sus electrones al ácido pirúvico, y se obtiene ácido láctico:



Debido a que el sustrato no se oxida hasta CO_2 y H_2O , la energía contenida en la glucosa, es aprovechada tan solo en una vigésima parte. Por tal razón, la producción de biomasa en los procesos anaerobios, es veinte veces menor que en los procesos aerobios.

Este proceso representa ventajas y desventajas para los procesos de tratamiento de aguas y desechos sólidos. Cuando el proceso de tratamiento es anaerobio, la ventaja consiste en la baja producción de biomasa residual y la desventaja es muy lento. Si el tratamiento se lleva a cabo por un proceso aerobio, la situación es inversa; el crecimiento acelerado de la flora (ventaja) al descomponer de manera acelerada las partes orgánicas de los residuos generando muchos lodos de desechos que deben ser tratados (desventaja) dando lugar a un producto estable llamado “compost”.

1.3.4.2. Reacciones bioquímicas en la generación de biogás

El biogás constituido básicamente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), es un combustible que puede ser empleado de la misma forma que el gas natural. También puede comprimirse para su uso en vehículos de transporte, debiéndose eliminar primero su contenido de CO_2

El biogás se produce mediante el proceso de fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, o sea en condiciones anaeróbicas, quedando como residuo del proceso un lodo estabilizado que es un excelente mejorador de suelos con un alto valor fertilizante.

Debido a esto, es factible procesar los desechos de animales (estiércol de vaca, cerdo y gallinaza), y residuos agrícolas que se encuentran presentes en el medio rural para producir gas combustible.

Sin afectar el uso actual que se le da a estos materiales los que, generalmente, se reincorporan a los terrenos de cultivo.

1.3.4.3. Reacciones biológicas (digestión anaeróbica)

Es la digestión de biomasa humedecida por bacterias en un ambiente sin oxígeno (anaeróbico), produciendo un gas combustible llamado biogás. En el proceso, se coloca la biomasa (generalmente desechos de animales como el excremento), en un contenedor cerrado (el digestor) y allí se deja fermentar; después de unos días, dependiendo de la temperatura del ambiente, se habrá producido un gas, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono.

La materia remanente dentro del digestor es un buen fertilizante orgánico rico en nitrógeno, fósforo y potasio, pero debido a la complejidad de las estructuras de las plantas, estas demoran mucho más en descomponerse.

Es mucho más sencillo aplicar un sistema de biogás para la autosuficiencia cuando se dispone de algunos animales para alimentar el sistema. Los digestores han sido promovidos fuertemente en China e India para usos domésticos en sustitución de la leña. También se pueden utilizar aguas negras y mieles como materia prima, lo cual sirve, además, para tratar el agua.

Supliendo un subproducto de alto valor energético (metano) de alrededor de 20 – 25 MJ/m³, comparado con 33 – 38 MJ/m³ para el gas natural; aunque, en algunos de los procesos, el valor de la energía generada no compensa la inversión requerida. Tal es el caso de los reactores anaeróbicos para el tratamiento de las aguas de café, cuyo objetivo es el tratamiento biológico de los residuos líquidos.

1.3.4.4. Bacterias que intervienen en el proceso de biodigestión

En el proceso de la biodigestión anaerobia, se involucra siempre cuatro tipos de bacterias, la hidrolítica,⁹ que producen ácidos acético, compuestos monocarbonados, ácidos grasos orgánicos, y otros compuestos policarbonatos; la acetogénica,¹⁰ productoras de hidrogeno, las homoacéticas,¹¹ que pueden convertir una cantidad considerable de compuestos multicarbonados o monocarbonados, en ácido acético; y las metanogénicas,¹² productoras de gas metano.

⁹ Hidrolítica: compuestos orgánicos complejos, como los lípidos, proteínas e hidratos de carbono, son despolimerizados, por acción de enzimas hidrolíticas, en moléculas solubles y fácilmente degradables, como azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos, alcoholes, etc.

¹⁰ Acetogénica: son compuestos intermedios son transformados por las bacterias acetogénicas. Como principales productos se obtiene ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono. El metabolismo acetogénico es muy dependiente de las concentraciones de estos productos.

¹¹ Homoacéticas: convierte una cantidad considerable de compuestos multicarbonados o monocarbonados en ácido acético.

¹² Metanogénica: constituye la etapa final del proceso, en el que compuestos como el ácido acético hidrogeno y dióxido de carbono son transformados a CH₄ y CO₂. Se distinguen dos tipos principales de microorganismos, los que degradan el ácido acético (bacterias metanogénicas acetoclásicas) y los que consumen hidrogeno (metanogénicas hidrogenófilas).

Algunos organismos anaerobios trabajan juntos, en la descomposición anaerobia de los residuos, para llevar a cabo la conversión de la fracción orgánica de los residuos en un producto final estable.

Se debe notar la extrema interdependencia que existe entre ambos grupos de bacterias, pues, mientras las productoras de ácido suprimen el oxígeno y producen el alimento que permite la vida de las metanógenas, estas últimas eliminan los desechos ácidos y evitan que el medio se vuelva muy ácido permitiendo con ello la sobrevivencia del primer grupo.

Tomando en consideración las etapas en que se desarrolla la conversión biológica en condiciones anaerobias de la biomasa, se puede establecer que la primera etapa (hidrólisis)¹³ implica la transformación mediada por enzimas de compuestos de masas moleculares más altas en compuestos intermedios identificables de masa molecular más baja, en la segunda etapa los productos solubles de la primera etapa se convierten en ácidos orgánicos volátiles de vida corta y alcoholes, producto de la acción de endoenzimas; y la tercera etapa implica la conversión bacteriana de los compuestos intermedios a productos finales sencillos, principalmente metano y dióxido de carbono.

¹³ Hidrólisis: materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la membrana celular, es por tanto, el primer paso necesario para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos.

Es decir, un grupo de organismos anaerobios, en el proceso de la biodigestión anaerobia, se encargan de hidrolizar a los polímeros orgánicos y los lípidos en unidades estructurales como ácidos grasos, monosacáridos, aminoácidos y compuestos relacionados.

Un segundo grupo de bacterias anaerobias fermenta los productos descomponibles del primer grupo en ácidos orgánicos simples, el más común en la biodigestión anaerobia es el ácido acético. Este segundo grupo de microorganismos, descrito como no metanogénico, está formado por bacterias anaerobias que frecuentemente se identifican como “acidógenos” o “formadores de ácidos”. Teniendo en cuenta la tolerancia al oxígeno las bacterias anaerobias, se clasifican en:

- Anaerobias estrictas: crecen en atmósferas con una tensión de oxígeno¹⁴ inferior a 0,5 %.
- Anaerobias aerotolerantes: toleran el oxígeno hasta un 8 % pero son incapaces de utilizarlo para su metabolismo.

¹⁴Tensión de oxígeno: presión parcial del oxígeno en los microorganismos anaerobios estrictos. La razón por la que los anaerobios estrictos son destruidos por el oxígeno, es por la incapacidad que tienen de eliminar algún producto tóxico derivado del metabolismo del oxígeno.

La tolerancia al oxígeno de estas bacterias está dada por la presencia de enzimas superóxido dismutasa (SOD),¹⁵ catalasa¹⁶ y peroxidasa.¹⁷

Que catalizan la conversión de radicales superóxido a peróxido de hidrógeno menos tóxico y a oxígeno molecular.

- Anaerobios facultativos: no necesitan oxígeno para su desarrollo normal, pero si está presente lo pueden utilizar metabólicamente, es decir, que crecen bajo condiciones tanto aeróbicas como anaeróbicas, utilizando el oxígeno como aceptor final de electrones.
- Microaerofilicas: crecen en presencia de tensiones de oxígeno inferior a 0,5 %, y lo metabolizan utilizándolo como aceptor final de electrones. Necesitan atmósfera de CO₂.

Un tercer grupo convierte el hidrógeno y el ácido acético, producido por los formadores de ácidos, en gas metano y anhídrido carbónico. Las bacterias responsables de esta conversión se identifican como “metanógenos”, o “formadores de metano”. Muchos de los organismos metanogénicos identificados en los vertederos y en biodigestores anaerobios son similares a aquellos que se han encontrado en los estómagos de animales rumiantes y en sedimentos orgánicos sacados de lagos y ríos.

¹⁵ Superóxido dismutasa SOD: enzima catalizadora de la dismutación de superóxido de oxígeno y peróxido de hidrógeno. Debido a esto es una importante defensa antioxidante en la mayoría de las células expuestas al oxígeno.

¹⁶ Catalasa: enzima perteneciente a la categoría de las oxidoreductasas que cataliza la descomposición del peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en oxígeno y agua. Esta enzima utiliza como cofactor al grupo hemo y al manganeso.

¹⁷ Peroxidasa: tipo de enzimas muy extendidas en todo el árbol filogenético de la vida. Pertenecen a la categoría de las oxidoreductasas.

Dentro de las bacterias más importantes del grupo metanogénico, están aquellas que utilizan hidrógeno y ácido acético, en donde las tasas de crecimiento son muy lentas; en consecuencia su metabolismo normalmente, se considera limitante en el tratamiento anaerobio de residuos orgánicos.

La estabilización de residuos en la biodigestión anaerobia se lleva a cabo cuando se produce metano y anhídrido carbónico.¹⁸

1.3.4.5. Descripción de las fases del proceso

La descripción de las fases del proceso se puede dividir en:

1.3.4.5.1. Hidrólisis

Aquellos compuestos orgánicos complejos, como los lípidos, proteínas e hidratos de carbono, que son despolimerizados, por acción de las enzimas hidrolíticas, en moléculas solubles y fácilmente degradables, como azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos, alcoholes, entre otros.

En proceso enzimático extracelular, son las bacterias las responsables de la generación de bacterias hidrolítico-acidogénicas.

¹⁸ ANGELIDAKI, Irini. *Applications of the anaerobic digestion process*. p 36.

“La etapa hidrolítica¹⁹ puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso, sobre todo, cuando se tratan residuos con alto contenido en sólidos”.²⁰

Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico,²¹ de la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del pH, de la concentración de NH_4^+ , y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

1.3.4.5.2. Acidogenesis

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H_2), y compuestos orgánicos más reducidos (propionico, butírico, valerico, láctico y etanos principalmente), que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso, por lo que estos compuestos solubles obtenidos de la etapa anterior, se transforman en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles).

¹⁹ Etapa hidrolítica: se produce la degradación de moléculas orgánicas complejas (proteínas, celulosa, lignina, etc.) dando lugar a moléculas orgánicas simples y solubles (aminoácidos, ácidos grasos, azúcares, etc.)

²⁰ SPYROS G., Pavlosthatis; GOSSETT, James M. *A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge*. p. 65.

²¹ Retención hidráulico: es el tiempo de retención del líquido dentro del digestor. Si disminuye el TRH para mantener un TRS (tiempo de retención de sólidos) fijo, disminuye el tamaño del reactor.

Esto es, ácidos acéticos, propiónico, butírico y valérico, principalmente, bacterias acidogénicas comúnmente encontradas en digestores incluyen especies de *Butyrivibrio*, *Propionibacterium*, *Clostridium* spp, *Bacteroides*, *Ruminococos*, *Bifidobacterium* spp, *Lactobacillus*, *Streptococos* y *Enterobacterias*.

1.3.4.5.3. Metanogenesis

Son microorganismos metanogénicos que completan el proceso de digestión anaerobia mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariontes, constituyéndose en la etapa, final del proceso, en el que los compuestos como el ácido acético hidrogeno y dióxido de carbono son transformados en CH₄ y CO₂.

Se distinguen dos tipos principales de microorganismos, los que se degradan el ácido acético (bacterias metanogénicas acetoclásicas) y los que consumen hidrógeno (metanogénicas hidrogenófilas). La principal vía de formación del metano es la primera, con alrededor del 70 % del metano producido, de forma general.

A pesar de ser esa la vía más importante, solo microorganismos de los géneros *Methanosarcina* y *Methanothrix*, son capaces de producir metano a partir de acético. Otros géneros a los que pertenecen microorganismos metanogénicos, es este caso hidrogenófilos, son *Methanogacterium*, *Methanococos*, *Methanovreviabacter* o *Methanogenium*, entre otros.

1.3.4.6. Factores que afectan la biodigestión

Se sabe que las bacterias son el ingrediente esencial del proceso, lo que asegura y optimiza su ciclo biológico. Se hace necesario mantener un sistema de tratamiento anaerobio que establezca eficazmente un residuo orgánico, siendo las bacterias no metanogénicas y metanogénicas, las que deben estar en un estado de equilibrio dinámico. Para establecer y mantener tal estado, los contenidos del reactor deberán estar libres de oxígeno disuelto y de concentraciones inhibitorias de amoníaco libre y de constituyentes como metales pesados y sulfitos.

1.3.4.6.1. Temperatura

La reacción de los procesos biológicos, depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión dando lugar a mayores producciones de biogás.

Es por ello que la operación del digestor, está considerada como uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaerobia, cuyas variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden provocar la desestabilización del proceso.

Es por ello que para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura.

A continuación se encuentran los tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaerobios:

- Psicrófilico (por debajo de 296,15 °K), para este tipo de biodigestión, el tiempo de retención es de 100 días con una agitación baja o casi nula.
- Mesófilico (entre 298,15 y 318,15 °K).
- Termófilico (entre los 318,15 y 338,15 °K, es la velocidad máxima específica de crecimiento, conforme aumenta el rango de temperaturas, cuyo objetivo es conseguir una mayor velocidad del proceso (lo que significa un aumento en la eliminación de materia orgánica y en la producción de biogás) y una mejor eliminación de organismos patógenos.

1.3.4.6.2. pH

Son microorganismos anaerobios, que necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo, aunque permiten cierta oscilación. El pH afecta fundamentalmente a la actividad enzimática de los microorganismos, mediante cambios de estado de los grupos ionizables de las enzimas como el carboxil y amino, alteración de los componentes no ionizables del sistema.

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6 ni subir a 8. El valor del pH, en el digestor no solo determina la producción del biogás, sino también su composición.

Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado sea muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas.

Dentro del biodigestor, el pH se auto regula con diversos cambios que ocurren durante la digestión. En el primer período del pH, tiende a bajar debido a la producción de ácidos volátiles, luego de unas semanas este se eleva de acuerdo con el actuar de las bacterias metanógenas que al degradar las proteínas aumenta el amonio, subiendo el pH.

1.3.4.6.3. Tiempo de retención

Se determina por el tipo de sustrato, en conjunto con el tiempo de retención y la velocidad de carga orgánica, siendo sus principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digestor.

El tiempo de retención es la razón existente entre el volumen del biodigestor y la carga diaria de alimentación.

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica, siendo determinado por el tiempo de retención.

Los tipos de tiempos de retención, son:

- Tiempo de retención hidráulico (TRH).
- Tiempo de retención de sólidos (TRS).

El tiempo de retención hidráulico corresponde al tiempo de retención del líquido dentro del digestor. Si disminuye el TRH, para mantener un TRS fijo, disminuye el tamaño del reactor.

1.3.4.6.4. Sustancias inhibidoras de la reacción

Como cualquier sistema biológico, son susceptibles a materias tóxicas, el envenenamiento se produce con la presencia de ciertos compuestos en altas concentraciones, las cuales, son necesarias para la sobrevivencia de estos organismos pero en menores concentraciones.

Durante el proceso anaerobio, el nitrógeno orgánico se hidroliza produciendo formas amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal, es un importante nutriente para el crecimiento de los microorganismos, cuya carencia puede provocar el fracaso en la producción de gas, una concentración excesivamente alta del mismo puede limitar su crecimiento.

Derivado de las altas concentraciones de amonio, afectado por los principales microorganismos, se generan los metanogénicos. Un cambio brusco en la concentración de amonio produce un descenso en la velocidad de crecimiento de los organismos metanogénicos, pero no en la tasa de crecimiento de los acidogénicos o acetogénicos. Los microorganismos metanogénicos que consumen acético son más sensibles a la inhibición por amonio que los consumidores de H_2 .

1.3.4.6.5. Alcalinidad

Es uno de los parámetros importantes en el control de un biodigestor, que mide su capacidad tampón, es decir, su capacidad de amortiguar los cambios de pH, que son suficientes para asegurar que el pH, no caerá por debajo de 6,2 porque las bacterias de metano no pueden funcionar por debajo de este umbral.

En el rango de pH, de 6 a 8 el principal equilibrio químico que controla la alcalinidad es el dióxido de carbono-bicarbonato.

1.3.4.6.6. Agitación

Los reactores anaerobios tiene diversos objetivos, dentro de los que se encuentran: a) poner en contacto el substrato fresco con la población bacteriana y proporcionar una densidad uniforme de población bacteriana; b) prevenir la formación de una capa superficial y de espumas, así como la sedimentación en el reactor; c) prevenir la formación de espacios muertos que reducirían el volumen efectivo del reactor; y la formación de caminos preferenciales en función de la hidráulica del sistema; d) eliminar la estratificación térmica, manteniendo una temperatura uniforme en todo el reactor, llevándose a cabo por medio de dispositivos de mezcla (agitadores) construidos en acero inoxidable o PVC, para evitar la corrosión por el ácido sulfhídrico.

1.3.4.6.7. Otros factores

La proporción entre el carbono y el nitrógeno que tenga la mezcla de carga, influye en la cantidad de producción de biogás, toda vez que, este sea mayor a la relación del carbono y nitrógeno, a su vez será mayor, la producción de biogás, por unidad de residuo sólido orgánico; esta relación recomendada como óptima, es de entre 20 y 30 partes de carbono por una de nitrógeno. Si la relación es muy baja, el nitrógeno será liberado y acumulado en forma de amoniaco, mismo que incrementará el pH de la carga en el digestor, y cuando el pH sea mayor a 8,5, la carga se volverá tóxica para las bacterias metanogénicas, lo que significa que se detiene la producción de metano.

1.4. Biogás

El biogás es un combustible incluido dentro del conjunto de la biomasa, que en el caso del biogás de vertedero, está constituido por un conjunto de gases formados como subproductos de la descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en condiciones anaeróbicas (fermentación en ausencia de oxígeno).

Es una mezcla gaseosa que se obtiene de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y cuyos principales componentes son el metano (55-65 %), y el anhídrido carbónico (35-45 %), y en menor proporción, nitrógeno, (0-3 %), hidrógeno (0-1 %), oxígeno (0-1 %), y sulfuro de hidrógeno (trazas) que se producen como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de un microorganismo.

El biogás constituido por metano (CH_4), y dióxido de carbono (CO_2), es un combustible que puede ser empleado de la misma forma que el gas natural. También puede comprimirse para uso en vehículos de transporte, pero primero se debe eliminar su contenido de CO_2 .

La descomposición de la materia orgánica en los vertederos controlados, que se realiza por la actividad microbiana anaeróbica, genera diversos subproductos, entre ellos el biogás. Por tanto, las condiciones favorables del medio, para la supervivencia de los microorganismos anaeróbicos, pueden desarrollarse a temperaturas de entre 283,15 y 333,15 °K, teniendo su mejor desarrollo entre 303,15 y 313,15 °K, rango mesofílico, entre 323,15 y 333,15 °K, rango termofílico. El pH entre 6,5 y 8,5 permite un buen desarrollo de los microorganismos; su desarrollo óptimo es entre 7 y 7,2 para el rango mesofílico.

1.4.1. Propiedades del biogás

El biogás es más liviano que el aire, tiene una temperatura de inflamación de entre los 873,15 y los 973,15 °K; cuando se produce la combustión del biogás la llama de este puede alcanzar hasta los 1 143,15 °K.

Su poder calorífico depende del contenido de metano que posea, de acuerdo con los parámetros, su poder calorífico puede variar desde 3 500 kcal/m³ (45 % de CH₄), hasta 5 250 kcal/m³ (60 % de CH₄), lo que supone de 4,07 kWh/m³ a 6,11 kWh/m³, respectivamente. Este valor puede llegar hasta los 6,95 kWh/m³, si el porcentaje de CH₄ alcanza el 70 %.

El biogás posee las siguientes características:

- Grado de inflamación: 6 a 12 % vol. aire
- Temperatura de inflamación: 873,15 °K
- Presión crítica: 7,5MPa – 8,9MPa
- Temperatura crítica: 190,65 °K
- Peso específico: 1,2 kg/m³

Para el manejo de este gas, debe tomarse la precaución en la condensación del vapor, que es con frecuencia un problema debido a que el biogás se encuentra, generalmente, a una temperatura superior que la de las cañerías por donde se conduce. Por lo que es necesario una trampa de agua y puntos de drenaje en la tubería.

Debido a las propiedades del biogás se obtienen los siguientes valores comparativos respecto de los combustibles más convencionales:

- 1m³ de biogás equivale a:
 - 0,61 L de gasolina
 - 0,583 L de keroseno
 - 0,55 L de diesel
 - 1,5 m³ de gas natural
 - 1,43 KWh de energía eléctrica
 - 0,5 a 1,5 Kg de madera
 - 0,74 Kg de carbón vegetal
 - 0,3 m³ de propano
 - 0,2 m³ de butano

1.4.2. Componentes

Dentro de los principales componentes del biogás se encuentra el metano (CH₄), y el dióxido de carbono (CO₂). Aunque la composición del biogás, varía de acuerdo con la biomasa utilizada.

Tabla II. **Componentes del biogás**

Metano (CH ₄)	55 a 70 %
Anhidrido carbónico (CO ₂)	35 a 40 %
Nitrógeno (N ₂)	0,5 a 5 %
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0,1 %
Hidrógeno (H ₂)	1 a 3 %

Fuente: elaboración propia.

El valor energético del biogás, por lo tanto, estará determinado por la concentración de metano alrededor de 20 -25 MJ/m³, comparado con 33 – 38 MJ/m³ para el gas natural.

1.4.3. Usos del biogás

El uso del biogás proviene de la fermentación de los desechos orgánicos, este tipo de combustible puede ser utilizado en motores diesel y gasolina los cuales al ser conectados a un generador producen energía eléctrica.

En un motor diesel se puede reemplazar en un 80 % del combustible convencional, debido a que el ciclo de combustión es a base de aire; sin embargo, su dificultad en el reemplazo de la totalidad del combustible, se encuentra en la baja capacidad de ignición del biogás, además de que este tipo de motor carece de bujía para la combustión del combustible. En tanto que en un motor de gasolina, es distinto el ciclo de combustión porque el mismo necesita una mezcla entre el combustible, aire y una bujía de combustión para que se genere la explosión.

Con el biogás se puede sustituir el combustible en su totalidad, ya que el metano en estado puro, tiene un valor calorífico de 9 100 kcal/m³, a una temperatura de 288,65 °K a una atmósfera de presión. El valor calorífico del biogás varía entre los 4 800 y los 6 900 kcal/m³. En términos de equivalencias energéticas, entre 1,33 m³ y 1,87 m³, son iguales a un litro de gasolina (y entre 1,5m³ y 2,1 m³ equivalente a un litro de diésel), lo cual genera la suficiente fuerza al motor para su funcionamiento.

Sin embargo, la sustitución del combustible dependerá de la calidad del biogás, las condiciones en que se encuentre el motor y el uso del motor. El contenido energético del biogás derivado de los procesos de la digestión anaeróbica (DA) tiene, en promedio, entre 20 y 25 MJ por m³, mientras que por cada tonelada de desechos sólidos, se pueden extraer entre 167 MJ y 373 MJ a través del metano recuperado.

2. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE BIOMASA DE DESECHOS SÓLIDOS URBANOS

2.1. Sistemas de obtención de energía

Estos sistemas de conversión bioquímica, utilizan a la biomasa para transformar mediante reacciones químicas y biológicas, procesos metabólicos de microorganismos que permitan la degradación de la biomasa (residuos orgánicos, estiércoles, lodos orgánicos, desechos urbanos, etc.), en energía liberada en forma de calor y pueda ser transformada, tanto en energía eléctrica como en energía mecánica.

Como resultado de este proceso a continuación se detallan los tres sistemas más aplicados.

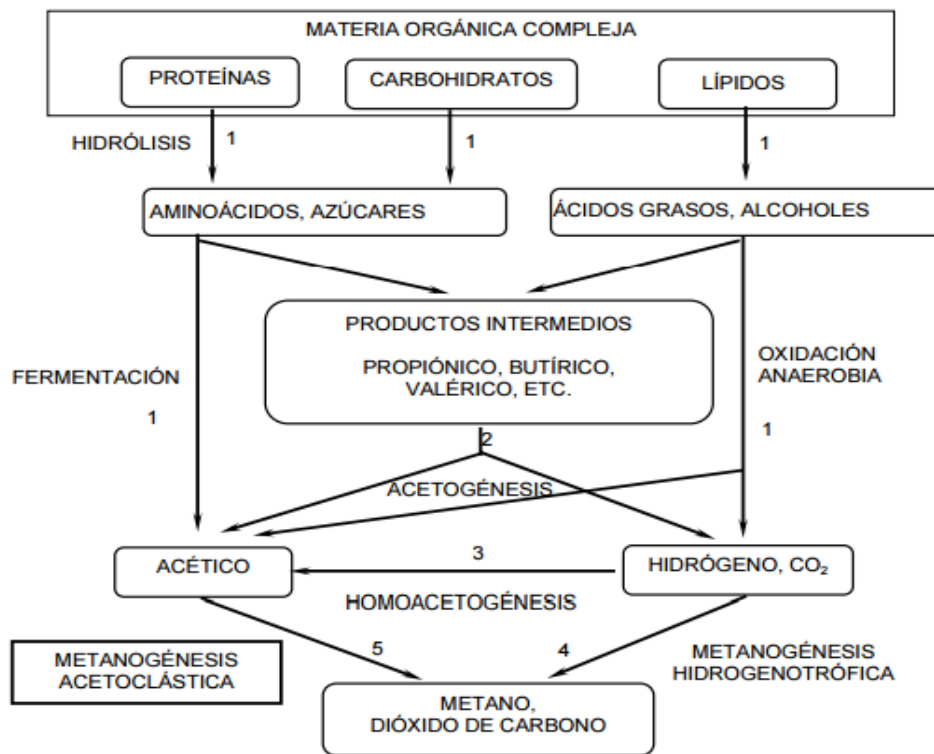
2.1.1. Digestión anaeróbica

La implementación de esta tecnología, permite la obtención de energía eléctrica y/o térmica, con un rango de potencia eléctrica de alrededor de 0,3-10MW, del cual se obtiene biogás, el que está compuesto principalmente de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y ácidos sulfhídrico (H_2S), en ausencia del oxígeno, lo que reduce la cantidad de patógenos y lodos comparado con procesos tradicionales de tratamientos de residuos orgánicos.

Este proceso de fermentación anaeróbica, es resultado de la digestión que se alimenta de varias bacterias y desperdicios orgánicos como materia prima. Al reaccionar el sustrato, se producen dos compuestos: el oxidado y el reducido, comparado al estado en que se encontraba originalmente.

La figura 1 ilustra dicho proceso. La digestión anaeróbica se logra en tres etapas principales: hidrólisis, fermentación y metanogénesis. Durante la hidrólisis los compuestos complejos se descomponen en componentes solubles, los cuales quedan dispuestos para que en la etapa de fermentación la bacteria los convierta en alcoholes, ácidos acéticos, otros ácidos volátiles y algunos gases como H₂ y CO₂.

Figura 1. **Proceso de digestión anaeróbica**

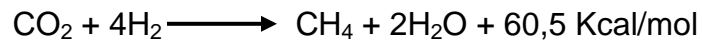


Fuente: SPYROS G., Pavlosthatís; GOSSET, James M. *A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge*. P 12.

Proceso de digestión anaeróbica: 1) bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) bacterias acetogénicas; 3) bacterias homoacetogénicas; 4) bacterias metonogénicas hidrogenófilas; 5) bacterias metonogénicas acetoclásticas.

Estos productos intermedios son metabolizados, principalmente, en CH₄ (60 – 70 %), CO₂ (30 – 40 %) y otros gases asociados por la metanogénesis, los cuales son sensibles a ciertos parámetros.

Los microorganismos anaeróbicos convierten el CO en CO₂ y CH₄, microorganismos selectos que son capaces de convertir una mezcla de CO₂ y H₂ en CH₄ por la siguiente reacción:



Esta reacción es común en todas las bacterias metanogénicas. Existen tipos de bacterias que producen metano como la bacteria llamada "Methanobacterium thermoautotrophicum", esta ha mostrado la rapidez con que produce el metano, la cual oxida el H₂ y reduce el CO₂, ha sido medida dando lugar a un rango de producción de 5,21 m³ de CH₄ por día.

Las bacterias metanogénicas son las responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono: acetato, H₂, CO₂, formato, metanol y algunas metilaminas. Estos organismos se clasifican dentro del dominio Archaea,²² todos poseen varias coenzimas especiales, siendo la coenzima M, la que participa en el paso final de la formación del metano. La mayoría de los organismos metonogénicos son capaces de utilizar el H₂ como aceptor de electrones, mientras que solo dos géneros son capaces de utilizar el acetato. En la tabla III se encuentran las reacciones de la fase de la metanogénesis el paso para formar metano.

²² Archea: son criaturas unicelulares que se unen a las bacterias para compensar una categoría de la vida que producen gas metano, como producto de desecho de su "digestión" o proceso de elaboración de la energía.

Tabla III. Principales reacciones metanogénicas

Reacciones hidrogenotróficas
$4\text{H}_2 + \text{H}^+ + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow [\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2]^- + 4\text{H}_2\text{O}$
$4\text{H}_2 + 4\text{S}^0 \rightarrow 4\text{HS}^- + \text{H}^+$
$4\text{H}_2 + 2\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
$4\text{H}_2 + 4\text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$
$4\text{H}_2 + 4[\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_2] \rightarrow 4[\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4]$
$4\text{H}_2 + \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+ + 3\text{H}_2\text{O}$
Interconversión formiato-hidrógeno
$\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{formiato} + \text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis acetoclástica
$[\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2]^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{CH}_4$
Metanogénesis a partir de otros sustratos
Fórmico
$4\text{HCOOH} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
Metanol
$4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
Trimetil-amina
$4(\text{CH}_3)_3\text{N} + 6\text{H}_2 \rightarrow 9\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$
Dimetil-amina
$2(\text{CH}_3)_2\text{NH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{NH}_3$
Monometil-amina
$4(\text{CH}_3)\text{NH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$

Fuente: LEEWEWNHOEK, Antonie Van. *Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments*. p 271.

- Principios que influyen en la producción de biogás:
 - Temperatura: la digestión anaeróbica se lleva a cabo en un rango de entre 283,15 °K a 342,15 °K aumentando el proceso si la temperatura es más elevada, después disminuye y prácticamente se detiene en 283,15 °K. Estableciendo para una mejor producción de biogás en un rango de 303,15 °K a 313,15 °K y 322,15 °K a 333,15 °K, donde diferentes bacterias prosperan en estos rangos de temperatura. Estas bacterias se ven más fácilmente afectadas cuando se realizan cambios de temperatura y el proceso de fermentación es menos estable. Se debe tener en cuenta que los cambios de temperatura afectarán los diferentes tipos de bacteria en distintas maneras, y si la temperatura sufre una mínima disminución, la bacteria que produce con el metano, disminuirá la producción.
 - Acidez: una solución ácida excesiva obstaculiza el proceso de fermentación. Siendo el mejor rango para una rápida fermentación el pH de 6,6 – 7,6; debajo de ese rango el medio se convierte en ácido inhibiendo la actividad de las bacterias metanogénicas y el gas producido tendría contenidos pobres de metano. Si es muy bajo el pH la bacteria que produce el gas será incapaz de usar los ácidos lo suficientemente rápido y la digestión se verá detenida. Introducir más materia orgánica fresca para la digestión a un nivel muy elevado de acidez, origina que la solución de fermentación se vuelva ácida (pH para una escala de 0 a 7).
 - Grado de carbono/nitrógeno(C/N): son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células.

Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1. La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso. La idea de la fermentación anaeróbica en las plantas de biogás es convertir todo el carbono disponible en metano.

- Oxígeno: con presencia de oxígeno, no debería existir bacteria causada por el proceso de fermentación, ya que al ser este anaeróbico, la bacteria no podrá sobrevivir.

2.1.2. Purificación de gas

El gas que se obtiene del proceso anaeróbico en la digestión de materiales orgánicos necesita ser purificado antes de ser transmitido a los sistemas de tuberías. Este proceso de tratado incluye el remover el bióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y humedad del digestor para las especificaciones de las tuberías.

Existen numerosos tratamientos de gas en aplicaciones comerciales, estos difieren en la efectividad para remover impurezas, para la selección del proceso más óptimo se debe considerar la cantidad de gas que se va a tratar, el contenido de impurezas y el grado de pureza que se requiere.

2.2. Sistema de combustión

La combustión es el proceso más directo para convertir la biomasa en energía, que es utilizada en muchas aplicaciones. La ignición de los materiales de la biomasa requiere altas temperaturas de al menos 823,15 °K, así que la parte más difícil de este proceso es el arranque. Una vez que la ignición ha tenido lugar, la combustión seguirá siempre y cuando exista la cantidad de oxígeno necesaria.

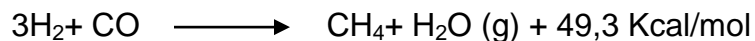
A pesar de su aparente simplicidad la combustión es un proceso complejo desde un punto de vista tecnológico. Tomando en cuenta las reacciones químicas que prevalecen en el proceso de combustión, estos han dado lugar a nuevos diseños de tecnologías para satisfacer estándares de eficiencia y emisiones.

2.3. Sistema de gasificación

Este sistema es el tercer método para convertir la biomasa en energía utilizable, y es similar al sistema de combustión por las propiedades que comparten algunos procesos.

- Principios del sistema de gasificación
 - La metanización: es el proceso de fermentación anaeróbica de los componentes orgánicos de los residuos. Dicha fermentación es producida por bacterias que se desarrollan en ambientes carentes de oxígeno.

Durante el proceso de transformación de la materia orgánica (digestión) dichas bacterias producen un gas denominado por su origen biogás, el cual se compone fundamentalmente de metano (CH₄) y de dióxido de carbono (CO₂). Los porcentajes de participación de estos gases son variables y dependen de las condiciones fisicoquímicas en que se desarrolla la "digestión" de la materia orgánica; La química de la metanización se describe utilizando solo unas cuantas reacciones. La conversión del monóxido de carbono e hidrógeno a metano se describe en la siguiente ecuación:

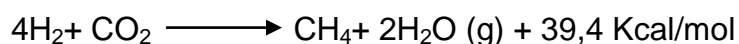


Estas reacciones liberan cierta cantidad de energía en el proceso, y otras dos reacciones producen metano a partir de óxidos de carbono, como se describe en la siguiente ecuación:

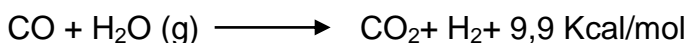


La siguiente ecuación se puede expresar como una combinación de la ecuación anterior y el gas de agua.

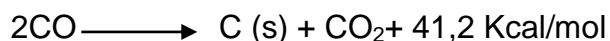
Y la hidrogenización del dióxido de carbono en la siguiente ecuación, tal y la cual no ocurre sin la presencia de monóxido de carbono, como se refleja a continuación:



En esta reacción aumenta la relación molar de H₂/CO en la reacción del gas.



La reacción final relevante desde el punto de vista energético, es el proceso de la metanización catalítica que no solo elimina el CO, sino también el CO₂ y el O₂ residual, como se muestra:



La desproporción del monóxido de carbono deposita carbón sólido en el catalizador,²³ con el objetivo de convertir materiales orgánicos directamente en un gas sintético, disminuyendo su actividad catalítica al efecto de la reacción química con la metanización.

Es por ello que la metanización catalítica debe ser operada a bajas temperaturas, consistentes con actividades catalíticas aceptables. Dichas reacciones relacionadas con la metanización son altamente exotérmicas, las que requerirán el control adecuado de la alta temperatura.

²³ Catalizador: un catalizador es una sustancia química, simple o compuesta, que modifica la velocidad de una reacción química, interviniendo en ella pero sin llegar a formar parte de los productos resultantes de la misma. Esta técnica se basa en la medida de la radiación absorbida por los átomos existentes en la muestra, que en contacto directo con una llama pasan a su estado fundamental.

Una elevada presión puede disminuir la disposición de carbón debido a la desproporción, pudiendo incrementar los rangos de las reacciones, pero también aumenta la producción volumétrica de calor, intensificando el control de temperatura y disminuyendo el campo de metano.

- Tipos de gasificadores: una característica principal de los tipos de gasificadores, es la manera en la que el combustible se extrae en la etapa de gasificación, considerando como principales las siguientes formas:
 - Con gasificador ascendente: es el tipo más sencillo en donde la toma de aire se encuentra en el fondo y los gases salen por arriba. En el fondo, tienen lugar las reacciones de combustión, que van seguidas de reacciones de reducción, en el gasificador. En la zona superior del gasificador tiene lugar el calentamiento y pirólisis,²⁴ de la carga, como resultado de la transferencia de calor, por convección forzada y radiación, de las zonas inferiores. Los alquitranes y productos volátiles producidos durante este proceso son transportados por la corriente de gas. Removiendo las cenizas del fondo del gasificador, como se muestra en la siguiente ecuación:

²⁴ Pirólisis: se define como un proceso termoquímico mediante el cual el material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua.

Tabla IV. **Ecuación gasificador ascendente**

$\eta_{th} = \frac{(H_g \times Q_g) + (Q_g \times \zeta_g \times C_p \times \Delta T)}{H_s \times M_s} \times 100 \quad (\%)$	
$\eta_{th} =$	Eficiencia de la gasificación (%) (térmica). Si se emplea el gas para combustión directa, en la eficiencia de la gasificación.
$\zeta_g =$	Densidad del gas (kg/m ³).
$C_p =$	Calor específico del gas (kJ/kg°K).
$\Delta T =$	Diferencia de temperaturas entre el gas en la entrada del quemador y el combustible que entra al gasificador (°K).

La ventaja, es su simplicidad pero la desventaja principal es la baja cantidad de biomasa que procesa.

- Con gasificador descendente: en este tipo de gasificador el aire se introduce por la parte superior y desciende de igual manera, en donde el gas se extrae por la parte inferior del gasificador. Las zonas son iguales pero cambiando el orden del método anterior, en donde se tiene una zona de secado-destilación- y la zona central-donde se oxida la biomasa y las cantidades de carbón y otros combustores- donde pasan a la zona de reducción-en la cual el monóxido de carbono y el hidrógeno se forman.

Tabla V. **Ecuación gasificador descendente**

$\eta_m = \frac{H_g \times Q_g}{H_s \times M_s} \times 100 \quad (\%)$	
$\eta_m =$	Eficiencia de la gasificación (%) (mecánica). Si se emplea el gas para aplicaciones de motores.
$H_g =$	Valor calorífico del gas (kJ/m ³)
$Q_g =$	Flujo en volumen de gas (m ³ /s).
$H_s =$	Valor calorífico inferior del combustible del gasificador
$M_s =$	Consumo de combustible sólido del gasificador (kg/s).

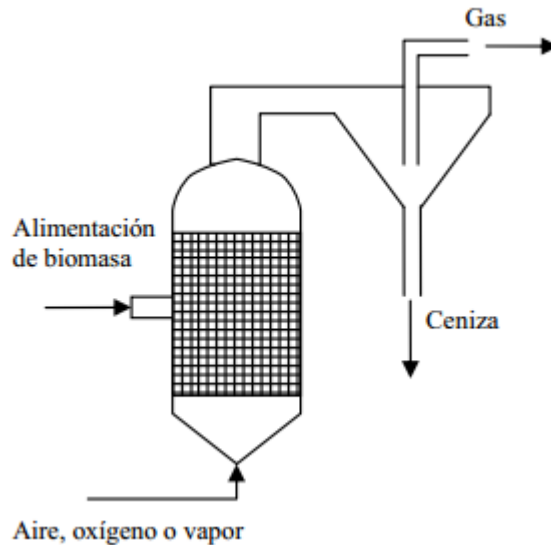
Ventajas o desventajas de este tipo; es necesario utilizar energía en los rangos de 80 a 500 KW.

- Con gasificador combinado: es una adaptación para quemar carbón mineral de alta calidad y elevar la temperatura hasta los 1 773,15 °K en la zona central del contenedor. Aunque se hace más eficiente el sistema. La desventaja es la de operar a escala pequeña. Es el usado comúnmente en pequeñas poblaciones donde no se necesitan más de 10 KW.
- Gasificador variable: este sistema tiene por objetivo resolver los problemas de los diferentes gasificadores (los tres descritos anteriormente) con alto contenido de ceniza, además de generar mayores capacidades de energía (hasta 10 MW). Las características de este sistema son parecidas al sistema de combustión, pero la temperatura es un poco más baja (1 023,15 a 1 173,15 °K), aunque en la zona central del contenedor llega a superar los 1 473,15 °K. El combustible se suministra en una superficie a alta temperatura, caracterizada por ser de alta turbulencia; las partículas se mezclan rápidamente con el material de la superficie, resultando una rápida pirólisis con mayor contenido de gases.

Las ventajas de este sistema sobre los anteriores, son la construcción más compacta, además los niveles de reacción en la cámara se dan de manera más intensa. Es flexible ante los cambios de humedad, ceniza y otros contenidos en el combustible.

Contiene bajos niveles de residuos debido a las reacciones dinámicas y de alta temperatura.

Figura 2. **Ejemplo del contenedor con gasificación variable**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 2 se muestra un esquema del contenedor de gasificación variable en donde el vapor u oxígeno se inyectan en lugar de aire sirviendo como agentes de gasificación, obteniendo un valor calorífico mayor debido a la ausencia del nitrógeno que presenta el aire. Sin embargo, la producción de oxígeno puro es costosa y rentable solo en sistemas grandes y eficientes.

2.4. Conversión de energía calorífica a eléctrica

El sistema de conversión de la energía, convierte la energía calorífica (también llamada térmica) en energía eléctrica, haciendo que el calor proveniente del recipiente o almacenamiento convierta el agua alimentada en vapor, el cual a su vez alimenta a la turbina y esta acciona al generador.

El vapor es condensado en el condensador y el agua regresa a la caldera para receso como agua de alimentación. En todos los materiales de digestión, los átomos que forman moléculas están en continuo movimiento ya sea trasladándose o vibrando. Este movimiento implica que los átomos tengan una determinada energía cinética a la que se le denomina calor, energía térmica o energía calorífica.

Se puede transmitir de un cuerpo a otro la energía térmica (o calorífica), como se describe a continuación:

- a) **Energía térmica por radiación:** se transmite a través de ondas electromagnéticas proveniente del Sol. La energía calorífica del sol llega a través de las radiaciones solares, esta energía puede transformarse en energía eléctrica gracias a distintos procesos desarrollados como los paneles solares.
- b) **Energía térmica por conducción:** se experimenta cuando un cuerpo caliente está en contacto físico con otro cuerpo más frío. La energía se transmite siempre del cuerpo caliente al cuerpo frío. Si ambos cuerpos están a la misma temperatura no hay transferencia energética.
- c) **Energía térmica por convección:** se produce cuando se trasladan las moléculas calientes de un lado a otro. Es el caso del viento.

Por lo tanto, la energía térmica o calorífica, se emplea en la generación de energía eléctrica mediante máquinas que transforman la energía calorífica en energía mecánica, a su vez, es utilizada para accionar el rotor de un generador eléctrico. Las máquinas más utilizadas para la utilización del biogás obtenido, se deben a la turbina de gas y al motor de combustión interna.

2.4.1. Motor de combustión interna alterna (MCIA)

Los gasificadores conectados a MCIA ofrecen la posibilidad de utilizar la biomasa para producir energía mecánica o energía eléctrica, con un amplio campo de potencia que va desde 0,1 kW hasta 32 MW como se muestra en la tabla VI, generando el gas natural (99 % metano) obtenido por medio de la biomasa.

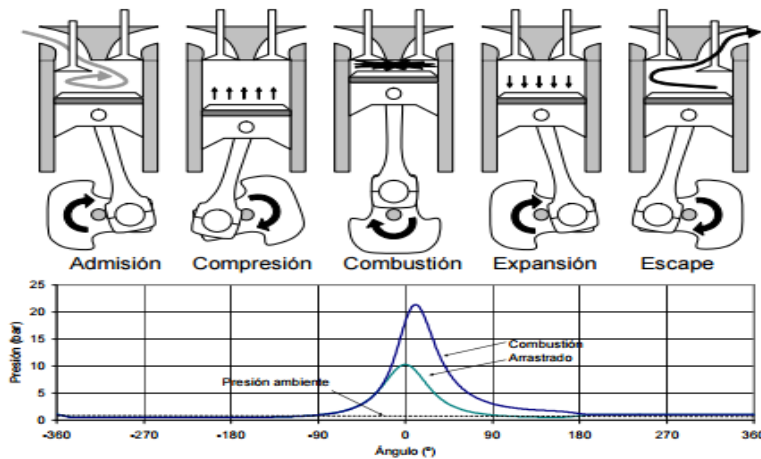
Tabla VI. **Calculo de energía generada**

$Q_{gen} = (H_g \times Q_g) + (Q_g \times \rho_g \times C_p \times \Delta T)$	$Q_{gen} =$	Energía generada en [kJ/S] o [kW]
	$H_g =$	Valor calorífico del gas (kJ/m ³)
	$Q_g =$	Flujo de volumen de gas (m ³ /s)
	$\rho_g =$	Densidad del gas (kg/m ³)
	$C_p =$	Calor específico del gas (kJ/kg°K)
	$\Delta T =$	Diferencia de temperaturas entre el gas de salida del quemador y el combustible que entra al gasificador (°K)

Fuente: elaboración propia.

El motor funciona mediante la ignición del combustible al ser inyectado en una cámara que contiene aire a una temperatura superior a la temperatura de auto combustión, es decir, la temperatura mínima requerida para que una mezcla de gases inflamables y de aire se enciendan espontáneamente sin necesidad de una ignición externa. La temperatura que inicia la combustión procede del aumento de presión en el compresor, el combustible se inyecta y se mezcla con el aire, por lo que la mezcla se quema rápidamente y el gas se expande, lo que impulsa al pistón desplazarse y comenzar el movimiento del motor. Obsérvese en la figura 3.

Figura 3. **Ciclo de combustión del motor de combustión interna alterna (MCIA)**



Fuente: Muñoz M., Payri F. *Motores de combustión interna alternativos*. p 523.

2.4.1.1. Tiempo de ciclo de combustión

Estados repetitivos de trabajo, que se completa en cuatro carreras del émbolo y dos vueltas del cigüeñal. En estos motores, la renovación de la carga se controla mediante la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape, la cual se describe a continuación:

- **Admisión:** en el momento que el pistón está en el punto más alto (PMS), la válvula de admisión se abre y el propio pistón por el vacío que se crea dentro del cilindro aspira la mezcla (aire y combustible) hasta llegar al punto más bajo del cilindro (PMI).
- **Compresión:** después del ciclo de admisión, el pistón se encuentra en el punto más bajo (PMI), en este momento la válvula de admisión se cierra y el pistón empieza a ascender comprimiendo la mezcla hasta llegar al punto más alto del cilindro (PMS).

- **Expansión:** una vez que en la carrera de compresión se ha comprimido la mezcla, la bujía hace saltar una chispa y enciende la mezcla, aumentando la presión en el cilindro y haciendo descender el pistón hacia el punto más bajo (PMI). En esta carrera de expansión es donde se realiza el trabajo útil.
- **Escape de gases:** cuando el pistón llega al punto más bajo (PMI), se abre la válvula de escape y el pistón empieza a ascender empujando los gases quemados hacia el exterior. En el momento que llega al punto más alto (PMS) la válvula de escape se cierra

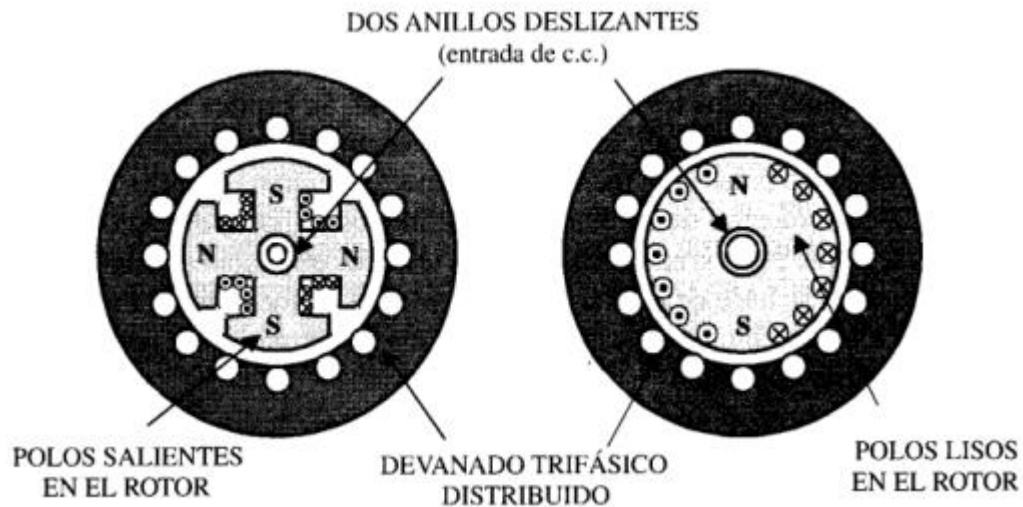
Se necesita una mezcla de combustible homogénea para que la llama se propague completamente, estos motores están limitados a relaciones de compresión bajas para evitar el autoencendido, pero con el gas natural combustible, las desventajas de las bajas relaciones de compresión quedan eliminadas porque contienen principalmente metano y otras parafinas ligeras que tienen altas temperaturas de autoencendido.

2.4.2. Generador síncrono (GS)

Es una máquina cuya velocidad de rotación está vinculada rígidamente con la frecuencia de la red de corriente alterna. En la práctica de las instalaciones eléctricas el empleo es casi siempre como generadores de energía eléctrica, formada por una parte mecánica estática donde se encuentran tres devanados perfectamente distribuidos y colocados en ranuras, los cuales son excitados por corriente alterna.

En la figura 4 se muestran tres devanados de armadura dispuestos alrededor del estator desplazado a intervalos de 120° grados, tanto que con una rotación uniforme del campo magnético se genera en estos un voltaje desplazado de 120° grados en cada fase por donde se producirán las ondas de tensión, una en cada bobina, así se obtiene la onda trifásica.

Figura 4. **Generador sincrónico**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p 384.

A. Operación del generador sincrónico (GS), parte eléctrica

Esta puede ser comparada a un transformador de corriente en cuanto a la forma de funcionamiento, al tener dos devanados: el de excitación, por donde circula la corriente eléctrica directa que produce el campo magnético; y el de armadura, donde existe corriente alterna de salida o de entrada dependiendo si se trata de un generador o motor, respectivamente.

Su operación ocurre cuando a los devanados de armadura colocados en el estator se les aplican voltajes de corrientes alternas, trifásicos y balanceados; produciéndose un campo magnético rotatorio en un determinado sentido y estando dispuesto el rotor en el interior de esta máquina, con su devanado propio de campo, en corto-circuito. Esta tenderá siempre a reducir la reluctancia del flujo, alineándose en la dirección de giro tratando de establecerse la rotación.

El devanado auxiliar denominado amortiguador, que está integrado por conductores colocados convenientemente sobre las caras polares del rotor, permitirá que se ejerzan las fuerzas mencionadas en la Ley de Biot-Savart,²⁵ y que producen el par rotatorio obteniéndose una velocidad cercana a la sincrónica. En seguida se alimenta con corriente directa, desde una fuente interna o externa, el devanado de excitación que estaba cerrado logrando que se establezca un campo magnético en el rotor que sigue al campo magnético giratorio, exactamente a su velocidad de sincronismo.

Esta velocidad de rotación, depende exclusivamente de la frecuencia del voltaje alimentado en cada fase y del número de polos para el cual fue diseñado para amortiguar, teniendo las siguientes funciones: sirve para el arranque de la máquina sincrónica conocido también como motor de inducción, para minimizar las oscilaciones del rotor, al reducir sobre-voltajes en condiciones de corto-circuito y para ayudar en la sincronización del generador sincrónico.

²⁵ Ley Biot-Savart: los físicos Jean Baptiste Biot (1774-1862) y Félix Savart (1791-1841) establecieron poco después de que Oersted (1777-1851) divulgara su experiencia, que al igual que una carga origina un campo eléctrico o una masa un campo gravitatorio, un elemento de corriente genera un campo magnético. Los campos magnéticos pueden ser generados por cargas individuales en movimiento y en grupo (corrientes eléctricas).

B. Operación del generador sincrónico (GS), parte de construcción

La conversión de energía electromecánica se produce cada vez que un cambio en el flujo se asocia con el movimiento mecánico. En las máquinas síncronas, el devanado de campo es la fuente primaria de flujo. El devanado de campo y el devanado de inducido se colocan en un circuito magnético común consta de dos partes - el estator y el rotor.

- Estator: es un miembro estacionario. Es la porción anular de un cilindro dentro del cual el rotor gira. Un espacio de aire suficiente se proporciona entre el estator y el rotor. El devanado de inducido se aloja en las ranuras cortadas en el estator. Está conformado por: a) núcleo magnético del estator, b) órganos sustentadores del núcleo magnético del estator (carcasa, anillos de sujeción del núcleo y pernos de fijación para los anillos de sujeción); c) arrollamiento del estator con sus aislamientos; d) órganos de sustentación del arrollamiento del estator (bridas y cinchos de sujeción).
- Rotor: consiste en espiras concentradas en torno a polos y alimentadas con corriente continua a través del colector. El eje del rotor se lleva a cabo en dos rodamientos en las dos tapas atornilladas a ambos lados del rotor. El devanado de campo se alimenta con una corriente DC a partir de un excitador por separado, a través de un par de cepillos. El excitador puede ser una fuente externa o un generador de corriente acoplado al eje de la máquina síncrona.

Está conformado por: a) núcleo magnético del estator; b) órganos sustentadores del núcleo magnético del estator (carcasa, anillos de sujeción del núcleo y pernos de fijación para los anillos de sujeción); c) arrollamiento del estator con sus aislamientos; d) órganos de sustentación del arrollamiento del estator (bridas y cinchos de sujeción); e) caja de bornes; f) canales de ventilación, dispuestos transversalmente sobre el núcleo magnético del estator.

2.4.2.1. Velocidad de rotación

En los generadores síncronos, la frecuencia eléctrica que se produce, o entrelaza, se sincroniza con la tasa mecánica de rotación del generador. El rotor consta de un electroimán al que se le suministra corriente directa. El campo magnético del rotor apunta en la dirección en que gira el rotor, la velocidad de rotación de los campos magnéticos en la máquina está relacionada con la frecuencia eléctrica del estator por medio de la siguiente ecuación, como se observa a continuación:

Tabla VII. Ecuación frecuencia eléctrica

$f_e = \frac{n_m P}{120}$	fe=	Frecuencia en Hz
	nm=	Velocidad mecánica del campo magnético en r/min (igual a la velocidad de la máquina síncrona).
	P=	Número de polos

La tensión interna generada por un generador síncrono depende del flujo Φ en la máquina, de la frecuencia o velocidad de rotación y de la construcción de la máquina como se muestra en la ecuación siguiente:

Tabla VIII. **Ecuación tensión interna generada**

$E_A = K\Phi\omega$	$E_A =$	Tensión interna generada (tensión de armadura) en V
	$K =$	Constante que representa la construcción de la máquina
	$\Phi =$	Flujo de la máquina en Wb
	$\omega =$	Velocidad angular en rad/seg

Si ω se expresa en radianes eléctricos por segundo, entonces:

Tabla IX. **Ecuación constante en radianes**

$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}}$	$K =$	Constante que representa la construcción de la máquina
	$N_c =$	Número de espiras total de una fase

Mientras que si ω se expresa en radianes mecánicos por segundos, entonces:

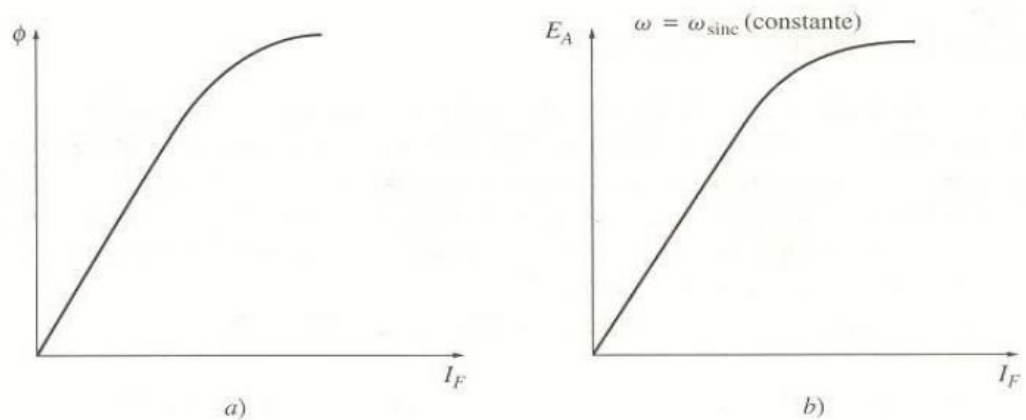
Tabla X. **Ecuación constante en radianes por segundos**

$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}}$	$K =$	Constante que representa la construcción de la máquina
	$N_c =$	Número de espiras total de una fase
	$P =$	Número de polos

La tensión interna generada E_A , es directamente proporcional al flujo y a la velocidad, pero el flujo en sí depende de la corriente que fluye por el circuito de campo del rotor.

En la figura 5a se muestra la manera en que se relacionan el circuito de campo I_F (corriente de campo) y el flujo ϕ . Debido a que E_A es directamente proporcional al flujo, el voltaje interno generado E_A está relacionado con la corriente de campo, como se observa en la figura 5b, la curva de magnetización o característica de circuito abierto de la máquina.

Figura 5. **Curva de magnetización del generador síncrono**



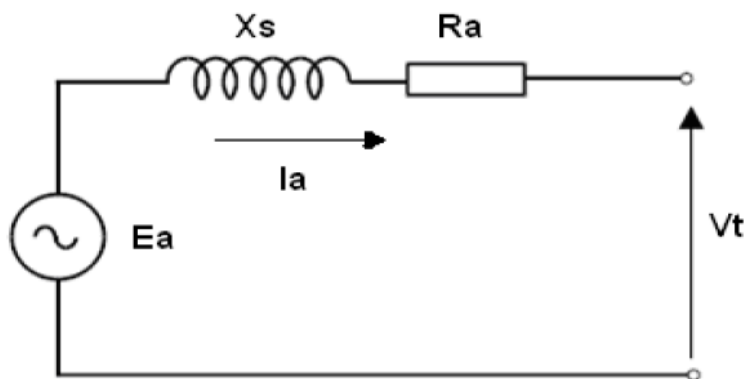
- a) Gráfica de flujo contra la corriente de campo en un generador síncrono
- b) Curva de magnetización de un generador síncrono

2.4.2.2. Circuito equivalente

Este modelo es usado para analizar el funcionamiento en régimen permanente de un generador debido a las condiciones de operación, este se puede clasificar en operación en vacío u operación con carga, a lo cual se tomará en consideración si se tiene un generador de polos lisos o polos salientes. Derivado de las condiciones anteriores se pueden obtener dos circuitos equivalentes distintos.

La primera condición, generador en vacío mostrado en la figura 6, dependerá solo de la excitación aplicada al devanado excitador, por lo que en el devanado inducido se podría interpretar como una fuente de tensión alterna E_a , la cual tendrá una magnitud de relación lineal a la magnitud del campo.

Figura 6. **Circuito equivalente de la máquina síncrona**



Fuente: CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. p 285.

Cuando gira el rotor, se induce un voltaje E_a en las bobinas estatoricas. Conectada una carga en terminales del generador, fluirá corriente, pero este flujo de corriente trifásica estatórica produce un campo magnético propio en la máquina.

El campo magnético estatórico distorsiona el campo magnético del rotor cambiando el voltaje en sus terminales. La reacción que se produce se conoce como reacción de armadura debido a la corriente del estator que afecta al campo magnético que la produce. Comprendiendo los diagramas de vectores entre los voltajes y corrientes del rotor-estator. Se modela como una reactancia "X" en serie, que, multiplicado por la corriente del estator, establece la ecuación de caída de tensión por la reacción de armadura como:

Tabla XI. **Ecuación de caída de tensión por reacción de armadura**

$-jX_I I_A$	$I_A =$ Corriente de armadura
	$X =$ Reactancia por efecto de reacción de armadura

Utilizando la ley de voltajes de Kirchhoff se obtiene el voltaje en terminales de la máquina como:

Tabla XII. **Ecuación voltaje en terminales**

$V_t = E_a - jX_I I_A$	$V_t =$ Voltaje en terminales de la máquina
	$E_a =$ Tensión interna generada

Los devanados del estator tienen una inductancia y una resistencia. Si se le llama L_A a la autoinductancia del estator, X_A a su reactancia y la resistencia del estator como R_A , incluyendo estos valores en la ecuación de voltaje en terminales se obtiene:

Tabla XIII. **Ecuación general de voltaje en terminales**

$V_t = E_a - jX_I I_A - jX_{A'} I_A - R_A I_A$	$V_t =$ Voltaje en terminales de la máquina
	$E_a =$ Tensión interna generada
	$-jX_I I_A =$ Caída de tensión por reacción de armadura
	$-jX_{A'} I_A =$ Caída de tensión en reactancia de dispersión
	$-R_A I_A =$ Caída de tensión en resistencia del Inducido

Los efectos de reacción de armadura y autoinductancia de la máquina se representan como reactancias, y es común combinarlas en una sola “*reactancia síncrona*” de la máquina expresándola:

Tabla XIV. **Ecuación reactancia síncrona**

$X_S = X + X_A$	$X_s =$ Reactancia síncrona
	$X =$ Reactancia por efecto de reacción de armadura
	$X_A =$ Reactancia de dispersión

La ecuación final describirá el voltaje en terminales de la máquina.

Tabla XV. **Ecuación final de voltaje en terminales**

$V_t = E_a - jX_{sI_A} - R_{AI_A}$	$V_t =$ Voltaje en terminales de la máquina
	$E_a =$ Tensión interna generada
	$-jX_{sI_A} =$ Caída de tensión en reactancia síncrona
	$-R_{AI_A} =$ Caída de tensión en resistencia del Inducido

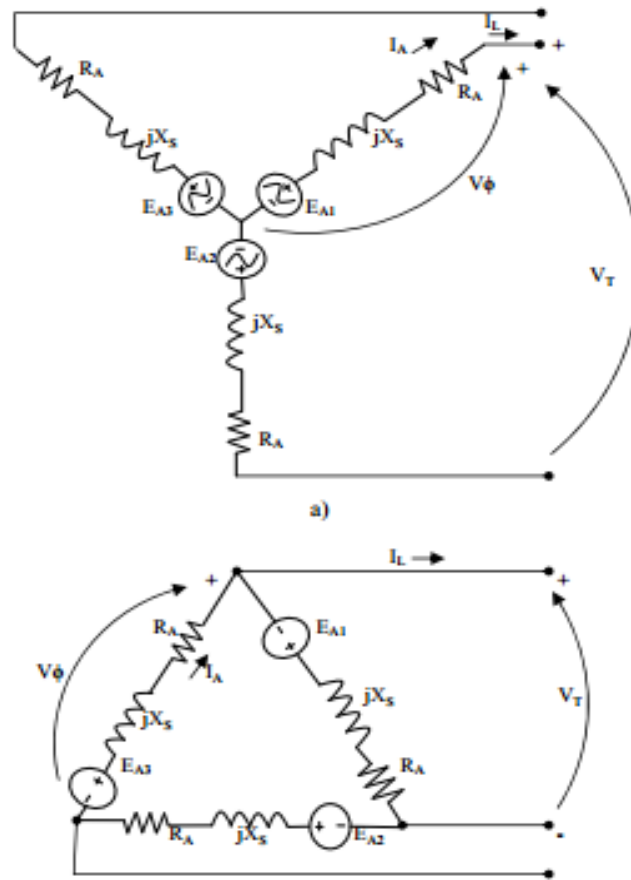
Estas tres fases se conectan en Y o Δ como se muestra en la figura 7. Si se conectan en Y, entonces la tensión del terminal V_T , está relacionada con la tensión de fase por la siguiente ecuación:

Tabla XVI. **Ecuación tensión del terminal**

$V_T = \sqrt{3}V\phi$	$V_t =$ Tensión del terminal
	$V\phi =$ Voltaje de fase

Si se conecta en Δ entonces $V_T = V\phi$. Normalmente, el hecho de que las tres fases de un generador síncrono sean idénticas en todos aspectos, menos el ángulo de fase, este conlleva a la utilización de un circuito por fase.

Figura 7. Conexión trifásica del generador (Y y Δ)



Fuente: Ibíd. p. 278

2.4.2.3. Eficiencia del generador síncrono

Esta máquina se encuentra conectada a una red cuyo voltaje y frecuencia son constantes. Existe un límite de la potencia que el generador puede entregar a la barra infinita (red) y un torque máximo que puede ser aplicado al motor sin perder sincronismo.

Es por ello que durante la conversión de energía mecánica a eléctrica se crea energía calorífica que no se utiliza. Una máquina ideal sería aquella en la cual toda la energía mecánica se transforma en energía eléctrica o viceversa, pero no es posible por la ley de conservación de la energía.²⁶

En todas las máquinas eléctricas rotativas existen rozamientos entre partes mecánicas y los conductores están sometidos al efecto Joule, además de desarrollarse corrientes parásitas en sus campos magnéticos.

La tabla XVII muestra las pérdidas en la máquina eléctrica por implementar en el sistema:

Tabla XVII. **Pérdidas en la máquina eléctrica**

Pérdidas	Descripción
Rendimiento	No se aprovecha al máximo su capacidad
Ley de Joule	Provoca pérdidas que originan calentamiento, que al elevarse darán lugar a fallas más importantes
Caída de tensión	La regulación debe ser aceptable, sobre todo, si la energía sobrante se va distribuir a algún otro sistema eléctrico

Fuente: elaboración propia.

Las pérdidas del generador síncrono son fundamentalmente causadas como se muestra en la tabla XVIII:

²⁶ Ley de conservación de la energía: afirma que la energía se puede transformar de una forma a otra, y transferir de un objeto a otro, pero la cantidad total permanece constante.

Tabla XVIII. **Pérdidas del generador síncrono**

Tipo de pérdidas	Descripción
Fricción	La potencia mecánica que se requiere para que la máquina funcione durante la realización de la prueba de cortocircuito, es igual a la suma de las pérdidas por fricción y rozamiento (lo cual se determinó a partir de la prueba de circuito abierto con una corriente de campo de cero).
Ventilación de la máquina	Pérdidas de ventilación, corresponden a la potencia necesaria para obtener una ventilación suficiente para disipar el calor producido por las pérdidas presentes en la máquina, en condiciones normales de funcionamiento.
Histéresis	Cuando un material ferromagnético, sobre el cual ha estado actuando un campo magnético, cesa la aplicación de este, el material no anula completamente su magnetismo, sino que permanece un cierto magnetismo remanente.
Corrientes parásitas	Cuando el flujo es variable, se inducen en el interior del núcleo ferromagnético unas pequeñas corrientes llamadas corrientes parásitas, que producen más pérdidas de calor. Para minimizarlas, los núcleos no son macizos, sino que se construyen a base de láminas ferromagnéticas con sustancias aislantes en sus caras.

Fuente: elaboración propia.

Los valores de las dos primeras son relativamente bajos y despreciables, la histéresis y las corrientes parásitas se deben a las características del material magnético.

Las pérdidas son importantes por tres razones: 1) determinan la eficiencia de la máquina e influyen en su costo de operación; 2) determinan el calentamiento, y por tanto, la salida de potencia obtenida evitando un deterioro indebido del aislamiento, y 3) tomar en consideración las caídas de voltaje o de corriente asociada con la compensación de pérdidas.

La tabla XIX muestra que la eficiencia en las máquinas eléctricas, son equivalentes al rendimiento, por lo tanto es importante determinarla. Para el generador síncrono se utilizan las potencias de entrada y salida, como se muestra a continuación:

Tabla XIX. **Eficiencia total**

$\eta = (P_s) / (P_e)$	$\eta =$ Eficiencia total
	$P_s =$ Potencia de salida
	$P_e =$ Potencia de entrada

Tabla XX. **Potencia de entrada**

$P_e = P_s + P_T$	$P_T =$ Pérdidas totales
	$(P_s) =$ Potencia de salida
	$(P_e) =$ Potencia de entrada

Entonces:

$$\eta = \frac{P_s}{P_s + \text{Pérdidas totales}}$$

Por lo que la potencia de salida del generador trifásico es:

Tabla XXI. **Potencia de salida**

$P_s = \sqrt{3} V I \cos \varphi$	$P_s =$	Potencia de salida
	$V =$	Voltaje
	$I =$	Corriente
	$\cos \varphi =$	Factor de potencia

Sustituyendo la fórmula se tiene:

$$\eta = \frac{\sqrt{3} V I \cos \varphi}{\sqrt{3} V I \cos \varphi + \text{Pérdidas totales}}$$

En general los equipos seleccionados para estos sistemas son pequeños, por lo tanto su rendimiento es elevado.

2.5. Generación de energía eléctrica a partir de biogás

El objetivo de generar energía eléctrica con el uso de biogás, contribuye a la reducción de la contaminación en el medio ambiente, esto por la composición básicamente de metano (CH_4), que es cerca de veinte veces más contaminante que el dióxido de carbono (CO_2) para el tratamiento del efecto invernadero como se describe en los siguientes principios:

2.5.1. Principio de generación de energía eléctrica a partir de una turbina

Es generada utilizando el gas caliente, expulsado de las calderas a través de una turbina que va unida por un rotor a un alternador que, al girar, produce energía eléctrica.

Esta turbina es accionada al girar por la expansión del vapor procedente de la caldera el cual, tras ceder parte de la energía a la turbina, se condensa y se vuelve a introducir en la caldera, funcionando prácticamente en un ciclo cerrado, haciendo que el aire comprimido (generalmente de 10 a 25 unidades de presión-bars-) reacciona con el gas combustible inyectado.

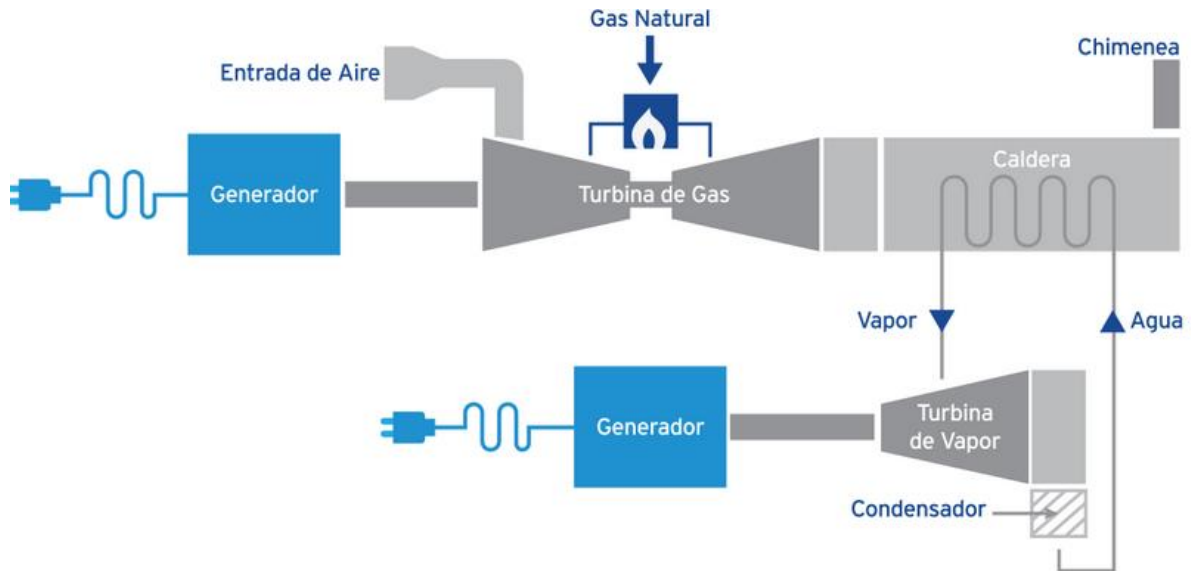
Las características de este principio son:

- La condensación del vapor va perdiendo una parte importante de la energía que llevaba el vapor inicial, lo que condiciona el rendimiento general del sistema.
- El rendimiento eléctrico puede variar entre el 25 % y el 33 %.
- Las turbinas son de condensación, en las que la magnitud termodinámica, también llamada entalpía, aprovecha al máximo la turbina.
- Funciona mediante un tipo de turbina de ciclo de Rankine.²⁷

En la figura 8 se muestra el principio de una turbina por gas.

²⁷ El ciclo Rankine: es un ciclo de potencia que opera con vapor; es producido en una caldera a alta presión para luego ser llevado a una turbina donde produce energía cinética, donde perderá presión.

Figura 8. Principio de una turbina de gas



Fuente: Generación de energía eléctrica con gas. www.termoelectricamexicali.com/proceso-de-generacion-de-energia-electrica.html. Consulta: 24 de agosto de 2015.

Los gases provenientes de la cámara de combustión al llegar a la turbina mantienen una temperatura elevada (superior a los $1\,523,15\text{ °K}$), mayor que la temperatura del vapor (de $798,15$ a $833,15\text{ °K}$). Por lo tanto, la eficiencia termodinámica es elevada con las turbinas de gas.

2.5.2. Tipos de generadores

Los generadores se clasifican de acuerdo con el combustible que utilizan:

- a) **Generadores por gas:** funcionan con gases alternativos, haciéndolo versátil al momento de funcionar con biogás, pero debe considerarse una pérdida de un 10 % de su potencia en el motor. Por lo que la pérdida es del mismo nivel en la generación de electricidad.

b) Generadores de diésel adaptados para funcionar con biogás:

Utilizan como combustible el biogás a través de un generador o turbinas con combustible dual y, exclusivamente, para el combustible por medio de biogás, las cuales ya tienen un sistema de pretratamiento del gas integrado.

c) Generadores a gas con motor diésel: reemplazan hasta el 80 % de diésel, siendo de baja capacidad de ignición del biogás que no permite reemplazar la totalidad del diésel en este tipo de motores que carecen de bujía para la combustión.

d) Generadores a biogás: turbinas diseñadas especialmente para trabajar con biogás, las que ofrecen un mejor rendimiento del combustible al ser un diseño dedicado de acuerdo con las características del biogás. Estas cuentan con un sistema pretratamiento²⁸ del combustible.

2.5.3. Generación de energía eléctrica a partir de biogás

Las consideraciones técnicas en la generación de energía eléctrica, indican que cualquier proceso que transforma un tipo de energía en otro, a través de la conversión energética en este caso a partir del biogás, lleva a cabo este proceso a partir de la energía química contenida en las moléculas que convierte en energía mecánica por combustión. Esta energía mecánica activa un alternador que la convierte en electricidad, a partir de las siguientes propiedades de composición del biogás:

²⁸ Pretratamiento: proceso para reducir, eliminar o cambiar las propiedades evitando se altere el metabolismo de los microorganismos implicados, y que por lo tanto pueda afectar el rendimiento de la planta.

- La composición del gas: el porcentaje de metano contenido en su mezcla, es el combustible que se quemará para obtener energía eléctrica en la turbina. La cantidad de metano dentro de la mezcla de biogás es la que determinará el volumen del gas requerido para satisfacer la demanda en cierto instante de tiempo.
- Cálculo de la carga eléctrica: calcular la carga eléctrica que debe ser satisfecha es importante debido a que influirá en la capacidad para generarse dentro de la turbina.
- Selección de la turbina: este proceso se realiza de acuerdo con la capacidad de la generación, y de guiarse por las características técnicas del fabricante.
- Estimación de costos: deben estimarse los costos de los dispositivos, los materiales, el equipo y herramientas, mano de obra e instalación, el mantenimiento y operación del sistema de generación del producto final.

El poder calorífico del biogás tiene diferentes capacidades de calor en función de las condiciones de concentración de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2); puede alcanzar el poder calorífico, como se muestra en la tabla XXII.

Tabla XXII. Poder calorífico del biogás

Composición química del biogás	Peso específico (kg/m ³)	Poder calorífico inferior (kcal/kg)
10 % CH ₄ - 90 % CO ₂	1,8393	465,43
40 % CH ₄ - 60 % CO ₂	1,4643	2 338,52
60 % CH ₄ - 40 % CO ₂	1,2143	4 229,98
65 % CH ₄ - 35 % CO ₂	1,1518	4 831,14
75 % CH ₄ - 35 % CO ₂	1,0268	6 253,01
95 % CH ₄ - 05 % CO ₂	0,7768	10 469,60
99 % CH ₄ - 01 % CO ₂	0,7268	11 661,02

Fuente: elaboración propia.

La principal tecnología utilizada para este tipo de conversión es la de los motores con un ciclo Otto, en donde el biogás como combustible alterno en motores de combustión interna encendidos por chispa.

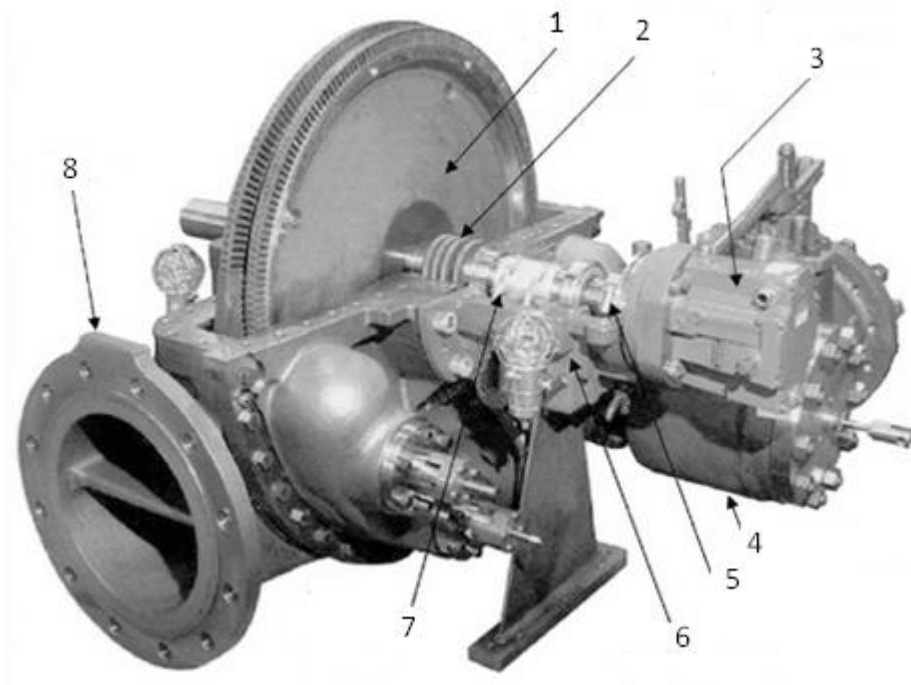
La combustión tiene lugar por medio de la explosión de combustible mediante una chispa en la cámara de combustión. Las turbinas de gas son equipos para el compresor, la cámara de combustión y la turbina de expansión (ciclo Brayton).²⁹ El aire comprimido se inyecta en la cámara de combustión proporcionando el oxígeno a la combustión de combustible.

²⁹ Ciclo Brayton: también conocido como ciclo Joule o ciclo froude, es un ciclo termodinámico consistente, en su forma más sencilla, en una etapa de compresión adiabática, una etapa de calentamiento isobárico y una expansión adiabática de un fluido termodinámico compresible.

2.5.4. Características técnicas de una turbina de biogás

La figura 9 ilustra una turbina de biogás también llamada turbina de vapor, la cual es la encargada de mover el eje del generador al cual está acoplado.

Figura 9. Partes de turbina Elliot, modelo YR



1. Rotor 2 Carcasa de sellado 3.Sistema de Gobernador 4. Arca de vapor 5. Sistema de velocidad 6. Cojinete 7. Sistema de aceite para la lubricación del anillo. 8. Carcasa

Fuente: *Steam turbine parts*. <http://imgarcade.com/1/steam-turbine-parts/>. Consulta: 21 de septiembre de 2015.

Es el vapor el que llega a la turbina, esta presión puede ser de 49,2 bar, y a una temperatura de hasta los 672,15 °K, según las características técnicas de la turbina, como se muestra a continuación:

Tabla XXIII. **Modelo YR marca ELLIOT TURBINES**

Características del modelo YR	
Presión de admisión del vapor	49,20 bar
Temperatura de admisión del vapor	De 672,15 °K
Presión exhaustiva del vapor	0,10 bar
Temperatura exhaustiva del vapor	318,35 °K
Velocidad máxima	6 675 RPM
Numero de etapas	1
Numero de alabes rotatorios	2
Diámetro del conducto inyector	7-10 cm
Diámetro del conducto de escape	20 cm
Rango de potencias	Hasta 1 050 KWe
Peso aproximado	580 Kg

Fuente: www.elliott-turbo.com/Files/Admin/Literature/TUR.309---District-Energy-Final.pdf.

Consulta: septiembre de 2015.

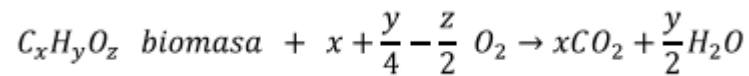
2.6. Aspectos de la producción de electricidad por biogás

2.6.1. Combustión de biomasa

La combustión de la biomasa implica fenómenos dinámicos complejos donde se transfieren simultáneamente masa y calor produciendo reacciones químicas diversas. A diferencia de los procesos de conversión bioquímicos y termoquímicos similares, la combustión reduce esencialmente toda la biomasa en productos simples.

Cuando la biomasa es sometida a altas temperaturas, se producen cambios en su estructura química y sus componentes principales se degradan.

Estos cambios dependen fundamentalmente de la forma de la materia, así como de los parámetros del proceso, como la velocidad de calentamiento. Esto explica como este método de extracción de energía útil de la biomasa seca es quemada utilizando aire como el oxidante. La química de la oxidación completa de materiales que contengan principalmente C, O y H se indica la forma siguiente:



En donde X, Y, y Z representan la composición elemental media de la biomasa.

Es por ello que si la combustión es incompleta debido a la insuficiente O_2 que es liberada de los gases de combustión tanto C, CO, hidrocarburos como otros gases, se reduce el calor de la reacción.

Sin embargo, la eficiencia se ve reducida debido a la exigencia añadida de calentamiento del agua contenida en la biomasa, al evaporarse a temperaturas de combustión, reduciendo, además, la temperatura de la llama y la velocidad de combustión.

Es por ello que se forma una reacción global para la combustión del combustible de biomasa y aire donde el primer compuesto reactante es un combustible de biomasa, además, se pueden encontrar metales pesados que tienen una influencia importante sobre la eliminación de cenizas.

El segundo compuesto son los reactantes, que expresan la humedad en el combustible, este varía dentro de cierto rango, pero es importante tener en cuenta que si hay demasiada humedad, el combustible no reaccionará espontáneamente. El tercer compuesto es una simplificación y representa el aire por la simple mezcla binaria O y N en la relación de volumen; contiene los sulfuros y el cloro como componentes importantes de las emisiones contaminantes, pero también son los responsables de las reacciones que producen incrustaciones en la gasificación.

En el punto anterior, se observa que la combustión ideal es aquella que produce la oxidación completa de la parte orgánica sólida del combustible en gases CO_2 y H_2O .

2.6.2. Transformación de biomasa

La transformación de biomasa es aquella generada por las propiedades físicas, químicas y biológicas que poseen los residuos sólidos urbanos (RSU), debiéndose tomar en cuenta al momento de diseñar y desarrollar sistemas de gestión integrada de los residuos sólidos, así como su forma y composición. Esto se puede observar en la tabla XXIV.

Tabla XXIV. **Procesos de transformación de la biomasa**

Proceso de transformación	Medio o método de transformación	Productos principales de la conversión o transformación
Físico <ul style="list-style-type: none"> • Separación de componente. • Reducción en volumen. • Reducción de tamaño. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Separación manual y/o mecánica. b) Aplicación de energía en forma de fuerza o presión. c) Aplicación de energía en forma de trituración. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Componentes individuales encontrados en los residuos urbanos no seleccionados. b) Reducción del volumen de los residuos originales. c) Alteración de forma y reducción de tamaño de los componentes residuales originales.
Químico <ul style="list-style-type: none"> • Combustión. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Oxidación térmica. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Dióxido de carbono (CO₂) dióxido de azufre (SO₂) y otros productos de oxidación.
Cenizas <ul style="list-style-type: none"> • Pirolisis. • Gasificación. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Destilación destructiva. b) Combustión con defecto de aire. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Una corriente de gas que contiene una variedad de gases, alquitrán y o aceite y un combustible carbonoso. b) Un gas de bajo poder calorífico, un combustible que contiene carbono e inertes originalmente en el combustible y aceite pirolítico.

Fuente: SOSNOWSKI, James; et al. *Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes*. p 15.

Continúa Tabla XXIV. Procesos de transformación de la biomasa

Proceso de transformación	Medio o método de transformación	Productos principales de la conversión o transformación
Biológico <ul style="list-style-type: none"> • Aerobio. • Digestión anaerobia (bajo o alto contenido en sólidos. • Compostaje anaerobio. 	a) Conversión biológica aerobia. b) Conversión biológica anaerobia. c) Conversión biológica anaerobia.	a) Compost (material humito utilizado como acondicionador de suelo). b) Metano (CH ₄), dióxido de carbono (CO ₂), trazas de otros gases, humus o fangos digeridos. c) Metano (CH ₄), dióxido de carbono (CO ₂), residuos digeridos.

Fuente: Ibíd.

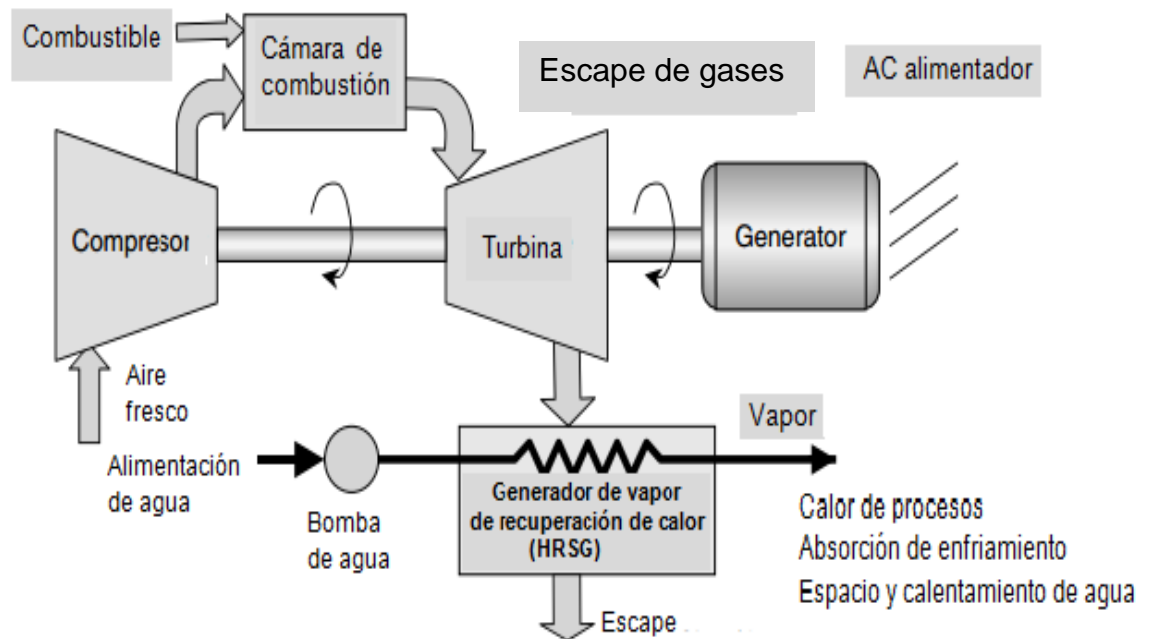
2.6.3. Sistema de cogeneración por medio de motores de combustión interna (MCI)

Los MCI aplicados a la cogeneración derivan de los equipos electrógenos y, aunque la mayoría de ellos son motores Diésel de cuatro tiempos, en el mercado existen todas las variedades posibles: ciclo Otto o Diésel y de cuatro o dos tiempos.

El tipo de motor térmico más utilizado para la transformación de energía química de un combustible en trabajo. En sus aplicaciones convencionales, el objetivo es producir el máximo trabajo con el rendimiento más alto posible.

Las plantas de cogeneración que utilizan MCI pueden ser utilizadas al mezclar el biogás con el diésel o con gasolina o simplemente utilizar biogás como su combustible. Y donde se recupera el calor de refrigeración del motor y el calor residual contenido en los gases de escape. Dicha recuperación de calor se realiza mediante intercambiadores de calor situados, uno en el circuito de refrigeración del motor y otro a la salida de los gases de escape. En la figura 10 se ilustra este proceso:

Figura 10. **Esquema de cogeneración con motores de combustión.**



Fuente: http://dotl.in/download/electrical/Renewable_And_Efficient_Electric_Power_Systems.pdf. Consulta: octubre de 2015.

Si se trata de una central de ciclo combinado convencional, la turbina de vapor ha sido diseñada para una máxima eficiencia eléctrica haciendo que la distribución de energía generada, eléctrica y térmica y las pérdidas energéticas, dependan principalmente del tipo de motor, y de la potencia nominal, del carburante utilizado y de lo alejado que esté del punto de trabajo de las condiciones nominales.

Los motores de combustión interna alternativos se clasifican en:

- Encendido por chispa (ciclo Otto). También llamado encendido de gasolina, obtienen su fuerza motriz al provocar, mediante una chispa eléctrica que actúa como el fulminante de un explosivo, la explosión de una mezcla de aire-combustible.

Se realiza en el carburador, pero en los motores con sistema de inyección se realiza dentro del conducto de admisión de la culata. Una vez realizada la mezcla esta penetra en los cilindros; durante la carrera de admisión se produce la gasificación del combustible y la mezcla se toma más uniforme. La tabla XXV explica este proceso:

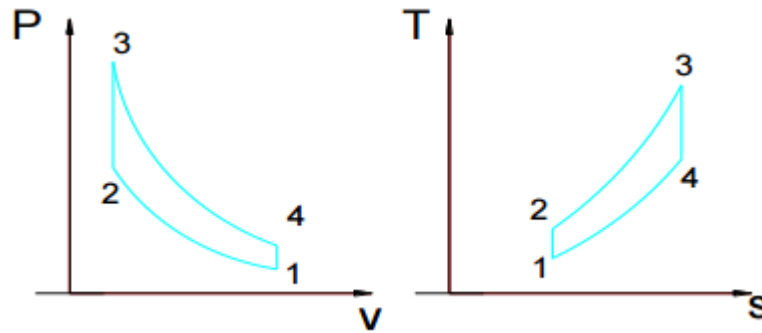
Tabla XXV. **Proceso del ciclo Otto**

Proceso	Descripción
Proceso 1-2:	Adiabática o isentrópica (sin intercambio de calor con el exterior): compresión del fluido.
Proceso 2-3:	A volumen constante: introducción instantánea del calor.
Proceso 3-4:	Adiabática: expansión.
Proceso 4-1:	A volumen constante: rechazo instantáneo de calor.

Fuente: elaboración propia.

Este proceso se muestra en la siguiente figura:

Figura 11. **Ciclo Otto**



Fuente: DÍAZ, Rodrigo. *Manual de motores de combustión interna*. p 22.

La combustión se realiza cuando el pistón se encuentra en el punto de máxima compresión de una mezcla de aire-combustible. En este momento, cuando la chispa que proporciona una bujía produce una deflagración con el consiguiente aumento de temperatura y presión de los gases que actúan sobre el pistón que será el encargado de realizar el trabajo motriz.

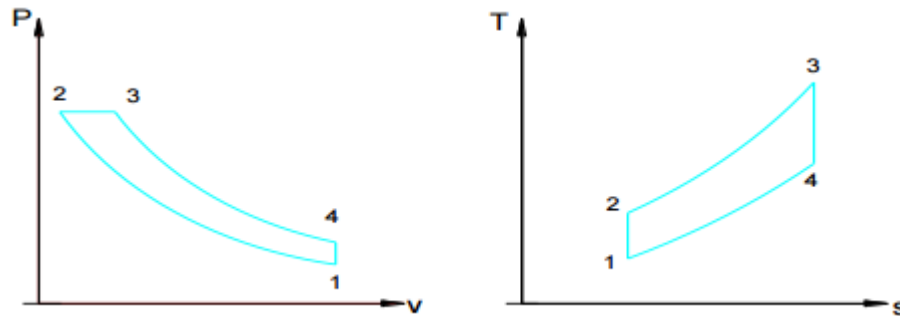
- Encendido por compresión (ciclo Diésel). En el ciclo del motor se identifican las transformaciones del fluido operante con las carreras del pistón produciendo la explosión del fluido operante, cuando se introduce el combustible finamente pulverizado en la cámara de combustión y el combustible explota al entrar en contacto con el aire comprimido debido a la transformación termodinámica que ha sufrido durante la compresión. A continuación en la tabla XXVI se explica este proceso:

Tabla XXVI. **Proceso del ciclo de Diésel**

Proceso	Descripción
Proceso 1-2:	Compresión adiabática.
Proceso 2-3:	Introducción de calor a presión constante.
Proceso 3-4:	Expansión adiabática.
Proceso 4-1:	Rechazo de calor a volumen constante

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Ciclo Diésel**



P= potencia; Pv pérdidas; T=constante térmica de tiempo; Ts= duración del ciclo

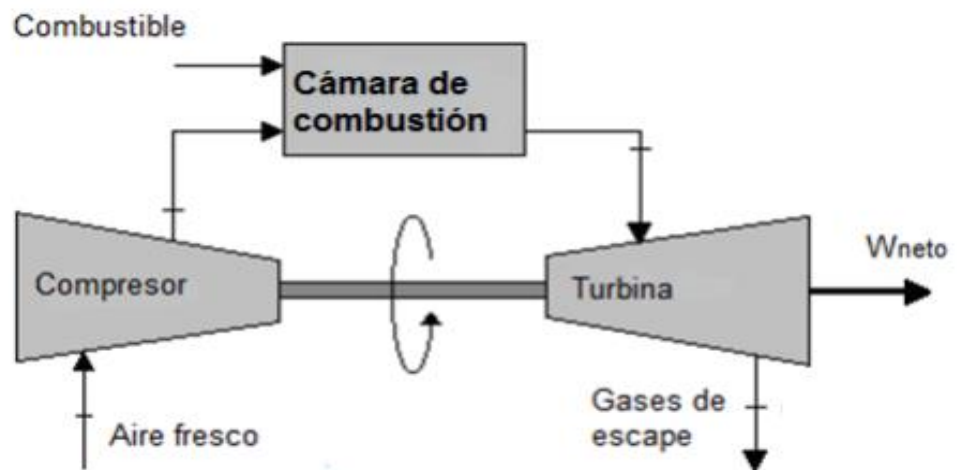
Fuente: Ibíd. p. 23

Introduciendo previamente el aire en el cilindro, el cual va comprimiendo hasta que llega a un punto de máxima temperatura; a continuación, se inyecta a presión y pulverizado el combustible, con lo que consigue la combustión con la fuerza necesaria para realizar el proceso.

El rendimiento eléctrico y térmico tiene cierta energía que se va al sistema de refrigeración del motor y a los gases de escape, la cual se puede recuperar en forma de calor y considerarlo en la generación de electricidad.

- Turbinas de gas (TG): está formada por un compresor, un quemador, la turbina propiamente dicha y el alternador que genera electricidad, como se observa en la figura 13.

Figura 13. Esquema de cogeneración con turbina de gas



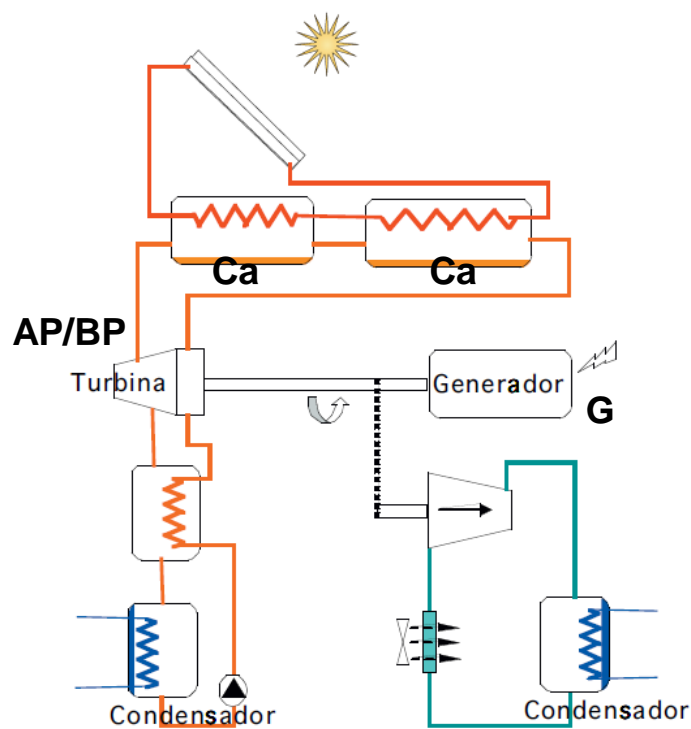
Fuente: Boles, Michael A. *Termodinámica*. p 41.

En donde el aire es aspirado por el compresor que lo eleva a la presión de trabajo de la turbina, pasa a la cámara de combustión o quemador donde se quema el carburante y produce gases a alta temperatura, estos gases a presión y temperatura elevadas llegan a la turbina donde se expansionan hasta la presión de escape.

El trabajo generado por la turbina, se utiliza para accionar el compresor y el resto se transmite al alternador que genera electricidad. Los gases calientes a presión y temperatura elevadas llegan a la turbina, donde se expansionan hasta la presión de escape.

- Turbinas de vapor (TV): el equipo de cogeneración con turbina de vapor funciona según un ciclo de Rankine clásico, como se observa en la figura 14, con una turbina a contrapresión o de condensación con extracción, en función del nivel térmico de la demanda de calor.

Figura 14. **Esquema de cogeneración con turbina de vapor sistema Rankine**



Fuente: www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Frio-Solar-fenercom-2011.pdf. Consulta: noviembre de 2015.

En donde la turbina de vapor de condensación con extracción. La caldera (Ca) produce vapor recalentado que se lleva a una turbina de vapor de dos cuerpos uno de alta presión (AP) y otro de baja presión (BP). Todo el vapor generado por la caldera pasa por la zona de alta presión, parte del mismo continua hasta la zona de baja presión y el resto se extrae.

El vapor sangrado en la zona intermedia está a una temperatura más elevada que el vapor expulsado en la zona de baja presión, con lo cual se puede tener calor útil a dos niveles térmicos distintos.

El vapor turbinado acciona un generador eléctrico (G) y el agua resultante se recoge en una línea de condensados y se devuelve a la caldera mediante una bomba de presión que consumirá parte de la electricidad generada.

3. RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

El primer paso para definir el sistema bioenergético, utilizando residuos sólidos orgánicos, consiste en la determinación de la carga que produce la Universidad. Para esta etapa se propone lo que a continuación se describe.

3.1. Sistemas de recolección selectiva

La primera etapa del sistema depende de las características topográficas del lugar. Consistirá en la producción de residuos en los 48 edificios situados en la ciudad universitaria, con una población estudiantil aproximada de 155 000.







En esta etapa la población universitaria, genera los residuos sólidos urbanos (RSU). No todos los desechos son basura, ya que en gran parte de los residuos que se generan pueden ser reducidos o minimizados, es decir, el volumen de residuos que genera cada estudiante puede disminuir.

Este sistema de recolección selectiva, consta de distintos tipos de residuos seleccionados en origen para su reciclaje, tales como plásticos, papeles y cartones, productos orgánicos, vidrios, metales y ordinario no reciclable.

Los dos modelos por utilizar, contenedores públicos y sanitarios públicos:

- Contenedores públicos: estratégicamente en cuarenta y ocho edificios dentro y fuera de ellos, en los ingresos, salidas, como también a sus alrededores un total de veinte grupos de cinco contenedores identificados con letras y colores. Recuperando así los materiales que la población deposite, según se muestra en la tabla XXVII.

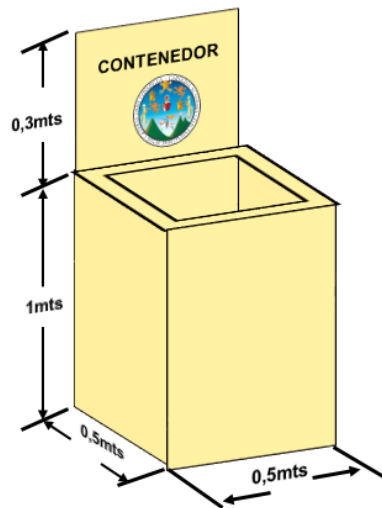
Tabla XXVII. **Colores de los contenedores**

	<p>El color azul identifica el contenedor destinado para el depósito de residuos plásticos, como las botellas de gaseosas, jugos, agua pura (PET).</p>
	<p>El amarillo será destinado para el depósito de papel bond, periódicos y cartón, residuos muy comunes en las oficinas y de fácil separación.</p>
	<p>Los desechos orgánicos como alimentos, frutas, verduras, hojas y ramas de árboles, serán depositados en el contenedor de color verde, el cual posteriormente servirá para producir compost.</p>
	<p>El blanco estará destinado para el depósito de botellas de vidrio (vino, champagne o licores), frascos de vidrio (perfume, colonia o similar), tarros de alimentos (mermelada, conservas, vegetales, etc.) y cristalería en general.</p>
	<p>El color café identifica el contenedor destinado para el depósito de metales (latas de metal, latas de aluminio, aerosoles, botes de desodorante, tapas, tapones metálicos, etc.).</p>
	<p>El crema estará destinado para el depósito de materiales ordinarios o inertes (servilletas, empaques de papel plastificado, polvo, basura o desperdicios que se arrastran al barrer, colilla, poliestireno expandido, pajilla, papel carbón, tela y restos de alimentos y empaques no contaminados.</p>

Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestran las dimensiones del contenedor y en condiciones óptimas se logrará recolectar un volumen por contenedor de $0,25\text{m}^3$.

Figura 15. Dimensiones del contenedor



Fuente: elaboración propia.

Por tanto, al tener veinte grupos de cinco contenedores por edificio, individualmente por color se logrará recolectar 240m^3 .

$$V_{48 \text{ Edificios por grupo de 20 contenedores}} = 48_{\text{Edificios}} \times 20_{\text{Contenedores}} \times 0,25\text{m}^3$$

$$V_{48 \text{ Edificios por grupo de 20 contenedores}} = \mathbf{240\text{m}^3}$$

- Sanitarios públicos: se dispondrá de diez sanitarios portátiles, a los alrededores de cuarenta y ocho edificios, con lo cual se recolectará volumen de orina y heces fecales.

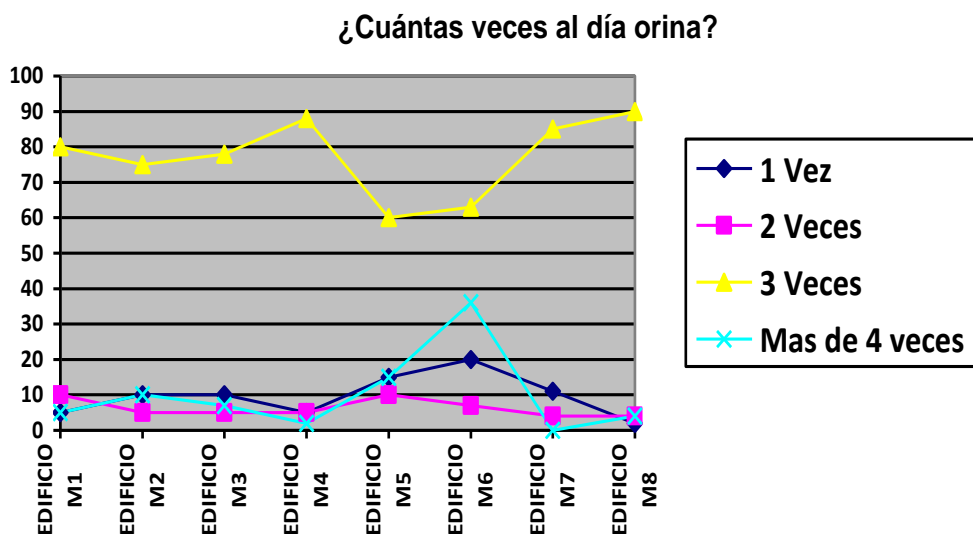
El volumen recolectado depende de la muestra poblacional estudiantil, teniendo como media a 155 000 estudiantes.

$$A_{\text{base cilindro}} = A_{\text{base cono}} = \pi r^2$$

Para obtener un valor más confiable de la cantidad de residuos por recolectar, se realizó una encuesta en cada uno de los edificios, obteniendo diferentes muestras y llegando a un valor interesante de 465m³ al día.

Para obtener ese valor la encuesta arrojó datos interesantes en cada una de las preguntas como se muestra a continuación:

Figura 16. **Pregunta No.7 encuesta en edificios “M”**

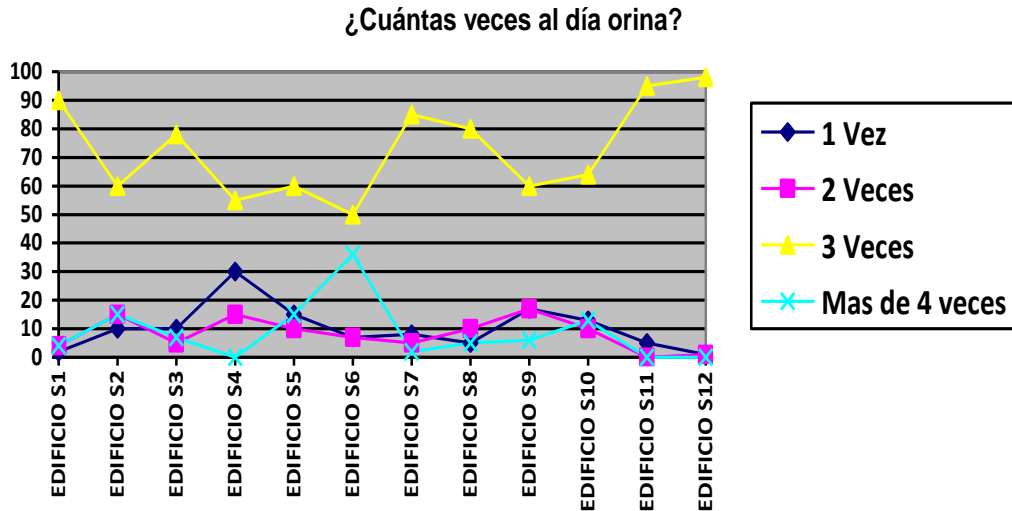


Fuente: elaboración propia.

La pregunta se realizó a una población de 800 personas, tomando muestras de 100 en cada edificio consultado, obteniendo un valor acertado y preciso para la realización del estudio de aprovechar los desechos líquidos.

Los encuestados quedaron satisfechos y entusiasmados por colaborar con el medio ambiente, se les comentó que la orina proporcionada serviría para fabricar energía limpia y sostenible dentro de la universidad.

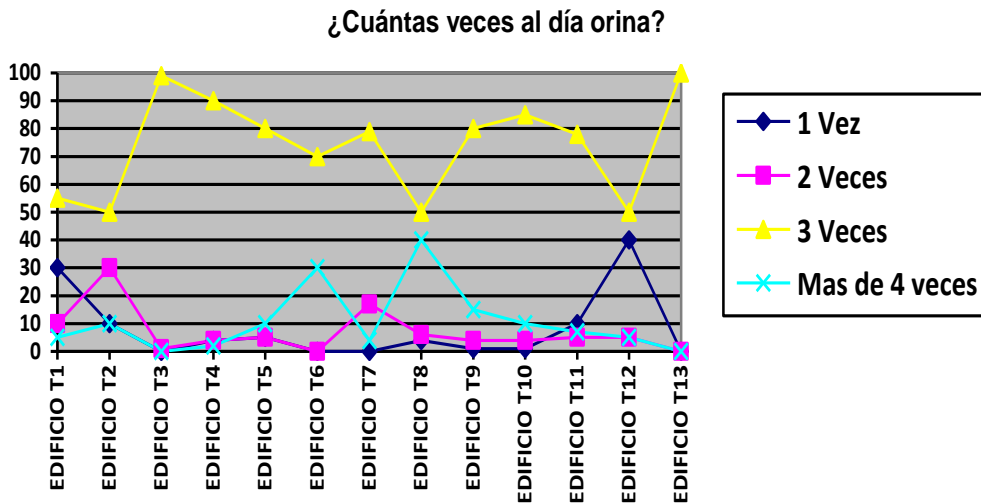
Figura 17. **Pregunta No.7 encuesta en edificios “S”**



Fuente: elaboración propia.

La pregunta se realizó a una población de 1 200 personas, tomando muestras de 100 en cada edificio consultado, obteniendo valores con bastante variación pero acertando una vez más en tres veces la utilización de sanitarios públicos para depositar la orina.

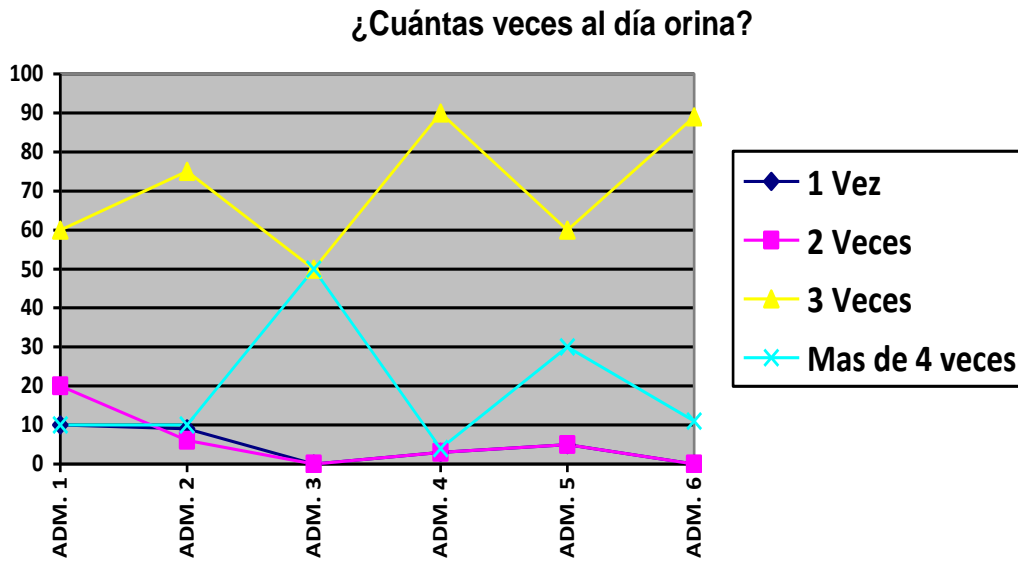
Figura 18. **Pregunta No.7 encuesta en edificios “T”**



Fuente: elaboración propia.

Se consultó a una población de 1 300 personas, tomando muestras de 100 en cada edificio consultado, obteniendo valores con variación y acertando a un uso de tres veces la necesidad de utilizar el sanitario.

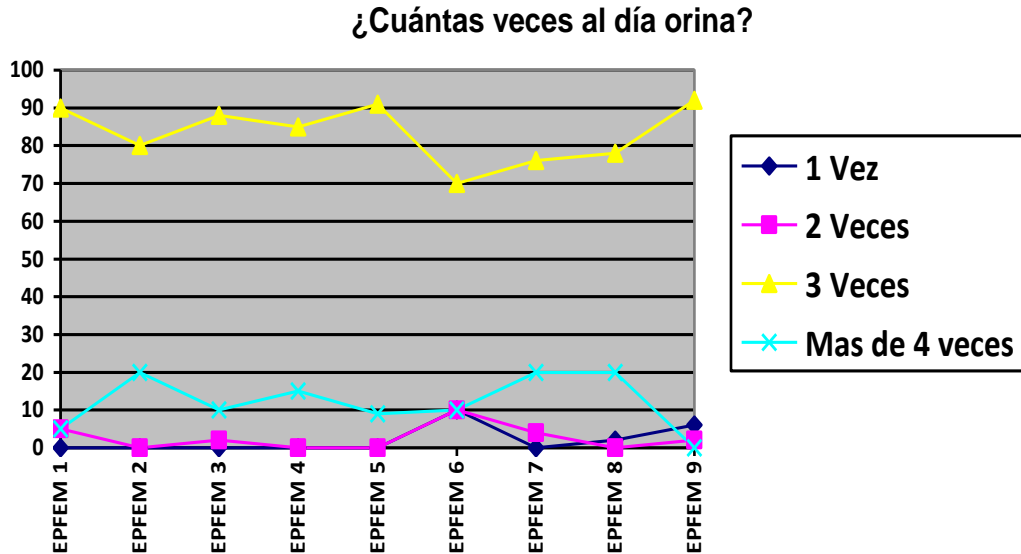
Figura 19. **Pregunta No.7 encuesta en edificios de administración**



Fuente: elaboración propia.

Consulte a una población de 600 personas, tomando muestras de 100 en cada edificio consultado, obteniendo descensos y crecimientos en los datos recolectados, llegando a una conclusión en la necesidad de ir tres veces al baño en este sector.

Figura 20. **Pregunta No.7 encuesta en edificios de EPFEM**



Fuente: elaboración propia.

La grafica muestra a una población de 900 personas, 100 en cada edificio consultado, obteniendo descensos y crecimientos en los datos recolectados.

Con estos datos extraídos a una población consultada de 4 800 personas, se puede observar una tendencia dentro y fuera de los edificios de área técnica, área social humanística, administración y EPFEM, que se sienten identificados en ir tres veces al día, además, no les molestaría utilizar los servicios sanitarios portátiles.

Hablando en términos medios y con el concepto que cada persona es un mundo diferente, se puede anotar que la capacidad máxima de la vejiga urinaria es de unos tres litros y se suele llegar a estos límites en casos de retención aguda de orina. La capacidad cistométrica, que no es ni más ni menos que la cantidad de orina que se retiene de forma consciente sin que se produzca fugas inesperadas, dependerá de la variabilidad individual de cada persona.

La necesidad de orinar normalmente suele ocurrir cuando en la vejiga hay entre 250ml o 350ml de orina, aunque un adulto puede orinar sin tener ganas y con menos de 200ml.

Con estos tres valores de volumen se procede a obtener una media de orina por depositar por un individuo:

$$\bar{V}_{\text{promedio de orina}} = \frac{250\text{ml} + 350\text{ml} + 200\text{ml}}{3}$$

$$\bar{V}_{\text{promedio de orina}} = \mathbf{267\text{ml}}$$

El volumen promedio de orina con la tendencia de las personas a ir al sanitario y una cantidad promedio de estudiantes de 155 000. Se recolectará un volumen al día como se muestra a continuación:

$$267\cancel{\text{ml}} \times \frac{(1\cancel{\text{cm}})^3}{1\cancel{\text{ml}}} \times \frac{(1\text{m})^3}{(100\cancel{\text{cm}})^3} = 267 \times 10^{-6}\text{m}^3$$

$$\bar{V}_{\text{Promedio orina}} = 267 \times 10^{-6}\text{m}^3 \times 3 \frac{\text{veces}}{\text{día}} \times 155\,000 \text{ individuos}$$

$$\bar{V}_{\text{Promedio orina}} = \mathbf{124 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}$$

Adicional, se recolectará en los servicios sanitarios heces fecales, que serán proporcionados por la población promedio antes descrita; se usará 10 baños portátiles por edificio. Ubicando en los 48 edificios, 480 sanitarios portátiles. Una cantidad suficiente para proporcionarle la materia necesaria al biodigestor.

Las preguntas No. 8 y No. 10 están relacionadas entre sí, el objetivo es conocer la media de los entrevistados en cuanto al tema de ir al baño, a defecar, al día.

Adicionalmente, si estarían en la disposición de utilizar estos baños a las afueras de los edificios, dando a conocer que de cada cien personas entrevistadas solo dos estarían dispuestas a depositar sus desechos sólidos.

Un valor global del 2 % para el estudio que no amerita preocupación; se necesita aprovechar este resultado y asumir una media de la población con la cual contamos. El análisis se muestra a continuación:

$$N_{\text{Individuos disponibles}} = 155\,000 \text{ individuos} \times 0,02$$

$$N_{\text{Individuos disponibles}} = \mathbf{3\,100 \text{ individuos}}$$

La cantidad promedio de heces fecales por persona al día es 0,45Kg, y conociendo la densidad promedio; se puede obtener el volumen total por recolectar:

$$\bar{\rho}_{\text{heces fecal}} = 4\rho_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$\bar{\rho}_{\text{heces fecal}} = \frac{m_{\text{heces fecal}}}{\bar{V}_{\text{heces fecal}}}$$

$$\bar{V}_{\text{heces fecal de 1 individuo}} = \frac{m_{\text{heces fecal}}}{\bar{\rho}_{\text{heces fecal}}}$$

$$\bar{V}_{\text{heces fecal de 1 individuo}} = \frac{0,45\text{kg}}{4\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\bar{V}_{\text{heces fecal de 1 individuo}} = \mathbf{112,5 \times 10^{-6} \text{m}^3}$$

$$\bar{V}_{\text{hece fecal de individuos disponibles}} = 3\ 100 \text{ individuos} \times 112,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\bar{V}_{\text{hece fecal de individuos disponibles}} = 0,35 \text{ m}^3$$

Con los cálculos obtenidos realizó un resumen del promedio de materia orgánica que se obtendrá en el campus de la Universidad de San Carlos de Guatemala:

Tabla XXVIII. **Materia orgánica promedio**

Volumen obtenido	m ³
V _{48 Edificios por Grupo de 20 Contenedores}	240
$\bar{V}_{\text{promedio de orina}}$	124
$\bar{V}_{\text{hece fecal de individuos disponibles}}$	0,35
$\bar{V}_{\text{Total materia organica}}$	364,35

Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestra el baño portátil por utilizar:

Figura 21. **Baño portátil**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Interior baño portátil



Fuente: elaboración propia.

La capacidad de cada sanitario portátil será de 450Lts, dividiéndolo en 150Lts ($0,15\text{m}^3$) para la recolección de orina y 300Lts ($0,3\text{m}^3$) en la recepción de heces fecales. Con este volumen obtenido se deberá realizar de tres a cuatro recolecciones diarias.

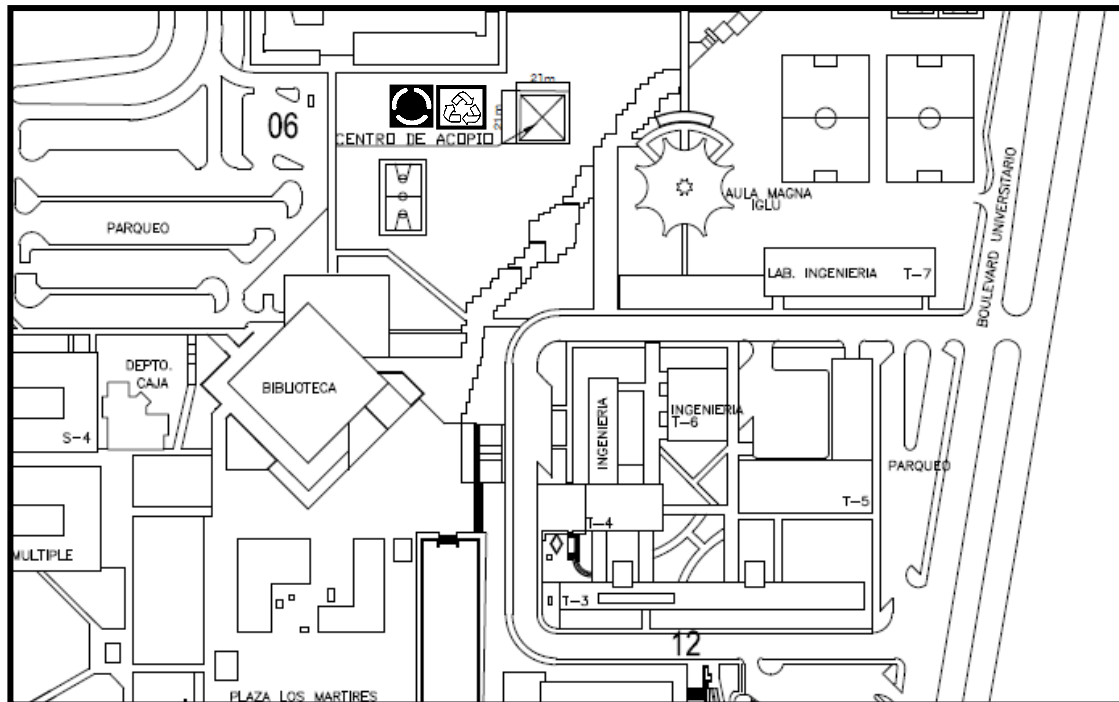
- Centros de acopio: son espacios más o menos amplios organizados en donde se realiza la separación de la materia orgánica e inorgánica. Contribuyen a la educación y concientización en el cuidado del medio ambiente. Generadores de empleo y, sobretodo, proporcionan la satisfacción de que al realizar esto, se está colaborando con el cuidado de los recursos naturales.

El centro de acopio tendrá un área aproximada de 441m^2 , donde se organizará la materia resultante de sanitarios y contenedores públicos.

El volumen total deberá ser de 2 646m³ distribuyéndolo en volumen superior de 1 764m³ y volumen subterráneo de 882m³.

Se ubicará en el volumen superior la materia resultante de los contenedores públicos, en el inferior la materia adquirida por los sanitarios. A continuación se muestra en la figura 23 la ubicación del centro de acopio a un costado del aula magna IGLU.

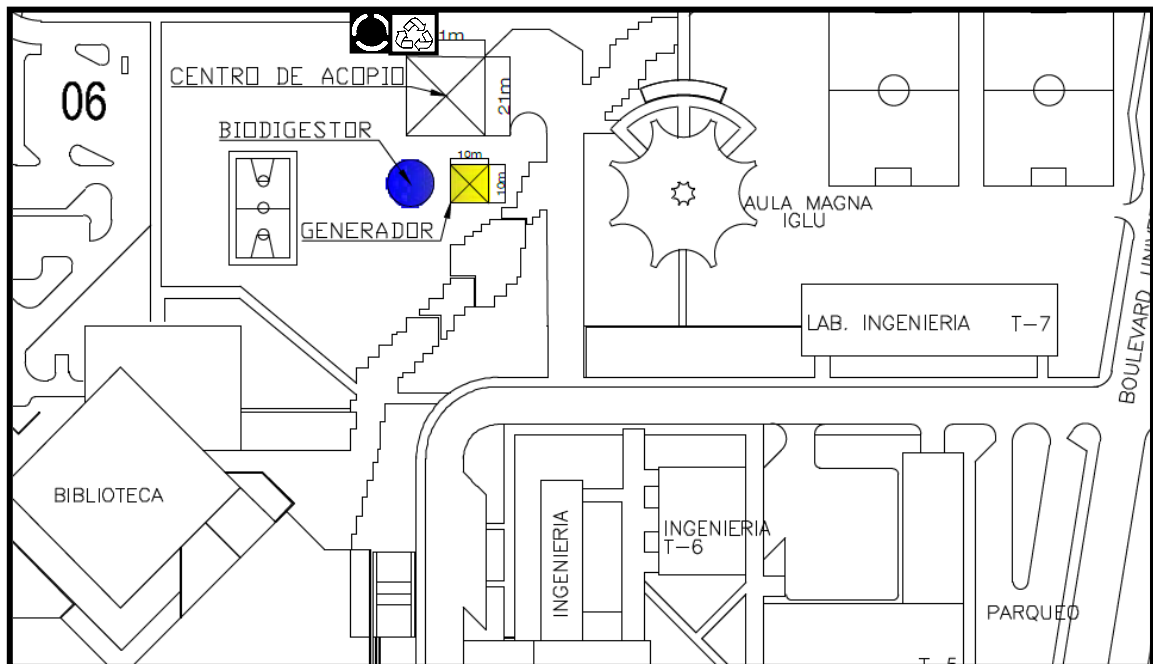
Figura 23. Centro de acopio



Fuente: elaboración propia.

A la par del centro de acopio estará ubicado el biodigestor, una posición cercana donde se almacena, genera, transmite y se distribuye la energía obtenida del proceso de descomposición de la materia orgánica. A continuación se muestra en la figura 24 su ubicación.

Figura 24. Ubicación del biodigestor



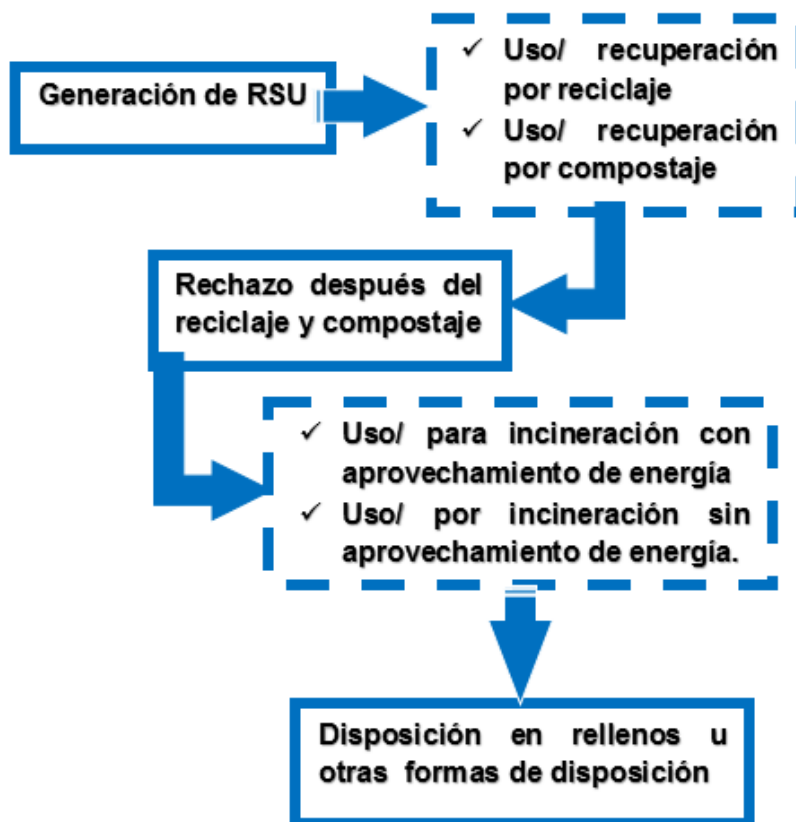
Fuente: elaboración propia.

Recolección institucional: la contribución de educar y promover la separación en origen de los residuos, beneficiará al centro de acopio al obtener la materia recolectada de cada uno de los contenedores en una forma organizada.

Prescindiendo del contenedor de materia orgánica, los demás residuos recolectados se pondrán a la venta con empresas recicladoras reconocidas en Guatemala. Esto ayudará a mantener un ciclo repetitivo de recolección y venta, obteniendo una estabilidad en el proyecto de generación de energía. El ingreso de dichas ventas servirá para pagar salarios de las personas asignadas al proyecto.

Para comprender los métodos y técnicas requeridas para la recolección selectiva de los residuos sólidos urbanos (RSU), se ejemplifica en la figura 25:

Figura 25. Metodología para la recolección selectiva de RSU



Fuente: elaboración propia.

Es por ello la importancia en la separación y recolección selectiva en origen, lo cual permitirá potenciar cualquier política de reciclaje que se encare dentro de la ciudad universitaria, lo que contribuye a mejorar notablemente las condiciones de trabajo de los recuperadores o recicladores, promover prácticas de consumo sustentables en la población, tomar un rol activo en la gestión de los residuos. Transformarse en un sujeto consciente de su aporte al ambiente y al espacio público.

3.1.1. Recolección selectiva de desechos orgánicos

Los desechos y/o residuos orgánicos recolectados selectivamente, se llevarán a lugares de tratamiento para someterlos al compostaje, mediante una serie de biotransformaciones oxidativas, similares a las que ocurren en el suelo. Actuará sobre la materia orgánica mineralizando la fracción por los microorganismos; el resultado final será la obtención de un compuesto parcialmente mineralizado y humificado una vez incorporado al suelo, pudiendo aprovechar en las áreas verdes con las que cuenta actualmente la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La transformación de la fracción orgánica de los desechos sólidos urbanos en compost, es uno de los métodos de reciclaje con mayor validez, el cual, desde un punto de vista agrícola, tiene los distintos usos:

- **Materia orgánica fresca:** es el material reciente antes de iniciar su descomposición; no se le debe llamar compost; su empleo es agrícola, pero sirve como sustrato para el compostaje. Sus formas inorgánicas simples, bien solubles (fosfatos, sulfatos, nitratos) o bien gaseosas (metano y dióxido de carbono).

La fracción que no se mineraliza en esta etapa, a través del proceso que se denominará “humificación”, formara parte de complejas reacciones bioquímicas de resíntesis y polimerización, transformándose y dando lugar, a compuestos nuevos: macromoléculas más o menos policondensadas, que reciben nombres de sustancias húmicas presentando propiedades muy específicas. Esta fracción humificada sufrirá, posteriormente, nuevos procesos de mineralización, generalmente más lentos.

La transformación, provisión continua y equilibrada de elementos nutritivos al medio vivo del suelo (animal y vegetal) está asegurada, cuando se mantienen los niveles de humos acordes con características agroecológicas y manteniendo un suelo vivo y activo, que se encargará de su dinámica, formación, degradación y transformación.

- Compost fresco: es una materia orgánica que ha pasado por una etapa termófila, tiene una descomposición inicial, pero no está estabilizada. Este producto puede ser usado en forma apropiada para mejoras agrícolas, con el objetivo de incrementar la actividad microbológica y mineralización de su materia orgánica.
- Compost: este término es sinónimo de compost maduro. Es un compost más estabilizado que el compost fresco y es totalmente adecuado para usos agrícolas como fertilizante orgánico, aplicándolo a los suelos cuando se inician los cultivos.

- Compost curado: también llamado compost maduro es aquel que ha sido sometido a un largo período de humificación y mineralización.
- Biodigestor: se emplea en la generación de energía eléctrica mediante máquinas que transforman la energía calorífica en energía mecánica, a su vez, es utilizada para accionar el rotor de un generador eléctrico. Las máquinas más utilizadas para la utilización del biogás obtenido, se debe a la turbina de gas, y el motor de combustión interna.

Puede decirse, entonces, que el compost resulta de un proceso biooxidativo controlado, constituido por una materia orgánica estabilizada, que ha sido degradado ocasionando partículas más finas y oscuras, su aplicación al suelo no provocará daños a las plantas y permitirá su almacenamiento sin posteriores tratamientos ni alteraciones, como se explicó los capítulos anteriores.

Para que esta propuesta sea beneficiosa debe considerarse que el principal problema de la recolección selectiva será la cooperación de la población, así como la decisión de las autoridades de la Universidad de San Carlos de Guatemala en solventar estas limitantes.

3.2. Fases de la gestión de residuos sólidos urbanos

La conceptualización de la gestión de los residuos sólidos ha sido ampliamente abordada a nivel nacional e internacional, dejando claro que la gestión requiere acciones desde diferentes ámbitos buscando establecer en los programas planteados como solución, actividades que reduzcan la generación de residuos sólidos, promuevan el reciclaje, aprovechamiento, valorización y reutilización de los residuos y, finalmente, la disposición y/o tratamiento en condiciones ambientalmente viables. Al plantear gráficamente la jerarquización de dicho programa, se establecerá como prioritaria una adecuada gestión de los residuos sólidos, como se muestra en la figura 26:

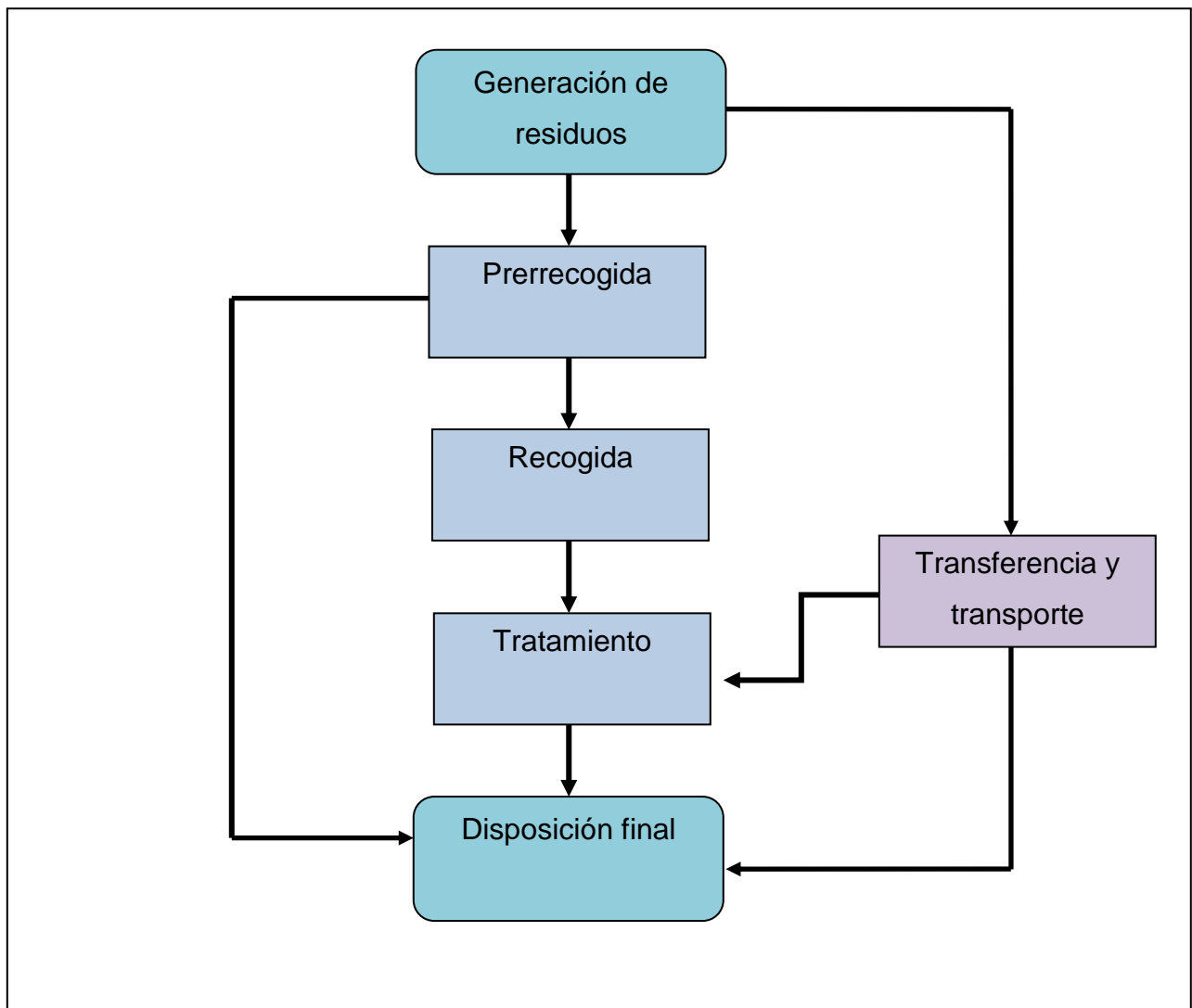
Figura 26. **Jerarquización de la gestión de los residuos sólidos**



Fuente: <http://userscontent2.emaze.com/images/cc67243f-0c70-4d73-af42-3818261191ea/a8078883-9b9b-4ee9-aeb2-2c1b9eb7475a.jpg>. Consulta: diciembre de 2015.

Esta jerarquización muestra las soluciones que debe darse al manejo de los residuos sólidos en la reducción de la generación de los residuos, el reciclaje y reutilización, de tal forma que estas acciones no repercuten en la cantidad de residuos que, finalmente, son dispuestos en un relleno sanitario autorizado, según se muestra en la figura 27:

Figura 27. **Sistema de gestión de RSU**



Fuente: elaboración propia.

Esta figura permite ver las diferentes fases de la gestión de los RSU, que sea necesario y que estén estrechamente relacionadas, en forma secuencial en el programa propuesto para el presente trabajo de tesis.

3.2.1. Prerrecolecta

Serán aquellas actividades de separación, almacenamiento y procesamiento en origen hasta que los residuos son depositados en el punto de recolecta para su recolección. La importancia de esta fase es la generación de fuentes de trabajo, es necesario evaluar más a fondo la integración al programa con una fuerte dosis de equidad social, que permita contrarrestar la vulnerabilidad en la que se encuentra actualmente la población más desposeída.

Es necesario implementar un programa de segregación en origen al considerar dos aspectos importantes: el primero es el aspecto operativo, y el segundo aspecto es de carácter educativo y participativo. La educación ambiental entre la población, tendrá como finalidad sensibilizar y capacitar a la población, de tal forma que con la intervención se pueda realizar la segregación de los residuos en forma adecuada.

Los criterios de selección deben ser los siguientes:

- Representatividad: por tratarse de un programa PILOTO es importante que las áreas seleccionadas tengan características (población, ordenamiento e infraestructura) que representen una idea novedosa promovida por nuestra Facultad de Ingeniería al beneficio de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Organización de la población estudiantil: la organización de la población en la separación de los RSU, el compromiso y trabajo del estudiante, reflejará la disposición y nivel de participación, los cuales serán elementos decisivos para el éxito del programa piloto.
- Cercanía de la infraestructura: este tema es de mayor relevancia pues a nivel de plan piloto, se pretende que los costos de transporte de la recolección selectiva sean mínimos a fin de obtener el máximo de utilidades por la venta del material recuperado. Es tarea de la Universidad de San Carlos de Guatemala, a través de la contratación de personal de servicio para recolectar los residuos depositados en los diferentes contenedores y baños portátiles. A continuación en el tema de recogida, se presenta el ingreso preliminar por venta de material reciclable.

3.2.2. Recogida

La fase de recogida y transporte es la de mayor inversión y planificación, en la cual se puede ver claramente la responsabilidad de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En donde el material recuperado en los contenedores y baños portátiles por el personal a cargo, se introducirán a un mercado, que abastecerá de materias primas a la industria.

Se necesitará la utilización de seis camiones de reciclaje que estarán identificados con los siguientes colores: azul, amarillo, verde, blanco, café y crema. Recolectarán la materia en cada contenedor colocado a los alrededores del campus central. Además de dos picops especiales con bomba incluida, para la extracción de orina y heces fecales en los sanitarios portátiles dispuestos en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 28. **Modelo del camión de reciclaje**



Fuente: www.fadu.edu.uy/viaje2015/files/2016/08/RSU-03-580x313.jpg. Consulta: enero de 2016.

Figura 29. **Modelo de picop especial**



Fuente: www.satelliteindustries.com/images/products/trucks/MAL-1300-1350/MAL1300_driversside.jpg. Consulta: enero de 2016.

A continuación en cuatro tablas de Excel se muestran los resultados de recolección en cada contenedor: materia recolectada primaria, ingreso promedio del material, ingreso total en cada región así como su total.

Este ingreso económico promedio deja un informe de la cantidad económica que se pierde, al no realizar un reciclaje adecuado de la materia que se deposita en contenedores tradicionales ubicados a los alrededores de la ciudad universitaria. Además, el proceso de biodigestión que se propone aprovecha la materia orgánica desperdiciada y la convierte en energía aprovechable.

Tabla XXIX. Ingreso preliminar contenedor azul

Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería		Tesisista: Smile Rigoberto Barillas de León								
Presupuesto preliminar RSU.										
Asesor: Ing. Jorge Gilberto González Padilla.										
INGRESO MONETARIO PRELIMINAR POR VENTA DE MATERIA RECYCLABLE										
Proyecto: Diseño de un prototipo bioenergético, empleando residuos sólidos orgánicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala.										
Asesores: Ing. Jorge Gilberto González Padilla. Ing. Alberto Arango Steckavizza.										
No.	DESCRIPCIÓN DE MATERIA A RECICLAR	CONTENEDOR		MATERIA RECOLECTADA		INGRESO MATERIAL		INGRESO TOTAL DEL REGIÓN		
		COLOR	NÚMERO DE EDIFICIOS	CONTENEDOR POR EDIFICIO	MATERIA RECOLECTADA POR CONTENEDOR	UNIDAD	PROMEDIO		UNITARIO SUB-TOTAL	
1	EDIFICIO: M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8.	AZUL	8	20	0,25	m ³	40	m ³	Q. 48,00	Q. 1 920,00
2	EDIFICIO: S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12.	AZUL	12	20	0,25	m ³	60	m ³	Q. 48,00	Q. 2 880,00
3	EDIFICIO: T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13.	AZUL	13	20	0,25	m ³	65	m ³	Q. 48,00	Q. 3 120,00
4	EDIFICIO: ADM1, ADM2, ADM3, ADM4, ADM5, ADM6.	AZUL	6	20	0,25	m ³	30	m ³	Q. 48,00	Q. 1 440,00
5	EDIFICIO: EPFEM1, EPFEM2, EPFEM3, EPFEM4, EPFEM5, EPFEM6, EPFEM7, EPFEM8, EPFEM9.	AZUL	9	20	0,25	m ³	45	m ³	Q. 48,00	Q. 2 160,00
									TOTAL	Q. 11 520,00

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la tabla la cantidad de PET recolectado en los contenedores azules en los diferentes edificios M, S, T, ADM y EPFEM. Se obtiene un ingreso promedio al día en condiciones óptimas de Q. 11 520,00

Tabla XXX. Ingreso preliminar contenedor amarillo

Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería		Tesisista: Smile Rigoberto Barillas de León						
Presupuesto preliminar RSU. Asesor: Ing. Jorge Gilberto González Padilla.								
INGRESO MONETARIO PRELIMINAR POR VENTA DE MATERIA RECOLECTABLE								
Proyecto: Diseño de un prototipo bioenergético, empleando residuos sólidos orgánicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala.								
No.	DESCRIPCIÓN DE MATERIA A RECICLAR	CONTENEDOR		MATERIA RECOLECTADA		INGRESO MATERIAL PROMEDIO		INGRESO TOTAL DEL REGIÓN
		NÚMERO DE EDIFICIOS	CONTENEDOR POR EDIFICIO	MATERIA RECOLECTADA POR CONTENEDOR	CANTIDAD UNIDAD	UNIDAD	UNITARIO SUB-TOTAL	
1.	EDIFICIO: M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8.							Q. 4 800,00
1.1	DEPÓSITO DE PAPEL BOND, PERIÓDICOS Y CARTÓN.	AMARILLO	8	20	0,25	m ³	40	Q. 120,00
2	EDIFICIO: S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12.							Q. 7 200,00
2.1	DEPÓSITO DE PAPEL BOND, PERIÓDICOS Y CARTÓN.	AMARILLO	12	20	0,25	m ³	60	Q. 120,00
3	EDIFICIO: T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13.							Q. 7 800,00
3.1	DEPÓSITO DE PAPEL BOND, PERIÓDICOS Y CARTÓN.	AMARILLO	13	20	0,25	m ³	65	Q. 120,00
4	EDIFICIO: ADM1, ADM2, ADM3, ADM4, ADM5, ADM6.							Q. 3 600,00
4.1	DEPÓSITO DE PAPEL BOND, PERIÓDICOS Y CARTÓN.	AMARILLO	6	20	0,25	m ³	30	Q. 120,00
5	EDIFICIO: EPFEM1, EPFEM2, EPFEM3, EPFEM4, EPFEM5, EPFEM6, EPFEM7, EPFEM8, EPFEM9.							Q. 5 400,00
5.1	DEPÓSITO DE PAPEL BOND, PERIÓDICOS Y CARTÓN.	AMARILLO	9	20	0,25	m ³	45	Q. 120,00
								TOTAL
								Q. 28 800,00

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la tabla la cantidad de papel bond, periódicos y cartón recolectado en los contenedores amarillos en los diferentes edificios M, S, T, ADM y EPFEM. Obteniendo un ingreso promedio al día en condiciones óptimas de Q. 28 800,00

Tabla XXXI. Ingreso preliminar contenedor blanco

No.	DESCRIPCIÓN DE MATERIA A RECICLAR	CONTENEDOR		MATERIA RECOLECTADA		INGRESO MATERIAL		INGRESO TOTAL DEL REGIÓN
		COLOR	NÚMERO DE EDIFICIOS	POR EDIFICIO	POR CONTENEDOR	PROMEDIO	UNIDAD	
1	EDIFICIO: M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8.		8	20	0.125	m ³	20	Q. 1 800,00
1.1	VIDRIO BLANCO	BLANCO	8	20	0.125	m ³	20	Q. 50,00
1.2	VIDRIO DE COLOR	BLANCO	8	20	0.125	m ³	20	Q. 40,00
2	EDIFICIO: S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12.		12	20	0.125	m ³	30	Q. 2 700,00
2.1	VIDRIO BLANCO	BLANCO	12	20	0.125	m ³	30	Q. 50,00
2.2	VIDRIO DE COLOR	BLANCO	12	20	0.125	m ³	30	Q. 40,00
3	EDIFICIO: T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13.		13	20	0.125	m ³	32.5	Q. 2 925,00
3.1	VIDRIO BLANCO	BLANCO	13	20	0.125	m ³	32.5	Q. 50,00
3.2	VIDRIO DE COLOR	BLANCO	13	20	0.125	m ³	32.5	Q. 40,00
4	EDIFICIO: ADM1, ADM2, ADM3, ADM4, ADM5, ADM6.		6	20	0.125	m ³	15	Q. 1 350,00
4.1	VIDRIO BLANCO	BLANCO	6	20	0.125	m ³	15	Q. 50,00
4.2	VIDRIO DE COLOR	BLANCO	6	20	0.125	m ³	15	Q. 40,00
5	EDIFICIO: EPFEM1, EPFEM2, EPFEM3, EPFEM4, EPFEM5, EPFEM6, EPFEM7, EPFEM8, EPFEM9.		9	20	0.125	m ³	22.5	Q. 2 025,00
5.1	VIDRIO BLANCO	BLANCO	9	20	0.125	m ³	22.5	Q. 50,00
5.2	VIDRIO DE COLOR	BLANCO	9	20	0.125	m ³	22.5	Q. 40,00
							VIDRIO BLANCO	Q. 6 000,00
							VIDRIO DE COLOR	Q. 4 800,00
							TOTAL	Q. 10 800,00

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la tabla la cantidad de vidrio blanco y vidrio de color recolectado en los contenedores blancos en los diferentes edificios M, S, T, ADM y EPFEM. Obteniendo un ingreso promedio al día en condiciones óptimas de Q. 10 800,00

Tabla XXXII. Ingreso preliminar contenedor café

No.	DESCRIPCIÓN DE MATERIA A RECIKLAR	CONTENEDOR			MATERIA RECOLECTADA		INGRESO MATERIAL			INGRESO TOTAL DEL REGIÓN
		COLOR	NÚMERO DE EDIFICIOS	CON TENEDOR POR EDIFICIO	MATERIA RECOLECTADA POR CONTENEDOR	UNIDAD	PROMEDIO CANTIDAD	UNIDAD	PROMEDIO UNITARIO	
1	EDIFICIO: M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8.									
1.1	METAL EN GENERAL	CAFÉ	8	20	0.125	m ³	20	m ³	Q. 120,00	Q. 2 400,00
1.2	LATAS DE ALUMINIO	CAFÉ	8	20	0.125	m ³	20	m ³	Q. 94,80	Q. 1 896,00
2	EDIFICIO: S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12.									
2.1	METAL EN GENERAL	CAFÉ	12	20	0.125	m ³	30	m ³	Q. 120,00	Q. 3 600,00
2.2	LATAS DE ALUMINIO	CAFÉ	12	20	0.125	m ³	30	m ³	Q. 94,80	Q. 2 844,00
3	EDIFICIO: T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13.									
3.1	METAL EN GENERAL	CAFÉ	13	20	0.125	m ³	32,5	m ³	Q. 120,00	Q. 3 900,00
3.2	LATAS DE ALUMINIO	CAFÉ	13	20	0.125	m ³	32,5	m ³	Q. 94,80	Q. 3 081,00
4	EDIFICIO: ADM1, ADM2, ADM3, ADM4, ADM5, ADM6.									
4.1	METAL EN GENERAL	CAFÉ	6	20	0.125	m ³	15	m ³	Q. 120,00	Q. 1 800,00
4.2	LATAS DE ALUMINIO	CAFÉ	6	20	0.125	m ³	15	m ³	Q. 94,80	Q. 1 422,00
5	EDIFICIO: EPFEM1, EPFEM2, EPFEM3, EPFEM4, EPFEM5, EPFEM6, EPFEM7, EPFEM8, EPFEM9.									
5.1	METAL EN GENERAL	CAFÉ	9	20	0.125	m ³	22,5	m ³	Q. 120,00	Q. 2 700,00
5.2	LATAS DE ALUMINIO	CAFÉ	9	20	0.125	m ³	22,5	m ³	Q. 94,80	Q. 2 133,00
Q. 4 296,00										
Q. 6 444,00										
Q. 6 981,00										
Q. 3 222,00										
Q. 4 833,00										
Q. 25 776,00										

METAL EN GENERAL	Q. 14 400,00
LATAS DE ALUMINIO	Q. 11 376,00
TOTAL	Q. 25 776,00



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería

Tesis: Smite Rigoberto Barillas de León

Asesor: Ing. Jorge Gilberto González Padilla. Ing. Alberto Arango Sietkavizza. Asesores: Ing. Jorge Gilberto González Padilla. Ing. Alberto Arango Sietkavizza.

Proyecto: Diseño de un prototipo bioenergético, empleando residuos sólidos orgánicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Presupuesto preliminar: RSU.

Asesor: Ing. Jorge Gilberto González Padilla.

INGRESO MONETARIO PRELIMINAR POR VENTA DE MATERIA RECIKLABLE

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la tabla la cantidad de metal en general y latas de aluminio recolectado en los contenedores cafés en los edificios M, S, T, ADM y EPFEM. Se obtiene un ingreso al día de Q. 25 776,00

3.2.3. Tratamiento

Es la etapa que comprende los procesos de separación, procesado y transformación de los residuos, es necesario contar con instalaciones de recuperación de materiales, donde los residuos llegan en masa o separados en el origen, debiendo pasar por los siguientes procesos:

- Separación de voluminosos (vidrio, papel/cartón, entre otros)
- Separación manual de los residuos sólidos
- Separación mecánica de los desechos sólidos
- Empaquetado del material para disposición final

Con el objetivo de obtener productos destinados al mercado de subproductos y otra de rechazo destinado al vertido o tratamiento térmico.

3.2.4. Disposición final

El destino final de los residuos o rechazos de los residuos recolectados selectivamente (tanto orgánicos como inorgánicos), depende del método de tratamiento por utilizar.

Entre los cuales se considera:

- Vertido controlado o relleno sanitario: consiste en el enterramiento ordenado y sistemático de los residuos sólidos, utilizando el confinamiento en el menor volumen posible y cubriéndolos con una capa de tierra al concluir las operaciones diarias. Por otro lado, el relleno sanitario constituye la alternativa a vertederos incontrolados y a botaderos de cielo abierto.

La degradación de la materia orgánica genera biogás, o gas de vertedero, que contiene alrededor de 50 % de metano. La instalación de un relleno sanitario puede causar rechazo por las personas, por consiguiente, es importante efectuar campañas de información pública y medidas compensadoras. Para minimizar los impactos negativos en la salud y seguridad, se puede realizar un plan para prevención de riesgos relacionado al manejo de residuos sólidos.

- Incineración: es una forma de tratamiento, donde la disponibilidad de grandes áreas para rellenos sanitarios es muy poca. Es un método para reducir volúmenes y puede ser proyectada con y sin recuperación de energía. Tiene un impacto adverso, la contaminación atmosférica representada por la generación de gases y cenizas de la combustión, esto incluye emisiones de dioxinas y furanos, que afectan la salud humana. Para este inconveniente los sistemas deben ser bien operados, y los efluentes gaseosos controlados con filtros electrostáticos y lavadores de gases. Además, se deberá cumplir con las normas de emisión vigentes.
- Producción de compost: imitar el proceso de fermentación que ocurre normalmente en el suelo de un bosque, de forma acelerada y dirigida. Es importante que la materia orgánica no llegue contaminada con sustancias ajenas, por lo tanto, la separación desde su generación en los contenedores será fundamental.

- Reciclaje: la recuperación de materia reciclable para volverlos a incorporar como materia prima a las industrias, dará parte del capital necesario para sostener el proyecto. Será un componente clave en la reducción de desechos, con la identificación adecuada en los contenedores, se reducirá en el centro de acopio su clasificación.
- Reducción en origen: implica reducir la cantidad y/o toxicidad de los residuos que son generados. Puede realizarse a través del diseño, la fabricación y el envasado de productos con el mínimo material tóxico, con un volumen mínimo, o con vida útil más larga. En este proyecto se cuenta con el diseño de los contenedores orgánicos e inorgánicos, como también la propuesta de baños portátiles, que recolectarán la materia desde su origen y al cerrar el ciclo se logrará la reducción y estabilidad de la materia mal organizada en la Universidad.
- Vertido incontrolado: o vertido en tiraderos es la solución para muchos países, consiste simplemente en abandonar la basura en lugares dispersos o sin acondicionar previamente. Esta disposición, es la que se pretende erradicar dentro de la universidad. Al organizar los residuos sólidos desde la fuente de origen se obtiene: el material se dirija correctamente hacia el centro de acopio, organizar la materia reciclable de una forma eficiente y aprovecharla para su venta, generación de energía por el proceso de biodigestión de la materia orgánica recolectada, entre otras.

- Otras técnicas de tratamiento de residuos: esterilización y pirólisis, combustión controlada alimentada por oxígeno, análoga a la llevada a cabo para obtención de carbón por combustión de madera. Si se efectúa se recuperan gases y otros materiales en estado líquido. Se lleva a cabo en un horno en cuyo fondo hay carbón caliente, mientras los compuestos volátiles deberán ir en la parte superior. En este proceso no se debe crear llamas, pues provocaría combustión de los gases emitidos, pero debe existir una temperatura adecuada para la fundición de metales y cristales. Los materiales fundidos son retirados a un depósito de agua.

Este proceso es elevado, al introducir los residuos en el horno deben ser desmenuzados, clasificados, etc., aparte del gasto energético que conlleva la combustión.

Debido a este alto costo esta técnica se podría realizar a medida que el proyecto estabilice sus ingresos económicos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que al realizar una combinación de técnicas puede ser la alternativa ideal para el manejo de los residuos sólidos a un futuro del proyecto.

3.3. Reutilización y reciclaje de desechos

Aprovechar los RSU, contribuye a establecer un modelo, en donde se espera el uso eficiente y equitativo de los bienes naturales al utilizar este programa para concienciar a la población para una adecuada planificación de programas de reciclaje, es necesario el uso de la metodología de las 4 erres (reducir, reutilizar, recuperar y reciclar), con el objetivo de un adecuado tratamiento de residuos sólidos que van dirigidos a la implantación de actuaciones para reducir los residuos generados, recuperación de los residuos, aquellas fracciones valorizables y eliminar de forma respetuosa con el medio ambiente la fracción no aprovechable, según se muestra en la tabla XXXIII:

Tabla XXXIII. Metodología de las 4 erres

4 erres	Descripción
<p>Reducir</p> 	<p>Evitar la producción de residuos y su nocividad, lo que requiere un cambio radical en las pautas de producción y consumo.</p>
<p>Reutilizar</p> 	<p>Al reparar las cosas rotas o creando nuevas formas de usar los objetos, que ya no se usan. El objetivo es reutilizar todo lo que se pueda, así se alarga la vida de los productos y se contribuye a disminuir la cantidad de residuos.</p>
<p>Recuperar</p> 	<p>Recuperar, mediante el tratamiento térmico de los residuos, esto debido a la energía contenida en los mismos. Con este aprovechamiento energético se ahorrará energía proveniente de otras fuentes y se reduce en un 90 % el volumen total de RSU, eliminando el gran impacto visual y ambiental de los vertederos.</p>
<p>Reciclar</p> 	<p>Recolectar y separar los materiales reciclables, como aquellos materiales contenidos en los residuos que pueden ser utilizados como materia prima para la industria, agricultura y otros usos.</p>

Fuente: <http://image.slidesharecdn.com/diapositivas4r-150820060639-lva1-app6892/95/diapositivas-4-r-7-638.jpg?cb=1440050846>. Consulta: febrero de 2016.

El logro que puede obtenerse ante estas acciones, se traduce en ahorro de energía, materia prima, agua y combustibles, prolongar la vida útil de los rellenos sanitarios, disminuir la contaminación del medio ambiente, así como la utilización de recursos naturales para la elaboración de nuevos productos. Con ello se incrementan los centros de acopio de residuos reciclables con la separación y la posibilidad de producir compost como mejorador de suelos para jardines o cultivos, evitando la destrucción de paisajes que aun se conserva en la ciudad universitaria. Inclusive, logra la minimización de la generación de los residuos sólidos y la máxima valoración posible de materiales y subproductos obtenidos de los mismos.

3.3.1. Sistematización del reciclaje

Ante los problemas ambientales derivados de la falta de un programa para el manejo adecuado de los RSU, es necesario establecer un sistema que contribuya a que todas las decisiones acerca de la recolección, el procesamiento y la comercialización de los reciclables esté interrelacionada, para beneficio de la sociedad estudiantil, y al mismo tiempo compartir las experiencias de dicho programa con personas externas a la Universidad, con la finalidad de buscar mejoras a los sistemas, y visualizar posibles alianzas de trabajo para que este proyecto dé los beneficios esperados.

Asegurar el éxito de este proyecto de reciclaje deberá desarrollarse de manera coordinada. En primer lugar, debe decidirse qué materiales van a reciclarse. Esta decisión se basa en el análisis del volumen de material generado, en las posibilidades de su manejo, en las demandas del mercado y en el costo de las operaciones. Una vez elegidos los materiales se prosigue con determinar cómo será recolectado el material, cómo será procesado y las exigencias de espacio demandadas por esas operaciones y el almacenaje.

Por último, en la tabla XXXIV, un proyecto de reciclaje debe diseñarse de tal manera que se cumpla con lo establecido en la legislación vigente sobre el tema:

Tabla XXXIV. **Sistematización del reciclaje**

Pasos	Descripción de la sistematización
Metodología participativa	La propuesta busca realizar un diagnóstico y una estrategia común respecto de la problemática de los RSU, enfocado a la Universidad de San Carlos de Guatemala, en donde se define qué materiales van a reciclarse.
Encuesta	Es necesario conocer las necesidades y costumbres de la sociedad estudiantil, con el fin de levantar datos relacionados con la percepción sobre el sistema de gestión de RSU.
Creación de una fundación(ONG) para el desarrollo de los programas RSU	Será una plataforma de conciencia ambiental no lucrativa, que busca hacer visible los efectos negativos de los residuos sin un adecuado manejo, siendo tarea primordial la concientización del programa, así como la administración de los recursos económicos logrados con la captación del programa 4 erres.
Experiencias de la población beneficiada de la implementación del programa.	Estas actividades tiene la finalidad de que los participantes compartan y visualicen los distintos sistemas de gestión de residuos que pueden implementarse dentro de la ciudad universitaria, y al mismo tiempo los evalúen, en términos de participación, aspectos negativos y positivos y que visualicen las posibles mejoras a estos programas.

Fuente: elaboración propia.

Continuación Tabla XXXIV. Sistematización del reciclaje

Pasos	Descripción de la sistematización
Evaluación del proyecto	Es necesario contar con una evaluación mensual, semestral o anual, en base a los resultados obtenidos y promover programas de capacitación si fuera necesario.
Campaña de difusión y capacitación	Describe el modelo como un enlace entre la Facultad de Ingeniería, y la Universidad de San Carlos, donde se pide a la sociedad estudiantil la participación e inclusión al programa de RSU, de donde la población sepa diferencian los residuos para reutilización y los residuos para la venta a las empresas recicladoras.
Cierre, difusión y sistematización de experiencias	En la etapa final, como parte del proceso de cierre del proyecto se propone la difusión de experiencias y lecciones aprendidas, además, de la preparación del informe final, donde se consolidan las lecciones aprendidas.

Fuente: elaboración propia.

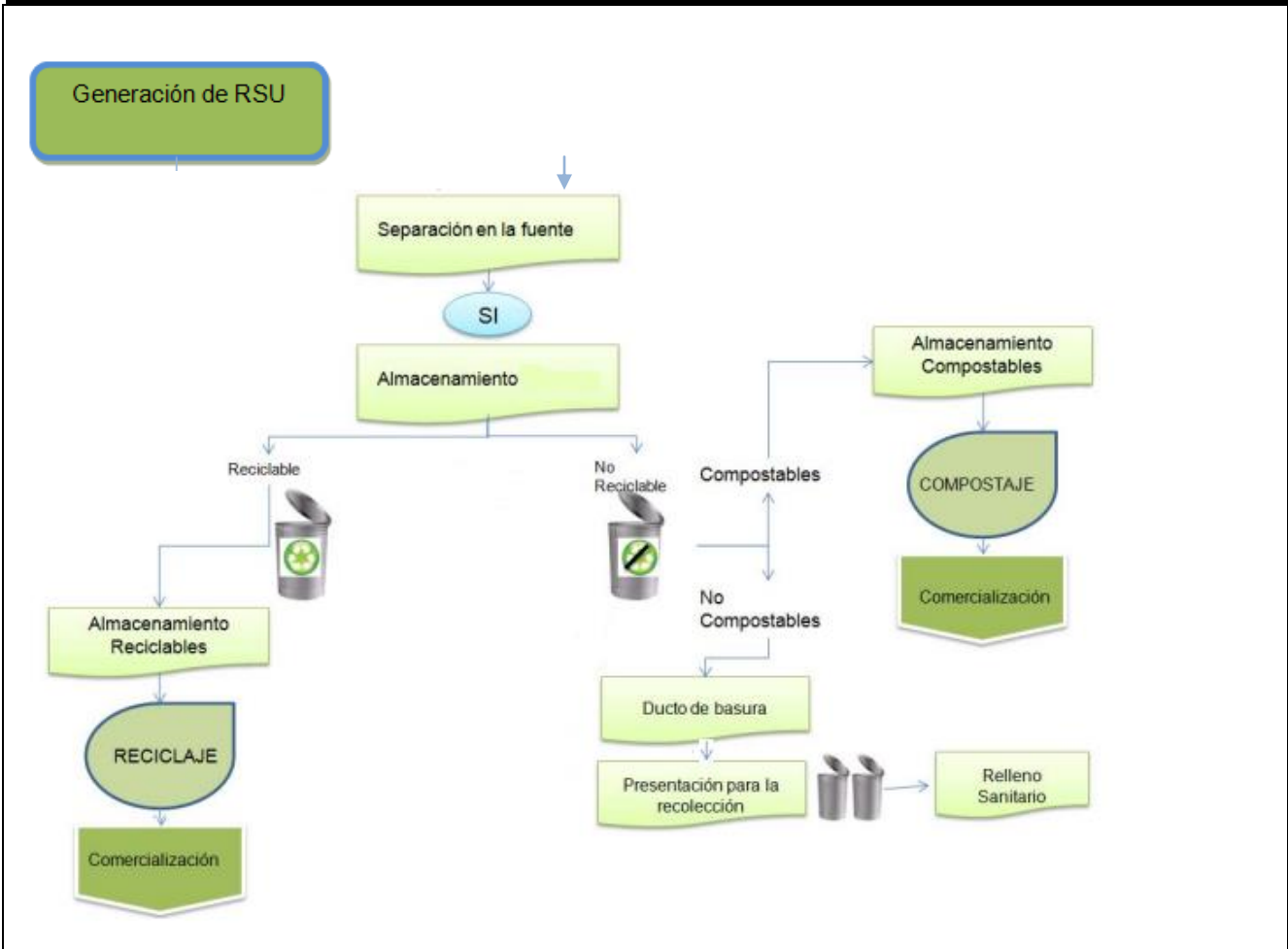
3.3.2. Separación de RSU

Se proponen aspectos que aumenten la eficiencia en la gestión de los residuos sólidos, lo que permite mitigar el impacto ambiental asociado a la mala educación en la gestión de los RSU.

Esta guía busca establecer en forma de diagrama, cómo debe diseñarse el programa para una adecuada separación de los residuos sólidos urbanos, según se muestra en la figura 30:

Figura 30. **Separación RSU**

Proyecto:	Reutilización y reciclaje de desechos	Área	Producción
Método:	Actual	Hoja:	1 de 1
Objeto:	Diagrama de flujo para la separación de RSU		
Fecha Elab.:	Julio 2016		
Elaborado por:	Smile Rigoberto Barillas de León		



Fuente: elaboración propia.

El anterior diagrama pretende que los RSU se orienten a dos tipos de residuos:

- Residuos reciclables o aprovechables: es cualquier material, objeto o elemento sólido que no tiene valor de uso directo o indirecto para quien lo genere, pero que es susceptible de incorporación a un proceso productivo, después de ser desechados y que, a su vez, pueden reincorporarse en la cadena productiva. En esta categoría están: papel, cartón, vidrio, plástico, metal, entre otros.
- Residuos no reciclables o no aprovechables: todo aquel material o sustancia sólida o semisólida de origen orgánico e inorgánico, que se pueda pudrir o no, proveniente de actividades domésticas, que no ofrece ninguna posibilidad de aprovechamiento, reutilización o reincorporación en un proceso productivo.

3.4. Importancia sanitaria de los desechos sólidos

La importancia sanitaria en el manejo de los desechos sólidos como mecanismo en la transmisión de enfermedades no está bien determinada, pero se le atribuye a la incidencia en la transmisión de algunas enfermedades, que actúan por vías directas a la salud, estas son:

- Efectos directos: el contacto ocasional directo con la basura, que contiene excremento humano, de animales y restos de otros agentes que pueden ser fuente de transmisión de enfermedades, de los cuales los recolectores y personas encargadas del servicio de recolección son los mayormente afectados.

- Efectos indirectos: aquellos que están vinculados a la proliferación de vectores de importancia sanitaria y de molestias públicas, como las moscas, las ratas, las cucarachas que encuentran en los residuos sólidos su medio alimenticio y su hábitat, y que transmiten enfermedades como fiebre tifoidea, salmonelosis, disenterías, diarreas, malaria, dengue y rabia, entre otras.
- Efecto en el medio ambiente: los efectos ambientales que se producen sobre el ambiente debido a los desechos sólidos, son el deterioro estético del paisaje natural y de la ciudad y, sobre todo, la contaminación de agua, suelo y aire.
- Efecto de alteración del sistema hídrico: es el efecto más grave en cuanto a la contaminación ambiental, provocado por un inadecuado manejo de los residuos sólidos, ya que afecta las aguas superficiales y subterráneas, por el vertido directo de las basuras a los ríos y quebradas.
- Efecto de alteración del sistema edafológico: se asocia al abandono y la acumulación de desechos sólidos a cielo abierto lo que causa el deterioro estético y la desvalorización del terreno propio, y de las áreas adyacentes. Esto es debido a la contaminación causada por distintas sustancias contenidas en la basura, sin ningún control.
- Efecto de alteración del aire: el impacto negativo que causan los vertederos a cielo abierto, los incendios y el humo que reduce la visibilidad, provoca irritaciones nasales y de la vista, además de incremento de afecciones pulmonares, aunado a las molestias originadas por los malos olores, producción de metano (CH₄), CO₂, NO₂, que son gases de efecto invernadero.

3.5. Manejo integral de los desechos sólidos

En base al Acuerdo Gubernativo No.111-2005 con fecha 04 de abril 2005, se acuerda aprobar la política nacional para el manejo integral de los residuos y desechos sólidos, cuyo objetivo es tener un tratamiento integral en el que se prevenga y reduzca la nocividad, que transforme los modelos actuales de manejo hacia un modelo sostenible, asegurando un sistema de gestión optimizada y adaptada de los residuos urbanos comunes, residuos de manejo especial y residuos peligrosos, al propiciar las acciones de los distintos entes responsables de su manejo.

Dichos programas son las áreas estratégicas de acción de la política nacional que involucra programas con una serie de actividades estratégicas que por su naturaleza en común han sido priorizadas, como se muestra a continuación:

- Programa de fortalecimiento de la institucionalidad: es aquel que persigue la funcionalidad de los entes relevantes que inciden en el manejo integral de los residuos y desechos sólidos.
- Programa de inversiones: de este programa se pretende generar espacios de cooperación pública-privada para el manejo integral de los residuos y desechos sólidos, con el objetivo de lograr un marco de coherencia en las inversiones que se hagan en el país, en el tema de manejo integrado.

- Programa de comunicación y participación social: este programa hace de conocimiento público que Guatemala tiene un problema cultural con el manejo de residuos y desechos sólidos, por lo que considera que este programa toca áreas estratégicas de acción que son complementarias y transversales a los programas de la política pero que es necesario hacerlo visible e identificable como actividades estratégicas.
- Auditoría social: se le considera a la base sobre el cumplimiento ético y social “ontividad”, de hacer factible la auditoría social sobre el cumplimiento de esta política, e inclusive de generar los mecanismos de participación que motiven a la población para hacer suyas las soluciones al manejo integrado de los residuos y desechos sólidos, en consonancia con los principios de participación de la política de descentralización y con la ley de descentralización y el Código Municipal.
- Indicadores para el monitoreo: consta de indicadores básicos de la política de acuerdo con objetivos específicos:
 - En lo político-institucional
 - En lo social
 - En lo económico
 - En lo ambiental y salud
- Responsable: la responsabilidad recae en coordinación de la Comisión Nacional para el Manejo de los Desechos Sólidos (CONADES).

Lo que demuestra a nivel nacional, el hecho de no contar con un programa adecuado para el tratamiento de los desechos sólidos en el país.

3.6. Educación y la concientización ambiental para la gestión de residuos

- **Introducción:** esta propuesta de educación ambiental, consiste en la concientización en la población para desarrollar las buenas prácticas ambientales que va desde los niños hasta los adultos y lo repliquen en cada uno de sus hogares; articulándose a un sistema sostenible.
El enfoque de este proyecto no es solo el reciclaje, sino también la reducción de los residuos sólidos.
- **Objetivo general:** mejorar el nivel de educación ambiental en la gestión de residuos sólidos, con participación de población estudiantil de las diferentes facultades de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- **Objetivos específicos:**
 - Sensibilizar y fortalecer los niveles de conocimiento y participación de la población, en la gestión y manejo de residuos sólidos.
 - Promover la promoción de buenas prácticas para reducir la producción de residuos sólidos dentro de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- **Actividades por realizar**
 1. Diseño, realización y evaluación de módulos de capacitación (talleres), sobre gestión de residuos sólidos y reciclaje dentro de la ciudad universitaria.
 2. Campañas informativas a la comunidad a través de: radio, vídeos, murales, redes sociales, entre otros.

3. Intercambio de experiencias de empresas que incentivan la selección en origen de determinadas fracciones de residuos, entre las demás facultades de la ciudad universitaria, sobre buenas prácticas para la reducción de residuos sólidos.
 4. Concurso de segregación de residuos sólidos entre escuelas de la Facultad de Ingeniería participantes.
 5. Reuniones de monitoreo con participación de voluntarios de la Facultad de Ingeniería, así como los representantes de Asociaciones Estudiantiles.
- Resultados: uso de indicadores que reflejen la captación de residuos sólidos, inclusive el incremento de participantes al proyecto que se han sensibilizado, y que a su vez puedan mejorar su conocimiento y aplican sobre las buenas prácticas en la gestión y manejo de los residuos sólidos.
 - Aliados y patrocinadores

Serán todas aquellas instituciones públicas o privadas, que a través del apoyo económico, tengan participación en los programas de concientización para el uso adecuado del manejo de los residuos sólidos.

En dicha propuesta, cuando la población participa activamente, es necesario reglamentar el sistema de recolección, esto para permitir a las autoridades locales multar a quienes no se suman al programa.

4. PROPUESTA DEL DISEÑO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR

4.1. Parámetros de diseño

Es un sistema anaerobio, se selecciona una capacidad de operación base de 25 TM/día de residuos frescos (as is),³⁰ lo que implica un manejo anual de 9 125 TM/año, captado de diez facultades y ocho escuelas dentro de la Ciudad Universitaria Z.12, lo que destaca de dicha propuesta, es la disminución de emisores de gases efecto invernadero.

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

- El pH: es un parámetro que varía respecto de cada etapa de la digestión, sus valores son un indicativo claro del equilibrio y vitalidad de las bacterias necesarias para la biometanización.
- La temperatura del sustrato: determina la cantidad y el tiempo de producción de metano en el sistema.
- Tiempo de retención: está relacionado con el tipo de sustrato y la temperatura de operación del sistema; define la relación entre el volumen del digestor y la carga diaria de residuos.

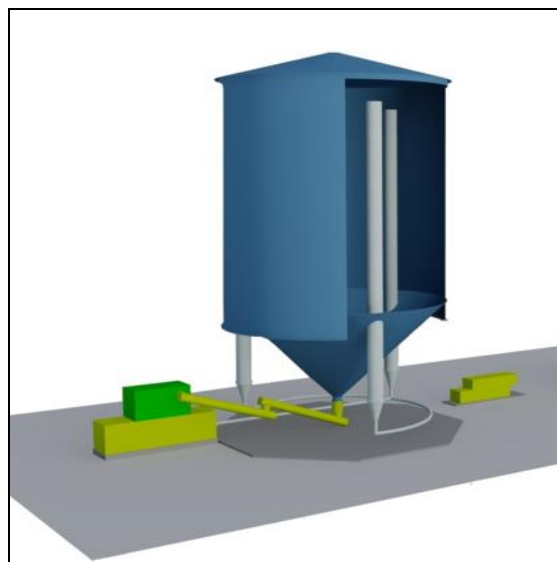
³⁰ (As is)= “Tal como Está”: constituye la primera fase después de haber identificado el alcance del trabajo.

- Velocidad de carga: es la velocidad de carga orgánica sobre la cantidad de biomasa. Debe mantenerse debajo de 0,1 Kg de demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- Tamaño de partícula: esta propiedad implica el tamaño del residuo que ingresa al biodigestor. El objetivo es aumentar la velocidad, para lo cual se debe realizar un pre-tratamiento para disminuir el tamaño de las partículas.

La figura 31 ilustra el biodigestor seleccionado de flujo pistón, conformado por un cilindro en la parte superior unido a un cono en la parte inferior. Las medidas generales para la capacidad de residuos frescos son de 8 metros de diámetro y 21 metros de altura, ubicándolo a un costado de la Facultad de Ingeniería.

A continuación se encuentra el diseño del modelo propuesto:

Figura 31. **Diseño del biodigestor**



Fuente: elaboración propia.

Para el dimensionamiento del tanque se describen los siguientes procesos:

- Dimensionamiento del tanque de digestión

El dimensionamiento del digestor se realiza en base a la cantidad de residuos, humedad, densidad y tiempo de residencia de los mismos dentro del biodigestor.

Tamaño del biodigestor:

$$\text{Volumen del reactor} = \frac{m_{@75\% \text{Ingresada Biodigestor}} \times tr}{\rho_{\text{Global Biodigestor}}} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\text{Volumen del reactor} = \frac{37,2 \frac{\text{TM}}{\text{día}} \times 20 \text{ días}}{1,06 \frac{\text{TM}}{\text{m}^3}} = 702 \text{ [m}^3\text{]}$$

Con estos parámetros, se obtuvo un volumen final de reactor de 702 m³ para el manejo de 25 TM/día, obteniendo las medidas generales que se muestran en la figura 32, para una capacidad máxima en el diseño de 25 TM/día, en la cual se debe construir el digestor propuesto.

Para el tipo de digestor seleccionado, las medidas generales recomendadas para esta capacidad son de 8 m de diámetro y 21 m de altura total.

Lo que representa el valor del volumen total de la masa dentro del reactor en 702 m³.

$$\text{Volumen del reactor} = \text{Volumen del cilindro} + \text{Volumen del cono}$$

$$\text{Volumen del reactor} = A_{\text{base cilindro}} \times h_{\text{cilindro}} + \frac{1}{3} A_{\text{base cono}} \times h_{\text{cono}}$$

$$A_{\text{base cilindro}} = A_{\text{base cono}} = \pi r^2$$

$$702\text{m}^3 = \pi r^2 \times \left(h_{\text{cilindro}} + \frac{1}{3} h_{\text{cono}} \right); \therefore r = 4\text{m y } h_{\text{cono}} = 5\text{m}$$

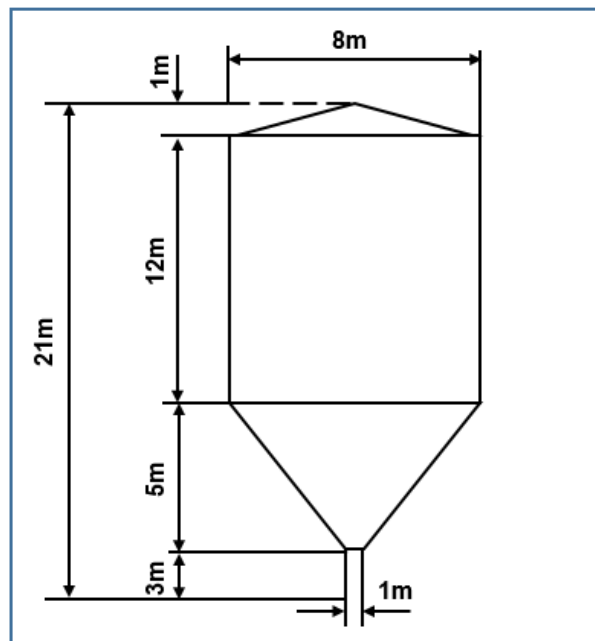
$$h_{\text{cilindro}} = \frac{702\text{m}^3}{\pi \times 4^2} - \frac{1}{3} \times 5\text{m} = \mathbf{12\text{m}}$$

$$\mathbf{\varnothing = 8\text{m}; h_{\text{cono}} = 5\text{m}; h_{\text{cilindro}} = 12\text{m}; h_{\text{cámara de biogás}} = 1\text{m}; h_{\text{a nivel del suelo}} = 3\text{m}}$$

Para efectos de diseño, se considerará una altura de 1 metro de forma cónica formando la cámara de biogás con una presión manométrica máxima de 17,24KPa, para el cilindro, se considerará añadir 1 metro más para dejar un pequeño margen por encima del sustrato.

Por debajo del tanque se debe dejar una altura de tres metros, por lo tanto las medidas generales del proyecto serían las mostradas en siguiente figura:

Figura 32. **Medidas generales del biodigestor (metros)**



Fuente: elaboración propia.

- Tiempo de vaciado del tanque de biodigestión:

Al calcular el tiempo de vaciado del tanque es necesario aplicar la siguiente ecuación:

$$m_{T \text{ ing}}^{31} = m_{\text{ fresca}} + m_{\text{ recirculada}} - m_{\text{ sale}} \quad \therefore \quad m_{\text{ sale}} = m_{\text{ fresca}}$$

$$m_{T \text{ ing}} = 223,02 \text{ [t/d]}$$

$$VT \text{ ing}^{32} = \frac{223,02}{1,06} = 210,40 \text{ [m}^3 \text{ /d]}$$

$$\#días = \frac{Vbd}{VTing}$$

$$\#días = \frac{702 \text{ m}^3}{210,40} = 3,34 \text{ [d]}$$

Estimando un tiempo aproximado de tres días y ocho horas. Esto significa que una porción dada de masa, separa una sexta parte y se mezcla con una sexta parte fresca. De esta manera se estiman seis ciclos de recirculación donde la masa se habrá renovado completamente en veinte días.

- Dimensionamiento de la unidad de dosificación

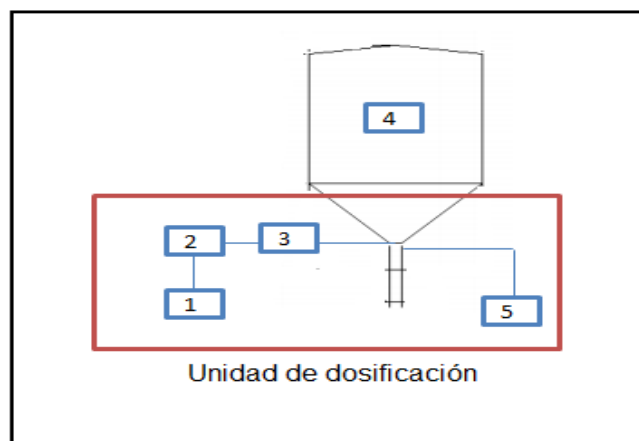
La unidad de dosificación y homogenización está compuesto de: el tanque de calentamiento de agua, de premezclado, de homogenización y de efluentes del sistema como se observa en la figura 33.

³¹ $m_{T \text{ ing}}$ = Masa total ingresada al tanque.

³² $VT \text{ ing}$ = Densidad global dentro del biodigestor.

Estos tanques, por ser de paso, deben tener un volumen suficiente para almacenar brevemente la masa durante el proceso continuo de homogenización. Se estima un tiempo fijo de dos horas de operación continua. El dimensionamiento de los componentes del sistema se muestra en la siguiente tabla XXXV.

Figura 33. **Sistema de tanque dosificador**



1. Tanque de agua pretratamiento; 2. Tanque de pretratamiento; 3. Tanque de homogenización;
4. Tanque de digestión; 5. Tanque de efluente o biofertilizante

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. Dimensión del tanques para el sistema de dosificación

	Almacenamiento de agua (pre-tratamiento)	Pre-tratamiento	Homogenización	Efluente (Bio-fertilizante)
Masa total (TM/días)	96	149	1,041 ³³	149
Densidad (TM/m ³)	1	1,06	1,06	1,06
Caudal de llenado (m ³ /h)	4	6	41	6
Tiempo de almacenamiento (hrs)	2	2	2	3
Volumen del tanque (m ³)	8	11,70	81,6	17,50
Volumen del diseño (m ³)	10	15	100	20
Altura (metros)	1,50	2	3,5	2
Diámetro (metros)	3	3	6	3,50

Fuente: elaboración propia.

- Tipo de crecimiento celular

El crecimiento celular consta de dos tipos: disperso y suspendido que se caracterizan por ser gránulos que se mantienen suspendidos en el reactor y soporte adherido que se caracterizan por bacterias que se adhieren a un soporte inerte para favorecer su desarrollo.

A continuación se resumen los principales parámetros y sus valores máximos permitidos dentro del biodigestor como se observa en la tabla XXXVI.

³³ Esta masa representa la suma entre la masa fresca 75 % y el recirculado que es 6 veces esa cantidad. 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.

API 650=Norma Estándar del Instituto Americano de Petróleo; Se definen como tanques, cilíndricos verticales, sobre tierra, no refrigerados de tope abierto o cerrado, para presiones internas aproximadamente iguales a la presión atmosférica.

Tabla XXXVI. **Parámetros y condiciones del Sistema de Digestión Anaerobia**

Parámetros	Rango permisible
Temperatura (°K)	323,15 a 343,15
pH	6,6 a 7,6
Ácidos volátiles (mg/l)	50 a 150
Alcalinidad (mg/l)	≥ 1 500
Relación C/N [carbono/nitrógeno]	15/1 – 45/1
Relación C/P [carbono/fósforo]	150/1
Potencial de óxido-reducción (mV)	-500
Sólidos totales y volátiles	4-10 %(h) y 30-35 %(s)
CH ₄ [Biogás compuesto del 55 % de Metano aprox.]	50-70 % (h) y 55 % (s)
Tiempo de retención (días)	20(h) y 16-20(s)
Producción de biogás (m ³ biogás/m ³ de reactor)	1,5-2,5 (h) y 5 a 8(s)
Ácidos volátiles (ppm)	≥ 3 600

Fuente: elaboración propia.

Para cubrir la concentración de la materia orgánica susceptible a ser oxidadas se requiere de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO),³⁴ en el proceso anaerobio, el cual debe considerar un parámetro conservativo, esto es que la suma de la concentración de la materia orgánica susceptible por medios químicos (DQO)³⁵ a la entrada debe ser igual al DQO de los efluentes.

³⁴ DBO: mide la materia prima susceptible a ser oxidada por medio biológicos. Se usa para medir el grado de contaminación de la muestra.

³⁵ DQO: mide principalmente la concentración de la materia orgánica susceptible a ser oxidada por medios químicos.

Los compuestos que tiene por efecto frenar o impedir las reacciones químicas provocadas por los inhibidores dentro del proceso son: metales pesados, antibióticos, detergentes, disolventes y pesticidas; estos se pueden encontrar en los RSU (Residuos Sólidos Urbanos). Sin embargo, se puede controlar sus concentraciones. En las desviaciones o grandes fluctuaciones de los parámetros normales se rompe el equilibrio entre las bacterias y pueden inhibir el proceso.

A continuación la tabla XXXVII muestra las concentraciones de inhibición y de toxicidad de los metales pesados en digestión anaerobia:

Tabla XXXVII. Inhibición y toxicidad de los metales pesados en el proceso de 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: elaboración propia.

4.1.1. Volumen requerido del biodigestor

Para los residuos sólidos orgánicos se tomaron en cuenta los residuos de comida encontrados en la Facultad de Ingeniería, donde se observó dentro de los desechos sólidos: papel, madera, cuero, plásticos y goma de chicle, como se muestra en la tabla XXXVIII:

Tabla XXXVIII. **Parámetros de diseño del biodigestor**

Parámetro	Dimensión
Cantidad de residuos (TM/día)	25
Eficiencia de recolección (η_r) (%)	90
Fracción orgánica (FO) (%)	59
Humedad estimada en residuos (Her) (%)	30
Humedad necesaria para biodigestión (Hnb) (%)	75
Tiempo de resistencia (tr) (días)	20
Densidad de masa fresca ($\rho_{mfresca}$) (TM/m ³)	1,20

Fuente: elaboración propia.

Lo que indica que los ácidos volátiles también son inhibidores de la digestión cuando se encuentran en cantidades mayores de 3 600ppm, lo que representa una grave concentración de sales minerales, oxígeno disuelto, nitrógeno y amoníaco alta, haciendo que estos elementos destruyan las bacterias metanogénicas.

- Cantidad de desechos orgánicos necesarios

$$\text{cantidad de residuos sólidos orgánicos necesarios (rson)} = \text{Desecho Total} \left[\frac{\text{TM}}{\text{día}} \right] \times \frac{\% \text{ FO}}{100 \%} \times \frac{\% \eta_r}{100 \%}$$

$$\text{cantidad de residuos sólidos orgánicos necesarios (rson)} = 25 \frac{\text{TM}}{\text{día}} \times \frac{59 \%}{100 \%} \times \frac{90 \%}{100 \%} = 13,28 \frac{\text{TM}}{\text{día}}$$

- Determinación de la porción seca de los residuos

$$\begin{aligned} \text{cantidad de residuos} \\ \text{sólidos orgánicos secos} &= r_{\text{son}} \left[\frac{\text{TM}}{\text{día}} \right] \times \left[1 - \frac{\% \text{ Her}}{100 \%} \right] \\ (\text{rsos}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{cantidad de residuos} \\ \text{sólidos orgánicos secos} &= 13,28 \frac{\text{TM}}{\text{día}} \times \left[1 - \frac{30 \%}{100 \%} \right] = 9,30 \frac{\text{TM}}{\text{día}} \\ (\text{rsos}) \end{aligned}$$

- Estableciendo la masa total fresca que ingresa al biodigestor (75 % MC rson) se tiene:

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

$$m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{fresca@30 \%}} = m_{\text{T}}$$

$$m_{\text{T@75\% Ingres a Biodigestor}} = \frac{r_{\text{sos}}}{1 - \frac{\% \text{ Hnb}}{100 \%}} = \frac{9,30 \frac{\text{TM}}{\text{día}}}{1 - \frac{75 \%}{100 \%}} = 37,2 \frac{\text{TM}}{\text{día}}$$

$$m_{\text{T@75\% añadida}} = m_{\text{T@75\% Ingres a Biodigestor}} - r_{\text{son}}$$

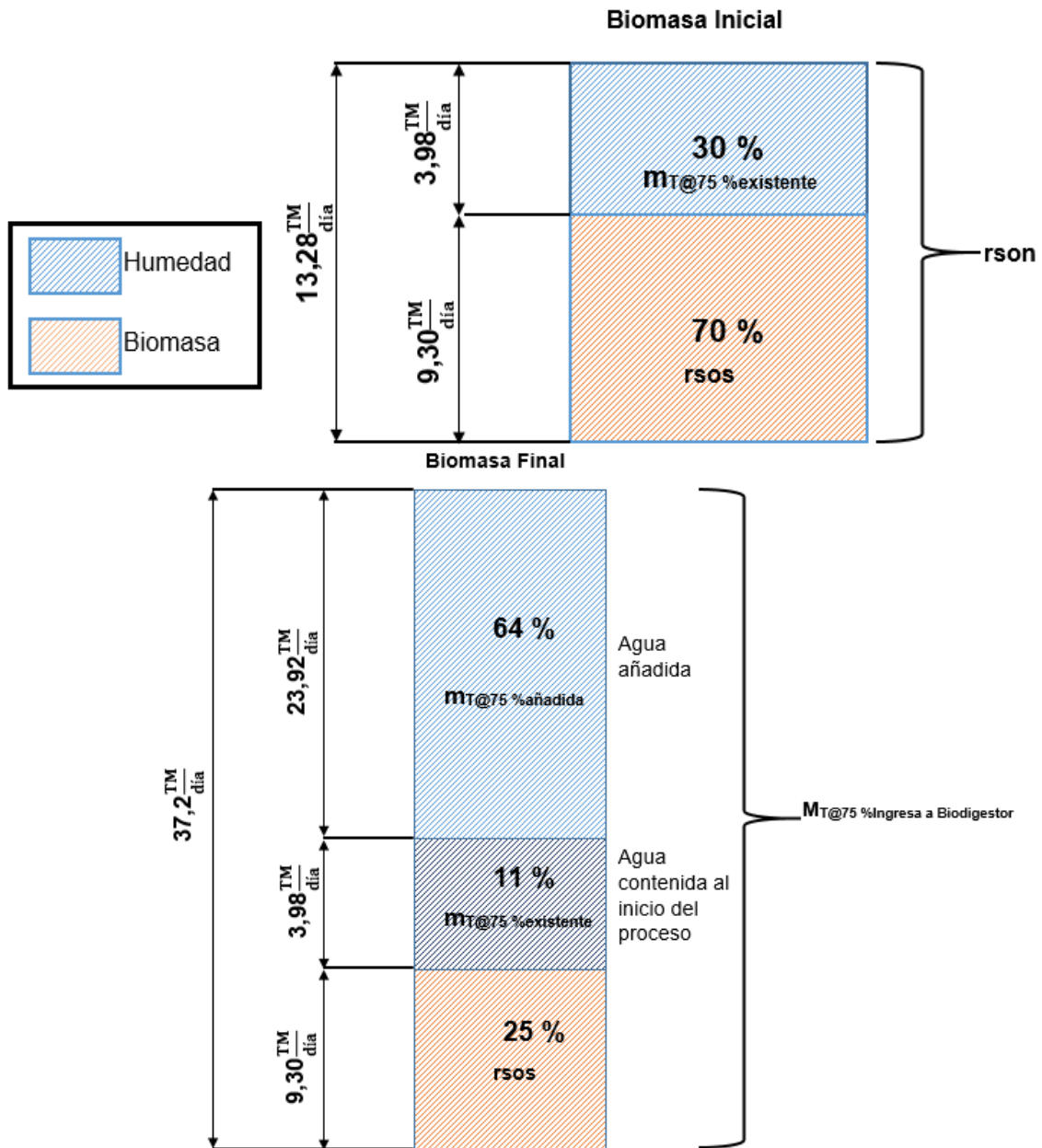
$$m_{\text{T@75\% añadida}} = 37,2 \frac{\text{TM}}{\text{día}} - 13,28 \frac{\text{TM}}{\text{día}} = 23,92 \frac{\text{TM}}{\text{día}}$$

$$m_{\text{T@75\% existente}} = r_{\text{son}} - r_{\text{sos}}$$

$$m_{\text{T@75\% existente}} = 13,28 \frac{\text{TM}}{\text{día}} - 9,30 \frac{\text{TM}}{\text{día}} = 3,98 \frac{\text{TM}}{\text{día}}$$

La diferencia entre la biomasa inicial y la biomasa que ingresa al digester se muestra en la figura 34.

Figura 34. Comparación entre biomasa inicial y la requerida en el biodigestor



Fuente: elaboración propia.

- Estableciendo la densidad global dentro del biodigestor, se tiene:

$$V_{T@día} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} + \frac{m_{fresca}}{\rho_{mfresca}} = \frac{m_{T@75\%añadida}}{\rho_{H_2O}} + \frac{r_{son}}{\rho_{mfresca}} \left[\frac{m^3}{día} \right]$$

$$V_{T@día} = \frac{23,92 \frac{TM}{día}}{1 \frac{TM}{m^3}} + \frac{13,28 \frac{TM}{día}}{1,2 \frac{TM}{m^3}} = 35 \left[\frac{m^3}{día} \right]$$

$$\rho_{Global \text{ Biodigestor}} = \frac{m_{@75\%Ingresada \text{ Biodigestor}}}{V_{T@día}} \left[\frac{TM}{m^3} \right]$$

$$\rho_{Global \text{ Biodigestor}} = \frac{37,2 \frac{TM}{día}}{35 \frac{m^3}{día}} = 1,06 \left[\frac{TM}{m^3} \right]$$

- Tamaño del biodigestor

$$\text{Volumen del reactor} = \frac{m_{@75\%Ingresada \text{ Biodigestor}} \times tr}{\rho_{Global \text{ Biodigestor}}} [m^3]$$

$$\text{Volumen del reactor} = \frac{37,2 \frac{TM}{día} \times 20 \text{ días}}{1,06 \frac{TM}{m^3}} = 702 [m^3]$$

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

- Producción de biogás

Para establecer la cantidad de energía del biogás, se necesita medir o predecir la cantidad de metano que contiene dicho biogás, para ello se vale de la digestión, por ser este 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 de cantidad de metano (CH₄), dependiendo de la calidad de los residuos.

Esto significa que la digestión genera una interconversión de energía, tomándola del sustrato y pasándosela a los productos de la digestión (biogás y efluente). Para el presente estudio la producción de biogás se analiza en condiciones normales (150 m³/TM) a 288,15 °K y a 100 000Pa, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Producción de biogás} = \text{Biogás condición normal} \times r_{\text{son}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Producción de biogás} = 150 \frac{\text{m}^3}{\text{TM}} \times 13,28 \frac{\text{TM}}{\text{día}} = 1\ 992 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right]$$

- La producción de metano (CH₄):

$$\text{Producción de metano (CH}_4\text{)} = \text{Producción de biogás} \times \frac{60\ \% \text{ de CH}_4}{100\ \%} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de CH}_4 \right]$$

$$\text{Producción de metano (CH}_4\text{)} = 1\ 992 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{60\ \% \text{ de CH}_4}{100\ \%} = 1\ 195,2 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de CH}_4$$

- En términos de TOE (tonelada equivalente de petróleo):

$$1\ 195,2 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de CH}_4 \times \frac{1 \text{ TOE}}{1\ 172 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4} = 1,02 \frac{\text{TOE}}{\text{día}}$$

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

$$1\ 195,2 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de CH}_4 \times \frac{10 \text{ kWh}}{1 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4} = 11\ 952 \frac{\text{KWh}}{\text{día}}$$

Lo que indica una tasa de extracción de biogás:

$$\text{Producción de biogás} = 1\ 992 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hrs}} = 83 \frac{\text{m}^3}{\text{hrs}}$$

4.1.2. Sustrato

Es el medio alimenticio por medio del cual se desarrolla vida dentro del biodigestor, siendo la temperatura del sustrato, la que 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 277,15 °K a 278,15 °K y máxima de 343,15 °K.

Dentro de este rango, la digestión se divide en psicrófila (278,15 °K a 293,15 °K), mesofílica (293,15 °K a 313,15 °K) y termofílica (323,15 °K a 343,15 °K), lo que indica, que mientras mayor sea la temperatura, mayor es la velocidad de crecimiento bacteriano.

La importancia del control de la temperatura es mantener un ambiente adecuado para el correcto desarrollo de las bacterias, cuyo objetivo es la destrucción de patógenos, eliminación de larvas y huevos de insectos, lo que aporta higienización del sustrato.

Para conseguir la estabilidad biológica del proceso en el interior del biodigestor, es necesario que exista una igualdad entre la producción y el consumo de ácido graso volátil (AGV) en las fases de hidrólisis y acidificación y metanogénesis, respectivamente.

Si la producción de AGV es mayor que el consumo, estos se irán acumulando y el sistema fallará. Las concentraciones de AGV superiores a 6g/L inhiben su subsecuente conversión al biogás; En la parte baja está conectada con la zona denominada: zona de sumersión, es aquí, donde el sustrato se mantiene bajo el líquido del reactor, con el objeto de conseguir una rápida descomposición de la materia orgánica.

Una mayor dilución de los AGV generados y evitar la flotación de sólidos y la consiguiente formación de costra, luego se mezclará a los residuos triturados y posteriormente al material recirculado para que la mezcla que pasa por medio de tubería, donde es enviada al digestor; en esta zona, el techo del reactor está en contacto con el lodo.

La siguiente zona, la de captura de biogás, tiene una serie de tuberías colocadas en el centro de fluctuación del lodo, y que tienen como objetivo romper la costra que se haya podido generar en la interface líquido-gas. En la última zona del reactor es la de descarga, que está compuesta por una “chimenea”, con el objetivo de acceder al interior del biodigestor y vaciarlo cuando corresponda.

4.1.3. Condiciones de operación

El tanque está diseñado y desarrollado para optimizar los parámetros de la digestión estática, espontánea y continua por vía seca, cuyo proceso descompone y genera el biogás de forma controlada y eficiente, mediante un proceso continuo en un periodo de 2 a 3 semanas. El biodigestor propuesto en el presente trabajo de tesis, es de tipo vertical lo que provoca que no posea partes mecánicas móviles, es capaz de manejar grandes concentraciones de sólidos, incluso mayores al 40 %.

La capacidad de depuración y las condiciones de operación se desarrollan en un rango termofílico. El control y estabilidad del sistema es complicada debido a que las bacterias se desarrollan en un medio donde es sensible a pequeños cambios que pudieran existir en el medio circundante.

Las condiciones de trabajo y los requerimientos de manipulación, deben contar con las siguientes etapas, estas son:

- Recolección y selección de residuos sólidos. Es el tratamiento de la parte orgánica de los residuos.
- Pretratamiento de la FORSU (fracción orgánica de residuos sólidos urbanos). Es la fracción orgánica se debe reducir a un tamaño menor o igual a 40 mm, de los residuos sólidos universitarios, siendo 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.
- Mezclado. Los residuos se mezclan con una gran cantidad de residuo digerido proveniente del digestor. La relación de mezcla se estima alrededor de 1 tonelada métrica (TM) de material alimentado entre 6 a 8 TM de residuo digerido. A esta mezcla es necesario añadir una cantidad de calor para llegar a la temperatura termofílica para obtener un rango mayor de 343,15 °K. Todo este proceso se realiza en una unidad de dosificación y mezclado la cual se complementa una bomba de alimentación.
- Bombeo del sustrato al digestor. En este proceso la mezcla precalentada de los residuos orgánicos frescos y digeridos, se bombea directamente hacia la parte superior del biodigestor por medio de tubos de alimentación.

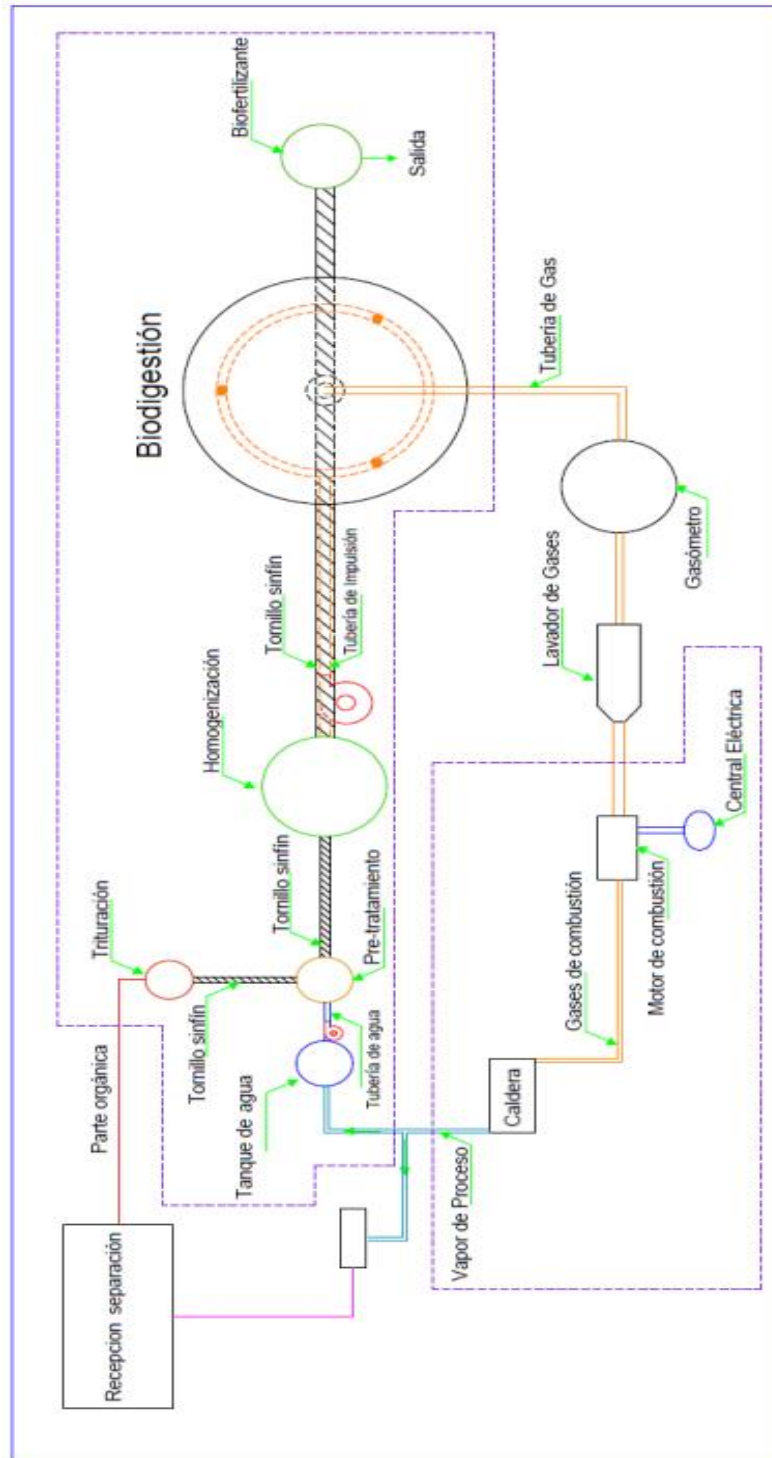
Estos tubos ingresan por el fondo del biodigestor y alcanzan una altura de 1 metro por debajo del techo interior del biodigestor. Los tubos de alimentación se construirán con un diámetro que reduzca las pérdidas por fricción y por ende el consumo de energía.

- Producción de biogás en biodigestor. Una vez ingresada la mezcla por la parte superior del digestor, con un tiempo estimado de 3 a 4 días (dependiendo de la tasa de alimentación) para descender por gravedad hacia el fondo del digestor. El biodigestor debe estar aislado térmicamente para evitar pérdidas de calor. De esta manera se evita incorporar el calentamiento en el cuerpo del biodigestor, lo que provoca que el equipo de agitación no se utilice, manteniendo de esa manera la identidad cronológica de cada porción de material en su paso vertical por el biodigestor, lo que provoca que el biogás sea extraído por medio de una tubería conectada en la parte superior del biodigestor.
- 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 al tratamiento de compost. Lo que hace que una parte de este material se aplica como inóculo³⁶ cuyo objetivo es mejorar el proceso de digestión.

Todo este proceso se estima en un tiempo de retención de 20 días, según se muestra en la figura 35.

³⁶ Inóculo: es la cantidad o número de gérmenes infectantes que son introducidos accidental o voluntariamente en los tejidos vivos o en medios de cultivos especiales.

Figura 35. Componente del sistema



Fuente: elaboración propia.

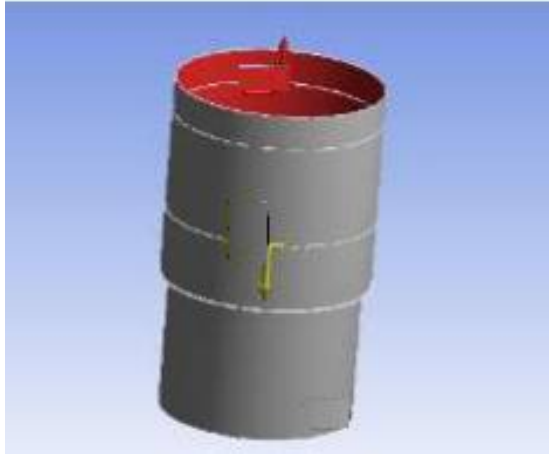
4.1.4. Geometría

El biodigestor está diseñado para una temperatura de operación de 328,15 °K, esta temperatura no debe cambiar debido a la supervivencia de las bacterias anaerobias, debiendo ser necesario colocar una doble pared de aislante térmico de poliuretano con una capa exterior de plancha de zinc de aproximadamente 2 mm, el objetivo es, mantener dentro de estas paredes la circulación del vapor que caliente el líquido almacenado.

El tipo de digestor seleccionado es de flujo pistón,³⁷ y está conformado por un cilindro en la parte superior unido a un cono en la parte inferior. El tanque de digestión es un silo de almacenamiento, con una base y un techo de forma cónica y el cuerpo en forma de cilindro. El tanque está construido por tres anillos circulares de diferente espesor. El primer anillo es con tres hileras de planchas de espesor de 15 mm; el segundo anillo por cinco hileras de espesor de 10 mm y el tercer anillo por 5 hileras de plancha con un espesor de 6 mm. El tamaño de las planchas debe ser de 2 440 mm de largo y 1 220 mm de ancho, según se muestra en la siguiente figura 36.

³⁷ Flujo de pistón: o tapón, implica la circulación de la mezcla reaccionante por un tubo con perfil radial plano de velocidad, temperatura y composición. Se alcanza a valores muy bajos de número de Reynolds, esto sucede cuando excede el esfuerzo de cedencia verdadero, el flujo comienza en la forma de un tapón sólido.

Figura 36. **Diseño del tanque de biodigestión**



Fuente: elaboración propia.

Debido al tipo de reacción química que se lleva a cabo dentro del tanque, la inestabilidad del proceso con respecto a la presencia de impurezas y la variación del pH durante el proceso, son características limitantes a tomar en cuenta al momento de seleccionar el tipo de material con que será construido.

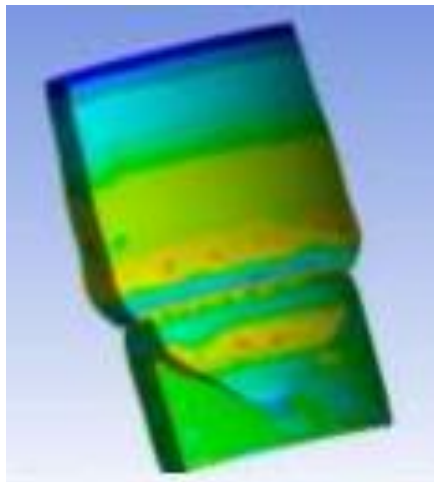
La base que sostiene al tanque está conformada por plancha de acero estructural de las mismas medidas y con un espesor de 15 mm. El techo es de forma cónica de tipo flotante externo con un ángulo de coronación de 50,8 mm x 50,8 mm x 6,35 mm y en la parte superior debe colocársele una válvula de salida por seguridad.

El biogás por ser inflamable, 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.

4.1.5. Espesor del estanque

- Tanque de almacenamiento de agua caliente. Está diseñado con planchas de acero de 5 mm de espesor, unido al techo por medio de un ángulo de 50,8 mm x 50,8 mm x 4,76 mm.; cuenta con una deformación total de 1,1 mm y que se ubica en la parte inferior del tanque, el cual debe realizar un esfuerzo máximo de Von Misses³⁸ (MPa), de $1,69 \times 10^2$ MPa, para el almacenamiento de agua caliente.
- Esfuerzo máximo. El esfuerzo equivalente de Von-Misses. 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, como se muestra a continuación en la figura 37:

Figura 37. Esfuerzo máximo de MPa corte transversal del tanque

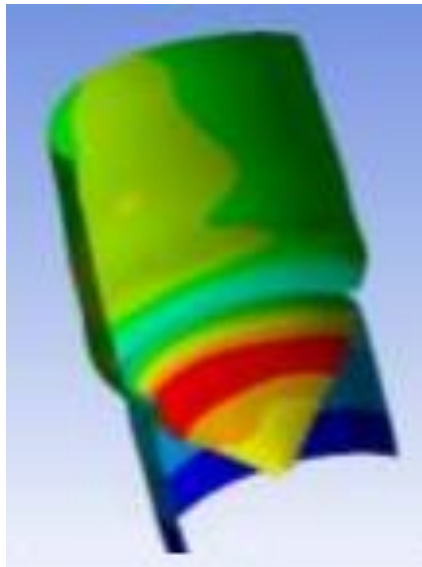


Fuente: elaboración propia.

³⁸ Von Misses (MPa): esfuerzo equivalente o efectivo que permite sustituir esfuerzos combinados multiaxiales de tensión y cortante por un único esfuerzo de tensión pura.

- Deformación total. Se puede observar que la deformación máxima se da en la base del cono al estimarse un valor máximo de 8 mm según se muestra en la siguiente figura 38:

Figura 38. **Deformación total del tanque de biodigestión**



Fuente: elaboración propia.

- Tanque de pretratamiento. Está diseñado con planchas de acero 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°, como se muestra en la figura 39:

Figura 39. Forma de tanque de pretratamiento



Fuente: elaboración propia.

- Tanques para el sistema de dosificación. Está diseñado para temperaturas que oscilan de entre 333.15 °K y 343.15 °K, esto significa, que a los tanques debe añadirse una capa de aislante, o espuma de poliuretano y sellarse con una chapa de zinc.

4.1.6. Espesor de diseño

Los tanques de acero seleccionados de manera definitiva están conformados por el tanque de agua caliente, tanque de pretratamiento y el tanque de biofertilizante; mientras que el tanque de homogenización y el tanque de biodigestión debe ser de acero inoxidable, pero debe evaluarse en base al costo y la oportunidad de encontrar los materiales en el mercado.

El sistema de almacenamiento y limpieza del biogás a través de diseño del gasómetro, es una de las partes claves del sistema de generación eléctrica.

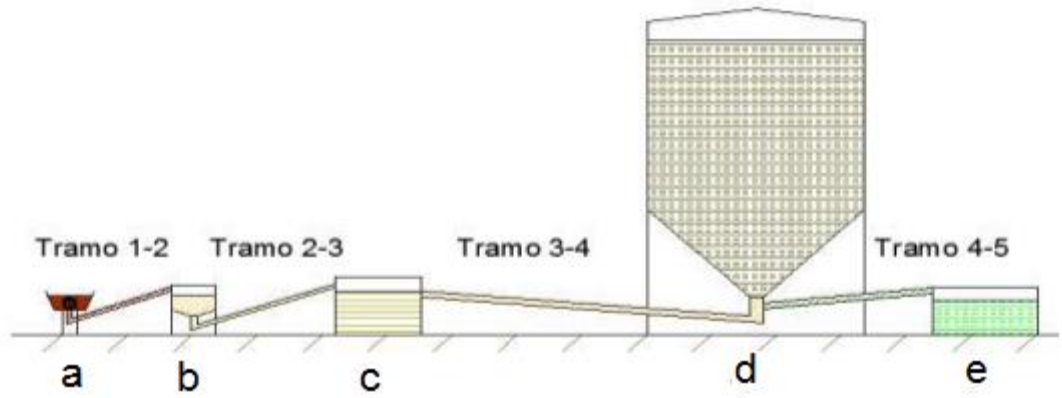
Las partes del sistema de tratamiento de biogás y las especificaciones del gasómetro, posee los siguientes componentes:

- Gasómetro para acumulación de biogás: consta del biogás de baja presión procedente del digester que es almacenado en un gasómetro de doble membrana. Este equipo es utilizado para garantizar un flujo de gas constante desde el digester hasta el equipo que será empleado para el aprovechamiento energético, lo que garantiza el suministro, lo que evitan los cambios bruscos, ya sea depresiones o picos en la producción de biogás.
- Sistema de filtrado de biogás: este dispositivo es un recipiente relleno con virutas de hierro, el cual forma un filtro poroso por donde circula el gas que reacciona con el metal depositándose así su contenido de ácido sulfhídrico (H₂S).

El H_2S , en condiciones normales de presión y temperatura, se encuentra en estado gaseoso, a una presión de vapor de 2026 kPa, es comúnmente empleado por su sencillez, por el que se hace pasar el biogás. Está constituida por un recipiente lleno con material de hierro finamente dividido formando un lecho poroso a través del cual debe circular el gas para que reaccione con el metal y se deposite en el lecho. En este recipiente se produce una reacción del H_2S con el hierro, descomponiéndose en sulfuro férrico (FeS), sustancia no perjudicial. Este material filtrante es susceptible de ser reutilizado permitiendo la oxigenación de este, entonces el sulfuro férrico se oxidaría con el oxígeno y el azufre se libera en su forma más simple. Además de servir como trampa del H_2S , sirve como trampa de llama al evitar el reflujó de la misma hacia el digestor, previniendo explosiones accidentales.

- Sistema de transporte de masa: el transporte de biomasa sólida o semisólida se realiza a través de los tornillos sinfín. Sin embargo, se describen los pasos por seguir para el diseño. La figura 40 muestra cuatro conexiones que se deben realizar por medio de tornillos sinfín, estas son:
 - a) Entre la trituradora y el tanque de pre-tratamiento (Tramo 1-2).
 - b) Entre el tanque de la mezcla pre-tratamiento y el tanque de homogenización. (Tramo 2-3).
 - c) Entre el tanque de digestión y el tanque de homogenización.(Tramo 3-4).
 - d) Entre el tanque de digestión y el tanque de biofertilizante.(Tramo 4-5).

Figura 40. **Proceso de transporte de biomasa**



a.Trituradora; b.Tanque de pretratamiento; c.Tanque de Homogenización; d.Tanque de biodigestión e.Tanque de biofertilizante.

Fuente: elaboración propia.

Para el diseño del tornillo sinfín se especifica los requerimientos del sistema, estos parámetros son: flujo másico y el tipo de material que se transportará en cada una de las conexiones según se muestra en la siguiente tabla XXXIX.

Tabla XXXIX. **Requerimientos para el diseño de tornillo sinfin**

Conexión	Flujo másico transportado	Tipo de masa
Tramo a-b	0,62 kg/s	Residuos orgánicos triturados.
Tramo b-c	1,72 kg/s	Residuos orgánicos a 342,15 °K, con 75 % de humedad.
Tramo c-d	10,33 kg/s	Biodigestor recirculado, 75 % de humedad.
Tramo d-e	1,72 kg/s	Biodigestor efluente 75 % de humedad.

Fuente: elaboración propia.

Los parámetros de diseño se seleccionan de acuerdo con el tipo de material que se transporta y a la geometría de la instalación.

4.1.7. Espesor hídrico

Para el transporte del material desde el tanque homogenizador hasta el biodigestor y entre el tanque de almacenamiento de agua, al tanque de pre-tratamiento, se utilizará un tipo de tubería con el objetivo de determinar la velocidad de flujo, el régimen, las pérdidas, la caída de presión y, por último, la potencia requerida para el funcionamiento del sistema, para el tipo de bombas a utilizar, como se menciona a continuación:

- Selección de tubería y velocidad de flujo: para el transporte de la biomasa triturada al biodigestor se requiere de una tubería en la que no existan problemas de corrosión cuyo objetivo es el de soportar un rango de temperatura superior a 328,15 °K, mientras que en el transporte agua, se debe seleccionar una tubería que pueda soportar temperaturas de entre 343,15 °K y 348,15 °K. Estas tuberías deberán estar correctamente aisladas para evitar pérdidas de energía.

4.2. Diseño del sistema de bombeo

4.2.1. Parámetro de diseño

Para analizar los parámetros, y las características de fluido, condiciones de flujo y propiedades del material de la tubería seleccionada, con el objetivo de determinar las condiciones de flujo y la potencia requerida, para el bombeo de la biomasa triturada, según se muestra en la siguiente tabla XL.

Tabla XL. **Características de fluido**

Parámetro	Tubería de acero inoxidable
Densidad (TM/m ³)	1,06
Viscosidad (Pa-s) (TM/ms)	1
pH	6,50 – 7,50
Temperatura (°K)	328,15
Diámetro nominal de tubería (mm)	609,60
Diámetro nominal de tubería (cm)	60,96
Espesor (mm)	30,96
Longitud (m)	47
Presión de operación (<i>Re</i>) ³⁹	4 530
Factor de fricción (nuevo) (mm)	0,05

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. **Cálculo del diámetro de tuberías**

La velocidad de flujo en tubería se calcula por medio de la siguiente tabla XLI:

³⁹ Re: número de Reynolds. Es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido.

Tabla XLI. **Ecuación flujo en tubería**

$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi r^2} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \times \phi^2} = \frac{1,2732 \times Q}{\phi^2} \left[\frac{m}{s} \right]$	Dónde:	
	Q=	condiciones de flujo (m ³ /s)
	Ø=	diámetro interior de la tubería en (m)

El diámetro nominal corresponde al diámetro exterior en tuberías cuyo diámetro es igual o mayor a 30,5cm (12 in). En tuberías de menor diámetro, sus dimensiones precisas están dadas en tablas normalizadas. Los datos utilizados y los resultados se muestran en la siguiente tabla XLII:

Tabla XLII. **Estimación de flujo**

Parámetro	Condición de flujo
Diámetro interno (mm)	578,64
Caudal (m ³ /s)	0,0113
Velocidad (m/s)	0,042

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Estimación de flujo, tramos en el interior del digestor**

Parámetro	Condición de flujo
Diámetro interno (mm)	384,96
Caudal (m ³ /s)	0,00283
Velocidad (m/s) tramo 1,2,3,4	0,0236

Fuente: elaboración propia.

Para el flujo turbulento la curva de distribución de velocidades es más plana (tipo pistón) y el mayor cambio de velocidades ocurre en la zona más cercana a la pared.

Tabla XLIV. **Ecuación de flujo turbulento**

$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$	$Re =$	Número de Reynolds
	$D =$	Diámetro del ducto [m]
	$v =$	Velocidad promedio del líquido [m/s]
	$\rho =$	Densidad del líquido [TM/m ³]
	$\mu =$	Viscosidad del líquido [TM/ms]

Si $Re < 2\,000$ el flujo es laminar, si $Re > 4\,000$ el flujo es turbulento, y si $2\,000 < Re < 4\,000$, donde el flujo se encuentra en zona crítica donde el régimen es impredecible, es decir bien turbulento, laminar o transición.

Siendo Re para una tubería de agua de 114 000, la tubería principal de transporte de biomasa es de 26 mm, y en los tramos es de 10 mm. Estos resultados indican que la tubería que transporta la biomasa tendrá un flujo laminar, mientras que la tubería de agua tendrá un flujo turbulento.

Este grupo adimensional es uno de los parámetros más utilizados en los diversos campos de la Ingeniería Química en los que se presentan fluidos en movimiento, lo que determina las pérdidas, la caída de presión y la potencia requerida para cada caso.

4.2.3. Espesor mínimo de tuberías

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 328,15 °K, mientras que en el transporte agua, se debe seleccionar una tubería que pueda soportar temperaturas de entre 343,15 °K y 348,15 °K, como se muestra en la siguiente tabla XLV.

Tabla XLV. **Espesor de las tuberías y velocidad del flujo**

Parámetro	Selección de tubería
Diámetro nominal de tubería (mm)	609,6
Diámetro nominal de tubería (cm)	60,96
Espesor (mm)	30,96
Longitud (m)	47
Presión de operación	4 530
Factor de fricción (nuevo) (mm)	0,05

Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Cálculo de potencia de operación de la bomba

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:

Tabla XLVI. **Ecuación de potencia de la bomba**

Dónde:		
$E_i = E_f + h_L$	$E_i =$	Energía interna o térmica
	$E_f =$	Factor de fricción
	$h_L =$	Pérdida de energía o carga, representada en las pérdidas

Las ecuaciones empleadas para calcular las pérdidas de energía en tuberías, se muestran a continuación en la tabla XLVII:

Tabla XLVII. **Tipo de flujo del coeficiente de fricción en tuberías**

Tipo de flujo	Transporte de biomasa (Laminar)	Tubería de agua (Turbulento)
Fracción de fricción ⁴⁰	$f = \frac{64}{R_e} = \frac{64\mu}{DvP}$	$f = 0,02 - 0,1$

Fuente: GREENE, B. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. p 17.

Lo que indica que para el transporte de biomasa, el flujo debe calcularse con la siguiente ecuación (*):

⁴⁰ Teorema de Bernoulli: es la forma de expresión de aplicación de la ley de la conservación de la energía al flujo de fluidos en una tubería.

(*) Nota: todas las fórmulas prácticas para el flujo de fluidos se derivan del teorema de Bernoulli, con modificaciones para tener en cuenta las pérdidas debidas al rozamiento.

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 H_1 + Pot &= (\dot{m}_1 H_2 + \dot{m}_1 h_{L1}) + \left(\frac{1}{4} \dot{m}_1 H_{R1} + \frac{1}{4} \dot{m}_1 h_{R1} \right) + \left(\frac{1}{4} \dot{m}_1 H_{R2} + \frac{1}{4} \dot{m}_1 h_{R2} \right) \\ &+ \left(\frac{1}{4} \dot{m}_1 H_{R3} + \frac{1}{4} \dot{m}_1 h_{R3} \right) + \left(\frac{1}{4} \dot{m}_1 H_{R4} + \frac{1}{4} \dot{m}_1 h_{R4} \right) \\ \dot{m}_1 H_1 + Pot &= (\dot{m}_1 H_2 + \dot{m}_1 h_{L1}) + 4 \left(\frac{1}{4} \dot{m}_1 H_{R1} + \frac{1}{4} \dot{m}_1 h_{R1} \right) \\ \dot{m}_1 H_1 + Pot &= (\dot{m}_1 H_2 + \dot{m}_1 h_{L1}) + \dot{m}_1 (H_{R1} + h_{R1}) \\ Pot &= \dot{m}_1 (H_2 + h_{L1}) + \dot{m}_1 (H_R + h_R) - \dot{m}_1 H_1 \\ Pot &= g \dot{m}_1 (H_2 + h_{L1} + H_R + h_R - H_1) \end{aligned}$$

Tabla XLVIII. Ecuación transporte de biomasa

Dónde:	
$m_f =$	Energía de presión como presión en el tramo.
$h =$	Pérdida por rozamiento en la tubería desde el punto uno al punto dos.
$H_f =$	Presión terminal + presión estática terminal – presión de origen – presión estática en origen.
$H_R =$	Radio hidráulico.
$m_f + H_f$	Líneas experimentales
$Pot =$	Potencia
$h_L =$	Pérdida de carga debida al flujo del fluido.
$\frac{1}{4} =$	Presión media efectiva aprox. dentro del cilindro, cuando la válvula se cierra de la carrera del émbolo, siendo igual a la presión de vapor x 0.597.
$v =$	Velocidad media del flujo
$Z_1 =$	Altura o elevación potencial sobre el nivel de referencia en metros

Fuente: elaboración propia.

Donde:

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

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

Reemplazando la ecuación, se tiene:

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

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

Mientras que para el cálculo de tubería de agua, debe utilizarse la siguiente ecuación:

$$Z_1 + H_b = Z_2 + \frac{v_1^2}{2g} + h_L$$

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

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

Lo que refleja los resultados, luego de aplicar las ecuaciones, como se detalla en la siguiente tabla XLIX:

Tabla XLIX. **Pérdida de energía en el sistema y potencia de la bomba**

Parámetro	Transporte de biomasa	Tubería de agua
Tipo de flujo	(Laminar)	(Turbulento)
P_p (*)de fricción (W)	18,23	48,37
P_p (*)de altura (W)	2 892,21	54,21
P_p (*)de velocidad (W)	0,01474	1,45
P_p (*) de presión (W)	195,27	0
P_i (W)	117,60	10,83
P_g (Densidad del Grano de la Roca) (KW)	2,9887	0,104
<i>Eficiencia de la bomba (η_B)</i>	40 %	60 %
<i>Potencia real de la bomba (Hp)</i>	10	0,25

(*) P_p = Energía obtenida por la bomba en forma de presión o presión del fluido de los poros.

Fuente: elaboración propia.

En base a los resultados obtenidos, se observa la caída de presión causada por la velocidad, presión y la fricción siendo está muy pequeña en comparación con la caída de presión debida a la altura, debido a la gran cantidad de sólidos, se requiere una bomba de tipo pistón.

4.2.5. Selección de la bomba

La bomba según los parámetros de diseño debe tolerar un fluido parecido al agua de drenajes con un bajo nivel de corrosión, según los resultados expuestos en la Tabla XLIX, derivado a las necesidades de potencia del equipo, se estima de 10 HP, aproximadamente.

La eficiencia de 40 %, sin embargo, este valor es solo representativo, ya que este proceso está en función de las características del material de trabajo derivado al tratamiento de los sólidos los cuales deben desmenuzar la masa hasta un tamaño máximo de 40 mm, este tamaño es relativamente grande y compromete el funcionamiento de la bomba.

La bomba propuesta debe utilizar pistones para entregar energía al fluido, y funciona mediante un sistema de apertura y cierre de válvula, al contener sólidos de tamaño considerable, con estas válvulas su tendencia es de tupirse y puede no cerrar de manera correcta, por lo tanto pierde presión, por ende la capacidad de bombeo, disminuyendo la eficiencia.

Por lo tanto, en lo concerniente a los sólidos grandes que interfieren en el funcionamiento de la bomba, requiere mayor demanda de energía, contar con conexiones más flexibles con el objetivo de amortiguar el impacto con los sólidos y, por ende, con los materiales que soporten la abrasión.

4.3. Equipos complementarios

4.3.1. Antorcha

La antorcha se encarga de eliminar el exceso de biogás (no utilizado) por medio de la combustión de este, el cual debe ser capaz de operar en condición de máxima generación de biogás, que pasa por los tanques, por ser de paso, deberán tener un volumen suficiente para almacenar momentáneamente la masa durante el proceso continuo de homogenización.

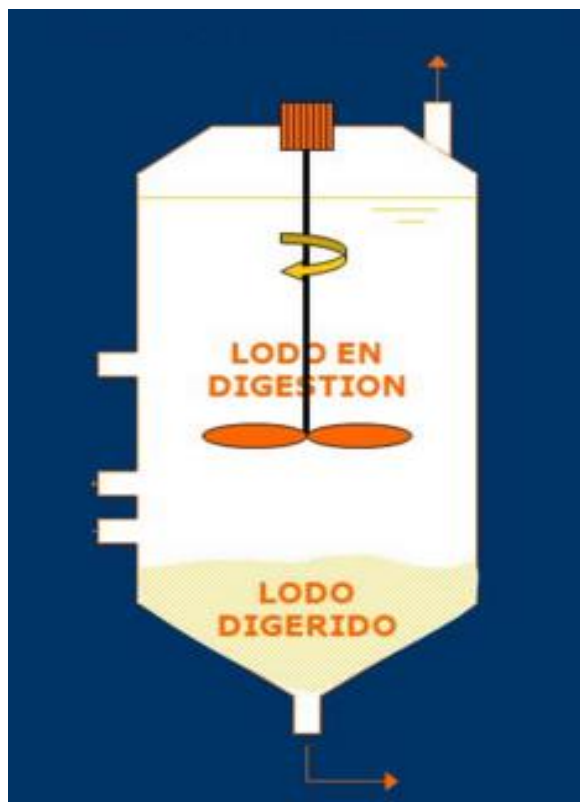
4.3.2. Agitador

Se considera la alternativa de implementar un agitador con el cual se logra una mayor homogeneidad de los purines en fermentación y con ello la mejora de la producción de biogás.

4.3.2.1. Parámetro de diseño

En su interior tiene un agitador de hélices para mantener una mezcla completa en donde el líquido crudo ingresa en la zona de digestión, donde se forma una capa de espuma favorecida por el gas, como se muestra a continuación:

Figura 41. **Agitador de hélices**



Fuente: elaboración propia.

4.3.2.2. Cálculo del agitador

El agitador debe permitir que el substrato esté lo más homogéneo posible para permitir el óptimo funcionamiento de la etapa de metanogénesis, siendo las velocidades recomendadas y potencia requerida, en base a las siguientes ecuaciones, como se detalla en la siguiente tabla L:

Tabla L. Ecuación cálculo del agitador requerido

Dónde:	
P=	Densidad del fluido en kilogramos por metro cúbico (libras/pie ³)
Q=	Caudal en litros por minuto (galones/minuto)
s=	Superficie en m ²
P _H =	Es la potencia necesaria para vencer las resistencias principales al desplazamiento del material en función de la capacidad de transporte.
λ=	Coefficiente de resistencia al desplazamiento del producto
P _N =	Potencia necesaria para vencer las resistencias en vacío, que son difíciles de calcular pero dependen en gran medida del diámetro y la longitud del tornillo.
P _{ST} =	Es la potencia necesaria para vencer las resistencias debidas a la inclinación
Φ=	Diámetro.
ρ=	Es la densidad del sólido en Kg/m ³
t =	Temperatura en grados Celsius (Fahrenheit)
hr =	Coefficiente de transferencia de calor
γ=	Viscosidad cinemática del fluido, m ² /s
L=	Longitud total en metros
C ₀ =	Coefficiente inicial

Fuente: elaboración propia.

$$s = \lambda \frac{\pi \phi^2}{4} \quad [m^2]$$

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

$$Q = 3600 * s * v * \rho * \kappa \quad [t/hr]$$

$$P = P_H + P_N + P_{St}$$

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

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

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

Los parámetros de diseño se seleccionaron de acuerdo con el tipo de material que se transporta y con la geometría de la instalación, dando como resultado los cálculos del agitador, según se muestra en la tabla LI:

Tabla LI. **Cálculo del agitador requerido**

Resultados	Tramos			
	a-b	b-c	c-d	e
Potencia de desplazamiento de 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.

Lo que indica que para el sistema de transporte de la biomasa, 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.

4.3.3. Pérdidas y aportes de calor

Para determinar el balance de energía, es necesario cuantificar los aportes y/o pérdidas de calor presentes en el equipo, como se mencionan a continuación:

4.3.3.1. Calor aportado al fluido

El calor aportado al fluido contribuye a controlar la temperatura en el biodigestor para facilitar la generación de biogás, para ellos se cuentan con datos iniciales para el cálculo del calor aportado como se observa en la tabla LII:

Tabla LII. **Cálculo del calor aportado al digestor**

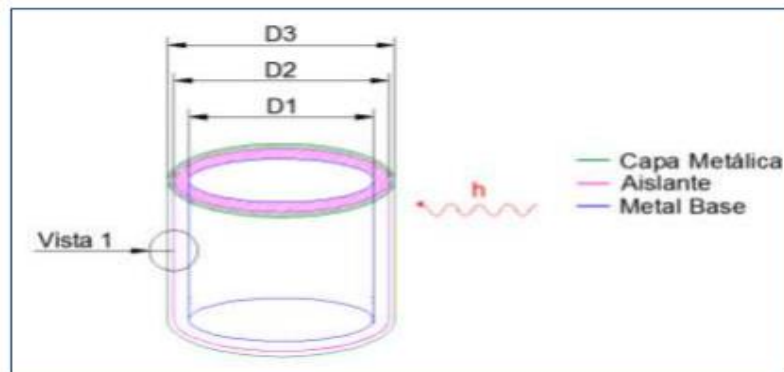
Datos iniciales	
L_{acero}	6 mm
L_{aislante}	150 mm
L_{Zinc}	2 mm
K_{acero}	16,3 W/m ^{°k}
K_{aislante}	0,023 W/m ^{°k}
K_{zinc}	112,2 W/mk
T_o	328,15 °K
T_f	295,15 °K
h_{aconv}	10 W/m ² °K

Fuente: elaboración propia.

4.3.3.2. Pérdida de calor por las paredes

En base a las medidas del digestor de 8 metros de diámetro x 21 metros de altura; se conforma por capas de: acero inoxidable, aislante de poliuretano y una plancha fina de zinc, como se muestra en la siguiente figura 42:

Figura 42. **Capas de aislamiento en tanques**



Fuente: elaboración propia.

Para este cálculo, se consideró la transferencia de calor en pared plana, a través de las siguientes ecuaciones, según tabla LIII:

Tabla LIII. Ecuación transferencia de calor

Dónde:	
$U_T =$	Coeficiente global de transferencia de calor máximo
$h_i =$	Coeficiente de convección gas-pared interior
$k =$	Conductividad térmica del material de fabricación de las placas (W/m ² *°K)
$k_{acero} =$	Es la conductividad del acero a la temperatura de líquidos
$k_{aislante} =$	Transferencia de calor en el molde de planchones de acero
$k_{zinc} =$	Elemento de transición, como un agente anti-corrosiva de transferencia de calor en pared plana.
$h_T =$	Coeficiente equivalente de transferencia de calor

Fuente: elaboración propia.

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

Donde se obtiene el coeficiente equivalente de convección h_T :

$$h_T = h_{a\ conv} + h_{equiv\ rad}$$

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

Tabla LIV. Ecuación equivalente de convección

Dónde:	
$h_T =$	Coeficiente equivalente de transferencia de calor
$h_{a\ conv} =$	Coeficiente de conversión
$h_{equiv\ rad} =$	Coeficiente equivalente en radianes
$A =$	Área aceleradora
$T_o =$	Temperatura exterior
$T_a =$	Temperatura ambiente
$\varepsilon =$	Rugosidad absoluta o altura efectiva de las irregularidades de las paredes de las tuberías, en milímetros (pies)
$FF =$	Cara plana (<i>flat face</i>).
$T_{wo} =$	Trabajo efectuado sobre el gas, por ciclo

Fuente: elaboración propia.

En este punto, se asumirá una temperatura de la pared expuesta al ambiente de 308,15 °K, luego este valor se itera hasta llegar al valor correcto de la temperatura. Siguiendo con el cálculo, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & h_{\text{equivalente radiación}} \times A \times (308,15 \text{ °K} - 295,15 \text{ °K}) = \\
 & 5,66 \times 10^{-8} \times 0,6 \times 1 \times A \times ((308,15 + 273)^4 - (295,15 + 273)^4) \\
 h_{\text{equivalente radiación}} &= \frac{5,66 \times 10^{-8} \times 0,6 \times 1 \times A \times ((581,15)^4 - (568,15)^4)}{A \times (308,15 \text{ °K} - 295,15 \text{ °K})} \\
 h_{\text{equivalente radiación}} &= 3,72 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \\
 h_T &= 3,72 + 10 = 13,72 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]
 \end{aligned}$$

Determinando, se obtiene el coeficiente siguiente:

$$U_T = \frac{1}{\left(\frac{6 \times 10^{-3}}{16,3}\right) + \left(\frac{150 \times 10^{-3}}{0,023}\right) + \left(\frac{2 \times 10^{-3}}{112,2}\right) + \left(\frac{1}{13,72}\right)}$$

$$U_T = 0,1516 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

$$Q_p = U_T \times A \times (T_o - T_f) = 0,1516 \times 301,60 \times (55 - 22)$$

$$Q_p = 1\,508,84 \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = 130,36 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]$$

Realizando la primera iteración se obtiene Ts:

$$Q_p = h_T \times A \times (T_s - T_\infty) \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right]$$

$$T_s = \frac{Q_p}{h_T \times A} + (T_\infty + 273,15) \text{ [}^\circ\text{K]}]$$

$$T_s = \frac{1\,508,84}{13,72 \times 301,60} + (22 + 273,15) = 295,51 \text{ [}^\circ\text{K]}]$$

Con este valor se realiza la primera iteración, en donde se obtiene un nuevo *hequivalente radiación*, **ht**, *Qp* y una Ts. Los valores resultantes de las dos iteraciones se muestran en la tabla LV:

Tabla LV. **Temperatura superficial y pérdida de energía**

	Determinación de T_{sup}	Determinación de pérdida total de energía
Ts (°K)	295,51	295,52
<i>hequiv rad</i> (W/m²K)	3,49	3,4939
Ut (W/m²K)	0,15165	0,15160
<i>Qp</i> (J/s)	1 508,84	1 508,85
Ts(K) nuevo	295,52	295,52 (converge)

Fuente: elaboración propia.

Realizando una segunda iteración, se obtiene una $T_s = 295,52 \text{ }^\circ\text{K}$ y una pérdida de calor de $Q_p = 1\ 508,85 \text{ J/s}$ que representan aproximadamente $130,36 \text{ MJ/d}$.

En base a los cálculos se observa que para 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 a la del fluido ($328,15 \text{ }^\circ\text{K}$). 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 $0,39 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{K/W}$.

Por tanto y como una primera aproximación, si se toma una capa de aislante de poliuretano de $0,15 \text{ m}$ de espesor con conductividad térmica de $0,023 \text{ (W/m}^\circ\text{K)}$ para el biodigestor, la resistencia térmica sería de $6,5 \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{k/W}$.

En otras palabras, la única resistencia que es predominante e influye directamente en el sistema es la que oponga al aislante.

4.3.4. Balance energético

La energía disponible para 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 como se observa en la tabla a continuación:

Tabla LVI. **Características del vapor de inyección**

Parámetro	Condición de caldera	Condición de salida
Condición	saturación	saturación
Presión (kPa)	1 000,00	101,32
Temperatura (K)	456,15	328,15
Entalpía (*MJ/t)	2 777,2	230,0

*Megajoules por tonelada

Fuente: elaboración propia.

Según los datos, el vapor requerido teóricamente se calculó a través de la siguiente ecuación:

Tabla LVII. **Ecuación vapor de inyección**

Dónde:	
$m_v =$	Calor disipado a través de la tapa de válvulas, saliendo el caudal
$q_p =$	Convección al medio ambiente, a través de la pared cilíndrica
MJ/d	Megajoules por día
MJ/t =	Megajoules por tonelada
$h_f =$	Pérdida de carga, mts

Fuente: elaboración propia.

$$m_v = \frac{q_p}{h_v - h_f} = \frac{21\,030 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]}{(2\,777,20 - 230,00) \left[\frac{\text{MJ}}{\text{t}} \right]} = 8,26 \left[\frac{\text{t}}{\text{día}} \right]$$

Siendo el choque del vapor con el agua fresca a 295,15 °K, se crea un vapor instantáneo que disipa el calor, para este fenómeno se asumirá una eficiencia del 70 %, por lo tanto, la cantidad real de vapor requerido será de 8,26 tonelada megajoules por día (TM/día).

- 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 LVIII:

Tabla LVIII. **Propiedades del metano**

Parámetros del cálculo energético	
LHW-Metano (MJ/m ³)	47
Densidad del metano (kg/m ³)	0,70
Producción del biogás (*Nm ³ /d)	1 992

*Nm³/d= Producción de combustión de metano generado en un día.

Fuente: elaboración propia.

La cantidad de energía por cada m³ de biogás se estableció con la siguiente ecuación:

$$LHV_b = LHV * \% CH_4 * \rho_{CH_4} = 47 * 60 \% * 0,7 = 19,74 \left[\frac{MJ}{Nm^3} \right]$$

Tabla LIX. **Ecuación sobre la cantidad de energía disponible**

Dónde:	
LHVb=	Valor calorífico inferior de metano en la producción del biogás
LHV=	Valor calorífico inferior de metano (En sus siglas en inglés <i>Low Heating Value</i>)
CH4 =	Contenido de metano del biogás, decimal
ρ_{CH_4} =	Densidad del metano
MJ=	Megajoules
En =	Energía residual neta
Ed =	Energía termoquímica disponible
Er=	Energía requerida en proceso

Fuente: elaboración propia.

Energía contenida en biogás:

$$E_n = LHV_b \times P_{\text{biogás}} = 19,74 \times 1\,992 = 39\,322 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]$$

La energía neta es:

$$E_n = E_d - E_r = 39\,322 - 21\,030 = 18\,292 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]$$

Lo que indica que la cantidad de energía generada diariamente es de 39 322 MJ/d termoquímicos, mientras que la energía neta termoquímica oscila en 18 292 MJ/d.

Para la generación eléctrica, es necesario utilizar un motor de combustión interna ya que se trata de tamaños moderados de bajo 1 MW.

La energía resultante será la cantidad que se podrá convertir en energía eléctrica que posteriormente podrá ser utilizada para el edificio de la Facultad de Ingeniería T-3. A medida que el proyecto se vuelva rentable se podrá expandir a otras facultades de la ciudad universitaria.

4.4. Especificación del generador

Se propone el modelo de generador a biogás de la marca ORIPO MODELO P400N con tensión nominal 120/240V monofásica, corriente nominal de 722A, a continuación se muestra sus características.

Tabla LX. **Generador de gas ORIPO**

Modelo P400N	
Potencia nominal (KW)	400
Potencia nominal (KVA)	500
Tensión nominal (V)	120/240V
Frecuencia (Hz)	50/60
Corriente nominal (A)	721,7
Estabilización de la regulación de voltaje	$\leq \pm 1,5\%$
Regulación del voltaje instantáneo	$\leq \pm 20\%$
Tiempo de recuperación del voltaje (s)	≤ 1
Porcentaje de la fluctuación del voltaje	$\leq 1\%$
Porcentaje de fluctuación de la frecuencia	$\leq 1\%$
Nivel de ruido (dB)	≤ 103
Aspiración	Turboalimentado
Tipo de enfriamiento	ONAF
Cilindraje	12
Índice de compresión	11:1
Potencia nominal (Kw)	520
Velocidad nominal (r / min)	1 500/1 800
Combustible	Gas Natural / Biogás
Consumo de gas (MJ / kW · h)	10,5
Consumo de aceite	$\leq 1,0g / kW.h$
Temperatura de escape	$\leq 1 112 ^\circ K$
Peso neto / (kg)	6 357
Dimensiones (mm)	4 250 X 1 700 X 2 580

Fuente: www.oripo.com/list/?5_1.html. Consulta: agosto de 2016.

Figura 43. **Generador de gas ORIPO**



Fuente: http://es.made-in-china.com/co_oriogenset/product_High-Efficiency-Cummins-300kw-Biogas-Generator-Set-Adopt-Biomass-Methane-CH4-Marsh-Gas-LPG_eseyonesy.html.

Consulta: agosto de 2016.

Se proponen dos de estos generadores para llegar a obtener una potencia de 1MW, con sus características antes descritas.

4.5. Estimación de costos

La cantidad de biomasa propuesta por trabajar será de 25TM/día que fue propuesto en este capítulo. Este sistema contará con 1 trituradora, 1 tanque de pre-tratamiento, 1 tanque de homogenización, 1 tanque de biodigestion, 1 tanque de biofertilizante, 1 antorcha y 1 agitador. Además de 2 generadores propuestos con las características indicadas.

Tabla LXI. Costo del biodigestor

COMPONENTES DEL BIODIGESTOR			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
RECOGIDA DE BIOMASA			
Contenedor orgánico	960	\$ 50	\$ 48 000
Sanitario portátil	480	\$ 1 000	\$ 480 000
SUBTOTAL			\$ 528 000
TRANSPORTE DE BIOMASA			
Camión recolector	1	\$ 700 000	\$ 700 000
Pickup recolector heces fecales y orina	1	\$ 270 000	\$ 270 000
SUBTOTAL			\$ 970 000
PROCESO DE BIODIGESTIÓN			
Trituradora	1	\$ 150 000	\$ 150 000
Tanque de pretratamiento	1	\$ 250 000	\$ 250 000
Tanque de homogenización	1	\$ 300 000	\$ 300 000
Tanque de biodigestion	1	\$ 500 000	\$ 500 000
Tanque de biofertilizante	1	\$ 200 000	\$ 200 000
Antorcha	1	\$ 150 000	\$ 150 000
Agitador	1	\$ 180 000	\$ 180 000
SUBTOTAL			\$ 1 730 000
GENERADOR ELÉCTRICO			
Generador ORIPO Mod. P400N	2	\$ 80 000	\$ 160 000
Envío desde China a Guatemala	2	\$ 16 000	\$ 32 000
SUBTOTAL			\$ 192 000
		TOTAL	\$ 3 420 000

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los datos obtenidos de la tabla anterior, el costo total de inversión de este proyecto es:

Costo de inversión= US 3 420 000 \$

Tabla LXII. Costo Mantenimiento por día

MANTENIMIENTO BIODIGESTOR			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Contenedor orgánico	960	\$ 1	\$ 960
Sanitario portátil	480	\$ 5	\$ 2 400
Camión recolector	1	\$ 25	\$ 25
Pickup recolector heces fecales y orina	1	\$ 15	\$ 15
Trituradora	1	\$ 21	\$ 21
Tanque de pretratamiento	1	\$ 18	\$ 18
Tanque de homogenización	1	\$ 10	\$ 10
Tanque de biodigestion	1	\$ 20	\$ 20
Tanque de biofertilizante	1	\$ 8	\$ 8
Antorcha	1	\$ 5	\$ 5
Agitador	1	\$ 10	\$ 10
Generador ORIPO Mod. P400N	2	\$ 50	\$ 100
		TOTAL	\$ 3 592

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los datos obtenidos de la tabla anterior, el costo total de mantenimiento por día de este proyecto es:

CM= USD 3 592 \$

Tabla LXIII. Costo de mano de obra planta de biodigestion

MANO DE OBRA PLANTA DE BIODIGESTION POR DÍA			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Conductor Licencia A y B	7	\$ 12	\$ 84
Recolector	7	\$ 11	\$ 77
Operario trituradora	1	\$ 12,30	\$ 12,30
Operario tanque pretratamiento	2	\$ 12,60	\$ 25,20
Operario tanque homogenización	2	\$ 12,50	\$ 25
Operario tanque biodigestión	2	\$ 12,30	\$ 24,60
Operario tanque de biofertilizante	3	\$ 13	\$ 39
Supervisor I	1	\$ 18	\$ 18
Supervisor II	1	\$ 17	\$ 17
Supervisor III	1	\$ 16	\$ 16
Electricista de planta	1	\$ 14	\$ 14
Ayudante de electricista	1	\$ 11	\$ 11
Mecánico de mantenimiento	1	\$ 13	\$ 13
Ayudante de mecánico	1	\$ 11	\$ 11
		TOTAL	\$ 387,10

Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos en esta tabla muestran el costo de la mano de obra por día:

CMOD= USD 387,10 \$

Ahora bien los costos de la mano de obra al año serán:

CMOA= USD 141 291,50 \$

Para calcular el costo de generación necesito conocer los gastos que me incurren para recolectar, mantener y trasladar la materia orgánica a mi punto de generación como la cantidad de energía aprovechada.

$$\text{Costo de generación} = (\text{m}^3 \text{ de CH}_4 / \text{Kwh}) * (\text{Q/m}^3 \text{ de CH}_4)$$

$$\text{Costo de generación} = (1 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4 / 1,43\text{kWh}) * (\$ 3 360 / 1 195,2 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4)$$

$$\text{Costo de generación} = 1,9 \$ / \text{kWh}$$

Se procede a calcular el Costo de generación durante los primeros 100 días, buscando obtener una generación constante de 1MW, con la siguiente ecuación:

$$\text{CGE} = \text{CMO} + \text{CM} + \text{CG}$$

$$\text{CGE} = \$ 38 710 + \$ 359 200 + \$ 1,9/\text{kWh} * 1 000\text{kW} * 24\text{h/d} * 100\text{d}$$

$$\text{CGE} = \$ 4 957 910$$

Donde:

CGE=Costo de generación de energía durante 100 días.

CM= Costo de mantenimiento.

CMO= Costo de mano de obra.

CG= Costo de generación de energía por hora.

El costo de venta de energía eléctrica, según el mercado eléctrico es de USD \$ 0,046 por kWh. Por tanto, el precio de venta de los 100MW durante 100 días aproximadamente será:

$$\text{CV100MW} = (100 000\text{kWh}) * (24\text{h/d}) * (100\text{d}) * (\text{USD } \$ 0,046/\text{kWh})$$

$$\text{CV100MW} = \$ 11 040 000$$

La utilidad neta se puede calcular por la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \text{Utilidad Neta} &= \text{CV100MW} - \text{CGE} \\ \text{Utilidad Neta} &= \text{USD } 11\,040\,000 \$ - 4\,957\,910 \$ \\ \text{Utilidad Neta} &= \text{USD } 6\,082\,090 \$ \end{aligned}$$

Si se compara el costo de venta con el costo de generar la energía eléctrica durante 1 año, el costo de generar será 0,12 veces el costo de venta. Obteniendo, aproximadamente, un 12 % de ganancias durante el primer año de funcionamiento de este proyecto.

Si el VPN (valor presente neto), es un valor positivo el proyecto es rentable, viable y recuperable en un determinado tiempo, el VPN se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{VPN} = -I + \sum_1^n \frac{Ct}{(1+r)^t}$$

Donde:

I=USD 3 420 000 \$ (Inversión)

n=1 (años de pago de efectivo)

r=15 % (tasa para depósitos a plazo fijo en sistema bancario)

Ct=USD 6 082 090 \$

t=2 (número correlativo de pago en el tiempo)

$$\text{VPN} = -3\,420\,000 + (6\,082\,090) / (1+0,15)$$

$$\text{VPN} = +1\,868\,773,91$$

Como se puede ver para n=1 el valor de VPN es positivo; por tanto, para 1 año el proyecto sí es rentable, viable y recuperable.

CONCLUSIONES

1. Con la elaboración de este proyecto se desarrolla un prototipo bioenergético empleando residuos sólidos orgánicos, para lo cual la biodigestión será aprovechada en el tratamiento de los residuos. Se utiliza un proceso anaeróbico con microorganismos metanogénicos bacteriáceo (hidrolítica, acetogénica, homoacéticas y metanogénica); que degradarán la materia en ausencia de oxígeno, produciendo biogás constituido principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Para que este proceso se desarrolle satisfactoriamente el pH no debe bajar de 6 ni subir a 8, además de mantener un rango de temperatura entre 303,15 °K y 313,15 °K (rango mesofílico) para la sobrevivencia de los microorganismos.
2. La unidad de dosificación contará con: 1. Tanque de agua de pretratamiento; 2. Tanque de pretratamiento; 3. Tanque de homogenización; 4. Tanque de digestión; 5. Tanque de efluente o biofertilizante. Evitando compuestos que puedan frenar o impedir las reacciones químicas provocadas por los inhibidores. Al implementar esta tecnología se aprovechan los residuos orgánicos, además de que se captan gases de efecto invernadero evitando dicha emisión en un aprovechamiento de energía renovable, y reduciendo notablemente los problemas ambientales.

3. Implementando esta tecnología se permitirá la obtención de energía eléctrica y/o térmica, en un rango de alrededor de 0,3-10MW, dependiendo de la biomasa ingresada. Se selecciona una capacidad de operación de 25TM/día de residuos frescos, lo que implica un manejo anual aproximado de 9125TM/año, captado dentro de la ciudad universitaria Z.12. El dimensionamiento del tanque de digestión con un volumen de 702m³, obteniendo la extracción de biogás a 83m³/hrs o 1992m³/día podrá ser aprovechado para una generación eléctrica promedio de 11 952KW.

4. Se deja plasmada la importancia en la separación y recolección selectiva en origen, lo que permitirá potenciar cualquier política de reciclaje que se encare dentro de la ciudad universitaria, contribuyendo a mejorar condiciones de trabajo de los recuperadores o recicladores y promoviendo prácticas de consumo sustentable en la población estudiantil, que tomará un rol activo en la gestión de los residuos. Así será un sujeto consiente de su aporte al ambiente y espacio público en la disminución de emisiones de gases efecto invernadero. El centro de acopio tendrá un área aproximada de 441m², en donde ingresará la materia orgánica, inorgánica y materia para reciclaje; esta última ayudará a mantener un ciclo repetitivo de recolección y venta, obteniendo estabilidad en el proyecto. El ingreso de dichas ventas servirá para pagar salarios de las personas asignadas al proyecto.

RECOMENDACIONES

1. Implementar buenas prácticas para el manejo adecuado de los residuos sólidos orgánicos dentro de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de información proporcionada en módulos de capacitación, campañas informativas, entre otros.
2. Debido a que este proyecto se enfoca en la generación de energía eléctrica a través de biomasa, se necesita dotarlo de un sistema de control para medición de ph, temperatura, nivel de agua, presión, peso, dióxido de carbono, metano, entre otros. Esto para mantener los niveles adecuados y que puedan existir los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica.
3. Si se necesita aumentar la cantidad de energía generada propuesta, solo bastará con duplicar, triplicar o colocar en forma aislada 2, 3 o más biodigestores; según el diseño propuesto e interconectarlos en forma paralela logrando la adición de potencia.
4. La reacción común en todas las bacterias metanogénicas responsables de la formación de metano es: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 60,5\text{Kcal/mol}$. Otra bacteria importante es *Methanobacterium Thermoautotrophicum* que ha demostrado rapidez en la oxidación de H_2 y reducción de CO_2 . Por tanto, se recomienda mantener una temperatura adecuada, acidez, grado de carbono/nitrógeno (C/N) y no existencia de oxígeno para que el proceso anaeróbico sea exitoso.

5. Transmitir la información para que, en base al diseño propuesto, se realicen mejoras u otras propuestas viables y se logre llevar a cabo como un proyecto rentable.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. *Directrices para la gestión integrada y sostenible de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe*. Brasil: AIDIS, 2005. 16 p.
2. CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. México: McGraw Hill, 1993. 110 p.
3. Organización de Naciones Unidas. *Cumbre de la tierra*. Brasil: ONU, 1992. 8 p.
4. DÍAZ, Rodrigo. *Manual de motores de combustión interna*. Ecuador: Dossat, 2009. 250 p.
5. FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. 5ª ed. España: McGraw Hill, 2003. 757 p.
6. MUÑOZ, M. PAYRI, F. *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Sección de publicaciones de la E.T.S de ingenieros industriales fundación general U.P.M., 1984. 725 p.
7. SIEMENS. *Turbinas de gas industriales para aplicaciones de cogeneración a base de biocombustibles*. México: Siemens AG, 2008. 20 p.

8. SOSNOWSKI, James. WIECZOREK, A. LEDAKOWICZ, S. *Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes*. 3^a ed. Polonia: Elsevier, 2003. 616 p.
9. CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. 4^a ed. México: McGraw Hill, 2005. 746 p.
10. CENGEL, Yunos A. *Termodinámica*. 5^a ed. México: McGraw Hill, 2006. 985 p.
11. WALDRON, Keith. *Advances in biorefineries biomass and waste supply chain exploitation*. 53^a ed. Reino Unido: Woodhead Publishing Series in Energy, 2014. 875 p.
12. BRAVO G., J. *Construcción de un biodigestor en ferrocemento*. Chile: Universidad austral, 1992. 250 p.
13. SPYROS G., Pavlosthatis; GOSSETT, James M. *A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge*. New York: 1986. 1600 p.

ANEXOS

Anexo 1. Encuesta realizada en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

ENCUESTA

Objetivo: identificar las clases de residuos sólidos y cómo los desechan en los diferentes edificios de la universidad de San Carlos de Guatemala.

A continuación se le presenta una serie de cuestionamientos los cuales debe leer y luego marque con una "X" la respuesta que usted crea conveniente.

1. Qué tipo de residuos desechas más al día:

- a. Restos de comida___ b. Restos de frutas y verduras___ c. cáscaras___
d. Restos de comida cocida___ e. Madera___ f. Papel___ g. Plástico___ h. Cartón. ___
i. Latas___ j. Vidrio. ___ Otro___ Cuál_____

2. Dónde depositas los residuos sólidos que desechas:

- a. Contenedor mixto___ b. Contenedor reciclable___ c. Costales___ d. Piso___
e. Bolsas___ f. Otra___ Cuál_____

3. Qué haces con los residuos que desechas:

- a. A un reciclador___ b. Al servicio de aseo___ c. Se los lleva___
d. los reutiliza___ e. Otra___ Cuál_____

4. Usted cree que son suficientes los contenedores de basura que están en la Universidad de San Carlos de Guatemala: a. Sí___ b. No___
Porque_____

5. Usted cree que los contenedores de basura en la Universidad de San Carlos de Guatemala, deben estar para cada tipo de residuos. Es decir, un recipiente para los residuos orgánicos (cáscaras, residuos de comida, residuos de verduras, legumbres etc.), residuos inorgánicos (plástico, hojalatas, vidrio etc.) y residuos ordinarios inertes (servilletas, empaques de papel plastificados, polvo, basura, etc) a. Sí____ b. No____
Porque_____

6. Usted ha recibido algún tipo de capacitación para manejar adecuadamente los residuos dentro de la Universidad: a. Sí____ b. No____

7. Cuantas veces al día orina: 1____Vez; 2____Veces; 3____Veces; Más de 4____Veces

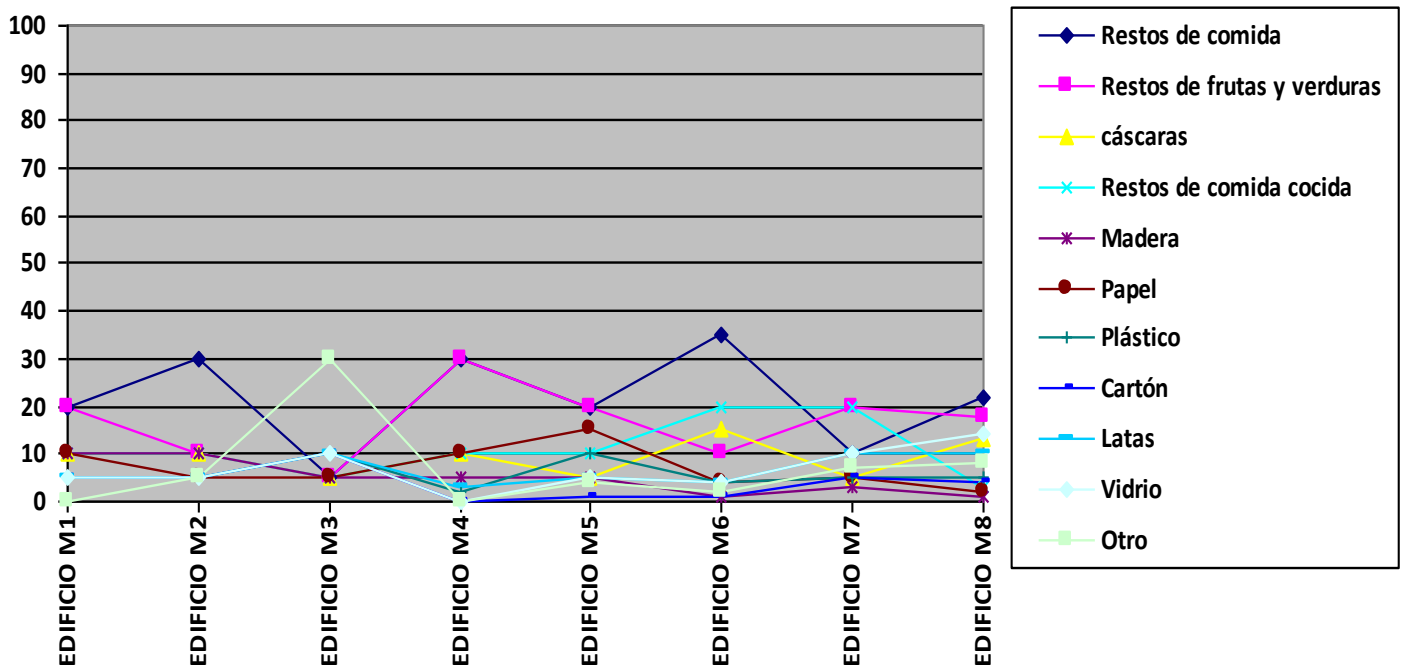
8. Cuantas veces al día defeca: 1____Vez; 2____Veces; 3____Veces; Más de 4____Veces

9. Si usted tiene necesidad de utilizar un sanitario dentro de la Universidad y tiene a su disposición los sanitarios del edificio y un sanitario portátil, cuál usaría
a. Sanitario del edificio____ b. Sanitario portátil____

10. Si se implementa en la universidad el uso de sanitario portátil, a las afueras de su edificio lo usaría para: a. Orinar____ b. Defecar____ c. Ambas cosas____

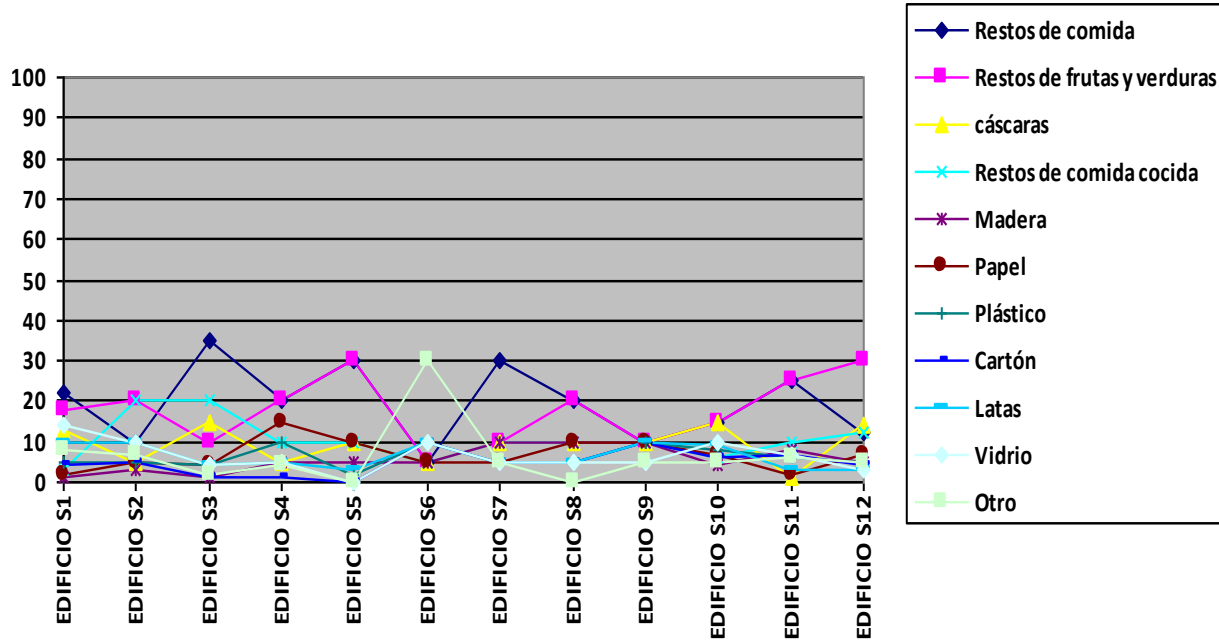
Anexo 2. Pregunta No. 1 Encuesta realizada en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica 1. Encuesta en edificios “M”, ¿Qué tipo de residuos desechas más al día?



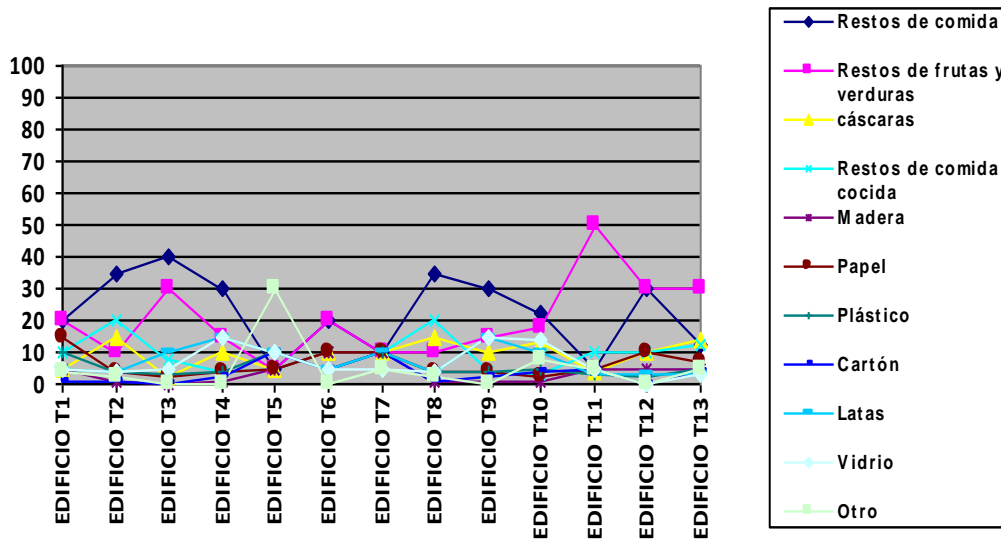
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 2. Encuesta en edificios “S”, ¿Qué tipo de residuos desechas más al día?



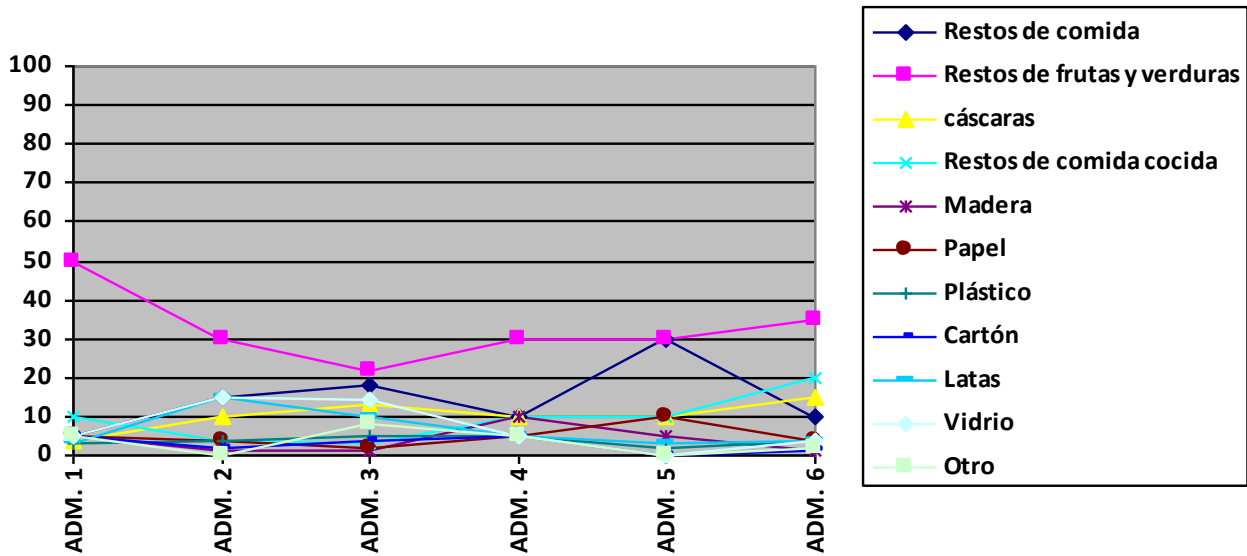
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 3. Encuesta en edificios “T”, ¿Qué tipo de residuos desechas más al día?



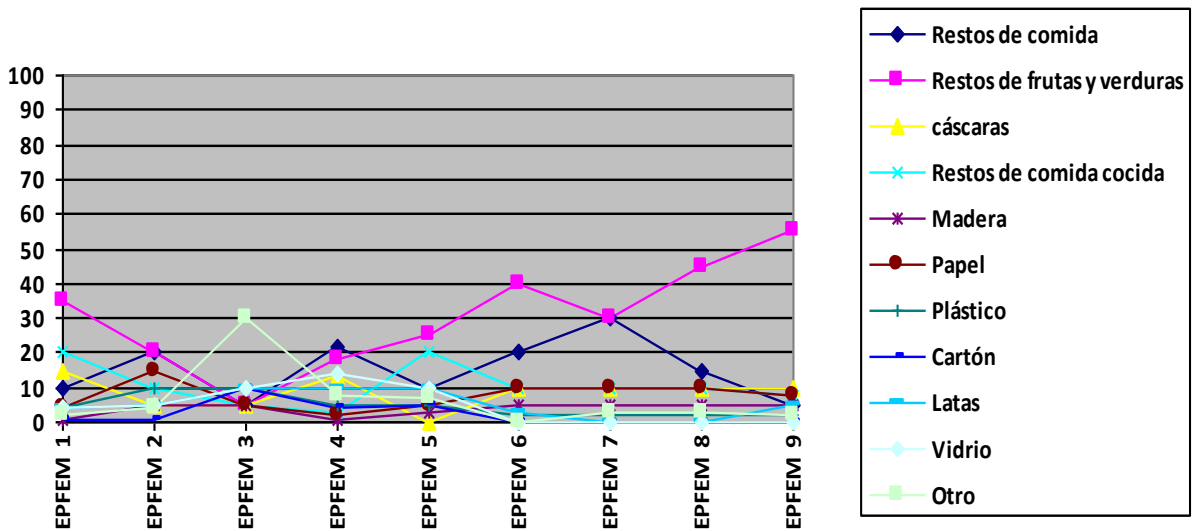
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 4. Encuesta en edificios “Administración”, ¿Qué tipo de residuos desechas más al día?



Fuente: elaboración propia.

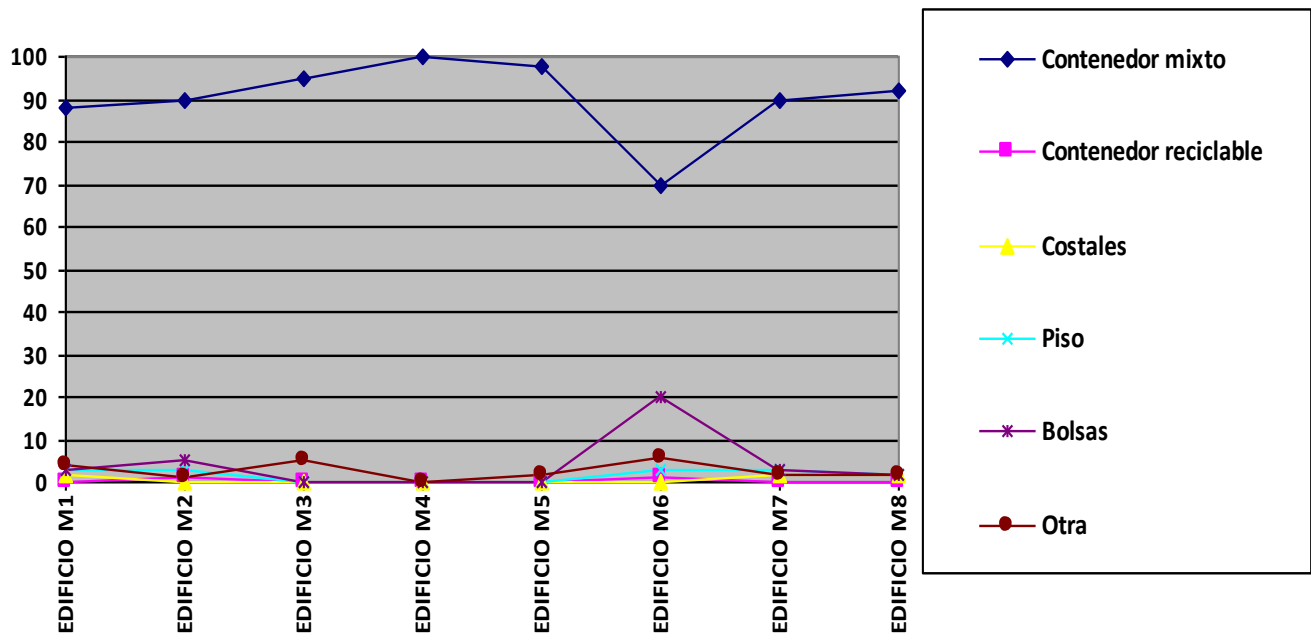
Gráfica 5. Encuesta en edificios “EPFEM”, ¿Qué tipo de residuos desechas más al día?



Fuente: elaboración propia.

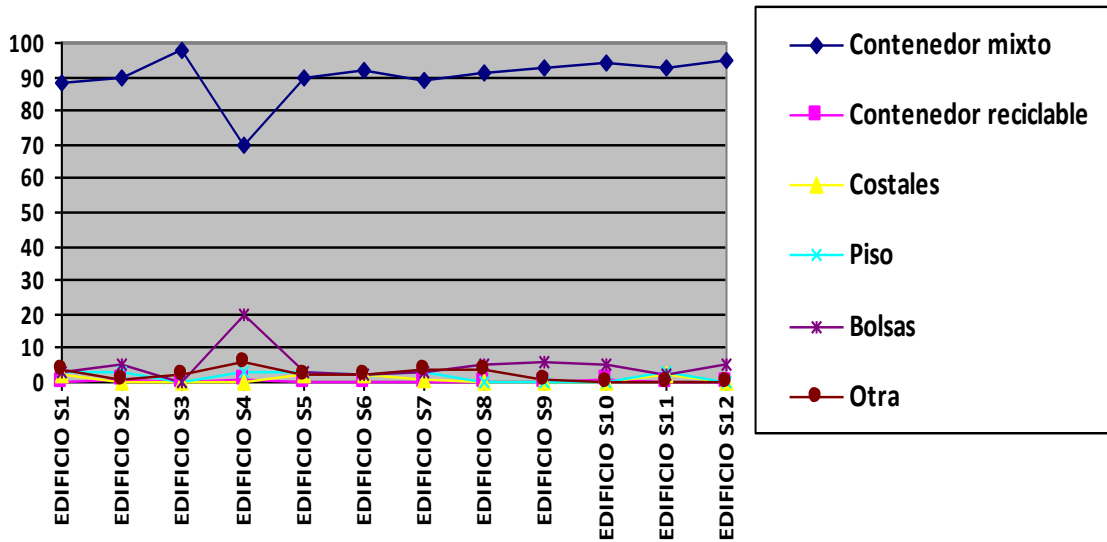
Anexo 3. Pregunta No. 2 encuesta realizada en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica 6. Encuesta en Edificios “M”, ¿Dónde depositas los residuos sólidos que desechas?



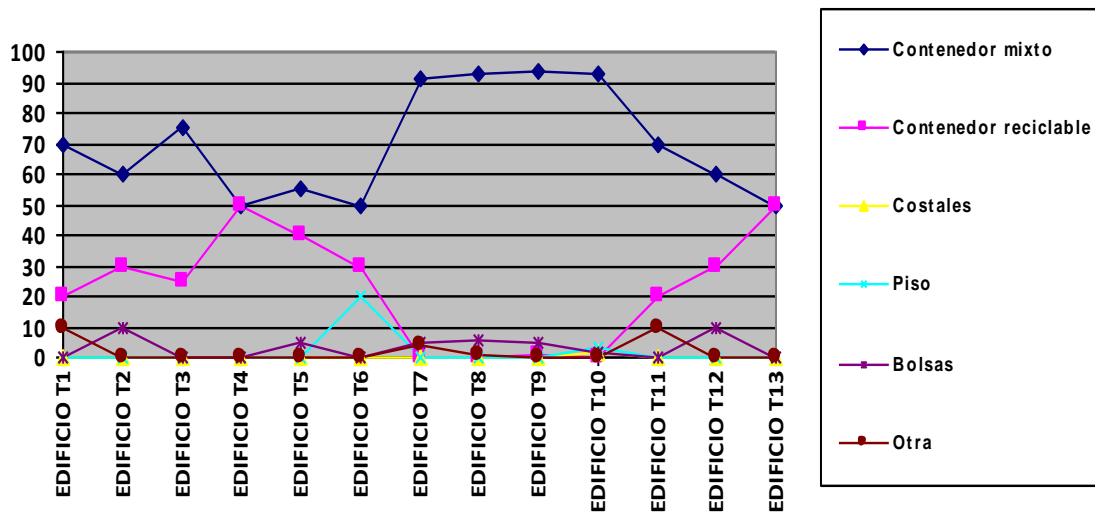
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 7. Encuesta en edificios “S”, ¿Dónde depositas los residuos sólidos que desechas?



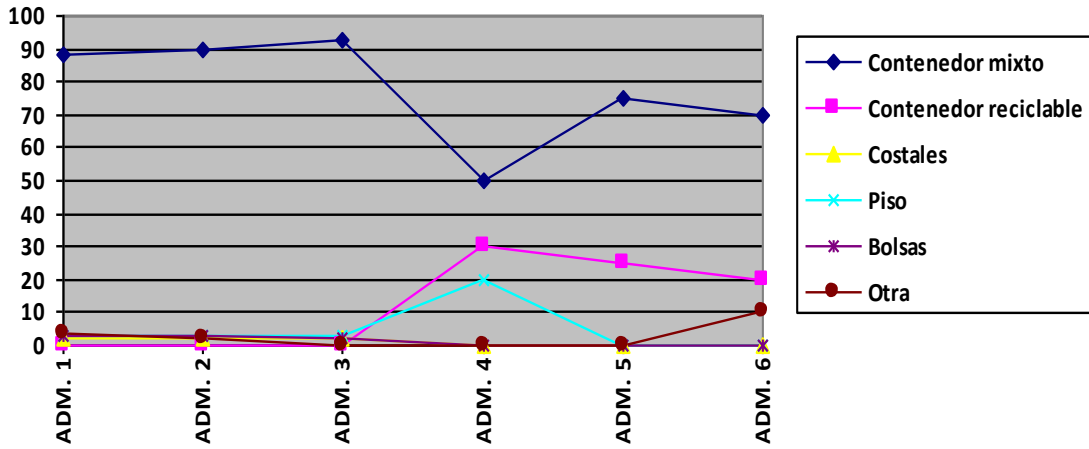
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 8. Encuesta en edificios “T”, ¿Dónde depositas los residuos sólidos que desechas?



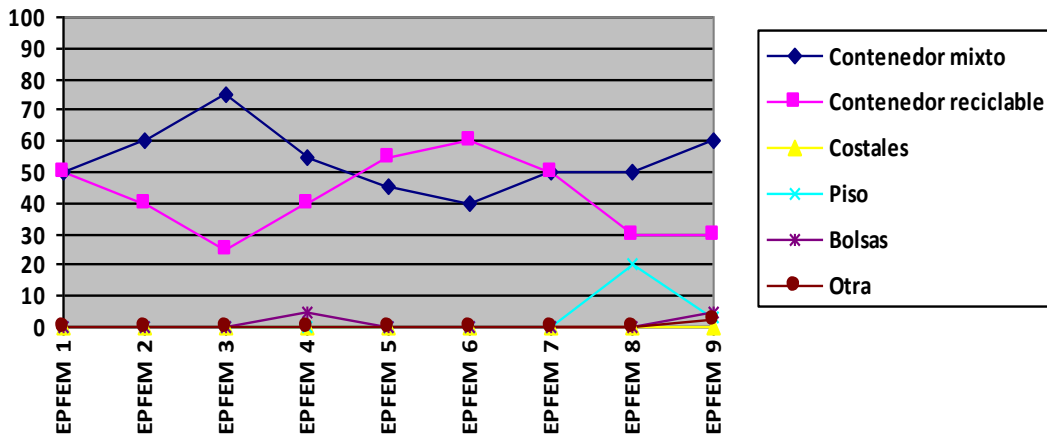
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 9. Encuesta en edificios “Administración”, ¿Dónde depositas los residuos sólidos que desechas?



Fuente: elaboración propia.

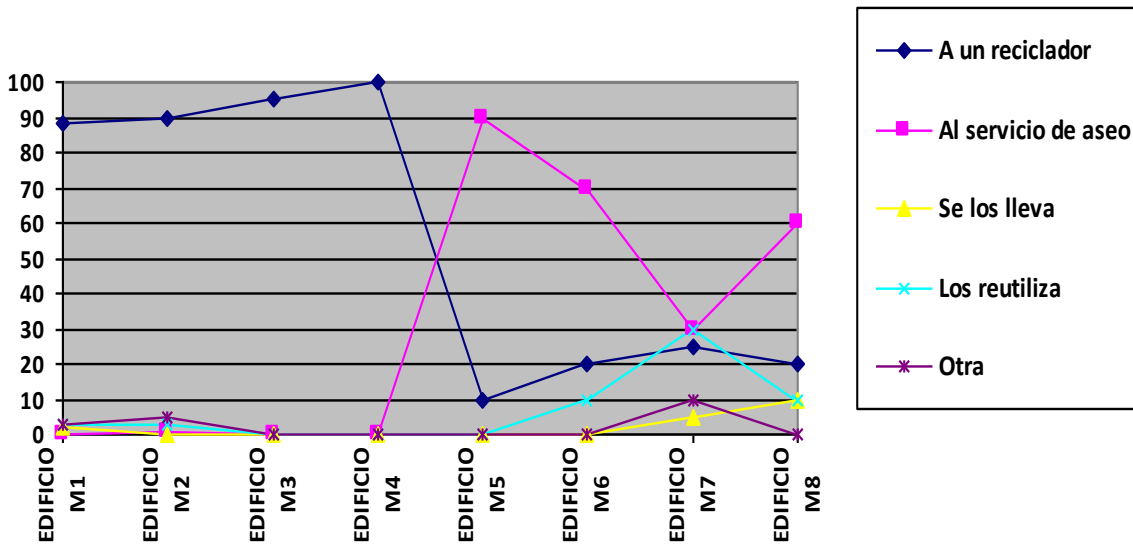
Gráfica 10. Encuesta en edificios “EPFEM”, ¿Dónde depositas los residuos sólidos que desechas?



Fuente: elaboración propia.

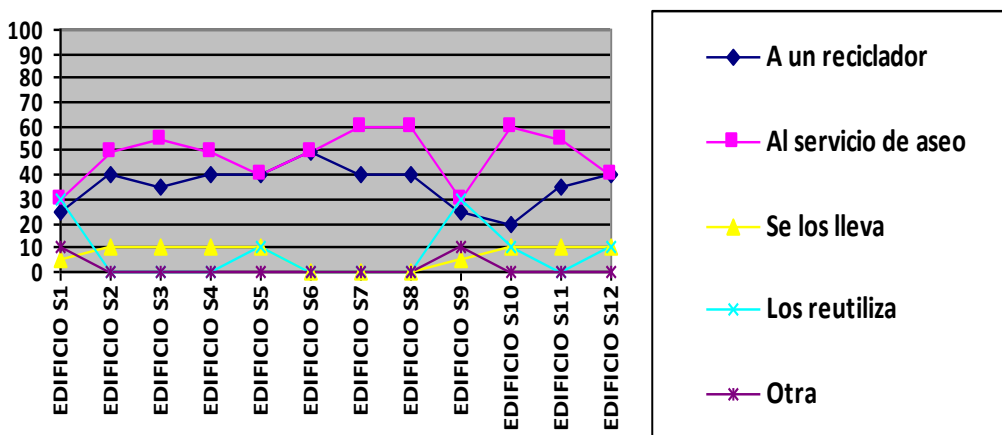
Anexo 4. Pregunta No. 3 encuesta realizada en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica 11. Encuesta en edificios “M”, ¿Qué haces con los residuos que desechas?



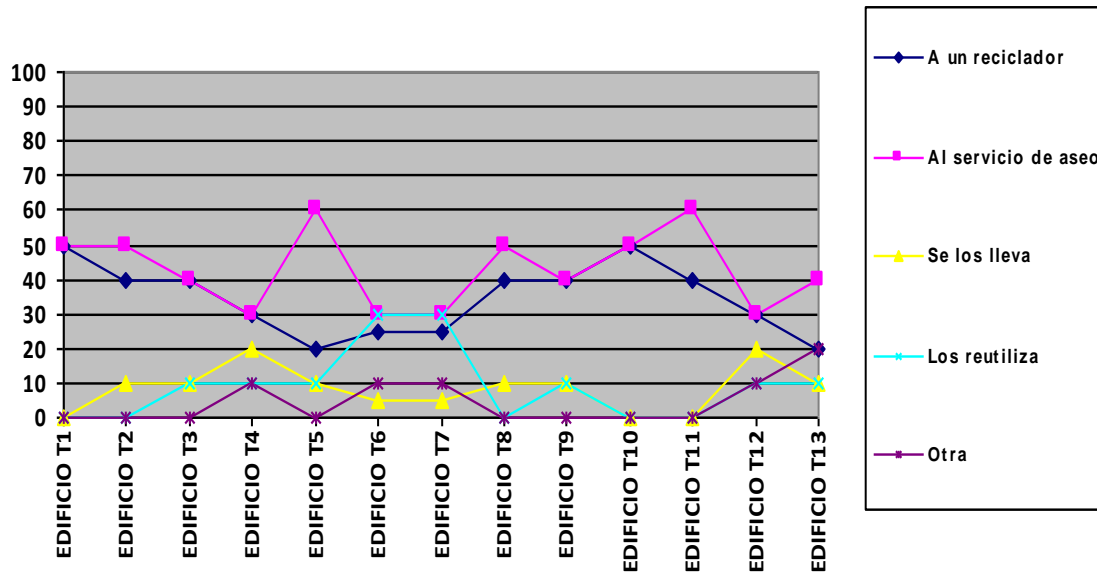
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 12. Encuesta en edificios “S”, ¿Qué haces con los residuos que desechas?



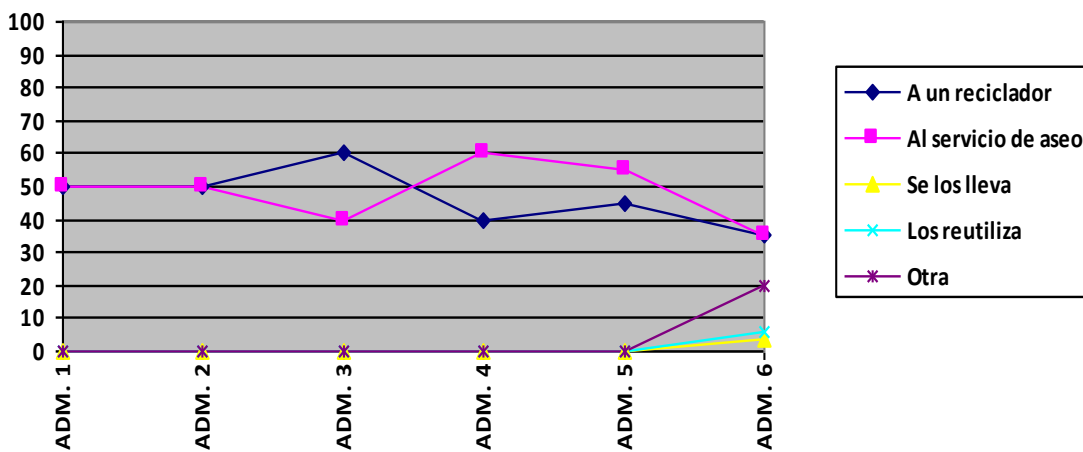
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 13. Encuesta en edificios “T”, ¿Qué haces con los residuos que desechas?



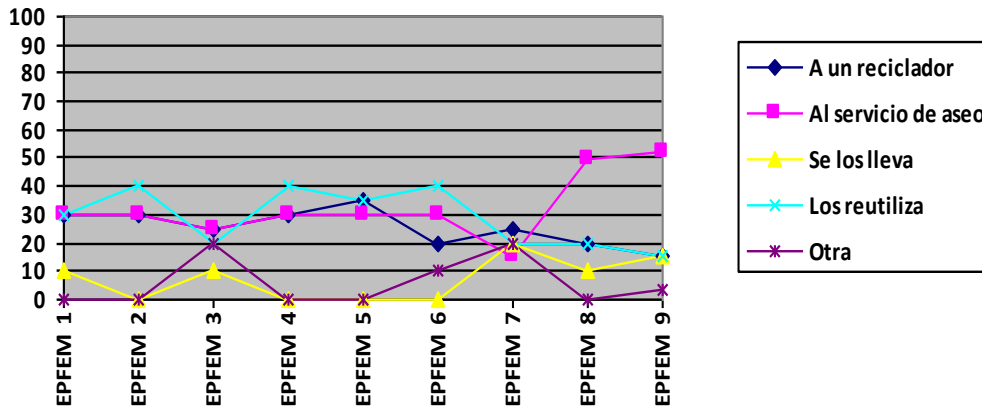
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 14. Encuesta en edificios “Administración”, ¿Qué haces con los residuos que desechas?



Fuente: elaboración propia.

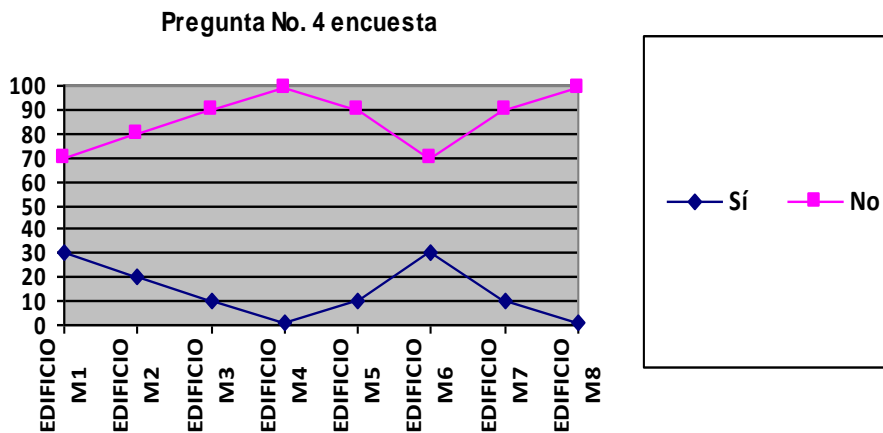
Gráfica 15. Encuesta en edificios “EPFEM”, ¿Qué haces con los residuos que desechas?



Fuente: elaboración propia.

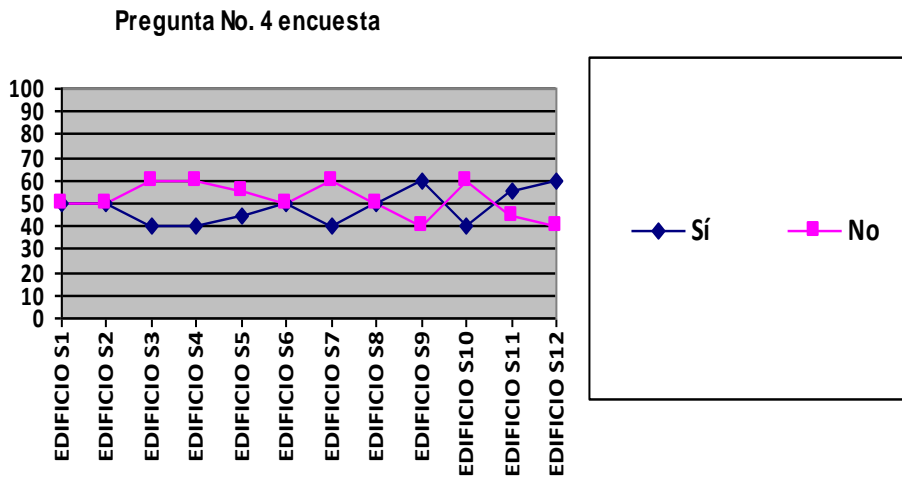
Anexo 5. Pregunta No. 4 Encuesta realizada en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica 16. Encuesta en edificios “M”, ¿Usted cree que son suficientes los contenedores de basura que están en la Universidad de San Carlos de Guatemala?



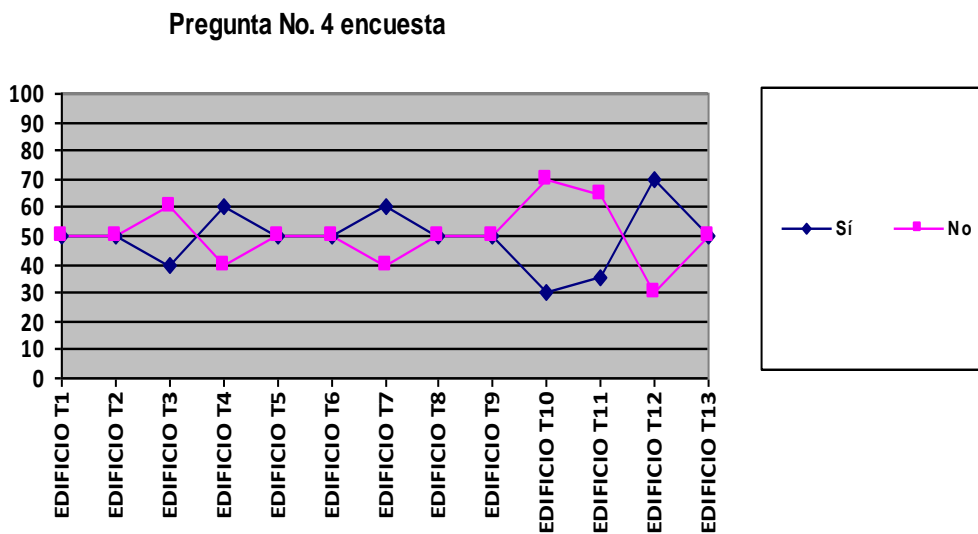
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 17. Encuesta en edificios “S”, ¿Usted cree que son suficientes los contenedores de basura que están en la Universidad de San Carlos de Guatemala?



Fuente: elaboración propia.

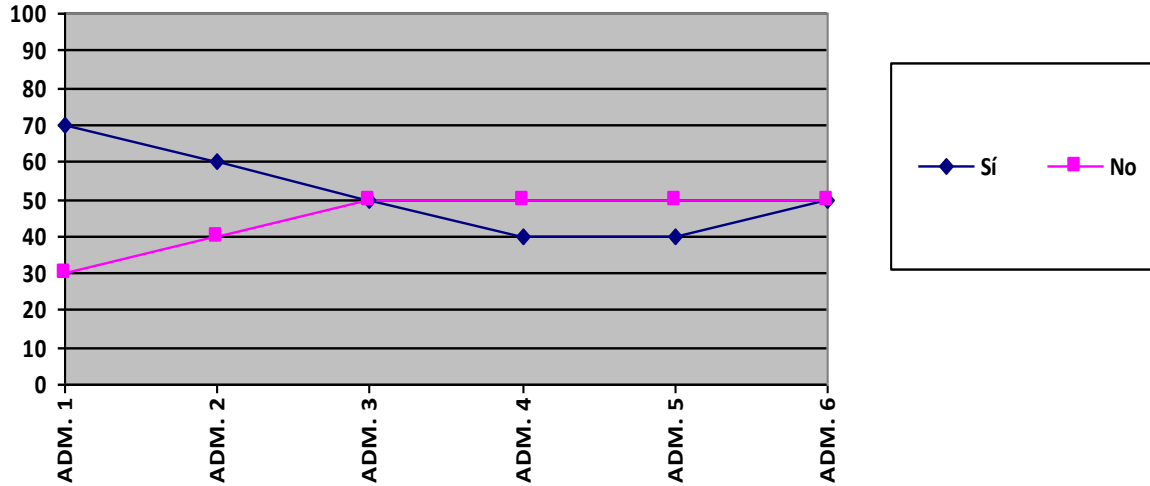
Gráfica 18. Encuesta en edificios “T”, ¿Usted cree que son suficientes los contenedores de basura que están en la Universidad de San Carlos de Guatemala?



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 19. Encuesta en edificios “Administración”, ¿Usted cree que son suficientes los contenedores de basura que están en la Universidad de San Carlos de Guatemala?

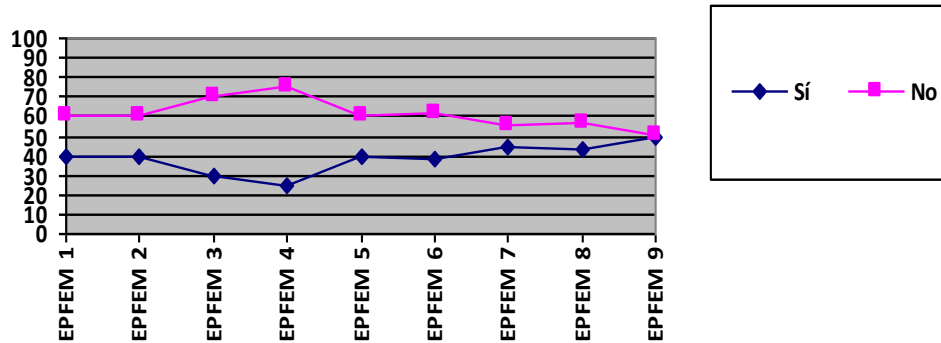
Pregunta No. 4 encuesta



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 20. Encuesta en edificios “EPFEM”, ¿Usted cree que son suficientes los contenedores de basura que están en la Universidad de San Carlos de Guatemala?

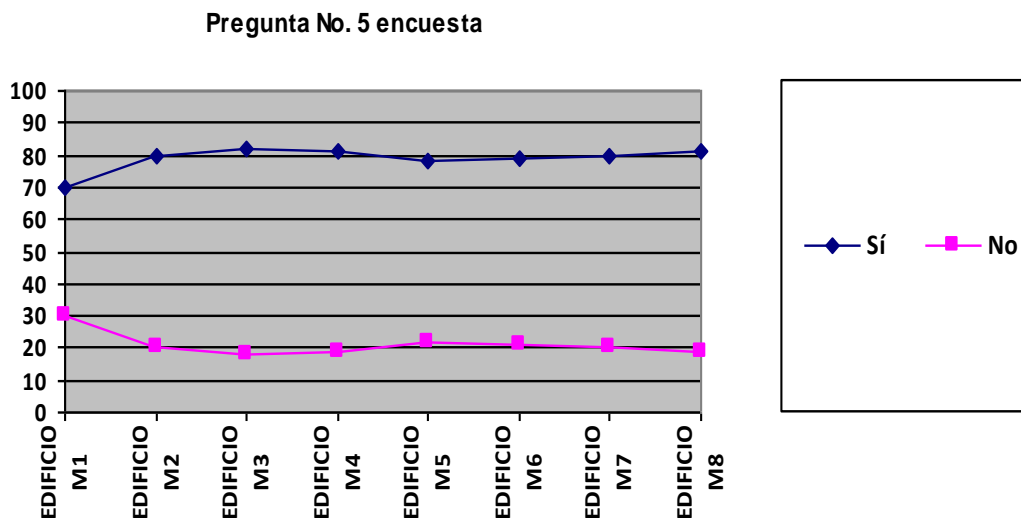
Pregunta No. 4 encuesta



Fuente: elaboración propia.

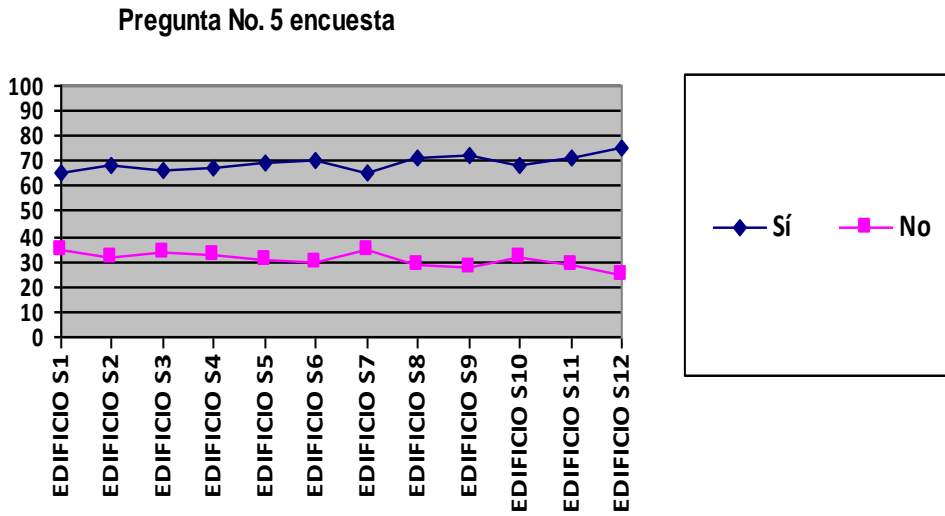
Anexo 6. Pregunta No. 5 ¿Usted cree que los contenedores de basura en la Universidad de San Carlos de Guatemala, deben estar para cada tipo de residuos. Es decir, un recipiente para los residuos orgánicos (cáscaras, residuos de comida, residuos de verduras, legumbres etc.), residuos inorgánicos (plástico, hojalatas, vidrio etc.) y residuos ordinarios inertes (servilletas, empaques de papel plastificados, polvo, basura, etc.)?

Gráfica 21. Encuesta en edificios “M”, pregunta No. 5



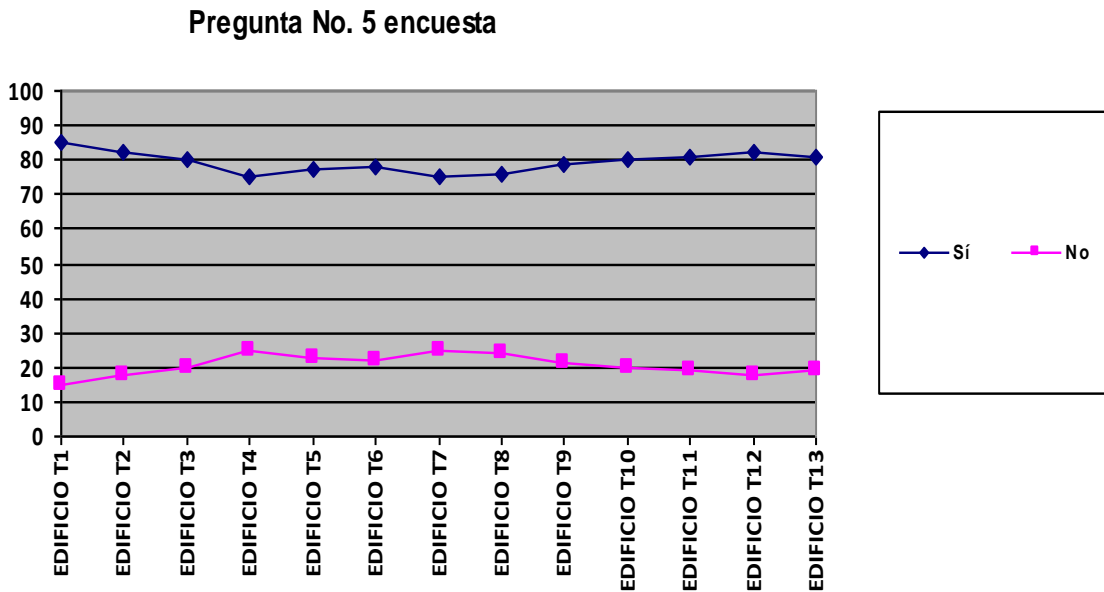
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 22. Encuesta en edificios “S”, pregunta No. 5



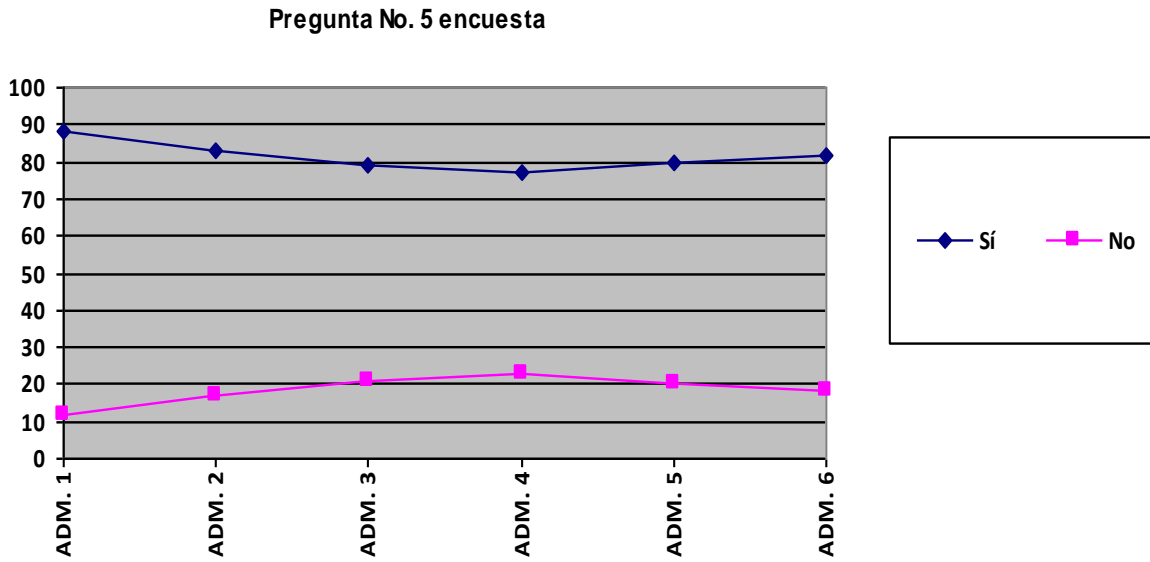
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 23. Encuesta en edificios “T”, pregunta No. 5



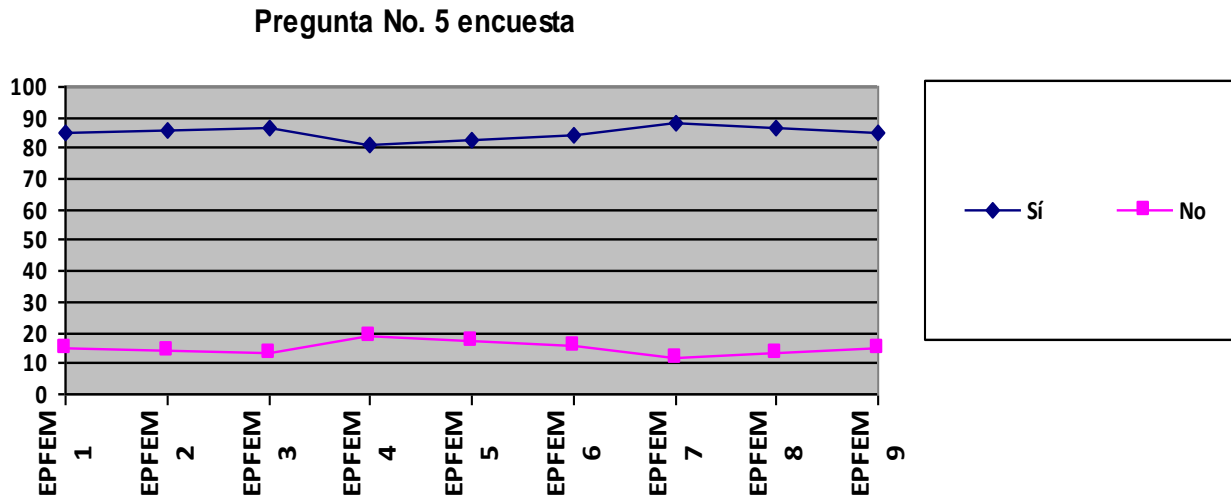
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 24. Encuesta en edificios “Administración”, pregunta No. 5



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 25. Encuesta en edificios “EPFEM”, pregunta No. 5

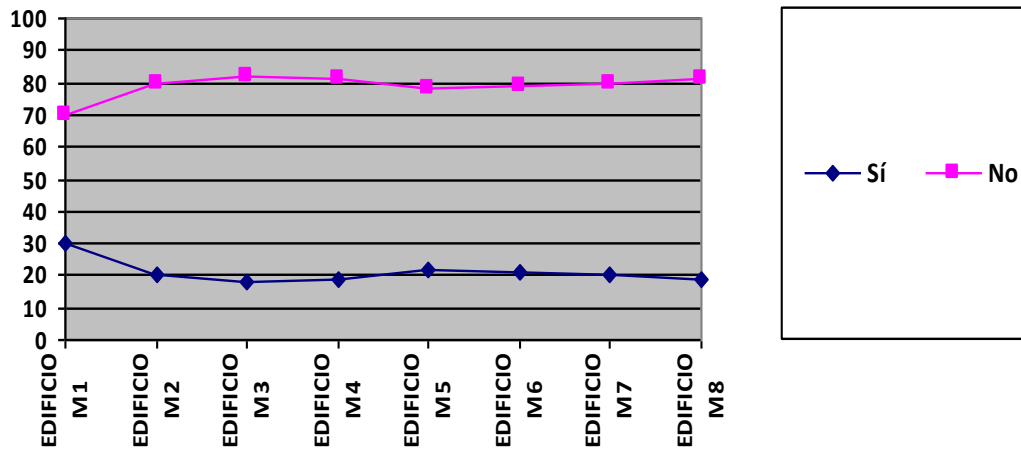


Fuente: elaboración propia.

Anexo 7. Pregunta No. 6 ¿Usted ha recibido algún tipo de capacitación para manejar adecuadamente los residuos dentro de la Universidad?

Gráfica 26. Encuesta en edificios “M”, pregunta No. 6

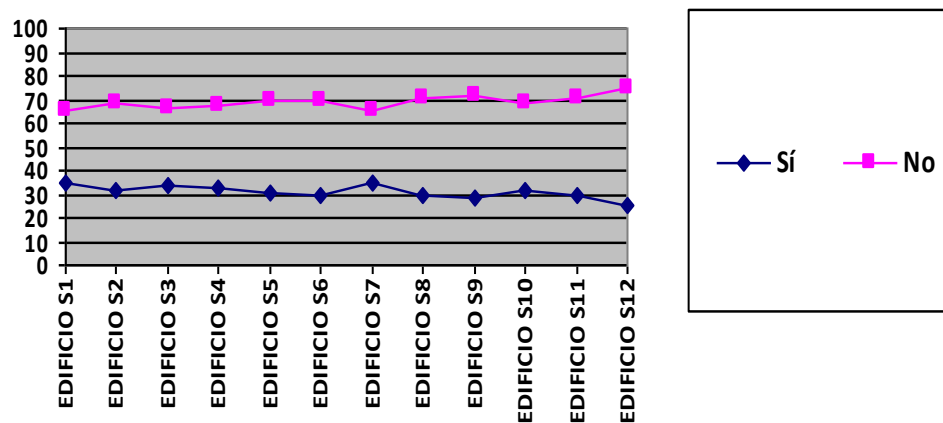
Pregunta No. 6 encuesta



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 27. Encuesta en edificios “S”, pregunta No. 6

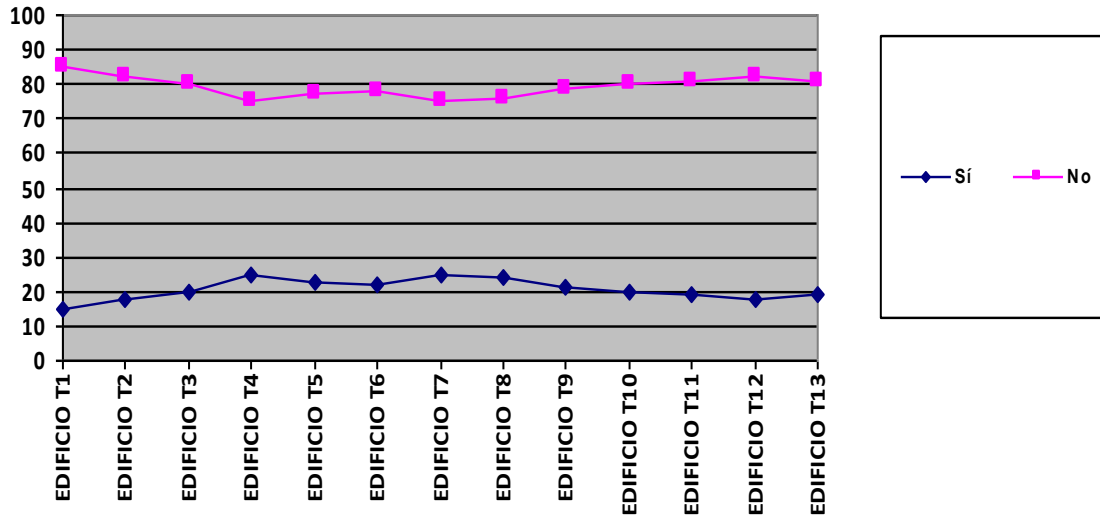
Pregunta No. 6 encuesta



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 28. Encuesta en edificios “T”, pregunta No. 6

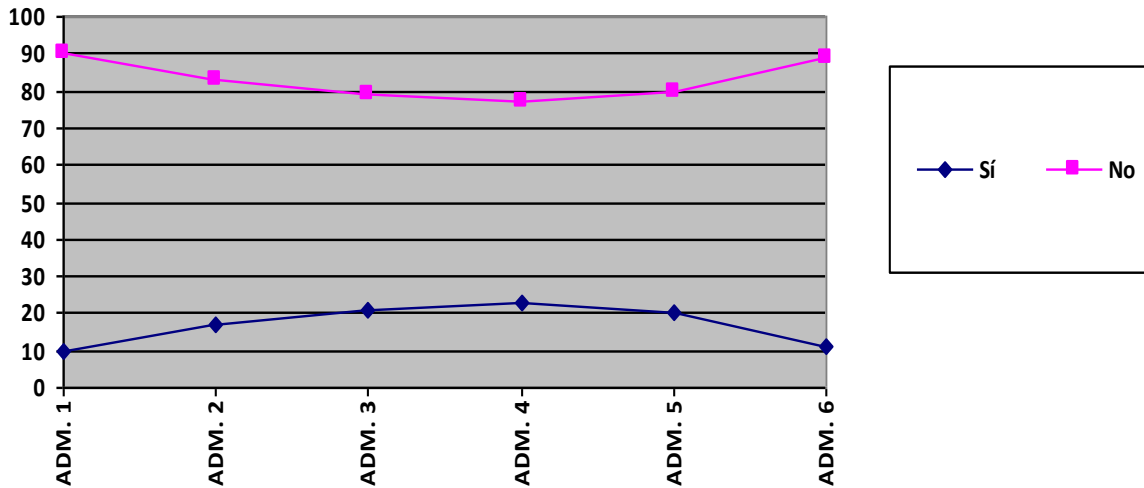
Pregunta No. 6 encuesta



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 29. Encuesta en edificios “Administración”, pregunta No. 6

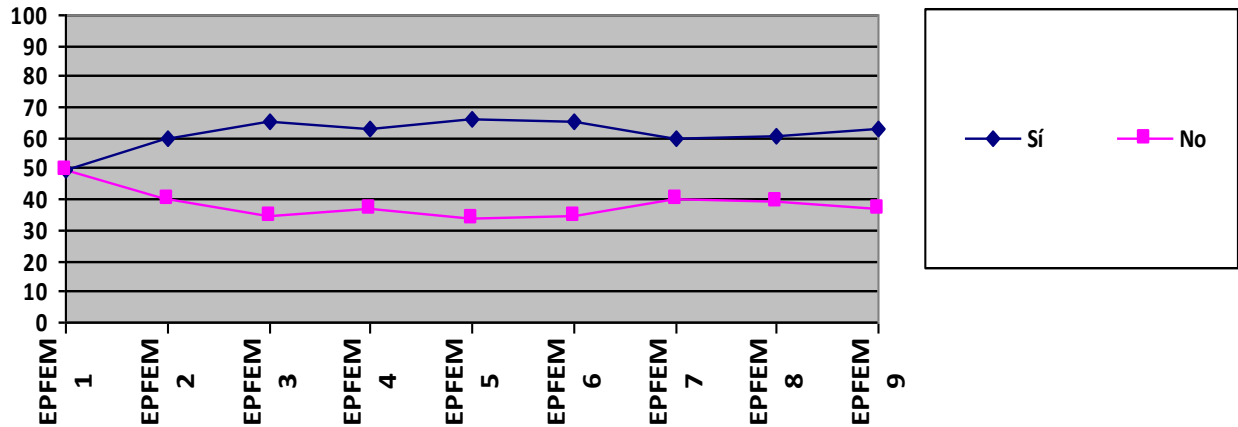
Pregunta No. 6 encuesta



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 30. Encuesta en edificios “EPFEM”, pregunta No. 6

Pregunta No. 6 encuesta

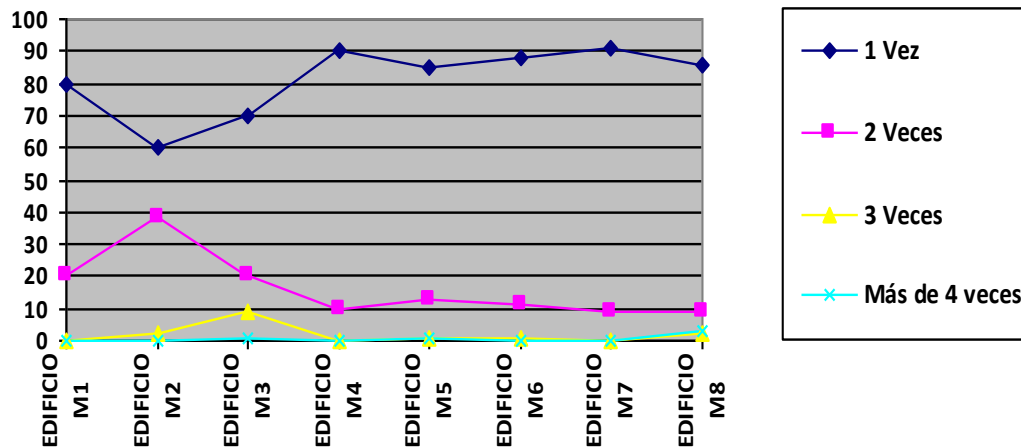


Fuente: elaboración propia.

Anexo 8. Pregunta No. 8 ¿Cuántas veces al día defeca?

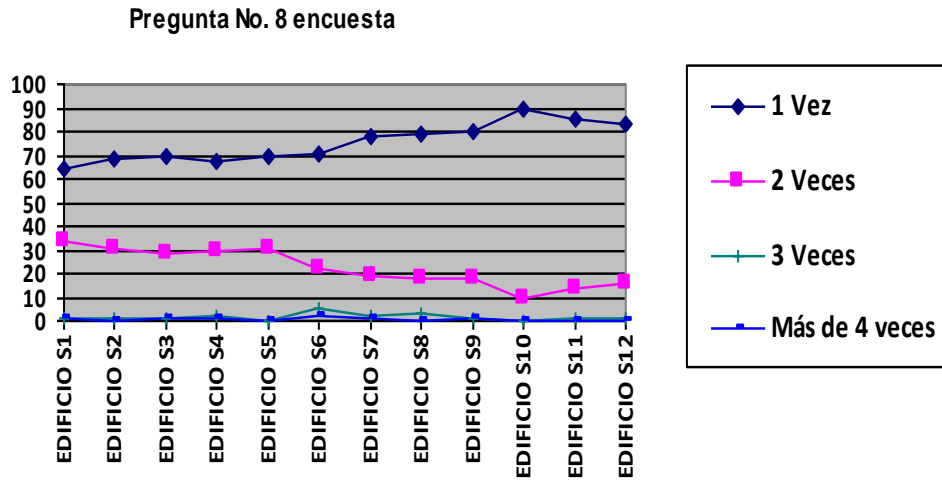
Gráfica 31. Encuesta en edificios “M”, pregunta No. 8

Pregunta No. 8 encuesta



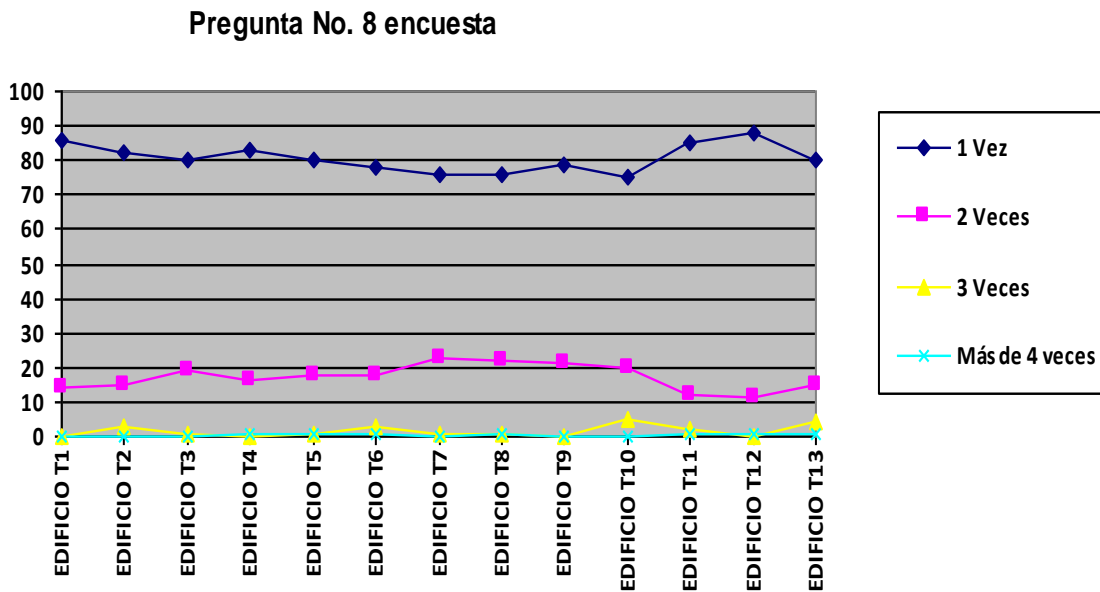
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 32. Encuesta en edificios “S”, pregunta No. 8



Fuente: elaboración propia.

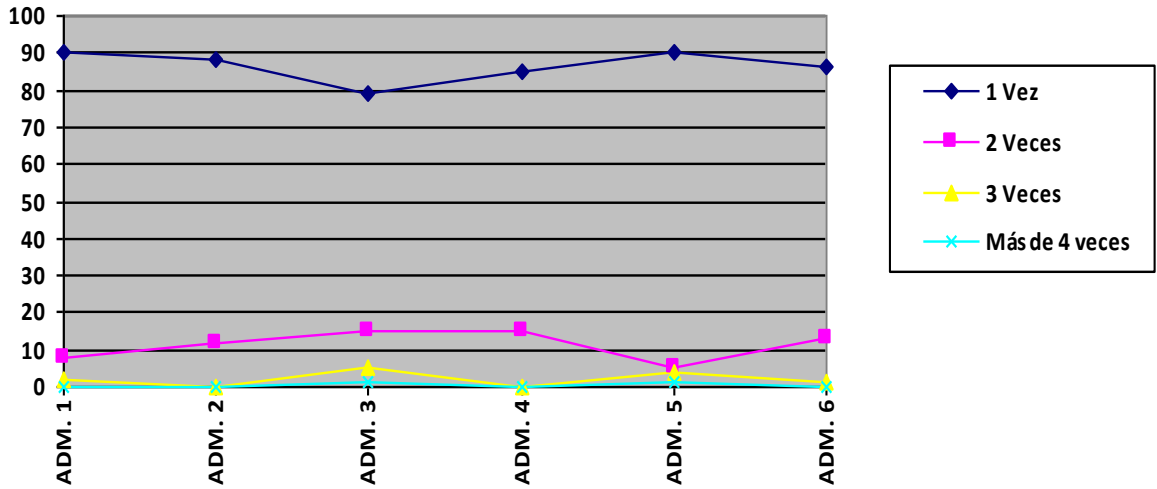
Gráfica 33. Encuesta en edificios “T”, pregunta No. 8



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 34. Encuesta en edificios “Administración”, pregunta No. 8

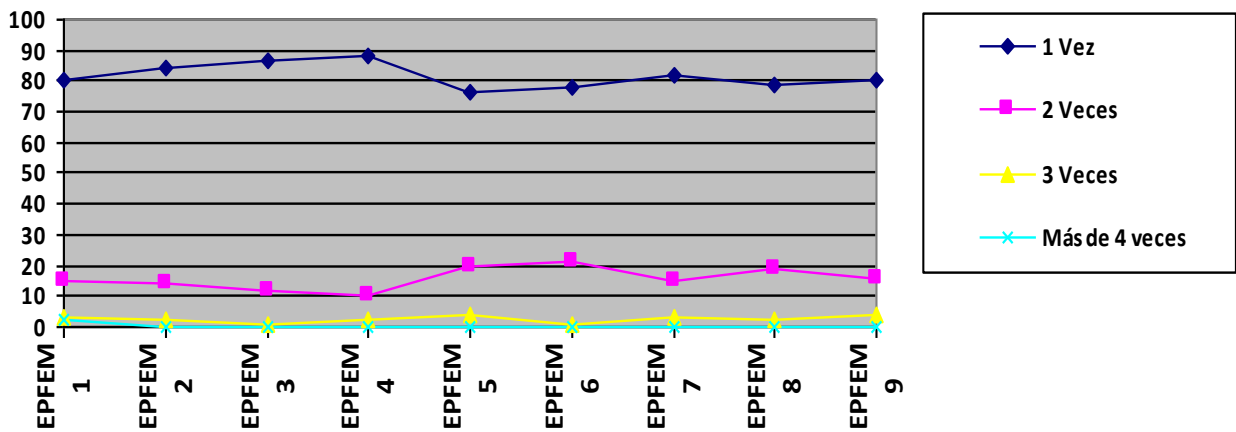
Pregunta No. 8 encuesta



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 35. Encuesta en edificios “EPFEM”, pregunta No. 8

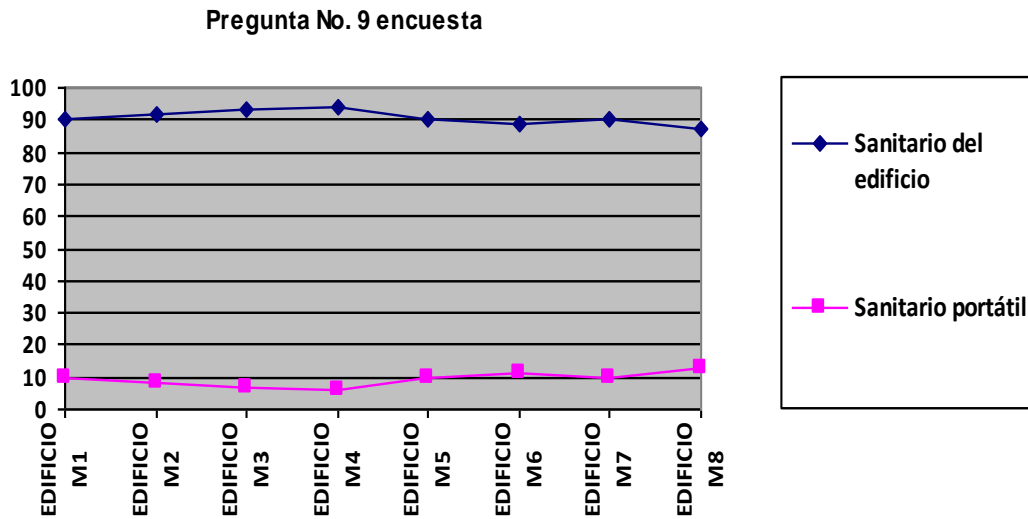
Pregunta No. 8 encuesta



Fuente: elaboración propia.

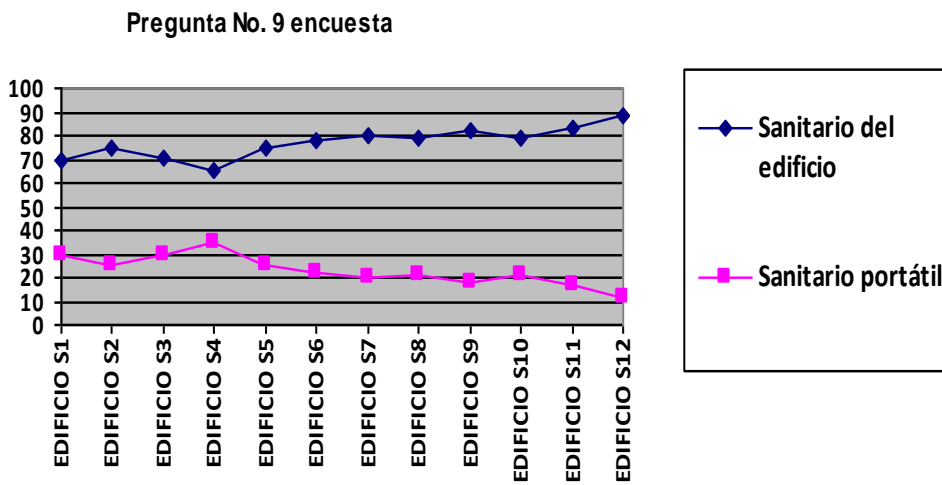
Anexo 9. Pregunta No. 9 ¿Si usted tiene necesidad de utilizar un sanitario dentro de la Universidad y tiene a su disposición los sanitarios del edificio y un sanitario portátil, cuál usaría?

Gráfica 36. Encuesta en edificios “M”, pregunta No. 9



Fuente: elaboración propia.

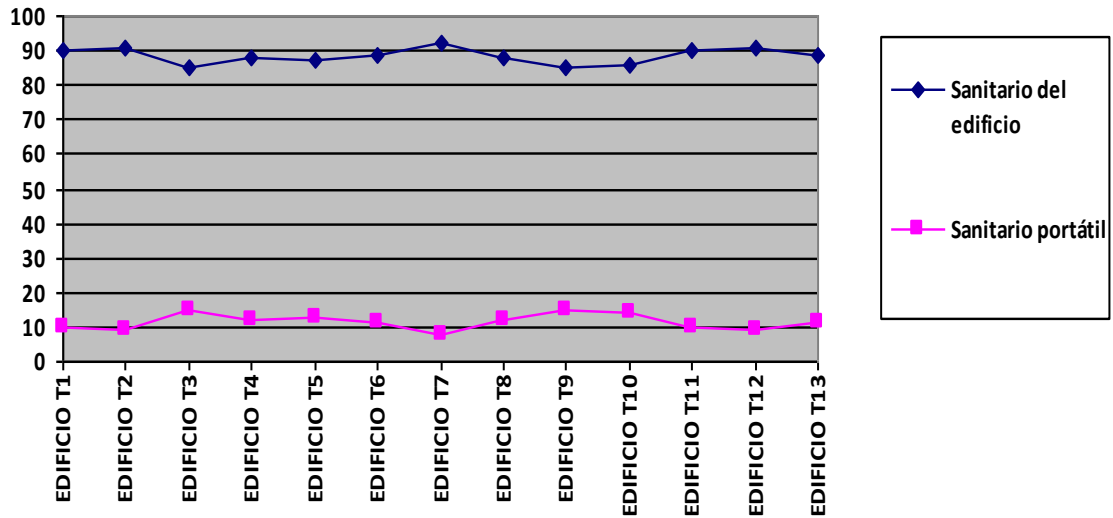
Gráfica 37. Encuesta en edificios “S”, pregunta No. 9



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 38. Encuesta en edificios “T”, pregunta No. 9

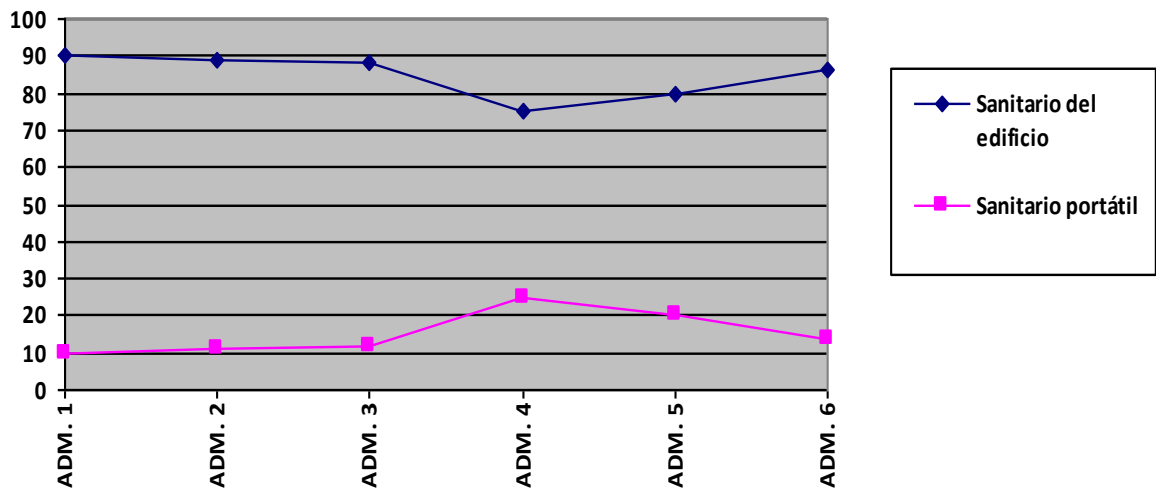
Pregunta No. 9 encuesta



Fuente: elaboración propia.

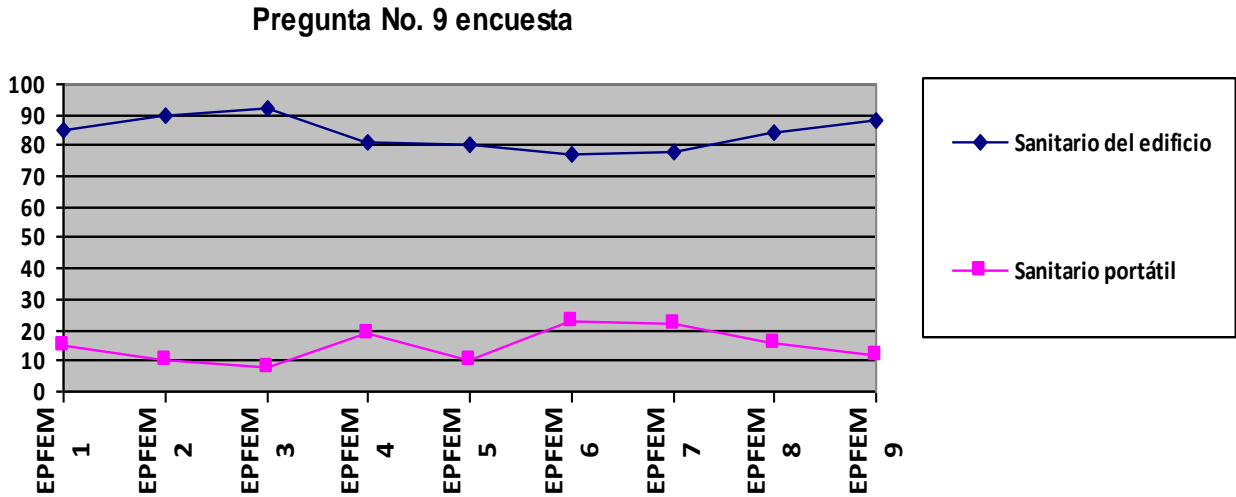
Gráfica 39. Encuesta en edificios “Administración”, pregunta No. 9

Pregunta No. 9 encuesta



Fuente: elaboración propia.

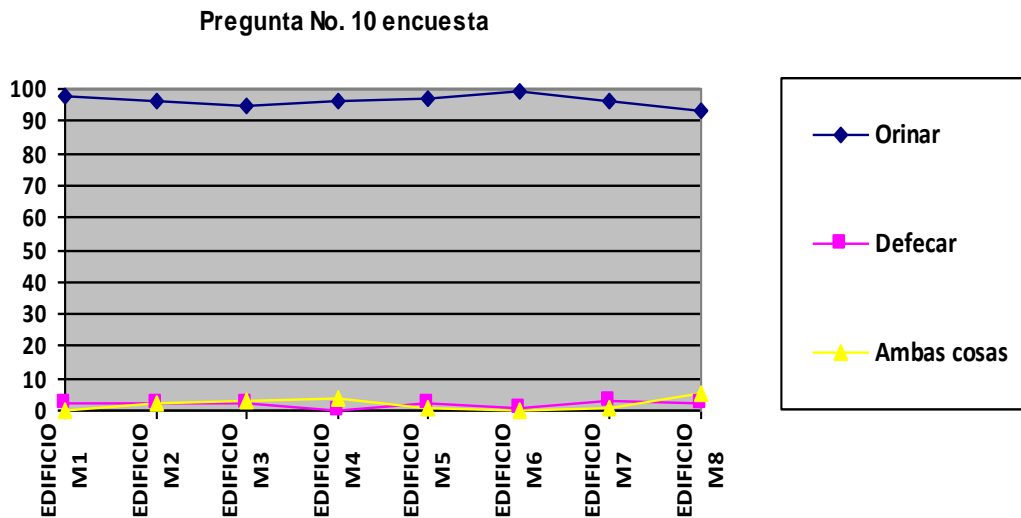
Gráfica 40. Encuesta en edificios “EPFEM”, pregunta No. 9



Fuente: elaboración propia.

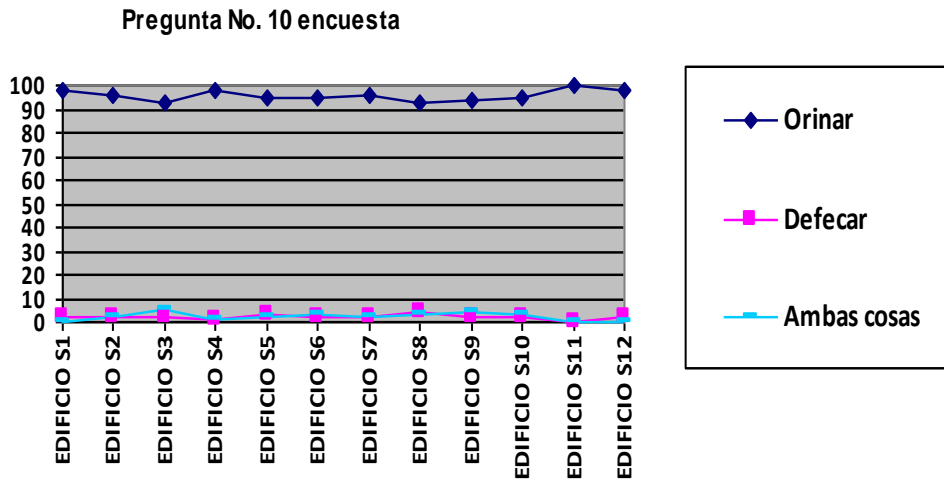
Anexo 10. Pregunta No. 10 ¿Si se implementa en la Universidad el uso de sanitario portátil, a las afueras de su edificio lo usaría para?

Gráfica 41. Encuesta en edificios “M”, pregunta No. 10



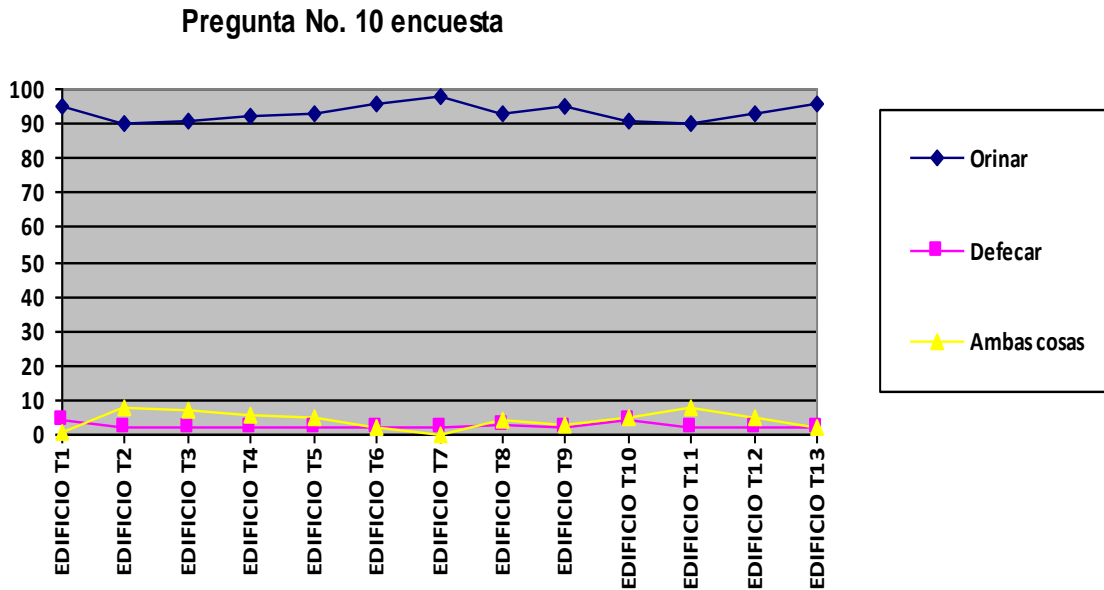
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 42. Encuesta en edificios “S”, pregunta No. 10



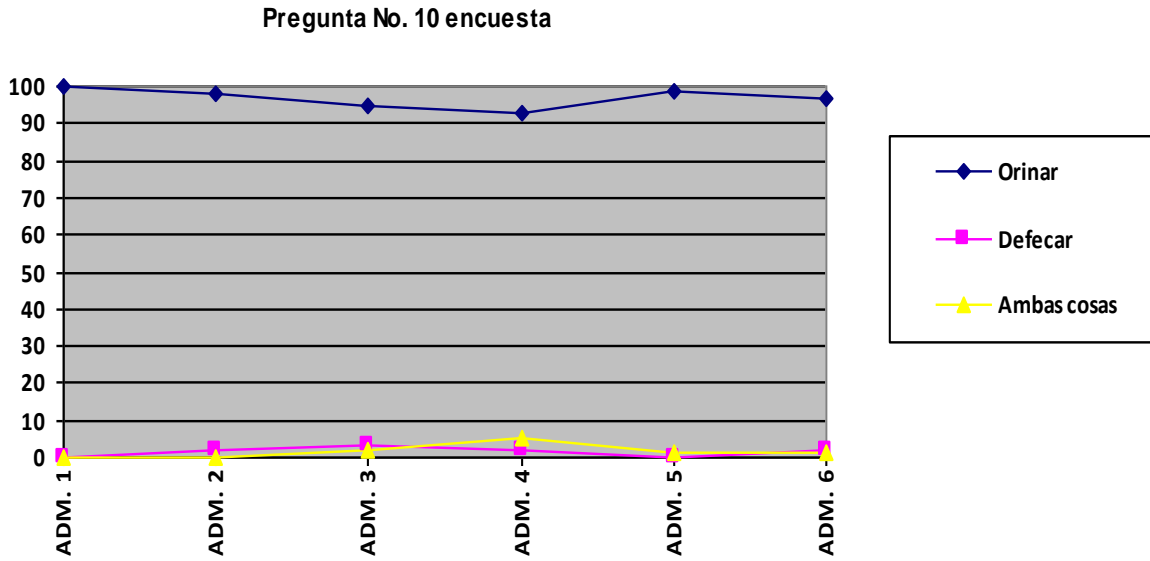
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 43. Encuesta en edificios “T”, pregunta No. 10



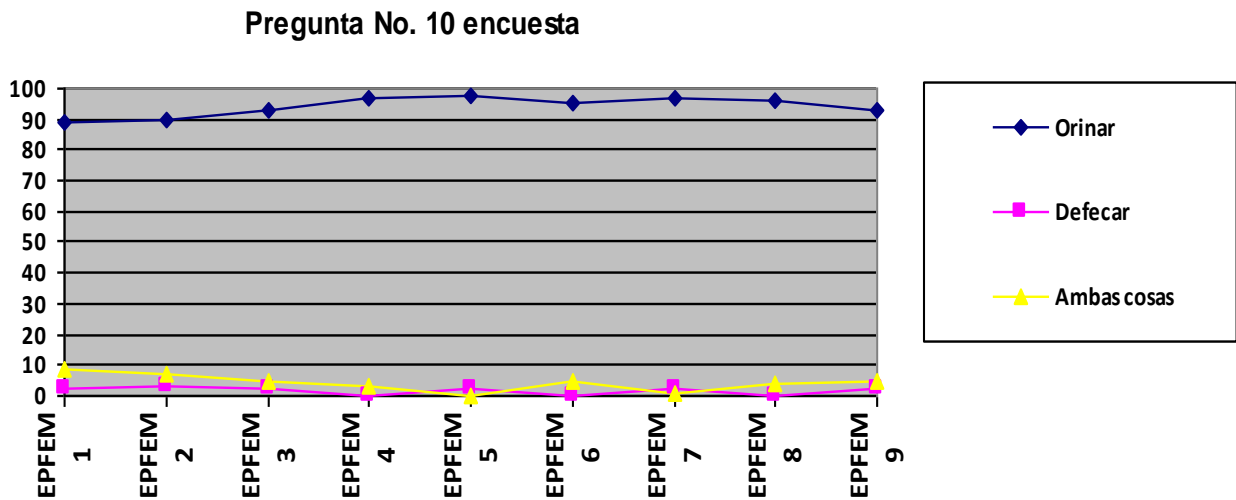
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 44. Encuesta en edificios “Administración”, pregunta No. 10



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 45. Encuesta en edificios “EPFEM”, pregunta No. 10



Fuente: elaboración propia.

