

PROYECTO DE GRADO

**ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA
GENERADORA DE ENERGÍA A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS DEL ORIENTE
ANTIOQUEÑO**

SUSANA ÁLVAREZ JARAMILLO

Cód. 200910008004

DANIELA DUQUE GARCÍA

Cód. 209910016004

Asesora:

CAROLINA OSORIO GÓMEZ

Ingeniera Ambiental

Especialista en Legislación Ambiental

Coasesor:

PABLO HERNÁNDEZ ARANGO

Ingeniero Químico

Msc. Ingeniería Química

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS

MEDELLÍN

2014

Nota de Aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, Noviembre 11 de 2014

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría aprovechar este espacio para agradecer no solo a las personas que fueron fundamentales en el desarrollo de este proyecto de grado sino a quienes nos apoyaron a través de estos 6 años de aprendizaje. Para comenzar quisiéramos dedicar este proyecto a nuestros padres y hermanos, pues nos acompañaron incondicionalmente día a día celebrando nuestros logros y dándonos una mano y un consejo de apoyo cuando más los necesitábamos.

Agradecemos también a todos los profesores que compartieron con nosotros sus conocimientos y nos dieron valiosas lecciones de vida que nos formaron no solo como profesionales sino como personas íntegras. Por supuesto a nuestros amigos con quienes vivimos innumerables momentos de risa, de estrés y de satisfacción, y quienes finalmente terminaron convirtiéndose en nuestra segunda familia.

Nos gustaría agradecer a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto, a Ambiental Mente S.A.S en especial a Alberto Mejía por confiar en nosotras y en nuestras capacidades para llevarlo a cabo. A Yuan Kuan Duque que siempre llevaremos en nuestro corazón por ser un gran profesor y persona, y por apoyarnos incondicionalmente durante el comienzo de este trabajo. Finalmente agradecemos al ingeniero Pablo Hernández Arango por dedicarnos tantas horas y porque su colaboración, su motivación y sus aportes contribuyeron enormemente en nuestra formación como ingenieras y nos permitieron finalizar este proyecto con éxito.

RESUMEN

Se realizó un análisis de pre factibilidad para determinar la viabilidad de construir una planta de biodigestión anaerobia de residuos orgánicos generados en empresas del Oriente Antioqueño para producir energía. Para ello se diseñó de manera conceptual dicha planta y paralelamente se buscaron ofertas comerciales de proveedores internacionales para este mismo tipo de planta. Esto se hizo con el fin de evaluar cuál de las dos opciones resulta técnica y financieramente más factible.

Para determinar la cantidad de material orgánico a tratar en la planta de biodigestión, se visitaron 13 compañías generadoras de residuos orgánicos de las cuales se seleccionaron 8 como posibles proveedores de materia prima para la planta. Estas compañías suministrarían 6 742 ton/año en total. Mediante pruebas fisicoquímicas realizadas en laboratorios de la Universidad de Antioquía se evaluaron los residuos provenientes de las empresas seleccionadas y se determinó que su potencial de generación de biogás es de 611 647 m³/año con una composición de metano de 55,5%v y un poder calorífico teórico de 4 479 kcal/kg.

Con los datos de material orgánico aportado por cada compañía, generación de biogás y cotizaciones a diferentes proveedores, se decidió producir y vender energía eléctrica para la compañía el Ranchero, pues aporta 88,7% de materia prima y se decidió ubicar la planta de biodigestión contigua a esta debido a facilidades de transporte. Se calculó una producción de energía eléctrica total de 1 056 666 kW/año.

A partir de los datos obtenidos por parte de proveedores internacionales se realizó la evaluación financiera para un periodo de 10 años incluyendo los costos de inversión, ingresos, egresos y costos de operación. Se obtuvo un VPN negativo de 9 729 MMCOP. La evaluación financiera para la planta diseñada arrojó un VPN negativo de 5 564 MMCOP, mostrando que bajo los parámetros y condiciones evaluadas el proyecto no resulta factible para ninguna de las 2 tecnologías.

Palabras Clave: residuos orgánicos, biodigestión anaerobia, producción de biogás, producción de energía, aprovechamiento de residuos orgánicos, Oriente Antioqueño

ABSTRACT

A prefeasibility analysis was performed to determine the viability of building an anaerobic digestion plant for energy production with organic waste generated in Oriente Antioqueño companies. For this purpose the plant was conceptually designed and simultaneously trade offers from international suppliers for the same type of plant were searched. This was done in order to assess which of the two options were technically and financially feasible.

To determine the amount of organic material to be treated in the biodigestión plant, 13 organic waste generating companies were visited of which 8 were selected as potential suppliers of raw materials for the plant. These companies would supply 6742 ton / year in total. By physicochemical tests in laboratories of the University of Antioquia waste from selected companies were evaluated and it was found that their potential for biogas production was 611,647 m³ / year with a composition of 55.5% methane and a theoretical calorific value of 4479 kcal / kg.

With data from the organic material provided by each company, biogas rate production and offers from different suppliers, it was decided to produce and sell electricity to the company El Ranchero, as it provides 88.7% of raw material so it was determined to locate the biodigestión plant next to it because of transportation facilities. A total production of electricity of 1,056,666 kW / year was calculated.

From the data obtained from international providers a financial evaluation was performed including investment costs, revenues, expenses and operating costs and it was found a negative NPV of 9 729 MMCOP while financial assessment for plant designed to throw a negative NPV of 5 564 MMCOP showing that under the conditions and evaluated parameters the project is not feasible for any of the two technologies.

Key Words: Organic waste, anaerobic digestion, biogas production, energy production, organic waste utilization, Oriente Antioqueño

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
CAPITULO 1. GENERALIDADES	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo general	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.2.3 Alcance del proyecto	18
1.3 Justificación.....	19
1.4 Metodología.....	20
1.4.1 Identificación de la oferta de material orgánico en el Oriente Antioqueño ...	20
1.4.2 Identificar la demanda de energía eléctrica o térmica	21
1.4.3 Estimar la producción de metano del material orgánico seleccionado y la generación eléctrica.....	21
1.4.4 Evaluación de tecnologías	22
1.4.5 Análisis financiero.....	23
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	24
2.1 Residuos sólidos	24
2.1.1 Residuos no biodegradables	25
2.1.2 Residuos biodegradables	25
2.2 Digestión anaerobia.....	26
2.2.1 Generalidades de la digestión anaerobia.....	26
2.3 Purificación del biogás.....	33
2.3.1 Remoción de sulfuro de hidrógeno	34
2.3.2 Remoción de vapor de agua.....	35
2.3.3 Remoción de amoníaco.....	35
2.3.4 Remoción de dióxido de carbono.....	36
2.4 Modelos para calcular el potencial de biogás.....	37
2.4.1 Modelo de Buswell extendido	37
2.4.2 Modelo EMCON Associates	38

2.4.3	Modelo de la IPCC.....	38
2.5	Producción energética con biogás	39
2.5.1	Combustión de biogás	39
2.5.2	Tecnologías para la producción de energía con biogás	40
2.6	Otros equipos requeridos en una planta de biodigestión	44
2.7	Aprovechamiento de bio-lodos.....	46
2.8	Impacto ambiental de una planta de digestión anaerobia	48
2.9	Estado de la tecnología de digestión anaerobia en el mundo.	49
2.9.1	Estado de la tecnología de digestión en Colombia	50
CAPITULO 3.	MODELOS DE CÁLCULO	54
3.1	Cálculo del potencial de biogás	54
3.2	Dimensionamiento de tanques cilíndricos.....	54
3.3	Silo para almacenamiento de sólidos.....	55
3.4	Tanque de biodigestión	58
CAPITULO 4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	60
4.1	Oferta de residuos orgánicos.....	60
4.1.1	Selección de empresas	64
4.1.2	Logística de recepción de materia prima	66
4.2	Demanda de energía	67
4.3	Determinación del potencial de biogás del material orgánico.....	69
4.3.1	Reporte de pruebas de laboratorio	72
4.3.2	Cálculo del potencial de biogás	74
4.3.3	Análisis de disposición de los bio-lodos.....	88
4.3.4	Poder calorífico del biogás.....	90
4.4	Evaluación de tecnologías de biodigestión	92
4.4.1	Proveedores internacionales de tecnologías de biodigestión.....	92
4.4.2	Diseño conceptual de la planta de biodigestión anaerobia.....	96
4.5	Análisis económico y financiero del proyecto.....	138
4.5.1	Evaluación financiera tecnología diseñada.	140

4.5.2	Evaluación financiera tecnología OWS-DRANCO	147
CAPITULO 5.	CONCLUSIONES.....	150
CAPITULO 6.	RECOMENDACIONES.....	152
CAPITULO 7.	REFERENCIAS	153
CAPITULO 8.	ANEXOS	160

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Caracterización relativa para la co-digestión de diferentes residuos orgánicos [14].	28
Tabla 2.2. Concentración y propiedades de los componentes del biogás [2]	31
Tabla 2.3 Concentraciones tóxicas de algunos elementos en la materia prima [12]	32
Tabla 2.4. Métodos típicos de remoción de H₂S [23]	34
Tabla 2.5. Métodos comunes para la remoción de vapor de agua de biogás [26]	35
Tabla 2.6. Métodos comunes de potenciación de biogás [25]	36
Tabla 2.7. Potencial de biogás de la biomasa residual en Colombia [53]	50
Tabla 4.1. Empresas visitadas durante el proyecto	61
Tabla 4.2. Datos tabulados generación de residuos orgánicos	63
Tabla 4.3. Evaluación de flujo de material	64
Tabla 4.4. Matriz de selección	65
Tabla 4.5. Evaluación del promedio	65
Tabla 4.6. Suministro de material orgánico líquido semanal	66
Tabla 4.7. Suministro de material orgánico sólido semanal	66
Tabla 4.8. Datos tabulados demanda y costo de energía eléctrica y térmica	67
Tabla 4.9. Composición porcentual de las mezclas elaboradas para análisis fisicoquímicos correspondientes al Día 1	71
Tabla 4.10. Composición porcentual de las mezclas elaboradas para análisis fisicoquímicos correspondientes al Día 2	71
Tabla 4.11. Análisis elemental de las mezclas del Día 1	72
Tabla 4.12. Análisis fisicoquímico de las mezclas del Día 1	72
Tabla 4.13. Análisis elemental de las mezclas del Día 2	73
Tabla 4.14. Análisis fisicoquímico de las mezclas del Día 2	73
Tabla 4.15. Caracterización de material inorgánico y otros análisis físicos para la mezcla compuesta de las empresas seleccionadas	74
Tabla 4.16. Modelos de descomposición biológica empleados en los artículos de referencia	75
Tabla 4.17. Comparación de la composición del biogás en metano calculada a partir del modelo extendido de Buswell con composiciones reportadas por otros autores	76
Tabla 4.18 Validación de la composición elemental reportada en las pruebas de laboratorio para la mezcla de líquidos- Día 1	77
Tabla 4.19 Cálculo de la composición elemental reportada en las pruebas de laboratorio para la mezcla de las empresas más grandes –Día 2	77
Tabla 4.20. Pesos moleculares	78
Tabla 4.21. Índices estequiométricos y coeficientes del modelo de Buswell para mezclas del Día 1	78
Tabla 4.22. Índices estequiométricos y coeficientes del modelo de Buswell para mezclas del Día 2	78
Tabla 4.23. Información del alimento al digester de las mezclas del Día 1	79
Tabla 4.24. Información del alimento al digester de las mezclas del Día 2	80

Tabla 4.25. Densidad de los componentes del biogás	80
Tabla 4.26. Composición del biogás producido por las mezclas del Día 1 en base húmeda	81
Tabla 4.27. Composición del biogás producido por las mezclas del Día 2 en base húmeda	81
Tabla 4.28. Producción de biogás en diferentes unidades en base húmeda, Día 1 ..	81
Tabla 4.29. Producción de biogás en diferentes unidades en base húmeda, Día 2 ..	82
Tabla 4.30. Composición elemental ajustada para las muestras del Día 1	83
Tabla 4.31. Concentraciones de elementos tóxicos en las muestras del Día 1	83
Tabla 4.32. Flujo de alimento para la producción de biogás antes y después de la recirculación	84
Tabla 4.33. Flujo de materia prima por componentes para la producción de biogás antes y después de recirculación	84
Tabla 4.34 Fórmula molecular empírica para la degradación de material orgánico de la mezcla de las tres empresas más grandes	85
Tabla 4.35. Flujo y composición del biogás real producido a partir de la ecuación de Buswell antes y después de recirculación	86
Tabla 4.36 Composición por componente del digestato generado durante el proceso	86
Tabla 4.37 Flujo de digestato recirculado y extraído por componentes	87
Tabla 4.38 Flujos de energía asociados al uso del digestato como combustible	89
Tabla 4.39 Composición porcentual de macro y micronutrientes del digestato extraído	90
Tabla 4.40. Composición elemental del biogás en base seca para la mezcla compuesta grandes-Día 1	91
Tabla 4.41. Poder calorífico inferior y superior del biogás sin remoción de contaminantes	91
Tabla 4.42. Poder calorífico inferior y superior del biogás con remoción de contaminantes	92
Tabla 4.43. Costos asociados a la construcción y operación de una planta de biodigestión de OWS a diferentes capacidades anuales	96
Tabla 4.44. Lista de equipos	99
Tabla 4.45 Tabla de servicios industriales	99
Tabla 4.46 Tabla de corrientes	100
Tabla 4.47. Información acero inoxidable y fibra de vidrio	101
Tabla 4.48. Información tubería en acero al carbono	101
Tabla 4.49. Información de entrada para el diseño de las tuberías	102
Tabla 4.50. Datos requeridos para calcular el costo de las tuberías	103
Tabla 4.51. Datos calculados para el diseño de las tuberías	103
Tabla 4.52. Costo total para el tramo de carga de la bomba P-01	104
Tabla 4.53. Características relevantes y costos de las tuberías	105
Tabla 4.54. Volumen y masa de material requeridos para diferentes espesores de aislamiento de P-03 TC	106
Tabla 4.55. Costo del aislamiento del tramo P-03 TC	106

Tabla 4.56. Costo del aislamiento de tuberías	107
Tabla 4.57. Diseño y costo de las bombas	108
Tabla 4.58. Volumen del tanque de almacenamiento de líquidos	109
Tabla 4.59. Costo del tanque de almacenamiento de líquidos	109
Tabla 4.60. Volumen del silo de almacenamiento de sólidos	110
Tabla 4.61. Costo del silo de almacenamiento de sólidos	111
Tabla 4.62. Diseño del tornillo sin fin	112
Tabla 4.63. Volumen del tanque de mezcla	113
Tabla 4.64. Costo del tanque de mezcla	114
Tabla 4.65. Flujos y volúmenes asociados a los biodigestores	116
Tabla 4.66. Dimensiones y costos para el biodigestor	117
Tabla 4.67 Material requerido para diferentes espesores de aislamiento	117
Tabla 4.68. Costo del biodigestor con aislamiento	118
Tabla 4.69. Volumen del tanque de almacenamiento de digestato	120
Tabla 4.70. Costo del tanque de almacenamiento de digestato	121
Tabla 4.71. Flujos máscicos y temperaturas en E-02	122
Tabla 4.72. Características de diseño del intercambiador E-02	122
Tabla 4.73. Costo del intercambiador E-02	123
Tabla 4.74. Volumen del tanque de almacenamiento de biogás	124
Tabla 4.75. Dimensiones y costos para el tanque de almacenamiento del biogás .	125
Tabla 4.76. Especificaciones de la micro turbina	126
Tabla 4.77. Flujo de energía eléctrico generado en la micro turbina.	127
Tabla 4.78. Información de diseño del ducto TKB-E-02	128
Tabla 4.79. Composición esperada de los gases en la descarga de la micro turbina	131
Tabla 4.80. Flujos máscicos y temperaturas en E-01	133
Tabla 4.81. Características de diseño del intercambiador E-01	134
Tabla 4.82. Costo del intercambiador E-01	134
Tabla 4.83. Costo de los equipos	140
Tabla 4.84. Costo de capital	141
Tabla 4.85. Consumo eléctrico en planta	142
Tabla 4.86. Balance de personal operativo y costos asociados	143
Tabla 4.87. Costos operativos	143
Tabla 4.88. Ingresos en el primer año de funcionamiento de la planta de biodigestión asociados a venta de energía eléctrica y disposición de materia prima	144
Tabla 4.89. Parámetros de evaluación del proyecto	145
Tabla 4.90. Resultados del análisis financiero del diseño de la planta	146
Tabla 4.91. CAPEX Y OPEX planta de biodigestión con tecnología DRANCO	148
Tabla 4.92. Resultados del análisis financiero de la planta con tecnología DRANCO	149

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1. Proyección de crecimiento poblacional en Colombia [3].</i>	15
<i>Figura 1.2. Generación de residuos sólidos en Colombia al año [3].</i>	16
<i>Figura 1.3. Generación de residuos sólidos por habitante vs. Número de habitantes en Colombia [3].</i>	16
<i>Figura 2.1. Métodos para el procesamiento de residuos orgánicos en Colombia [12].</i>	26
<i>Figura 2.2. Esquema general del proceso de producción de biogás a partir de material orgánico [14].</i>	29
<i>Figura 2.3. Equivalencias del biogás con otros combustibles convencionales [14]</i>	31
<i>Figura 2.4. Proceso general de purificación de biogás [23]</i>	34
<i>Figura 2.5. Partes de un motor de combustión interna de chispa [38]</i>	42
<i>Figura 2.6. Funcionamiento básico de una turbina de gas</i>	43
<i>Figura 2.7. Diferentes opciones para el tratamiento y uso del digestato [41]</i>	48
<i>Figura 2.8. Tanque de digestión anaerobia y reservorio de biogás [7].</i>	51
<i>Figura 2.9. Sistema piloto de digestión en el relleno sanitario del Carmen de Viboral [57].</i>	53
<i>Figura 2.10. Tanque para efluente y reservorio de biogás [57].</i>	53
<i>Figura 3.1. Esquema empleado para calcular el volumen del silo.</i>	56
<i>Figura 4.1. Ubicación espacial de las empresas visitadas</i>	62
<i>Figura 4.2. Matrices energéticas</i>	68
<i>Figura 4.3. Balance de masa global para la producción de biogás en el reactor antes y después de recircular</i>	88
<i>Figura 4.4. Diagrama de flujo general de las plantas de biodigestión construidas por la compañía OWS</i>	95
<i>Figura 4.5. Diagrama de flujo de la planta de biodigestión</i>	98
<i>Figura 4.6. Diámetro económico para las tuberías</i>	104
<i>Figura 4.7. Costo del tanque de almacenamiento de líquidos vs relación H/D</i>	109
<i>Figura 4.8. Costo del silo vs relación H/D</i>	111
<i>Figura 4.9. Costo del tanque de mezcla vs relación H/D</i>	113
<i>Figura 4.10 Potencia de agitación Vs. Velocidad de agitación</i>	115
<i>Figura 4.11 Costo del biodigestor vs relación H/D</i>	116
<i>Figura 4.12. Efecto de la recirculación del digestato en la ocupación de los digestores</i>	119
<i>Figura 4.13. Efecto de la recirculación del digestato en el flujo de biogás y metano</i>	119
<i>Figura 4.14. Costo del tanque de almacenamiento de digestato vs relación H/D</i>	120
<i>Figura 4.15. Esquema para el diseño del intercambiador de calor E-02 en el software HYSYS</i>	121
<i>Figura 4.16. Costo del tanque de almacenamiento vs. Relación H/D para el tanque de almacenamiento de biogás</i>	125
<i>Figura 4.17. Curva de temperatura de llama adiabática contra la relación másica aire combustible para la combustión del biogás generado en planta.</i>	130

Figura 4.18. Efecto simultáneo del espesor del aislamiento y el diámetro de transporte de gases sobre el costo equivalente del tramo de conducción de gases calientes entre la micro turbina y el intercambiador de calor	132
Figura 4.19. Efecto simultáneo del espesor del aislamiento y el diámetro de transporte de gases sobre la temperatura de salida de los gases en el tramo de conducción entre la micro turbina y el intercambiador de calor.....	132
Figura 4.20. Esquema para el diseño del intercambiador de calor E-01 en el software HYSYS	133
Figura 4.21. Layout general de la planta de biodigestión	137
Figura 4.22. Regresiones potenciales	148

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se desarrolló para la compañía Ambientalmente S.A.S, una empresa enfocada en la ingeniería, consultoría y gestión de proyectos ambientales fundada en el año 2005. Ha trabajado en más de 200 proyectos presentando soluciones sostenibles y proyectos de desarrollo para varios sectores.

La empresa dueña de este proyecto, busca apoyar a diferentes industrias en la administración del desarrollo sostenible y asesorar en la gestión y manejo de los recursos naturales, gestión ambiental por outsourcing, asesoría para la reducción de gases de efecto invernadero, gestión de territorio y gestión de incentivos tributarios por reducciones de contaminación.

Los proyectos que más se destacan en Ambiental Mente S.A.S, están relacionados con la valorización de residuos y subproductos, transferencia tecnológica para nuevos negocios o desarrollos, mecanismos de desarrollo limpio y proyectos de I+D.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

En este capítulo se encuentra una panorámica general de la problemática que incitó a su desarrollo y la justificación del mismo, explicadas en el planteamiento del problema y justificación respectivamente. Adicionalmente, se establecen los objetivos propuestos y la metodología para dar cumplimiento a cada uno de ellos y lograr la meta establecida en el alcance de este proyecto de grado.

1.1 Planteamiento del problema

La energía es hoy en día una parte indispensable del diario vivir como seres humanos en todos los ámbitos de nuestra existencia, sin embargo, el constante desarrollo y crecimiento de ciudades e industrias, ha generado que la demanda energética incremente significativamente y que en consecuencia, las fuentes y recursos convencionales que permiten su obtención comiencen a escasear. Debido a esto, el desarrollo de fuentes de energía alternativas, que no se basen en combustibles fósiles, se ha convertido en una estrategia de mitigación importante para conseguir un desarrollo energéticamente sostenible de la humanidad [1].

Paralelo al problema de la demanda energética, el crecimiento de las grandes urbes también ha desencadenado que la cantidad de desechos generados aumente significativamente y la falta de un manejo eficiente de residuos sólidos, comience a amenazar no sólo el medio ambiente, sino también la salud humana [2]. La **Figura 1.1** muestra una proyección del crecimiento poblacional en Colombia entre el 2005 y el 2019 y la **Figura 1.2** muestra durante el mismo periodo de tiempo la generación de residuos sólidos en el país.

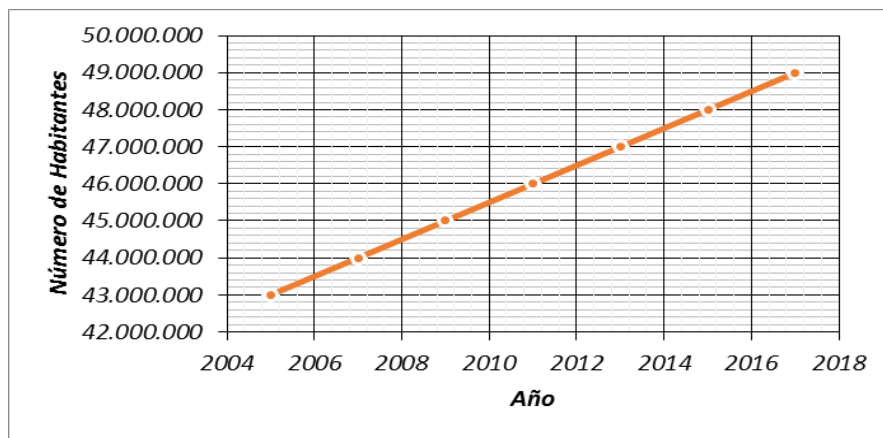


Figura 1.1. Proyección de crecimiento poblacional en Colombia [3].

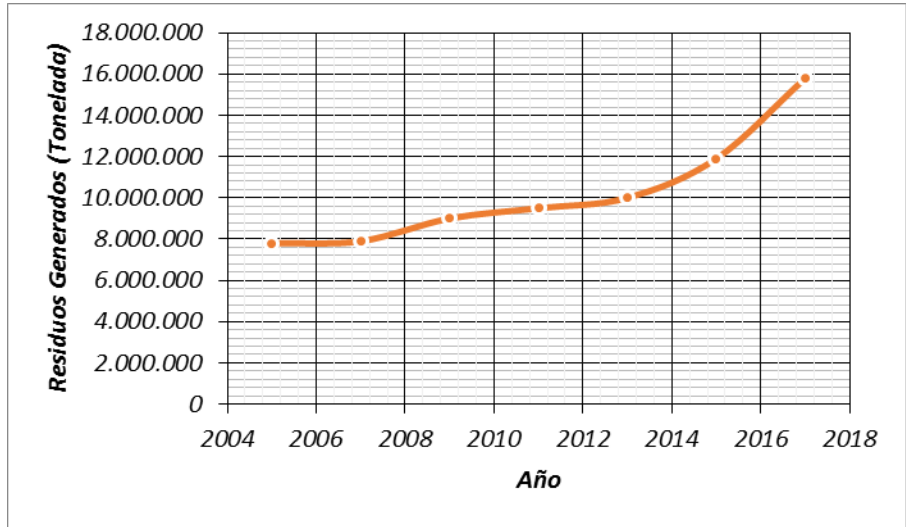


Figura 1.2. Generación de residuos sólidos en Colombia al año [3].

A partir de los datos presentados en las dos figuras anteriores, es posible analizar los residuos generados/número de habitantes vs. Número de habitantes como se muestra en la **Figura 1.3**. A partir de esta nueva gráfica se observa como a medida que el número de habitantes aumenta, también lo hacen los residuos generados por persona en Colombia y se hace clara la necesidad de buscar una adecuada disposición para los mismos.

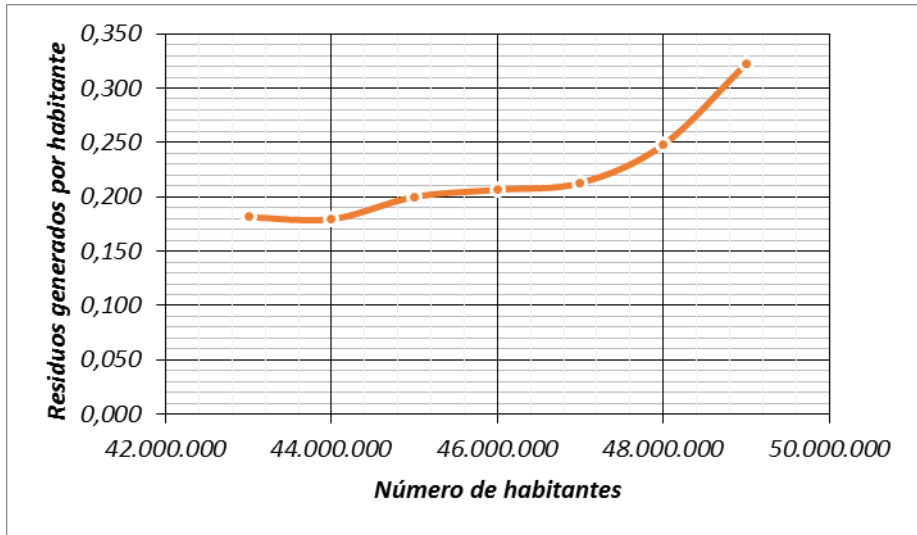


Figura 1.3. Generación de residuos sólidos por habitante vs. Número de habitantes en Colombia [3].

La producción de biogás a partir de desechos orgánicos, se convierte entonces en una fuente de energía alternativa que puede contribuir a la solución tanto del problema de la demanda energética (calor, electricidad e incluso combustible), como a la necesidad de

aprovechar los residuos sólidos generados en procesos industriales, agrícolas, pecuarios y en actividades domésticas [4].

El Oriente Antioqueño, con un total de 23 municipios y aproximadamente 600 000 habitantes, solía basarse en la agricultura como la principal actividad económica de la región, sin embargo, en los últimos años se han experimentado grandes cambios sociales, culturales y nuevas actividades pecuarias, artesanales, turísticas, comerciales y especialmente un alto desarrollo industrial que han incidido en un enorme crecimiento poblacional y por lo tanto un aumento significativo de producción de residuos que exige la toma de medidas urgentes para prevenir una posible crisis sanitaria [5].

Actualmente, se producen en esta zona, cerca de 7 500 toneladas/mes de desechos, de los cuales el 85,0% son dispuestos en rellenos sanitarios, es decir, únicamente 1 125 toneladas/mes de residuos se están aprovechando (por medio del reciclaje y la producción de humus o fertilizante) mientras que las otras 6 375 toneladas/mes se desperdician [5].

De la cantidad de residuos que no se aprovechan, el 60,0% corresponde a material sólido orgánico que podría tener todo el potencial para convertirse en biogás y posteriormente en energía para satisfacer necesidades específicas de la zona y en abono para nutrir una gran cantidad de suelos antioqueños destinados a la agricultura [5].

Con este trabajo se pretende evaluar la pre factibilidad económica y técnica de una planta productora de biogás a partir de digestión anaeróbica, utilizando residuos orgánicos generados en compañías del Oriente Antioqueño pertenecientes a sectores alimenticios, agrícolas, pecuarias y restaurantes industriales, estudiando la oferta de materia prima y la demanda de energía de las empresas que la aportan, el potencial de producción de biogás, posibles tecnologías requeridas y finalmente un análisis económico y financiero que permita determinar si el proyecto es o no factible y si es entonces, una posibilidad que aporta de manera efectiva a la solución de la problemática de consumo de energía y de disposición de residuos orgánicos.

1.2 Objetivos

En el marco general de este proyecto, se pretende dar cumplimiento al siguiente objetivo general, soportado por los objetivos específicos que se enuncian.

1.2.1 Objetivo general

Evaluar, a nivel conceptual, la pre factibilidad técnica, económica y financiera, de la construcción de una planta generadora de energía a partir de digestión anaerobia de residuos orgánicos de empresas del Oriente Antioqueño.

1.2.2 Objetivos específicos

Para dar cumplimiento al objetivo general de este proyecto, se propone dar cumplimiento a los siguientes objetivos específicos:

- Establecer la oferta de material orgánico disponible para la producción de biogás, en ciertas compañías del Oriente Antioqueño, pertenecientes al sector alimenticio, agrícola, pecuario y restaurantes industriales.
- Definir la demanda de energía eléctrica y térmica de algunas compañías del Oriente Antioqueño que puedan ser consideradas como clientes de la energía generada por medio del proceso de biodigestión.
- Calcular el potencial de producción de metano por masa de material orgánico alimentado y el potencial de generación eléctrica por m³ de biogás.
- Evaluar técnica y económicamente diferentes tecnologías de digestión, purificación y transformación de biogás a energía, por medio de diseño, dimensionamiento y selección conceptual de equipos y consultas comerciales con al menos un proveedor nacional o internacional.
- Realizar un análisis financiero para determinar si el proyecto es factible desde el punto de vista conceptual.

1.2.3 Alcance del proyecto

Al término del proyecto, se pretende determinar si es factible técnica y económicamente construir una planta de digestión anaerobia y producir energía a partir de residuos orgánicos de diferentes empresas del sector alimenticio, agrícola, pecuario y restaurantes industriales del Oriente Antioqueño.

Para ello, se hará entrega de un documento de proyecto de grado en donde consten todas las metodologías y procedimientos realizados para cumplir con los objetivos propuestos.

1.3 Justificación

La digestión anaerobia es un método para el tratamiento de residuos orgánicos. De este proceso se obtienen dos valiosos productos, un gas combustible, conocido como biogás, que puede ser utilizado para producir energía eléctrica o térmica, y un material resultante de la digestión que presenta excelentes características para ser utilizado como abono, como acondicionador de suelos [6] y eventualmente como combustible sólido.

A pesar de ser una de las tecnologías que ofrece mayores beneficios para el tratamiento de residuos orgánicos, entre las que se encuentran: la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, obtención de fertilizantes de mejor calidad debido al mejoramiento de la disponibilidad de nutrientes, obtención de una mejor calidad de aire y agua, y un control de los olores y patógenos, en Colombia no ha sido una práctica muy común y solo se conocen experiencias aisladas de firmas de ingeniería sanitaria que han implementado pequeños reactores anaerobios de flujo ascendente y lagunas de estabilización anaerobia en el sector agroindustrial, con resultados exitosos [7].

Partiendo de la necesidad de incrementar la producción de energías renovables, de reducir la emisión de los gases efecto invernadero y de reducir el volumen de residuos dispuestos en los rellenos sanitarios, se desea con este proyecto examinar, de manera conceptual, si es factible construir una planta de digestión anaerobia a mayor escala de las ya mencionadas y de esta forma impulsar el desarrollo de proyectos de aprovechamiento de residuos orgánicos.

Al definir la factibilidad en la construcción de una planta de las características mencionadas y su posterior construcción, se genera un impacto positivo a nivel ambiental, económico, social y académico:

- El metano que normalmente se liberara a la atmósfera por la descomposición de residuos sólidos produce un impacto sobre el deterioro de la atmósfera y el aumento del efecto invernadero. Por lo tanto, el hecho que se aprovechen los residuos orgánicos genera una disminución de emisiones y del impacto ambiental, a la vez que se satisface la demanda energética.

- El uso de biogás puede reducir la demanda de otros combustibles convencionales que causan grandes impactos sociales y ambientales, como es el caso de los combustibles fósiles, los cuales producen altas emisiones de CO₂ a la atmósfera, o la madera cuyo uso desencadena la aparición de grandes terrenos deforestados.
- Económicamente, el uso de esta energía alternativa puede representar beneficios al valorizar residuos que normalmente serían desechados y obtener energía a partir de ellos.
- Socialmente, la generación de empleo en las diferentes fases de implementación del proyecto y el manejo integral de los residuos sólidos son claras ventajas. Adicionalmente, este proyecto puede llegar a ser un estímulo para otros en el desarrollo e inversión en proyectos de aprovechamiento energético y material de los residuos orgánicos.
- A nivel académico, independiente de la conclusión de factibilidad, el desarrollo del proyecto aportará a la formación académica y obtención del grado de dos ingenieras de procesos.

1.4 Metodología

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados en el proyecto, se aplicó la siguiente metodología:

1.4.1 Identificación de la oferta de material orgánico en el Oriente Antioqueño

Para dar cumplimiento al primer objetivo específico, el cual es, ***“establecer la oferta de material orgánico disponible para la producción de biogás, en ciertas compañías del Oriente Antioqueño, pertenecientes al sector alimenticio, agrícola, pecuario y restaurantes industriales”***, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Búsqueda de información secundaria en entidades, empresas y proyectos para conocer los sectores potenciales y empresas generadoras de residuos orgánicos en el Oriente Antioqueño.
- Contacto con al menos 12 compañías pertenecientes a los sectores potenciales para indagar sobre su interés en la participación del proyecto.

- Visita a las empresas que presentaron interés en la participación del proyecto para obtener información primaria acerca de la generación y tratamiento actual de sus residuos mediante una encuesta, la cual se presenta en el Anexo 1.
- Procesamiento de la información levantada y elaboración de una matriz de selección de acuerdo a ciertos parámetros definidos que permitieron la selección de las compañías más adecuadas para el desarrollo del proyecto.

1.4.2 Identificar la demanda de energía eléctrica o térmica

Para dar cumplimiento al segundo objetivo específico, el cual es, ***“definir la demanda de energía eléctrica y térmica de algunas compañías del Oriente Antioqueño que puedan ser consideradas como clientes de la energía generada por medio del proceso de biodigestión”***, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Elaboración de una encuesta a las mismas compañías de oriente visitadas, indagando sobre las necesidades de energía térmica o eléctrica que poseen actualmente en sus instalaciones, tal encuesta se presenta en el Anexo 1.
- Elaboración de una matriz energética para observar el porcentaje de energía térmica o eléctrica empleado por estas compañías y adicionalmente una matriz para determinar los costos generales asociados a la producción de cada tipo de energía.
- Selección del tipo de energía que es más conveniente producir (térmica, eléctrica o ambas)

1.4.3 Estimar la producción de metano del material orgánico seleccionado y la generación eléctrica

Para dar cumplimiento al tercer objetivo específico, el cual es, ***“Calcular el potencial de producción de metano por masa de material orgánico alimentado y el potencial de generación eléctrica por m³ de biogás”***, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- En las compañías seleccionadas a partir de la matriz, hacer una recolección de muestras de los residuos generados en un día de producción y preparar 7 mezclas de manera porcentual según la producción de cada empresa. Las mezclas preparadas son las siguientes: una mezcla compuesta de todas las compañías, una mezcla de sólidos, una mezcla de líquidos, una mezcla de las tres compañías más grandes y una muestra individual de cada una de las 3 compañías más grandes. Se

realizó una repetición del anterior procedimiento para un día diferente de producción.

- Realización a cada muestra un análisis fisicoquímico que incluye: pH, % humedad para muestras sólidas o %sólidos para muestras líquidas y un análisis elemental de diferentes átomos de carácter orgánico e inorgánico. Este análisis fisicoquímico se llevó a cabo en el laboratorio GIEM de la Universidad de Antioquia.
- Calculo de la producción teórica de gas metano para cada muestra. Para ello se realizó una búsqueda bibliográfica de las ecuaciones y modelos y se seleccionó la más adecuada considerando los datos disponibles.

1.4.4 Evaluación de tecnologías

Para dar cumplimiento al cuarto objetivo específico, el cual es, ***“evaluar técnica y económicamente diferentes tecnologías de digestión, purificación y transformación de biogás a energía, por medio de diseño, dimensionamiento y selección conceptual de equipos y consultas comerciales con al menos un proveedor nacional o internacional”***, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

La metodología de análisis de tecnologías está dividida en dos partes, la primera busca analizar los procesos de biodigestión empleados por empresas internacionales y la segunda busca analizar tecnologías de biodigestión a partir del diseño y selección de equipos para finalmente compararlas técnica y económicamente.

- Contacto con al menos una compañía internacional para cotizar las tecnologías ofrecidas de digestión, purificación y transformación de biogás a energía eléctrica y térmica.
- Elaboración del diseño conceptual de la planta de biodigestión, determinando todos los flujos y condiciones de operación, dimensionando y seleccionando equipos para biodigestión, purificación y transformación de energía.
- Búsqueda de proveedores apropiados para la compra o construcción de los equipos requeridos y solicitud de cotizaciones correspondientes.
- Determinación de los costos de inversión y costos operativos que trae la construcción y futura operación de los equipos.

1.4.5 Análisis financiero

Para dar cumplimiento al quinto objetivo específico, el cual es, **“realizar un análisis financiero para determinar si el proyecto es factible desde el punto de vista conceptual”**, es preciso llevar a cabo las siguientes actividades:

La evaluación financiera es una parte fundamental para determinar la viabilidad del proyecto, para tal fin se evaluaron los correspondientes presupuestos donde se determine la inversión inicial, los ingresos, egresos y aquellas variables que representen un flujo monetario en el transcurso del proyecto.

Para realizar la ejecución de este proyecto es necesario realizar la mayor parte de las inversiones antes de su puesta en marcha, entre las que se encuentran: las obras civiles, mecánicas y eléctricas de la instalación y la adecuación del terreno hacen parte de este rubro. Además, el proyecto contempla costos asociado al personal y a la operatividad de la planta, los cuales estarán de acuerdo a la información suministrada por el proveedor de la tecnología seleccionada, según el perfil profesional y el tiempo de operación de la planta.

Para la elaboración del estudio se consideraron los siguientes valores como constantes:

- Inflación : 3,5% (promedio de inflación entre 2013 y 2014 de acuerdo al Banco de la República)
- Impuesto de Renta: 34,0% (resolución 007683 de 2010 de la dirección de Impuestos y Aduana Nacionales, DIAN)
- Tasa de interés: 11,0%
- Tiempo de depreciación de las obras mecánicas: 10 años

A pesar de que los equipos pueden lograr una vida útil mayor a los 15 años estableciendo un programa de mantenimiento, se tuvo como consideración evaluar el proyecto en un periodo de 10 años para determinar su viabilidad. Como indicadores de la viabilidad del proyecto se presentan el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Payback o periodo de recuperación de la inversión. Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad donde se recalculan el VPN y la TIR después de ampliar el horizonte de evaluación a 20 años.

El procedimiento anterior se realizó tanto para las tecnologías cotizadas con proveedores extranjeros como las obtenidas a partir del diseño conceptual, permitiendo comparar costos, elegir y determinar si el proyecto es o no factible.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrollan los conceptos teóricos más relevantes que involucran el proceso de la biodigestión.

En principio se realiza una recopilación de información acerca de los residuos sólidos orgánicos y los procesos de disposición más difundidos para los mismos en la actualidad, posteriormente se muestran generalidades de la digestión anaerobia: antecedentes, requerimientos de materia prima, etapas biológicas del proceso, condiciones operativas, productos obtenidos y la valorización de estos mediante tecnologías de purificación y aprovechamiento de bio-lodos e impacto ambiental de una planta de biodigestión.

Por último se realiza una breve recopilación bibliográfica de modelos útiles para el cálculo del potencial teórico de biogás, así como una breve descripción de la combustión del mismo y un modelo para calcular su poder calorífico.

2.1 Residuos sólidos

De acuerdo a la legislación colombiana un residuo sólido es: “Cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien. Se dividen en aprovechables y no aprovechables. Los primeros son susceptible de incorporación a un proceso productivo, mientras que los segundos no ofrecen ninguna posibilidad de aprovechamiento, reutilización o reincorporación, por el contrario, se les debe dar un tratamiento y disposición final, generando costos de disposición” [8]. La gestión de estos residuos requiere por lo tanto una visión integral, es decir, no solo disponer adecuadamente de ellos, sino hacer una buena separación desde la fuente y uso de aquellos que pueden ser aprovechados para prevenir que lleguen a los sitios de disposición final [9].

El aumento en la generación de residuos sólidos, ha ocasionado que estos se dispongan inadecuadamente y sean quemados, enterrados o descargados en cursos de agua, botaderos a cielo abierto o en rellenos sanitarios donde no hay control de la emisión de gases a la atmosfera y líquidos al subsuelo [10,11].

Al disponer indiscriminada e inadecuadamente de éstos residuos se generan impactos ambientales negativos, que han llevado a ver la necesidad de encontrar soluciones a esta problemática.

2.1.1 Residuos no biodegradables

Son sustancias o materiales que no pueden ser descompuestas por organismos vivos como las bacterias, hongos, gusanos e insectos. Ejemplos de residuos no biodegradables son las latas, vidrios, metales pesados, tetra pack, papel, cartón y plásticos [12].

Los residuos no biodegradables pueden ser a su vez aprovechables (reciclables) o no aprovechables (ordinarios), de forma que los segundos al no presentar una descomposición en el tiempo ni al facilitarse su desintegración, es posible que permanezcan en botaderos a cielo abierto o rellenos sanitarios durante largos períodos de tiempo, ocasionando esto contaminación del suelo, contaminación de aguas subterráneas, deterioro del paisaje y disminución de espacios naturales.

Es de gran importancia realizar una adecuada separación de los residuos no biodegradables, dado que de su clasificación dependerá también el aprovechamiento que se les dé. En el caso particular de los residuos ordinarios, al no contar con alternativas de tratamiento, deben necesariamente ser dispuestos en rellenos sanitarios; por el contrario, con los residuos reciclables, es posible continuar una cadena de aprovechamiento de estos materiales y convertirlos en subproductos. De la separación adecuada en la fuente dependerá el éxito en las prácticas de reciclaje, lo anterior evita la contaminación de material aprovechable como los residuos reciclables con sustancias no deseadas desprendidas de los residuos ordinarios [13].

2.1.2 Residuos biodegradables

Los residuos biodegradables son aquellos que tienen la característica de poder desintegrarse o degradarse rápidamente, por la acción de microorganismos en otras sustancias, orgánicas o inorgánicas, asimilables por el medio ambiente [9], estos residuos provienen de restos de productos de origen orgánico y en su gran mayoría son biodegradables [12]

La descomposición de la materia orgánica específicamente, tarda entre 3,0 y 16,0 semanas y genera subproductos como lixiviados y gases de descomposición que pueden ser nocivos para la salud humana y el ambiente pues contaminan los recursos hídricos, generan gases de efecto invernadero (dióxido de carbono y metano) y además su constante acumulación está propiciando problemas de espacio debido al requerimiento de vertederos y rellenos sanitarios [1].

Los residuos orgánicos presentan en general un índice alto carbono-nitrógeno (superior a 22) y un alto contenido de humedad (superior al 65,0%), aspectos esenciales para la producción de biogás [11 ,14], y tienen por lo tanto un gran potencial de aprovechamiento energético, debido al alto contenido de carbono, así como un gran potencial para ser usados en compostaje y lombricultura para la producción de biofertilizantes y acondicionadores para el suelo.

La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, de Bogotá realizó en 2007 un diagnóstico del estado de aprovechamiento de residuos orgánicos en Colombia. Para ello visitó 34 sitios o plantas de aprovechamiento de residuos sólidos en el país. Los resultados mostraron que en Colombia la fracción de los orgánicos que es aprovechada se procesa por tres métodos diferentes como se presenta en la **Figura 2.1** [12].

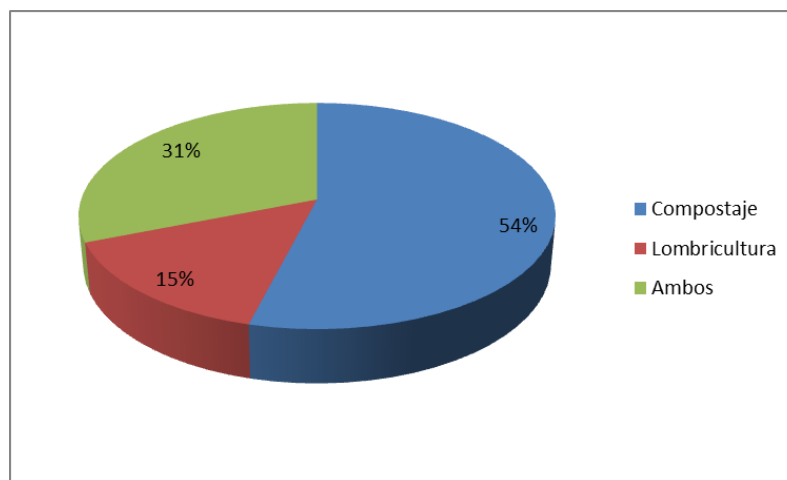


Figura 2.1. Métodos para el procesamiento de residuos orgánicos en Colombia [12].

2.2 Digestión anaerobia

A continuación, se presenta una descripción de los antecedentes de la digestión anaerobia, así como una breve recopilación de los aspectos operativos más relevantes asociados a este proceso.

2.2.1 Generalidades de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual ciertas bacterias descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, obteniendo dos productos: el biogás que puede ser aprovechado energéticamente y el efluente de la digestión que es un fertilizante muy valioso debido al incremento de la disponibilidad del nitrógeno y a la minimización de patógenos [15,16].

La producción de biogás a partir de digestión anaerobia ofrece ventajas significativas sobre otras formas de producción de bioenergía, tanto, que ha sido evaluada como una de las tecnologías más eficientes y beneficiosas para el medio ambiente en cuanto a la producción de bioenergía [15].

➤ ***Materia prima***

Todos los recursos de biomasa que contienen proteínas, grasas, carbohidratos, celulosa y hemicelulosa como principales componentes, pueden ser usados como sustratos para la producción de biogás, siendo la composición de éste variable y dependiente del tipo de insumo, el sistema de digestión y el tiempo de retención [15].

Ejemplos muy comunes de biomasa para la producción de biogás son el estiércol de animales de granja, la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, aguas residuales orgánicas de las industrias (producción de alcohol, procesado de frutas, verduras, lácteos, carnes, alimenticias en general), lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales, residuos de los cultivos y actividades forestales, cultivos energéticos y residuos del procesamiento de alimentos [2 ,10].

Es esencial conocer las características de la materia prima para poder hacer un buen diseño o selección de cualquier sistema de biodigestión. Estas características pueden expresarse en términos de las propiedades físicas, químicas o biológicas del desecho, siendo las más importantes: pH, concentración de DBO, contenido de nitrógeno y fosforo, porcentaje de humedad, de sólidos totales, volátiles y suspendidos [11].

Los sólidos totales son una importante variable para evaluar la concentración del desecho y determinar el tipo de tratamiento requerido. Los sólidos totales pueden ser separados en sólidos volátiles (SV), que representan la fracción de materia orgánica que se puede descomponer, y en sólidos fijos (SF), que son importantes para el dimensionamiento del biodigestor y del sistema de manipulación y almacenamiento del residuo sólido generado en el proceso [11].

Antes de introducir los residuos orgánicos dentro del reactor, es importante homogenizar la mezcla de sustratos y aplicar pretratamientos adecuados para facilitar la liberación del carbono de los residuos orgánicos, aumentar su superficie específica y solubilizar y degradar la mezcla, en consecuencia, mejorará la producción y calidad del biogás. Estos tratamientos pueden ser mecánicos, químicos, enzimáticos y térmicos [12].

Para incrementar el contenido de materia orgánica, la mayoría de las plantas de biogás agrícolas utilizan co-sustratos, es decir, residuos orgánicos adicionales al sustrato básico [8 ,13]. La ventaja principal de la co-digestión radica en la compensación de las carencias de cada uno de los sustratos por separado [14].

En la **Tabla 2.1** se indican las características relativas para la co-digestión y como se complementan diferentes tipos de residuos.

Tabla 2.1. Caracterización relativa para la co-digestión de diferentes residuos orgánicos [14].

	Residuos ganaderos	Lodos de depuración	Fracción Orgánica de los residuos Municipales	Residuos alimentos
Micro y macronutrientes	↑	↑	↓	↓
Relación C/N	↓	↑ ↓	↑	↑
Capacidad tampón (alcalinidad)	↑	↑ ↓	↓	↓
Materia orgánica biodegradable	↓	↑ ↓	↑	↑

Las características específicas del estiércol animal varían con la especie, dieta, geografía, entre otros, pero en general, el estiércol tiene un alto contenido de humedad (entre 75,0 – 92,0 %) y una amplia variedad de nutrientes, además, contiene grandes y diversas comunidades microbianas, de forma que los digestores anaerobios que tienen como insumo estiércol animal, pueden ser iniciados sin la adición de inóculos externos. Sin embargo, debido a las bajas concentraciones de materia orgánica fácilmente biodegradable, el estiércol presenta un bajo potencial de producción de biogás y el proceso de digestión puede ser muy lento pues, la digestión se ve inhibida a causa de las altas concentraciones de amoníaco generadas por el alto contenido de nitrógeno. El estiércol por lo tanto, es un sustrato adecuado para realizar co-digestión con residuos ricos en carbohidratos pero pobres en nitrógeno [14 ,15].

De forma similar, la composición de los residuos municipales (RM) varía dependiendo del clima, nivel de ingresos, nivel de vida, geografía y sistema de colección. En los países en desarrollo, los residuos urbanos se constituyen principalmente por materia orgánica, la

cual representa más del 55,0 % de su composición [2, 17]. La fracción orgánica de los residuos municipales, se compone de materiales biodegradables como sobras de comida, hojas y restos de jardinería. Estos residuos son típicamente deficientes en nitrógeno y fósforo y presentan un excesivo contenido en sólidos fijos, pero también presentan aspectos esenciales para la producción de biogás, ya que contienen altas concentraciones de materia orgánica fácilmente biodegradable, un alto índice de C/N y un alto contenido de humedad atribuyéndoles un potencial alto de producción de biogás si son digeridos correctamente [11, 18].

Los residuos de cultivos y del procesamiento de alimentos también son sustratos ideales para realizar co-digestión con estiércol de animales y lodos municipales, ya que ambos tipos de residuo presentan generalmente bajo contenido de nutrientes (a excepción de residuos de carne) pero alto contenido de sólidos volátiles y de materia orgánica fácilmente biodegradable [2].

➤ **Proceso de digestión anaerobia**

El proceso de biodigestión anaerobia es complejo por el número de reacciones bioquímicas y por los diferentes grupos de bacterias involucradas en ellas [19].

En la **Figura 2.2** se presentan las diferentes etapas metabólicas del proceso de digestión anaerobia, estas son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [14].

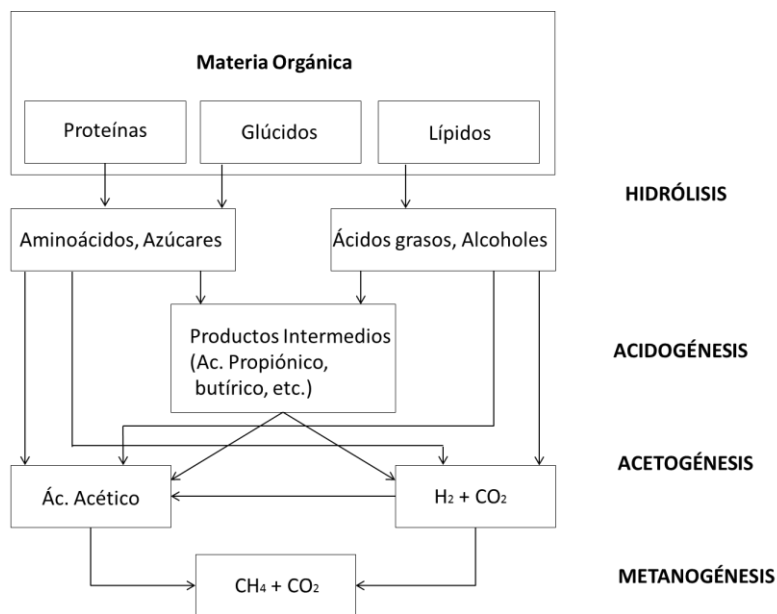


Figura 2.2. Esquema general del proceso de producción de biogás a partir de material orgánico [14].

En la etapa de *hidrólisis*, ocurre una transformación controlada en la que todos los componentes orgánicos complejos y no disueltos tales como proteínas, lípidos y polisacáridos, se rompen y se convierten en monómeros u oligómeros (ácidos grasos de alto peso molecular, glicerina, aminoácidos, azúcares, entre otros.) debido a la acción de bacterias hidrolíticas que toman la materia orgánica virgen con sus largas cadenas de carbono y liberan enzimas para romperlas. Estos compuestos son ahora susceptibles de emplearse como fuente de materia y energía para otros microorganismos [2].

La segunda etapa se conoce como *acidogénesis*, en esta, los compuestos formados anteriormente (monómeros y oligómeros) son transformados por microorganismos anaerobios conocidos como bacterias acidogénicas, mediante un proceso de fermentación, en otros compuestos de peso molecular intermedio, dando como resultado una mezcla de dióxido de carbono, hidrogeno, etanol y otros alcoholes alifáticos, ácidos grasos como el propiónico o el butírico y amoníaco [19]. La siguiente etapa se conoce como *acetogénesis*, en ella, ocurre una transformación de los ácidos grasos existentes y los alcoholes mediante oxidación, que permite obtener hidrógeno, dióxido de carbono, ácido acético y ácido fórmico [11].

En la etapa final, conocida como *metanogénesis*, se lleva a cabo un proceso de reducción en el que se transforman el ácido acético y fórmico y se obtiene finalmente una mezcla de CH₄, CO₂ y otros componentes como H₂S, NH₃, N₂ y agua [2].

Las bacterias responsables del proceso de metanogénesis son estrictamente anaeróbicas. Se distinguen dos tipos de microorganismos, unos encargados de degradar el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y las que transforman el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas) como se muestra respectivamente en las ecuaciones **E 2.1** y **E .2.2**:



La principal vía de producción de metano es la correspondiente a la transformación del ácido acético [20]. Este proceso es lento y constituye la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica [19].

➤ **Composición del biogás y sus aplicaciones**

La composición del biogás varía dependiendo del tipo de material orgánico que se utilice como materia prima y de las condiciones de operación que se establezcan en la digestión anaerobia. Como se presenta en la **Tabla 2.2**, el biogás está compuesto por metano (entre el 50,0 y el 75,0 %v), dióxido de carbono (entre el 25,0 y el 50,0 %v) y en menor proporción por otros componentes, algunos de los cuales requieren ser eliminados o reducidos a concentraciones mínimas con el fin de mejorar el desempeño de este biocombustible [2].

Tabla 2.2. Concentración y propiedades de los componentes del biogás [2]

Componentes	Concentración	Propiedades
CH ₄	50,0 – 75,0 %v	Portador de energía
CO ₂	25,0 – 50,0 %v	Disminución del poder calorífico / corrosivo
H ₂ S	hasta 5 000 ppm	Corrosivo / formación y emisión de SO ₂ durante combustión
NH ₃	hasta 500 ppm	Emisiones de NO _x durante combustión
N ₂	hasta 5,0 %v	Disminución poder calorífico
H ₂ O	1,0 – 5,0 %v	Corrosivo en presencia de CO ₂ y SO ₂

Debido a la alta concentración de metano en el biogás, éste resulta ser una fuente de energía alternativa con gran potencial y comparable con otros combustibles convencionales, como se presenta en la **Figura 2.3** [14].

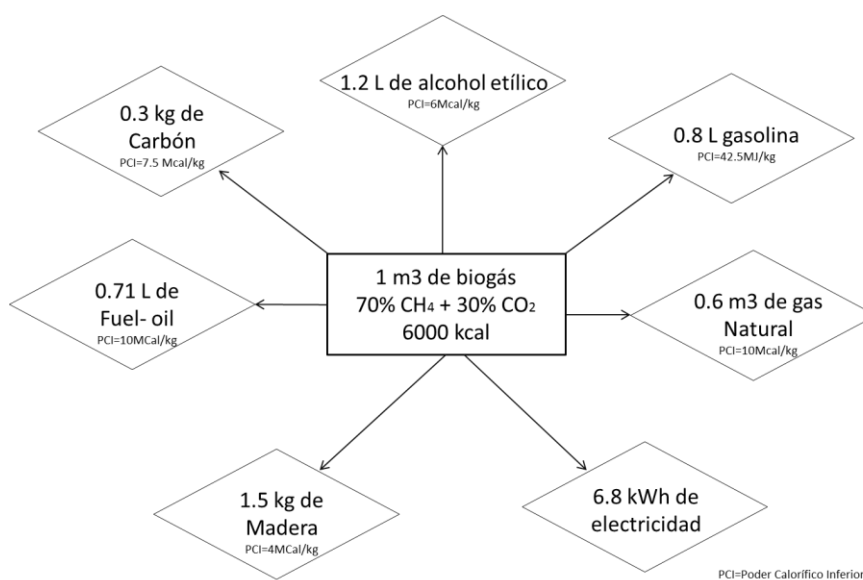


Figura 2.3. Equivalencias del biogás con otros combustibles convencionales [14]

➤ **Parámetros operacionales**

La actividad metabólica involucrada en el proceso de digestión anaerobia se ve afectada por diversos factores bioquímicos y físicos que deben controlarse [10]. Entre estos factores se destacan los siguientes:

- **Nivel de acidez (pH):** el crecimiento de las bacterias anaerobias, se ve afectado por niveles altos de acidez, se ha determinado que la digestión se desarrolla en condiciones óptimas a un pH de 7,0 - 7,20 pudiendo fluctuar entre 6,50 y 7,50 [12].
- **Alcalinidad:** se refiere a la resistencia a los cambios de pH de una solución. Debido a los efectos buffer que producen los compuestos bicarbonato dióxido de carbono ($\text{CO}_2\text{-HCO}_3$) y amoníaco (NH_3) con el ion amonio (NH_4), el proceso en sí mismo tiene capacidad de regular diferencias en el pH del material de entrada [10]. En caso de disminución del pH, se puede adicionar hidróxido de sodio, carbonato de sodio o hidróxido de calcio para mantener las condiciones de proceso [21].
- **Elementos tóxicos e inhibidores:** diferentes metales, antibióticos y detergentes, llegan a ser tóxicos cuando alcanzan una cierta concentración en el sustrato. Cuando es demasiado alta la concentración de ácidos volátiles (más de 2 000 ppm para la fermentación mesofílica y de 3 600 ppm para la termofílica) se inhibirá la digestión. También una elevada concentración de nitrógeno y amoníaco destruirá las bacterias metanogénicas [10]. Las concentraciones tóxicas de algunos elementos están comprendidas entre los valores presentados en la **Tabla 2.3**.

Tabla 2.3 Concentraciones tóxicas de algunos elementos en la materia prima [12]

Sodio	3 500 - 5 500 ppm
Potasio	2 500 - 4 500 ppm
Calcio	2 500 - 4 500 ppm
Magnesio	1 000 - 1 500 ppm
NH₄	1 500 - 3 500 ppm

- **Nutrientes:** una de las ventajas inherentes al proceso de digestión anaerobia es su baja necesidad de nutrientes como consecuencia de la pequeña velocidad de crecimiento de los microorganismos anaerobios. No obstante, resulta fundamental para la estabilización del proceso que la relación C/N se mantenga entre 20 y 30 y la relación N/P entre 1/5 y 1/7 [12]. El método más sencillo para ajustar la relación C/N es hacer una mezcla de diferentes materiales de contenidos altos y bajos de carbono y nitrógeno [10].

- **Temperatura:** los microorganismos involucrados en el proceso de digestión anaerobia son muy sensibles a los cambios de temperatura. Se puede operar en tres rangos de temperatura de acuerdo al tipo de microorganismos, los cuales se clasifican en psicrófilos (entre 10,0 y 30,0 °C), mesófilos (entre 30,0 y 45,0 °C) y termófilos (entre 50,0 y 60,0°C) [21, 22]. A mayor temperatura, aumenta la actividad biológica y por lo tanto la producción de gas, pero también debe tomarse en cuenta que el proceso requiere energía del exterior para mantener el calor y se deben extremar los cuidados pues los microorganismos son extremadamente sensibles. Estas consideraciones deben ser evaluadas antes de escoger un determinado rango de temperaturas para el funcionamiento de un digestor ya que a pesar de incrementarse la eficiencia y producción de gas paralelamente aumentará los costos de instalación y la complejidad de la misma [10].
- **Tiempo de retención hidráulica (TRH):** es el tiempo de residencia del sustrato en el digestor, para alcanzar el nivel de producción de biogás que se espera [10].
- **Velocidad de carga orgánica:** es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen del digestor y tiempo. Valores bajos de este parámetro implican un elevado tiempo de retención para favorecer la producción del biogás [14].
- **Contenido de sólidos:** la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la producción de gas. Para digestores continuos el porcentaje de sólidos óptimo oscila entre el 8,0 y 12,0% [10].
- **Humedad:** el contenido de agua en la materia orgánica es de vital importancia ya que permite a los microorganismos transportar los nutrientes a través de ella. Cuando el porcentaje de humedad se encuentra por debajo del 30,0%, las reacciones biológicas se retardan considerablemente. El rango óptimo para el proceso de biodigestión anaerobia se encuentra entre 70,0% y 90,0% [20].

2.3 Purificación del biogás

La remoción de componentes que afectan la generación de energía a partir de biogás, se lleva a cabo en dos etapas presentadas en la **Figura 2.4**. La primera se conoce como limpieza y se refiere a la remoción de H₂S, vapor de agua, amoníaco y partículas,

mientras que la segunda etapa se conoce como potenciación del biogás y consiste en la eliminación del dióxido de carbono [23].

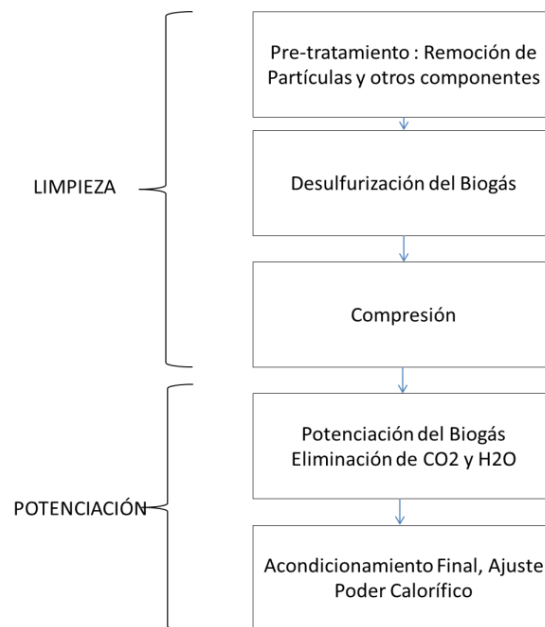


Figura 2.4. Proceso general de purificación de biogás [23]

2.3.1 Remoción de sulfuro de hidrógeno

El sulfuro de hidrógeno (H₂S), se produce en la digestión anaerobia, por material orgánico con contenido de azufre. Su concentración en el producto final, varía entre 50,0 y 5000 ppm [24]. Este compuesto debe ser removido o llevado a concentraciones entre 200 y 500 ppm pues su presencia implica no solo emisiones tóxicas durante la combustión pues el oxígeno requerido en el proceso ocasiona la formación de SO_x, sino también, efectos corrosivos en los equipos [25]. Existen diferentes métodos para reducir la concentración de sulfuro de hidrógeno como se muestra en la **Tabla 2.4**.

Tabla 2.4. Métodos típicos de remoción de H₂S [23]

Método de remoción	Descripción técnica
Fijación biológica	Se ventila aire dentro del digestor en el espacio disponible sobre el sustrato alimentado para tener una concentración de aire entre el 2,0-6,0%v. Bacterias oxidantes de azufre oxidan el H ₂ S y lo convierten en azufre elemental y agua de acuerdo a la reacción E 2.3 : $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{S} \quad (\text{E 2.3})$

Método de remoción	Descripción técnica
Lavado con agua	Se crea una solución de H ₂ S y agua mediante la alimentación de biogás a través de un flujo a contracorriente de agua. La solución generada puede ser tratada para recircularla al proceso o vertida.
Filtro de carbón activado	El biogás se lleva a través de un filtro de carbón activado impregnado por yoduro de potasio o por ácido sulfúrico. El sulfuro de hidrógeno se descompone y el azufre elemental, se regresa al digestor.
Hidróxido u óxido de hierro	El biogás pasa a través de un filtro compuesto por pellets de madera y óxido o hidróxido de hierro. El sulfuro de hidrógeno reacciona para formar sulfuro de hierro.

2.3.2 Remoción de vapor de agua

El biogás está frecuentemente saturado con agua que debe ser removida pues puede ser un problema ya que al pasar de altas a bajas temperaturas, se condensará, ocasionando problemas de corrosión y obstrucciones en los sistemas [25]. En la **Tabla 2.5** se describen diferentes métodos para la remoción de vapor de agua.

Tabla 2.5. Métodos comunes para la remoción de vapor de agua de biogás [26]

Método de remoción	Descripción técnica
Refrigeración	Intercambiadores de calor se utilizan para enfriar el biogás hasta condensar el vapor de agua. El biogás puede ser presurizado para incrementar la condensación del agua.
Adsorción	El gel de sílice u óxido de aluminio adsorbe agua del biogás a medida que este fluye a través del medio.
Absorción	Glicol o sales higroscópicas absorben agua a medida que el biogás se dirige a través del medio. El medio es regenerado por el secado a alta temperatura.

2.3.3 Remoción de amoníaco

Aparte de ser corrosivo y afectar los equipos mecánicos, la combustión presencia del amoníaco forma óxidos de nitrógeno que son nocivos para el medio ambiente [25].

Dado que el amoníaco es soluble en agua, la concentración de este compuesto, puede ser reducida con métodos de lavado a contracorriente con agua o mediante procesos de refrigeración. Ninguno de estos métodos genera emisiones peligrosas [27].

2.3.4 Remoción de dióxido de carbono

Una vez completada la limpieza del biogás, se procede a su potenciación mediante la eliminación del dióxido de carbono pues este reduce el poder calorífico del biogás. La **Tabla 2.6** presenta una descripción de las tecnologías para este efecto. La eliminación de este componente implica costos operativos bastante elevados y es únicamente requerida cuando el uso final que se le va a dar al biogás es la inyección a redes municipales de gas natural [26].

Tabla 2.6. Métodos comunes de potenciación de biogás [25]

Método de potenciación	Descripción técnica
Lavado con agua	<p>Se disuelve el dióxido de carbono en agua a altas presiones. El biogás se pasa a contra flujo de agua en una columna empacada para aumentar el contacto entre ambos elementos. El dióxido de carbono se disuelve en el agua a una mayor velocidad que el metano, así que la cantidad de biogás que sale del tanque tendrá una menor concentración de CO₂.</p> <p>El agua proveniente del lavado, que contiene una gran cantidad de dióxido de carbono disuelto y algo de metano, se lleva a un tanque de evaporación flash, donde se evapora el metano y se recircula el líquido resultante a la columna de lavado.</p>
Absorción química y física	<p>Se pueden utilizar solventes orgánicos para absorber CO₂ en lugar de agua, empleando un proceso similar al descrito anteriormente. Comúnmente se utiliza poli etilenglicol, dimetil etanol amina o mono etanol amina pues aumentan la eficiencia en la remoción de dióxido de carbono de biogás y es posible por lo tanto reducir la escala de la infraestructura y los equipos.</p>
Adsorción a altas presiones	<p>A altas presiones, moléculas seleccionadas pueden quedar atrapadas en un material adsorbente y ser liberadas posteriormente empleando bajas presiones. Dependiendo del tipo de adsorbente y la presión de operación utilizada, determinado elemento ya sea CO₂, O₂ o N₂ puede quedar atrapado en un adsorbente que generalmente es zeolita o carbón activado, mientras que el resto del gas fluye libremente. Una vez las moléculas deseadas se encuentran atrapadas y el flujo de biogás ha finalizado, la presión es aliviada y el adsorbente libera las partículas no deseadas en forma de gas de rechazo que puede ser utilizado como fuente de calor debido a su descompresión.</p>

Método de potenciación	Descripción técnica
Membrana de separación	Una membrana permeable selectiva se usa para retener el metano utilizando un gradiente de presión. En uno de los lados de la membrana existirá una acumulación de CH ₄ mientras que el CO ₂ fluirá a través de ella
Destilación criogénica	A presión atmosférica, el metano se condensa aproximadamente a -162°C, mientras que el dióxido de carbono lo hace a -78,5°C. Esta diferencia de temperaturas, permite separar dos componentes en diferentes fases. Se lleva el biogás, a altas presiones que aseguran la condensación del dióxido de carbono y su posterior separación.

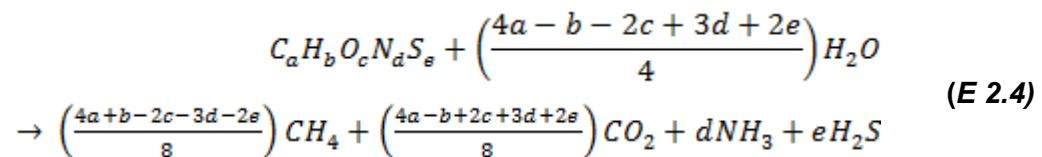
2.4 Modelos para calcular el potencial de biogás

Existen diferentes modelos que permiten calcular de forma teórica la producción de biogás de un sustrato de acuerdo a sus propiedades físico-químicas. Algunos de ellos son:

2.4.1 Modelo de Buswell extendido

En 1952, Buswell propuso la ecuación **E 2.4** que permite estimar los productos de la descomposición anaeróbica de un material orgánico de composición química conocida $C_aH_bO_cN_dS_e$ [28].

Este modelo asume una descomposición completa del sustrato alimentado y puede ser usada para estimar la composición máxima esperada del biogás.

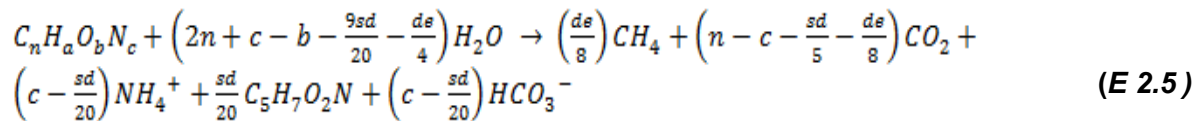


En la cual los parámetros a, b, c, d y e hacen referencia al índice estequiométrico de los átomos de C, H, O, N y S respectivamente.

En la práctica, el material orgánico que se degrada y convierte en biogás se encuentra entre el 40,0 y 65,0% del total alimentado. La cantidad que no logra descomponerse forma lodos de contenido biológico conocidos como digestato [28].

2.4.2 Modelo EMCON Associates

Según este modelo, la reacción bioquímica generalizada para la producción de metano se expresa en la ecuación **E 2.5** [29].



En la cual:

- a, b, c, n hacen referencia al índice estequiométrico de los átomos de H, O, N y C respectivamente.
- d es una combinación lineal de los coeficientes asociados a los átomos H, O, N y C dada por la ecuación **E 2.5**
- s es la fracción de DQO convertida de biomasa, dada por la ecuación **E 2.6**
- e es la fracción de DQO de residuo convertido a CH₄, el cual se ha reportado con un valor de 0,96.

$$d = 4n + a - 2b - 3c \quad (\text{E 2.5})$$

$$s = a_s \left(\frac{1+0.2f\theta_c}{1+f\theta_c} \right) \quad (\text{E 2.6})$$

En la cual:

- θ_c es el tiempo de retención de sólidos, días.
- f es la tasa de descomposición de células, d⁻¹.
- a_s es el tiempo de retención hidráulica del material orgánico en días

2.4.3 Modelo de la IPCC

Este modelo de estimación depende del tipo de residuos y la fracción de carbono orgánico y permite obtener la cantidad de metano producido por masa de residuos [30].

$$Lo = MCF \times COD \times COD_F \times F \times \frac{16}{12} \quad (\text{E 2.7})$$

En la cual:

L_o es el potencial de generación

MCF es el factor de corrección para el metano; 1,0 para emisiones controladas

COD es la fracción de carbono orgánico degradable, el cual se calcula con la ecuación **E 2.9**

COD_F es la fracción carbono orgánico degradable asimilado

F es la fracción de CH_4 en el biogás, en caso de no conocerse se considera el valor de 0,5 dado que es la composición molar más común de metano en el biogás.

$$COD = 0.4(A) + 0.17(B) + 0.15(C) + 0.30(D) \quad (E 2.8)$$

En la cual:

A, B, C y D son los porcentajes máxicos de residuos que corresponden a papel y textiles, desechos orgánicos lignocelulósicos menores, restos de alimentos y lignocelulósicos mayores, respectivamente.

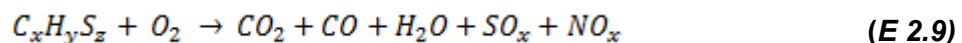
2.5 Producción energética con biogás

A continuación se presenta una breve descripción de la combustión del biogás y diferentes tecnologías que permiten su conversión en energía térmica o eléctrica.

2.5.1 Combustión de biogás

La combustión es una reacción de oxidación que se da al combinar un combustible con un oxidante. Se denomina combustible a cualquier material sólido, líquido o gaseoso que puede oxidarse para liberar energía, la mayoría de ellos, se componen principalmente de hidrógeno y carbono (hidrocarburos) y se denotan por la fórmula general C_xH_y [31].

Durante la combustión, se realiza la oxidación del carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre contenidos en los combustibles, liberando energía, productos de combustión y algunos residuos de acuerdo a la ecuación **E 2.9**



En la práctica, el oxígeno necesario para el proceso de la combustión es tomado del aire que presenta una composición de 21,0% de O₂ y un 79,0% de N₂ [32].

Si la oxidación es completa, la combustión produce el máximo rendimiento energético y los productos finales no son susceptibles de nueva combustión, es decir son: CO₂, SO₂, NO₂ y H₂O. De ser incompleta, una parte saldrá como hidrocarburo, otra como CO y se habrá perdido un porcentaje de la energía disponible. La cantidad de energía que se desprende por unidad de masa de combustible durante la reacción de oxidación se conoce como poder calorífico [33].

Como combustible, el biogás, posee compuestos que disminuyen su poder calorífico pues el calor de combustión, se comparte con diluyentes que disminuyen la temperatura máxima que puede alcanzarse en los gases de combustión [34]. Uno de estos componentes es el CO₂ que debido a su alta capacidad calorífica absorbe buena parte de la energía generada en la combustión [35].

El poder calorífico es estimado mediante el cálculo de la entalpía para la reacción obtenida del modelo estequiométrico con los reactantes y los productos bajo el mismo estado de referencia termodinámico [33]. El físico Dulong por su parte, enuncia una expresión que permite conocer de manera sencilla el poder calorífico de un combustible seco en kcal/kg que contenga carbono (%C), hidrógeno (%H), azufre (%S) y nitrógeno (%N) en su composición de acuerdo a la ecuación **E 2.11** y **E 2.12**:

$$PCS \text{ (Poder calorífico superior)} = 80,8 \times (\%C) + 344 \times \left[(\%H) - \frac{(\%O)}{8} \right] + 22,2 \times (\%S) + 5,6 \times (\%N) \quad (\text{E 2.101})$$

$$PCI \text{ (Poder calorífico inferior)} = PCS - 5,97 \times (\%H_2O) - \frac{(\%O)}{8} \quad (\text{E 2.112})$$

2.5.2 Tecnologías para la producción de energía con biogás

Son diferentes las tecnologías empleadas para la valorización de biogás. Las calderas, permiten convertir el metano en calor, mientras que otras como micro-turbinas, turbinas de gas, motores de combustión interna y celdas de combustible, convierten el biogás en calor y en electricidad [18, 35].

➤ **Calderas**

Las calderas son equipos que permiten valorizar el biogás de una manera más simple. Son dispositivos cerrados, diseñados para producir vapor proveniente de un fluido como el agua o para calentar un fluido de alto punto de ebullición y alta capacidad calorífica como es el caso de los aceites térmicos, utilizando un combustible como fuente de energía [1].

Los requerimientos de presión del biogás para la caldera oscilan entre los 0,80 y 2,50 kPa para asegurar un correcto funcionamiento [36]. La eficiencia térmica de una caldera varía entre el 80,0 y 90,0 % [24].

Cuando se emplean estos equipos, es recomendable que en el proceso de purificación, se remueva el H₂S contenido en el biogás, de manera que no exceda las 1 000 ppmv, pues una concentración superior, puede ocasionar una formación significativa de ácido sulfúrico y por lo tanto una corrosión grave en la caldera, además de los inconvenientes por emisiones ambientales [37].

➤ **Motores de combustión interna**

Desde los años 60, se tienen reportes de motores de combustión interna que funcionan eficientemente con biogás [37]. Existen dos tipos de motores, los de chispa y los de compresión, ambos, pueden acoplarse para funcionar con el biogás obtenido de digestores anaerobios [36]. Un motor de combustión interna de chispa, está integrado por pistones, bujías, válvulas, cigüeñal y una cámara de explosión, tal como se muestra en la **Figura 2.5**. Su funcionamiento, se basa en introducir un combustible en la cámara de explosión junto con una relación adecuada de aire (provenientes de un carburador) y empleando la chispa de la bujía generar una explosión que impulsa el pistón linealmente hacia abajo. Este último, a su vez está conectado con un cigüeñal que transforma la energía mecánica lineal en energía rotativa y dicha energía, se convierte en electricidad mediante el uso de un generador [38].

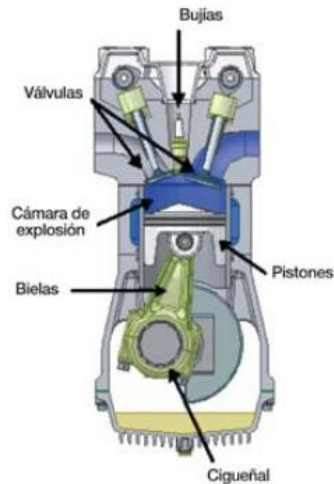


Figura 2.5. Partes de un motor de combustión interna de chispa [38]

Para que un motor de combustión interna funcione con biogás, es necesario realizar una modificación al carburador convencional y reemplazarlo por un mezclador biogás – aire [39]. El biogás se considera un buen combustible para emplear en motores pues su capacidad de mezclarse con el aire es mejor que el de la gasolina convencional y no deja depósitos de carbono en los cilindros [38]. Al igual que en las calderas, la presencia de H₂S en el biogás, puede producir un alto nivel de corrosión, por lo que se recomienda que su concentración, no exceda las 1 000 ppmv [37]. Las eficiencias que se reportan son hasta del 29,0 % o incluso llegan hasta el 65,0 % cuando se instala un sistema de recuperación de calor alrededor del motor para evitar la pérdida de energía térmica [24].

Los motores de combustión interna de compresión, funcionan de manera similar a los motores de combustión interna de chispa, solo que en ellos la mezcla de biogás y aire que ingresa a la cámara de explosión se somete al proceso de ignición empleando una pequeña cantidad de combustible diésel. Son útiles cuando las producciones de biogás son bajas y pueden llegar a tener una eficiencia eléctrica de hasta el 31,0 % [39].

➤ **Turbina de gas**

Un sistema de este tipo, como el que se muestra en la **Figura 2.6**, está compuesto por tres elementos principales: un compresor, una cámara de combustión y una turbina. Aire atmosférico ingresa al compresor, posteriormente, en la cámara de combustión, se le añade combustible generando un flujo de alta temperatura y presión. Este gas con alto nivel energético, ingresa a una turbina donde se expande y genera el movimiento de un eje. Un generador transforma la energía mecánica del eje en energía eléctrica. Por las paredes de la turbina, también se libera energía térmica que puede ser recuperada [36].

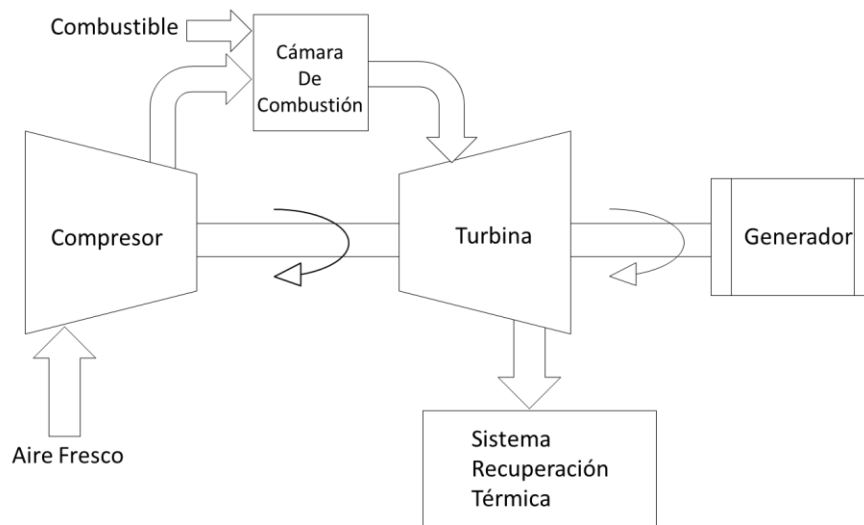


Figura 2.6. Funcionamiento básico de una turbina de gas

El biogás, puede reemplazar el combustible utilizado en la cámara de combustión. Sin embargo, las turbinas de gas son competitivas solo para generar electricidad a escalas mayores de 800 kWh [37].

➤ **Micro turbinas**

Son equipos que funcionan bajo el mismo principio que las turbinas de gas, pero su generación de potencia oscila entre los 30,0 y 500 kWh [38].

Este tipo de turbinas mejoran la eficiencia del equipo pues poseen un recuperador térmico que se utiliza para precalentar el aire comprimido antes de que se introduzca en la cámara de combustión [40].

Antes de emplearse en las micro turbinas, el biogás debe comprimirse a aproximadamente 585 kPa y debe removerse el vapor de agua contenido en este, mientras que, a diferencia de otros equipos, el H_2S no debe ser removido por efectos corrosivos pues estos equipos toleran concentraciones de hasta el 7,0 %v de este elemento [37]. Estos equipos pueden alcanzar eficiencias eléctricas entre 25,0 y 30,0 %. La eficiencia térmica por su lado, puede alcanzar porcentajes de hasta el 45,0 % [36].

2.6 Otros equipos requeridos en una planta de biodigestión

Hasta este punto en el documento, se han considerado los pre-tratamientos de la materia prima, el proceso de biodigestión, y los sistemas de purificación, potenciación y transformación energética de biogás, sin embargo, existen otros componentes y servicios que se requieren para que el funcionamiento de una planta de biodigestión sea adecuado y estos son explicados a continuación.

- **Almacenamiento de la materia prima**

Los equipos de almacenamiento dependen del tipo de materia prima que se va a emplear. De manera general, se utilizan silos para la materia prima sólida y tanques de almacenamiento cilíndricos para la materia prima líquida. El dimensionamiento de los equipos de almacenamiento está determinado por el flujo de material que se va a almacenar y la cantidad que se alimenta al digester [41]. Las materias primas deben almacenarse en tanques sellados y herméticos para prevenir emisiones y la descomposición aeróbica de la materia prima pero que a su vez permitan una fácil apertura y eliminación de posibles sedimentos. Es necesario tener en cuenta que en el caso de los silos, la materia prima puede liberar líquidos con un alto contenido de ácido nítrico que es altamente corrosivo y puede contaminar fuentes hídricas de no tomar las precauciones adecuadas [10].

- **Sistemas de alimentación, conductos y bombas**

Se pueden diferenciar la existencia de dos fluidos muy diferentes en el proceso anaeróbico: el biogás (gaseoso) y el sustrato (mezcla sólido-líquido); antes, durante y después de la digestión. La selección o el diseño del equipo de transporte se fundamentan en parámetros como viscosidad, tipo, tamaño y proporción de los sólidos, proporción de agua y caudales requeridos [42].

Cuando el sustrato puede ser bombeado, su transporte se realiza mediante bombas centrífugas y de desplazamiento positivo. Las bombas centrífugas se utilizan para transportar fluidos líquidos o lodos poco viscosos, mientras que las bombas de desplazamiento positivo ofrecen múltiples ventajas para el transporte de fluidos muy viscosos o con contenidos altos de sólidos, pues proveen altos caudales, buenos rendimientos y bajos consumos de energía. La materia prima apilable o muy sólida, puede ser alimentada al biodigestor mediante sistemas de tornillos sinfín [41].

Es necesario un correcto diseño del sistema de tuberías para evitar el reflujó del sustrato desde el digestor hasta los tanques de almacenamiento o mezclado. Las tuberías muy largas y angulares son susceptibles a perder presión. Las tuberías para el transporte de biogás deben ser instaladas en pendiente y ser equipadas con válvulas con el fin de liberar los condensados. Incluso cantidades muy pequeñas de condensado podrían conducir a la completa obstrucción de las tuberías de gas debido a una reducción de presión en el sistema [14].

- **Sistemas de calentamiento en el biodigestor.**

Mantener una temperatura constante dentro del digestor es una de las condiciones más importantes para mantener una operación estable y una alta rata de producción de biogás. Es necesario que el biodigestor se encuentre aislado y se caliente mediante el uso de fuentes externas. La fuente más común empleada proviene de la unidad de cogeneración instalada en la planta [43].

- **Almacenamiento del biogás**

La producción de biogás dentro de un biodigestor es constante durante las 24 horas del día mientras que el consumo, por lo general está concentrado en una fracción corta de tiempo. Por este motivo, será necesario almacenar el gas producido mientras no se consuma. Una de las opciones más comunes consiste en almacenar el biogás en la parte superior de los digestores empleando una membrana de gas hermética que a su vez sirve como cubierta del tanque. Para plantas de biogás a gran escala, se suele almacenar el biogás por separado y pueden ser operadas a presiones bajas, medias y altas dependiendo del uso final del gas [10].

Los tanques de baja presión operan en un rango de presiones entre 0,05 y 0,50 bar y son hechos con membranas especiales. Los tanques de almacenamiento de presiones medias y altas operan a presiones entre 0,50 y 1,50 bares y altas hasta 250 bares. Este tipo de almacenamiento tiene altos costos de operación y consumo de energía. El almacenaje a estas presiones se utiliza cuando se emplea el gas, como combustible de vehículos o inyección a redes de gas natural [10].

Todas las instalaciones de almacenamiento de biogás deben ser herméticas, resistentes a la presión y en caso de encontrarse a la intemperie se debe garantizar que resistirán la radiación, las fluctuaciones de temperatura y las posibles inclemencias climáticas. Deben estar también, equipadas con válvulas de seguridad y conectadas a chimeneas de

emergencia para quemar el biogás en caso de ser necesario. Se recomienda tener capacidad de almacenamiento de uno o dos días [41].

- **Almacenamiento del digestato**

El digestato es bombeado fuera del digestor y transportado a través de tuberías para ser almacenado por varios días. Cuando se va a usar como fertilizante, el digestato se transporta lejos de la planta y se almacena en tanques al aire libre que normalmente tienen capacidad para varios meses. El digestato se puede almacenar en tanques de concreto [43].

- **Unidad de control**

Una planta de biogás es una instalación compleja que requiere ser monitoreada y controlada mediante equipos computarizados que permitan garantizar su correcto funcionamiento y la documentación de diferentes etapas del proceso para establecer medidas correctivas. El proceso de monitoreo incluye la recolección y análisis de muestras para realizar pruebas de laboratorio que permitan optimizar los procesos bioquímicos, monitoreo del tipo y cantidad de materia prima que ingresa al digestor, temperatura del proceso, pH, cantidad de biogás y composición [42].

2.7 Aprovechamiento de bio-lodos

Durante el proceso de biodigestión anaerobia se produce junto con el biogás, un material residual conocido como digestato, que es una mezcla húmeda rica en nutrientes (fósforo, potasio y nitrógeno) que contiene materia orgánica parcialmente degradada, componentes inorgánicos y biomasa microbiana [44]. El volumen del digestato generalmente corresponde a un 90,0-95,0% del volumen total alimentado al biodigestor y debido a su composición en nutrientes puede ser utilizado como un efectivo biofertilizante y acondicionador de suelos [45].

La composición y la calidad del digestato dependen de la materia prima alimentada al biodigestor, pero de manera general está compuesto por elementos que actúan como nutrientes esenciales para las plantas como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y además contiene microorganismos como Pseudomonas, Klebsiella, Samonella, Penicillum, Shigella, Bacteriodes, Aspergillus y Bacillus, que aceleran los procesos microbianos del suelo, permitiendo a las plantas asimilar los nutrientes y tener un 25,0% más de acceso al nitrógeno que otros fertilizantes [46, 47].

Una vez termina el proceso de digestión anaerobia, el digestato se somete a una serie de tratamientos posteriores que dependen del uso final del producto como lo muestra la **Figura 2.7**. Así; los lodos con mayor calidad se someten a complejos procesos de refinamiento, eliminación de contaminantes y patógenos, y se disponen como fertilizantes de alto grado y los de menor calidad, se aplican directamente a los suelos como acondicionadores o se usan como materias primas para otros procesos industriales [41].

Los procesos de refinamiento buscan en la mayoría de los casos separar el digestato en dos fracciones: una sólida y una líquida [45] y así, reducir el volumen de las fibras, separar los nutrientes más efectivamente y reducir costos de almacenamiento y transporte [41]. Para esta separación los procesos que más se han popularizado son los de prensado y centrifugación.

La fracción sólida, conocida como fibra, es voluminosa, contiene bajos niveles de nutrientes y puede ser utilizada como acondicionador de suelos o fertilizante de baja calidad. Sin embargo, si se somete esta fibra a un proceso de compostaje, es posible obtener biofertilizantes de alto rendimiento [44].

La fracción líquida por su parte contiene la mayor parte de los nutrientes y puede ser utilizada como fertilizante de alta categoría, además, su alto contenido de agua facilita su aplicación al suelo mediante métodos convencionales de irrigación [45].

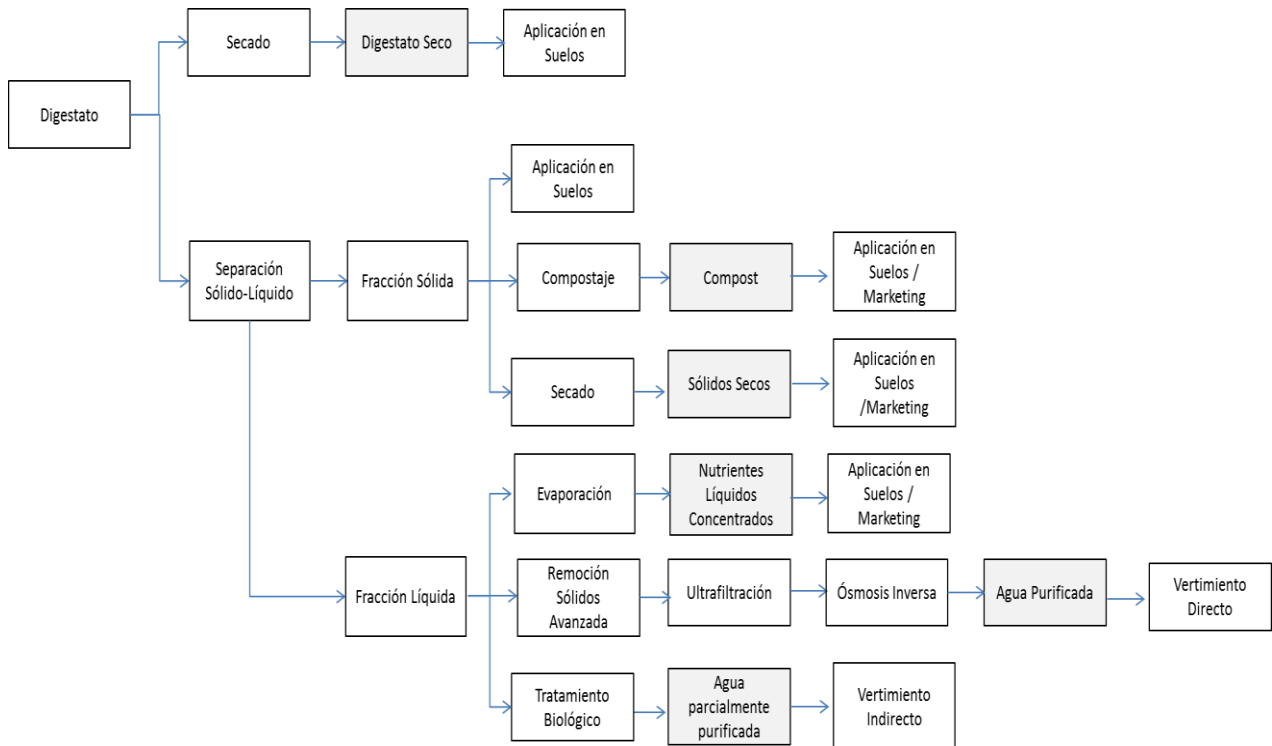


Figura 2.7. Diferentes opciones para el tratamiento y uso del digestato [41]

La utilización del digestato y su reincorporación a la tierra resulta una técnica adecuada desde el punto de vista ambiental pues permite un aprovechamiento de los recursos naturales, disminuye la contaminación, la huella de carbono, las emisiones de gases de efecto invernadero y el deterioro del suelo mediante la disminución de fertilizantes con altos contenidos químicos [47].

2.8 Impacto ambiental de una planta de digestión anaerobia

Un impacto ambiental es cualquier alteración en el medio ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad [1].

Como una fuente de energía renovable, la digestión anaerobia contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero, principalmente el metano, al evitar su liberación cuando los residuos orgánicos se descomponen y no están dispuestos correctamente [43] y el dióxido de carbono, al sustituir el uso de combustibles fósiles. Por ejemplo, si los residuos orgánicos son llevados a un relleno sanitario, sin un adecuado manejo de gases, se generan 4,20 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de residuos. La digestión anaerobia, evita la emisión de alrededor de 500 kg de CO₂ equivalente por cada tonelada procesada [48].

De forma general, al comparar diferentes tratamientos de disposición final de residuos orgánicos, se ha encontrado que la digestión anaerobia resulta ser uno de los tratamientos con menor impacto ambiental siempre y cuando el fertilizante orgánico y la energía generada en el proceso sustituyan a los fertilizantes inorgánicos y la energía no renovable, respectivamente [48, 49].

Por ejemplo, se realizó un estudio para comparar los impactos ambientales de tres alternativas de tratamiento de residuos orgánicos: relleno sanitario con recuperación de gases para producción de energía, incineración con recuperación de la energía por medio de generación de vapor para cogeneración y digestión anaerobia con recuperación de energía en forma de calor, electricidad y producción de biofertilizante. Los resultados mostraron que la digestión anaerobia es la alternativa más favorable en términos del potencial de calentamiento global, con un total de -2 300 ton de CO₂ equivalentes por unidad funcional comparados con los +30 000 y -1 500 ton de CO₂ equivalente del relleno sanitario y la incineración respectivamente. Los valores negativos indican reducción de emisiones debido a la carga evitada de producción de energía. Respecto al potencial de acidificación, la digestión anaerobia también es la mejor opción con -0,60 toneladas de SO₂ equivalente [48].

2.9 Estado de la tecnología de digestión anaerobia en el mundo.

En el año 1890 se construyó el primer biodigestor a escala real en la India y para 1896, las lámparas de alumbrado públicas de Exeter, Inglaterra, eran alimentadas con el gas producido por de la digestión anaerobia de los lodos cloacales de la ciudad. Así, comenzó la difusión de la producción de biogás y también de biodigestores para el sector rural y doméstico, siendo Europa, China e India quienes se convirtieron en los líderes de la tecnología de digestión

Para el 2007, había alrededor de 26,5 y 5,0 millones de digestores domésticos en China e India respectivamente [50]. En el caso de Europa, para el 2007 la producción de energía a partir de biogás, fue alrededor de 6,0 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep), con un aumento anual de más del 20,0 % [51].

Actualmente, Alemania es el país con mayor producción de biogás en el mundo, siendo las plantas de biogás agrícolas las de mayor desarrollo [51]. Para finales del 2013, en el sector agrícola del país se operaban aproximadamente 7 600 plantas de biogás produciendo 175 000 Nm³/h de biogás (0,0°C y 1,0atm) [51].

En los países en desarrollo, los dos diseños más comunes entre los diferentes tipos de biodigestores, son los llamados chinos de cúpula fija y los indios de campana flotante. El volumen típico de estos digestores para uso doméstico está entre los 5,0 y los 7,0 m³ y proveen alrededor de 2,70 m³ de biogás por día [50]. Por el contrario, en los países desarrollados, los biodigestores en el sector agrícola, industrial y municipal son cada vez más grandes, con una producción aproximada de 1 000 m³/h de biogás [52].

2.9.1 Estado de la tecnología de digestión en Colombia

En un estudio realizado por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia para estimar el potencial energético de la biomasa residual en Colombia, se encontró que para el año 2009 este potencial fue de 129 814 TJ/año. Este valor no es despreciable al compararlo con el consumo nacional de gas natural de 166 589 TJ/año. En la **Tabla 2.7** se presenta el potencial de biogás sectorizado [53].

Tabla 2.7. Potencial de biogás de la biomasa residual en Colombia [53]

Sector	Tipo de residuo	Masa de residuo	Potencial energético
		toneladas/año	TJ/año
Agrícola	Residuos de cosecha y residuos agroindustriales	331 638	11 657
Pecuario	Estiércol bovino, estiércol porcino y estiércol avícola	105 418 066	117 747
RSOU	Residuos de plazas de mercado, de centros de abastos y de podas.	165 021	410
Total		105 914 725	129 814

A pesar de este potencial y de que se conocen tecnologías de digestión anaerobia desde hace varios años, cuando se introdujeron sistemas en fincas, copiando inicialmente los modelos chinos (cúpula fija, presión variable) e indios (campana flotante, presión estable), está no ha sido una tecnología muy común y en general las empresas que tienen sistemas anaerobios para el tratamiento de los residuos no hacen un aprovechamiento del biogás generado por lo que este es emitido a la atmósfera [7].

A continuación se presentan algunas experiencias de diferentes organizaciones y empresas que procesan los residuos orgánicos mediante sistemas de digestión anaerobia con captura y aprovechamiento del biogás en el país.

➤ **Planta piloto de co-fermentación anaerobia [7]**

En Antioquia, el Centro Nacional de Producción Más Limpia y el Centro agropecuario la Salada del SENA, implementaron un biodigestor piloto para la estimación de factores de emisión de metano de acuerdo con las condiciones de la región.

El biodigestor es un tanque de 1,0 m³ en fibra de vidrio y se alimenta de residuos de plaza de mercado de la Central Mayorista de Antioquía, contenido ruminal de la Central Ganadera de Antioquía y suero de leche de la empresa Lácteos el Zarzal. El almacenamiento del biogás se hace en un reservorio de polietileno y es utilizado para mantener la temperatura del biodigestor. En la **Figura 2.8** se muestra el tanque de digestión anaerobia y el reservorio de biogás. El bio-lodo que se obtiene al final del proceso es dispuesto como fertilizante en un terreno aledaño.



Figura 2.8. Tanque de digestión anaerobia y reservorio de biogás [7].

➤ **Captura de metano en extractora de aceite de palma [54]**

Palmeras del Llano es una empresa mediana de extracción de aceite mediana para Colombia que en compañía de BIOTEC implementó un sistema de biodigestores para el tratamiento de los lodos de la extracción del aceite de palma. El efluente tratado (bioabono) se aprovecha para la fertilización del cultivo de palma, y el biogás para generar la electricidad de la fábrica en una planta eléctrica.

La planta cuenta con tres biodigestores, tipo pistón, elaborados en concreto, de 250 m³ cada uno, operando a una temperatura de 35 a 55°C. A partir de los 40,0 a 60,0 m³/d de lodos procesados (a una temperatura se producen alrededor de 1 000 m³/d de biogás con una composición de 65,0 %v CH₄, 34,0 %v CO₂ y 0,14 %v H₂S. El biogás se utiliza en una planta eléctrica diésel de 450 HP, produciendo 215 kWh (8 horas/d).

➤ ***Recuperación energética y material de residuos orgánicos municipales del Carmen de Viboral.***

La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural en convenio con el grupo de investigación GIEM (Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares) de la Universidad de Antioquia, iniciaron en 2012 un proyecto para que los municipios aprovechen sus residuos orgánicos. El proyecto inició realizando un diagnóstico del manejo de los residuos orgánicos en el oriente antioqueño con el objetivo de seleccionar el municipio más adecuado, según criterios de extensión del municipio, sistemas de recolección, separación en la fuente, producción de residuos sólidos y manejo de los mismos, producción de residuos orgánicos y distancia a Medellín. El Carmen de Viboral fue el municipio seleccionado, por sus buenas prácticas ambientales y el manejo de residuos orgánicos (porcentaje de separación en la fuente del 93,0% y producción de 120 toneladas/mes de residuos orgánicos que se aprovechan en compostaje principalmente). El objetivo de este piloto es servir como modelo para posteriormente escalar el sistema de aprovechamiento en otros municipios de Antioquia [55].

En la **Figura 2.9** se observa el montaje establecido en el relleno sanitario del Carmen de Viboral. El montaje consta de dos líneas paralelas de producción, cada una operando con baches de 500 kg y conformadas por **a)** un reactor de hidrólisis, **b)** un lecho de lodos y **c)** un reactor anaerobio de flujo ascendente (FAFA). En **a)** ocurre la descomposición de la materia orgánica por microorganismos aerobios y se genera un lixiviado que pasa a **b)** donde se comienza a producir biogás debido a la acción de microorganismos anaerobios sobre la carga orgánica del lixiviado. Al finalizar esta etapa el lixiviado puede contener aún carga orgánica y por lo tanto pasa a **c)** para continuar con el proceso de producción de biogás. El efluente líquido pasa a ser almacenado en un tanque como el que se presenta en la **Figura 2.10**; una parte se recircula a **a)** para promover el arrastre y la fracción restante se usa para la formulación de un fertilizante líquido. El digestato que queda en el tanque de hidrólisis se retira y se usa para compostaje. El biogás generado en **b)** y **c)** es almacenado en una bolsa de membrana reforzada. En un futuro cercano se instalará el sistema de limpieza del biogás y se determinará cuáles van a ser los usos que se le darán a este [3, 55, 56].



Figura 2.9. Sistema piloto de digestión en el relleno sanitario del Carmen de Viboral [57].



Figura 2.10. Tanque para efluente y reservorio de biogás [57].

En el primer bache del sistema, la línea 1 operó durante 90 días y el porcentaje de metano en el biogás fue de 62,8%, mientras que la línea 2 operó durante 60 días y el porcentaje de metano fue el 56,4% [55 ,56].

CAPITULO 3. MODELOS DE CÁLCULO

En este capítulo se presenta una breve explicación de los modelos de cálculo empleados para calcular el potencial de biogás y para el dimensionamiento de los equipos involucrados en la planta de biodigestión.

3.1 Cálculo del potencial de biogás

El cálculo del potencial de biogás se realizó empleando el modelo de Buswell extendido, enunciado en E 2.4. Para realizar este cálculo fue necesario hallar la fórmula empírica de las mezclas recolectadas a partir de los resultados del análisis elemental obtenido en la Universidad de Antioquia. Esta fórmula se halló suponiendo una base de cálculo de 100 kg y aplicando posteriormente la relación general mostrada en E 3.1.

$$n = \frac{\text{Peso dado del elemento}}{\text{Peso atómico del elemento}} \quad (\text{E 3.1})$$

Donde

n es el subíndice molecular del elemento calculado

Una vez obtenida la fórmula molecular, se aplicó el modelo de Buswell y finalmente mediante estequiometria se halló la cantidad de biogás producido.

3.2 Dimensionamiento de tanques cilíndricos

Para dimensionar los tanques cilíndricos y encontrar el diámetro económico, se establecen relaciones altura-diámetro (H/D) y se despeja el diámetro a partir de la ecuación del volumen de un cilindro, E 3.2:

$$V_t = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (\text{E 3.2})$$

$$R = \frac{H}{D} \rightarrow H = RD \quad (\text{E 3.3})$$

Donde,

V_t es el volumen del tanque

D es el diámetro interior del tanque

H es la altura interior del tanque

R es la relación de la altura H con el diámetro D

Reemplazando en **E 3.2** se obtiene la ecuación :

$$V_t = \frac{\pi}{4} D^3 R \rightarrow D = \sqrt[3]{\frac{4V_t}{\pi R}} \quad (\text{E 3.4})$$

Una vez hallado el diámetro es posible calcular el volumen de la superficie cilíndrica con la ecuación **E 3.5**, y por lo tanto el volumen de material necesario para la fabricación del tanque.

$$V_{ac} = \pi D H e + \left(2 * \frac{\pi}{4} D^2 e \right) \quad (\text{E 3.5})$$

Donde,

V_{ac} es el volumen del área cilíndrica

e es el espesor del tanque

3.3 Silo para almacenamiento de sólidos

A continuación se presenta un listado de todas las convenciones empleadas en los cálculos del diseño del silo.

V_C es el volumen de un cilindro

R es la relación de la altura con el diámetro

V_{cono} es el volumen de un cono

V_F es el volumen del fondo del silo

V_S es el volumen del silo

A_C es el área superficial de un cilindro

- A_{TS} es el área superficial de la tapa superior del silo
- A_{TI} es el área superficial de la tapa inferior del silo
- A_{cono} es el área superficial de un cono
- A_F es el área superficial del fondo del cilindro
- V_S es el volumen superficial del silo
- e es el espesor del material del silo

D, H, α, h, h', g y θ están dados por la **Figura 3.1** que representa el esquema empleado para realizar el diseño del silo.

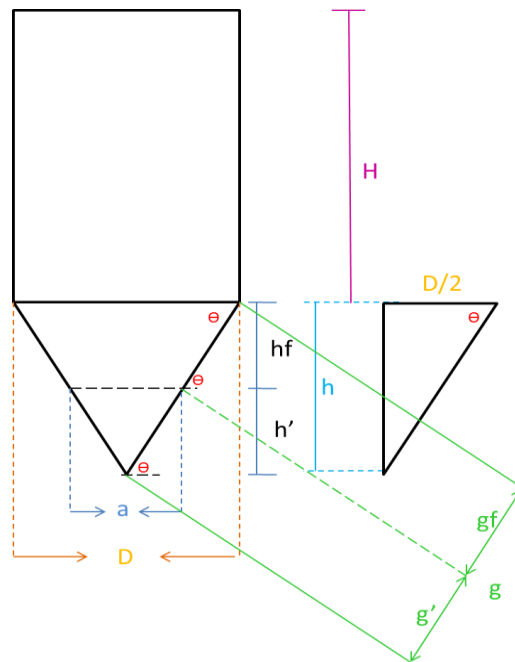


Figura 3.1. Esquema empleado para calcular el volumen del silo.

Para dimensionar los silos y encontrar el diámetro económico, se establecen relaciones altura-diámetro (H/D) y se despeja el diámetro a partir de la ecuación del volumen del silo **E 3.11**, que está conformada por la ecuación del volumen del cilindro, **E 3.6**, más la ecuación del volumen del fondo del silo, **E 3.10**:

$$V_c = \frac{\pi}{4} D^3 R \quad (\text{E 3.6})$$

El volumen del fondo del silo se calcula a partir de la ecuación **E 3.7** del volumen de un cono:

$$V_{cono} = \frac{\pi D^2 h}{12} \quad (\text{E 3.7})$$

Ya que el cono tiene una boquilla de descarga, el volumen perdido por tal boquilla se debe restar del volumen total del cono. De forma que el volumen real del fondo del silo esta expresado por la ecuación **E 3.8**:

$$V_F = \frac{\pi D^2 h}{12} - \frac{\pi a^2 h'}{12} = \frac{\pi}{12} (D^2 h - a^2 h') \quad (\text{E 3.8})$$

Donde,

$$\tan\theta = \frac{h}{D/2} \quad h = \frac{D \tan\theta}{2} \quad \text{y análogamente } h' = \frac{a \tan\theta}{2} \quad (\text{E 3.9})$$

Reemplazando **E 3.9** en **E 3.8**, se obtiene la ecuación **E 3.10** que dará finalmente el volumen del fondo del silo:

$$V_F = \frac{\pi}{12} \left[\frac{D^3 \tan\theta}{2} - \frac{a^3 \tan\theta}{2} \right] = \frac{\pi \tan\theta}{24} (D^3 - a^3) \quad (\text{E 3.10})$$

En la ecuación **E 3.11** se suman **E 3.6** y **E 3.10** para obtener el volumen total del silo:

$$V_S = V_C + V_F = \frac{\pi \tan\theta}{24} (D^3 - a^3) + \frac{\pi}{4} D^3 R \quad (\text{E 3.11})$$

Finalmente, se despeja D de la ecuación **E 3.11** como lo muestra la ecuación **E 3.12**:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_S + \frac{\pi a^3 \tan\theta}{24}}{\frac{\pi \tan\theta}{24} + \frac{\pi R}{4}}} \quad (\text{E 3.12})$$

Después de hallar el diámetro se debe calcular el volumen de la superficial del silo. Para ello, es necesario calcular en primer lugar el área superficial del cilindro con la ecuación **E 3.13**, el área superficial de la tapa superior e inferior con la ecuación **E 3.14** y **E 3.15**, respectivamente, y el área superficial del fondo del silo, con la ecuación **E 3.18**:

$$A_C = \pi DH \quad (E 3.13)$$

$$A_{TS} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (E 3.14)$$

$$A_{TI} = \frac{\pi a^2}{4} \quad (E 3.15)$$

El área lateral del fondo del silo se calcula a partir de la ecuación **E 3.16** del área superficial de un cono:

$$A_{cono} = \frac{\pi Dg}{2} \quad (E 3.16)$$

Donde,

$$g = \sqrt{\frac{D^2}{4} + h^2} \quad (E 3.17)$$

El área perdida por la boquilla se debe restar del volumen total del cono. De forma que el área real del fondo del silo está expresado por la ecuación **E 3.18**:

$$A_F = \frac{\pi D}{2} \sqrt{\frac{D^2}{4} + h^2} - \frac{\pi a}{2} \sqrt{\frac{a^2}{4} + h'^2} \quad (E 3.18)$$

Finalmente en la ecuación **E 3.19** se suman todas las áreas multiplicadas por el espesor del material para hallar el volumen de la superficie cilíndrica y por lo tanto el volumen de material necesario para la fabricación del silo.

$$V_S = (A_C + A_{TS} + A_{TI} + A_F) * e \quad (E 3.19)$$

3.4 Tanque de biodigestión

Para dimensionar el biodigestor se debe tener en cuenta el tiempo de retención de la mezcla y la geometría. El biodigestor dimensionado en este proyecto es cilíndrico. El volumen que ocupa la mezcla del reactor se determina mediante la ecuación **(E 3.20)**:

$$V = \frac{Tr}{60} \times Q \quad (E 3.20)$$

Dónde:

V es el volumen de la mezcla en m^3

Tr es el tiempo de retención en minutos

Q es el flujo volumétrico en m^3/h

Una vez obtenido el volumen de la mezcla y fijado el volumen de cada tanque, es posible saber el número de biodigestores y establecer relaciones H/D para determinar el diámetro económico siguiendo la misma metodología de los tanques cilíndricos.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presenta el reporte de información, los resultados y análisis que permiten dar cumplimiento a los objetivos considerados en este proyecto de grado. Se presenta en primer lugar una evaluación y selección de las empresas consideradas para la participación de este proyecto así como un análisis del consumo energético de cada una y la selección del tipo de energía que se va a producir. Posteriormente, empleando los reportes de laboratorio de cada mezcla se presenta los resultados para la producción de biogás teórico y real así como un análisis de la producción y composición del digestato generado. En tercer lugar, se presentan los resultados del dimensionamiento y selección de equipos para la planta de biodigestión elaborados con la información recopilada sobre el flujo de material orgánico (materia prima) y la producción de biogás y digestato del mismo. Por último se presentan los resultados obtenidos de la cotización de una compañía internacional y el análisis financiero del proyecto tanto para la tecnología diseñada como para la cotizada que definirá la factibilidad del proyecto.

4.1 Oferta de residuos orgánicos

Con el propósito de identificar la oferta de residuos orgánicos en el Oriente Antioqueño y de conocer información para determinar los posibles sectores y entidades proveedoras de insumos para la planta objeto de este trabajo de grado, se realizaron visitas a la Corporación Ambiental con jurisdicción en esta área: corporación autónoma regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare (CORNARE), ubicada en Carmen de Viboral , a la Corporación Empresarial del Oriente Antioqueño (CEO) y a la Asociación colombiana de exportadores de flores (Asocolflores), ubicada en el sector de Llanogrande, donde se recibió información que permitió contactar al personal encargado del área ambiental en compañías asociadas pertenecientes a los sectores pecuarios, agroindustriales, alimenticios y compañías con servicios de alimentación y restaurantes industriales.

El primer sector contactado para el desarrollo del proyecto fue el pecuario, mediante la Asociación Colombiana de Porcicultores (Asoporcicultores) y la Federación Nacional de Avicultores de Colombia (Fenavi). Una vez expuesta la esencia del estudio y solicitada una visita a las granjas, se percibió poco interés por parte de ambas entidades en la participación del proyecto ya que los residuos orgánicos generados en estas granjas (excretas aviares y porcinas), se disponen actualmente como abono fresco en sus propios suelos o se procesa y vende como fertilizante.

El segundo sector contactado fue la industria de alimentos para lo cual se contactaron las empresas de alimentos asociadas a la CEO: Compañía Nacional de Chocolates, Alimentos Cárnicos S.A.S planta La Ceja y planta Autopista Medellín-Bogotá, Novaventa S.A.S, Griffith Colombia S.A.S y Panamericana de Alimentos S.A.S, las cuales mostraron interés en participar del proyecto exceptuando la Compañía Nacional de Chocolates. Adicionalmente se contactaron otras dos compañías del sector: Lácteos el Ranchero y los Valles.

El tercer sector con el que se estableció contacto fue el agroindustrial, específicamente el área asociada a la floricultura mediante Asocolflores. Este sector reportó no tener inconvenientes relacionados con la disposición de los residuos orgánicos generados. Por el contrario, estos se compostan y usan como fertilizante en sus propios cultivos, convirtiéndose en elementos indispensables que no podrían ser entregados como materia prima para la planta de biodigestión.

A pesar de lo anterior, Asocolflores manifestó que los cultivos de hortensias presentaban inconvenientes debido a la generación de tallos no aptos para el compostaje para lo que requieren alternativas en cuanto a su disposición, dado esto, se contactaron dos compañías que cuentan con esta necesidad: Flores del Este y Flor Andina. Dentro del sector agroindustrial también se contactó la compañía Agrosabores.

Por último se contactaron otras compañías con generación de material orgánico asociado al servicio de sus restaurantes: Crystal S.A.S, Universidad Católica de Oriente y New Stetic.

Se estableció una muestra de 13 empresas, de las cuales se seleccionarán las de mayor potencial para el proyecto de acuerdo a una matriz de selección. Estas se listan en la **Tabla 4.1** junto con su actividad comercial.

Tabla 4.1. Empresas visitadas durante el proyecto

N°	EMPRESA	ACTIVIDAD ECONÓMICA
1	Lácteos El Ranchero	Producción de derivados lácteos.
2	Panamericana de Alimentos S.A.S	Producción de salsas, mermeladas, compotas, vegetales enlatados, néctar, esencias y bocadillos
3	Alimentos Cárnicos-La Ceja	Enlatados y platos listos congelados
4	Alimentos Cárnicos-Rionegro	Productos congelados y semielaborados a base de harinas
5	Los Valles	Frutas deshidratadas
6	Griffith de Colombia	Producción de salsas, condimentos y harinas

N°	EMPRESA	ACTIVIDAD ECONÓMICA
7	Crystal	Sector de confecciones. El área de interés en el restaurante
8	Universidad Católica de Oriente (UCO)	Sector educativo. El área de interés son las cafeterías y restaurantes.
9	Agrosabores	Cultivos de plantas aromáticas y frutas
10	New Stetic	Sector de manufactura dental. El área de interés es el restaurante industrial
11	Flor Andina	Cultivo y comercialización de Hortensias
12	Flores del Este	Cultivo y comercialización de hortensias
13	Novaventa	Distribución de artículos de venta por catálogo. El área de interés es el restaurante o residuos orgánicos asociados a devoluciones o vencimientos

En la **Figura 4.1** se presenta un mapa con la ubicación de las 13 empresas listadas anteriormente.

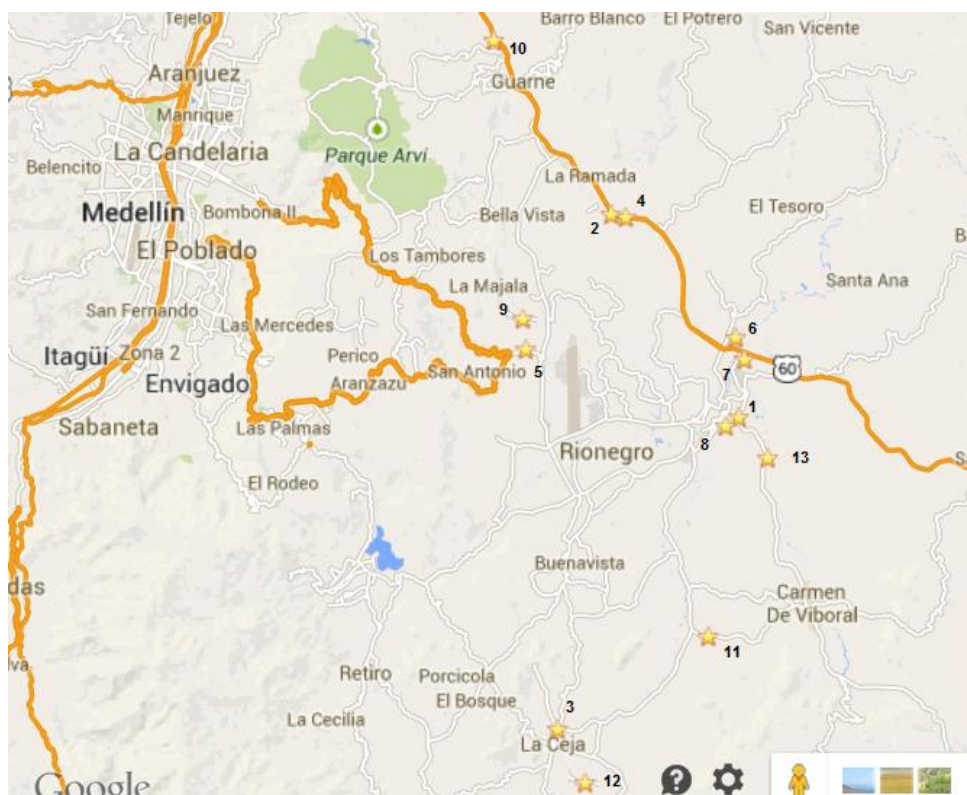


Figura 4.1. Ubicación espacial de las empresas visitadas

En cada una de las empresas se realizó el cuestionario presentado en el **Anexo 1**. La información tabulada se presenta en la **Tabla 4.2**.

Tabla 4.2. Datos tabulados generación de residuos orgánicos

EMPRESA	UBICACIÓN	TIPO DE RESIDUOS	ESTADO RESIDUO	GENERACIÓN kg/mes	COSTO DE DISPOSICIÓN \$/kg	FRECUENCIA RECOLECCIÓN	DESTINO
Ranchero	Rionegro - Vía a Marinilla	Residuos de alimentos	Líquidos	459 000	0,0	7D/sem	Se regala o se vierte
Panamericana	Autopista Med-Bog Km 35.4	Residuos de alimentos	Líquidos 60% Sólidos 40%	33 000	130	LWV	Empresa Green Group: compostaje
Alimentos Cárnicos	Km 3 La Ceja - Rionegro	Residuos de alimentos	Sólidos	18 000	0,0	5D/sem	Animales
Alimentos Cárnicos	Autopista Med-Bog Km 34	Residuos de alimentos	Líquidos 67% Sólidos 33%	3 000	0,0	5D/sem	Animales
Los Valles	Mall AeroCentro	Residuos de alimentos	Sólidos	1 650	ND	MJS	Empresa de recolección de basuras
Griffith	Autopista Med-Bog Km 39	Residuos de alimentos	Líquidos	1 000	320	6D/sem	Empresa Green Group: compostaje
Crystal	Autopista Med-Bog Km 39	Residuos de alimentos	Sólidos	911	320	MJS	Empresa GDA: compostaje
UCO	Rionegro	Residuos de alimentos	Sólidos	600	0,0	5D/sem	Animales y compostaje
Agrosabores	Vía aeropuerto - Autopista.	Residuos de cultivos aromáticos y gulupa	Sólidos	160	0,0	MJS	Compostaje
New Stetic	Autopista Med-Bog Km 22	Residuos de alimentos	Sólidos	30,0	ND	LMV	Empresa de recolección de basuras y animales
Flor Andina	Vereda Aguas Claras El Carmen	Residuos del cultivo de hortensias	Sólidos	ND	0,0	-	Formación de acolchado vegetal
Flores del Este	Vereda Las Lomitas Km 3. La Ceja	Residuos del cultivo de hortensias	Sólidos	ND	ND	-	Formación de acolchado vegetal
Novaventa	Rionegro - Vía al Carmen de Viboral	Residuos de alimentos	Sólidos	ND	ND	LMV	Empresa de recolección de basuras

4.1.1 Selección de empresas

Se elaboró una matriz de selección con base en los criterios listados a continuación, que permiten determinar cuáles empresas tienen mayor potencial para ser los proveedores de la materia prima y que ésta sea significativa para el proceso. Se estableció una calificación para cada uno de los criterios, considerando puntajes de evaluaciones, mínimo de 0, medio de 3,0 y máximo de 5,0.

- Ubicación: tiene en cuenta la cercanía a las demás empresas visitadas y facilidad de acceso, siendo la Autopista Medellín-Bogotá, el área donde se reúne la mayor cantidad de empresas y con más fácil acceso.
- Masa de residuos: considerar si es significativa la disponibilidad de residuos. La empresa que aporta el mayor flujo recibe una calificación de 5,0 puntos y proporcionalmente se califican las demás empresas.
- Separación en la fuente: si los residuos orgánicos son separados por la empresa para su posterior recolección.
- Interés: interés de la empresa en la alternativa ofrecida (biodigestión) para entregar sus residuos orgánicos.

En la **Tabla 4.3** se presenta la evaluación para los flujos de residuos generados y en la **Tabla 4.4** la matriz de selección, con las empresas seleccionadas resaltadas en gris.

Tabla 4.3. Evaluación de flujo de material

Empresa	Flujo de material	Porcentaje	Percentil	Evaluación
	kg/mes	%		
New Stetic	30,0	0,0058	0,0058	0,000290
Agrosabores	160	0,031	0,0367	0,00184
UCO	600	0,116	0,153	0,00764
Crystal	911	0,176	0,329	0,0164
Griffith	1 000	0,193	0,522	0,0261
Los Valles	1 650	0,319	0,841	0,0421
Alimentos Cárnicos Rionegro	3 000	0,580	1,42	0,0710
Alimentos Cárnicos La Ceja	18 000	3,48	4,90	0,245
Panamericana	33 000	6,38	11,3	0,564
Ranchero	459 000	88,7	100	5
Total	517.351	100		

Tabla 4.4. Matriz de selección

Empresas	Ubicación	Masa de residuos	Separación en la fuente	Interés	Promedio
Ranchero	3,0	5,0	5,0	3,0	4,0
Panamericana	5,0	0,6	5,0	5,0	3,0
Griffith	5,0	0,0	5,0	5,0	3,0
Crystal	5,0	0,0	3,0	5,0	3,0
Alimentos Cárnicos Rionegro	5,0	0,1	5,0	3,0	3,0
Los Valles	3,0	0,0	5,0	5,0	3,0
UCO	3,0	0,0	3,0	5,0	2,0
Alimentos Cárnicos La Ceja	0,0	0,2	5,0	3,0	2,0
New Stetic	5,0	0,0	3,0	0,0	2,0
Flor Andina	3,0	0,0	5,0	0,0	2,0
Novaventa	3,0	0,0	3,0	0,0	1,0
Agrosabores	0,0	0,0	5,0	0,0	1,0
Flores del Este	0,0	0,0	5,0	0,0	1,0
Promedio					2,2
Mediana					2,0

Tabla 4.5. Evaluación del promedio

Promedio	Cantidad	Porcentaje, %	Acumulado, %
4,0	1	7,69	7,69
3,0	5	38,46	46,2
2,0	4	30,77	76,9
1,0	3	23,08	100
Total	13	100	

En la **Tabla 4.5** se observa que el 76,9% de las empresas (10 en total) presentan calificaciones promedio superiores a los 2 puntos, con lo que se descartan las tres empresas con calificación menor que no hacen parte de este percentil aproximado al 80,0% (Novaventa, Agrosabores y Flores del este).

La empresa Flor Andina se descarta debido a que aunque tiene una evaluación de 2,0 puntos, esta no esta influencia por su aporte de material pues la empresa no hace seguimiento a este dato. Adicionalmente, la compañía posee una práctica en la cual todos los residuos orgánicos generados se esparcen dentro del mismo cultivo para generar una

capa de abono que aporta beneficios y humedad a los suelos por lo cual no estarían dispuestos a entregar materia prima para la planta de biodigestión.

Por su parte, la empresa New Stetic se descarta debido a que aunque tiene una evaluación de 2,0 puntos, su aporte de material es incluso 5 veces menor al de la empresa que le sigue en aportes (Agrosabores con 160 kg/mes) lo cual la convierte en un aporte poco apreciable.

4.1.2 Logística de recepción de materia prima

Buscando mantener la misma frecuencia de recolección que las compañías seleccionadas tienen actualmente en su sistema de disposición de residuos orgánicos, se analizó la logística para determinar el flujo de residuos que puede ser recibido diariamente en la planta de biodigestión discriminando el material que se recibe en estado líquido y el que se recibe en estado sólido. Esta información se presenta en la **Tabla 4.6** y **Tabla 4.7**, respectivamente. En ellas se puede apreciar que la logística de recolección de la planta de biodigestión estaría en funcionamiento de lunes a domingo y que el flujo de material orgánico líquido es significativamente mayor que el flujo de material orgánico sólido que ingresaría a la planta.

Tabla 4.6. Suministro de material orgánico líquido semanal

Proveedor	Operación mensual	L	M	W	J	V	S	D
	días/mes	kg/día						
Ranchero	28,0	16 393	16 393	16 393	16 393	16 393	16 393	16 393
Panamericana	24,0	1 650		1 650		1 650		
Alimentos Cárnicos Rionegro	20,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0		
Griffith	24	41,7	41,7	41,7	41,7	41,7	41,7	
TOTAL		18 135	16 485	18 135	16 485	18 135	16 435	16 393

Tabla 4.7. Suministro de material orgánico sólido semanal

Proveedor	Operación mensual	L	M	W	J	V	S	D
	días/mes	kg/día						
Panamericana	24,0	1 100		1 100		1 100		
Alimentos Cárnicos La Ceja	20,0	900	900	900	900	900		
Alimentos Cárnicos Rionegro	20,0	100	100	100	100	100		

Proveedor	Operación mensual	L	M	W	J	V	S	D
	días/mes	kg/día						
Los Valles	20		165		165		82,5	
Crystal	24		75,9		75,9		75,9	
UCO	20	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0		
TOTAL		2 130	1 271	2 130	1 271	2 130	158	0,00

4.2 Demanda de energía

Con el propósito de tener un estimado de costos y demanda de energía eléctrica y térmica en las empresas del Oriente Antioqueño, que fueron tenidas en cuenta para realizar este proyecto de grado, el cuestionario realizado contenía preguntas referentes a estos aspectos. Con este estimado se pretende determinar qué tipo de energía es más conveniente generar a partir del biogás, cual es un precio adecuado para su venta y finalmente identificar cuáles serían los clientes potenciales para vender la energía generada. En la **Tabla 4.8** se muestran los datos para el consumo de la energía eléctrica y energía térmica en las empresas y su respectivo costo.

Tabla 4.8. Datos tabulados demanda y costo de energía eléctrica y térmica

EMPRESA	ENERGÍA ELÉCTRICA kWh/mes	COSTO COP/kWh	ENERGÍA TÉRMICA ¹ kWh/mes	COSTO COP/kWh
Ranchero	42 039	360	113 946	22,1 (carbón)
Panamericana	174 339	273	17 784	83,8 (GN)
			887 151	23,0 (carbón)
Alimentos Cárnicos La Ceja	82 524	250 ²	244 888	78,0 ² (GN)
Alimentos Cárnicos Rionegro	58 600	250 ²	3 500	78,0 ² (GN)
Los Valles	1 537	390	0	0
Griffith	100 000	260	148 500	155 (GLP)
Crystal	447 558	207	3 857 886	21,5 (carbón)

EMPRESA	ENERGÍA ELÉCTRICA kWh/mes	COSTO COP/kWh	ENERGÍA TÉRMICA ¹ kWh/mes	COSTO COP/kWh
UCO	47 567	191	10 691	78,0 ² (GN)
Agrosabores	532	382	0	0
New Stetic	96 551	271	69 270	112,7 (GN)
Flor Andina	539	250 ²	0	0
Flores del Este	3 200	392	0	0

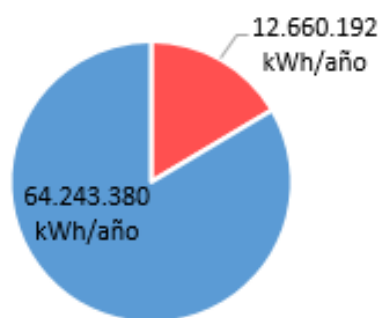
¹Para calcular la energía térmica se consideraron los siguientes factores de conversión: 1 m³ de GN = 10,25kWh, 1 ton de carbón = 8 139 kWh y 1 galon de GP = 27 kWh.

² El dato no fue proporcionado por la empresa, pero se supusieron valores racionales para realizar los cálculos.

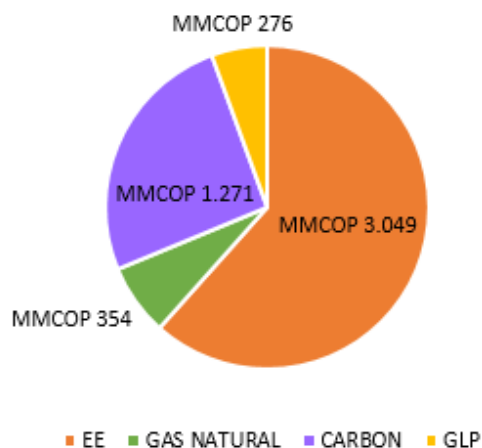
³ La compañía Novaventa no suministró la información solicitada para este cuestionario.

A partir de la información suministrada en la tabla anterior, se realizaron dos matrices energéticas, una para identificar claramente el consumo de energía eléctrica y térmica en las empresas y otra para identificar cuál de estos energéticos representa para ellas un mayor gasto anual. Estas matrices se presentan en la **Figura 4.2**.

Matriz energética del consumo anual total de las empresas



Matriz energética de costos anuales para el total de las empresas



■ ENERGÍA ELÉCTRICA ■ ENERGÍA TÉRMICA

■ EE ■ GAS NATURAL ■ CARBON ■ GLP

Figura 4.2. Matrices energéticas

Con la información proporcionada en las matrices, se percibe un mayor consumo de energía térmica en las empresas, parámetro que indicaría que es mejor vender energía

térmica producida a partir del biogás ya que tendría un mercado mayor. En el caso de la planta de biodigestión, al hablar de vender energía térmica, se entiende como la venta de metano para ser quemado y así producir energía térmica.

Sin embargo, en la matriz de costos se observa que los gastos anuales por energía eléctrica son mucho mayores a los gastos por energía térmica con respecto a los tres tipos de combustible empleados. Esto indicaría que el proyecto puede resultar más atractivo para la venta de energía eléctrica ya que se estaría impactando sobre lo que más le cuesta a las empresas en cuanto al consumo de energía.

En reportes encontrados en la literatura y según información obtenida de ciertos proveedores, la producción de metano resulta más costosa y compleja que la producción y venta de energía eléctrica en cuanto a equipos, en gran medida por la eliminación del CO₂; en cuanto a transporte ya que se deben mantener las condiciones de consumo en el punto de suministro; y en cuanto a legislación si se integra a una red municipal [79,81].

Por las razones anteriores se decidió evaluar únicamente el diseño para una planta generadora de energía eléctrica considerando un precio de venta un 10,0% menor al que actualmente pague la empresa que se seleccione para la venta de energía. La ubicación de la planta de biodigestión será contigua a la empresa que se le venderá la energía para disminuir costos asociados a su distribución, así como también se buscara disminuir costos asociados al transporte de materia prima. Es importante tener en cuenta que es un caso hipotético ya que con en la encuesta realizada se indagó por el consumo eléctrico pero no se consideró si estarían o no interesados en ser consumidores de la energía generada.

La venta de metano requiere de unas condiciones de diseño bastante distantes a las de la venta de energía eléctrica, cuya aplicación generaría un proyecto en sí mismo que se sale del alcance del proyecto, sin embargo en el análisis financiero se incluirá una evaluación superficial de la producción y venta de metano a partir de residuos orgánicos.

4.3 Determinación del potencial de biogás del material orgánico

Para realizar el cálculo del potencial de producción de biogás de las materias primas, se realizaron pruebas de humedad (a las mezclas sólidas), sólidos totales (a las muestras líquidas), pH, cenizas y un análisis elemental a 7 mezclas diferentes de todas las materias primas de la siguiente manera:

1. Mezcla compuesta: contiene residuos tanto líquidos (L) como sólidos (S) de todas las empresas seleccionadas de manera porcentual de acuerdo al flujo que cada una aportaría. Esta mezcla corresponde a la materia prima a partir de la cual se hará el diseño de la planta para dimensionar su mayor capacidad.
2. Mezcla compuesta de las tres empresas que más material aportan: es una mezcla porcentual de residuos sólidos y líquidos correspondientes a El Ranchero, Panamericana de Alimentos y Alimentos Cárnicos La Ceja.
3. Mezcla sólidos: corresponde a una mezcla porcentual de los residuos producidos en Panamericana de Alimentos, Alimentos Cárnicos La Ceja, Alimentos Cárnicos Autopista Rionegro, Los Valles, Crystal y la Universidad Católica de Oriente.
4. Mezcla líquidos: corresponde a una mezcla porcentual de los residuos producidos en El Ranchero, Panamericana de Alimentos, Griffith Colombia y Alimentos Cárnicos Rionegro.
5. Residuos líquidos de El Ranchero pues es la empresa con mayor flujo de material orgánico aportado.
6. Residuos sólidos y líquidos de Panamericana de Alimentos pues es la segunda empresa con mayor flujo de material orgánico aportado.
7. Residuos sólidos de Alimentos Cárnicos La Ceja pues es la tercera empresa con mayor flujo de material orgánico aportado.

Se decidió realizar por duplicado (una repetición de cada una) las mezclas anteriores en un día diferente de producción de las empresas seleccionadas, debido a que la composición de los residuos orgánicos generados puede ser variable.

En total, se evaluaron 14 muestras correspondientes a 2 días diferentes de producción: Día 1 y Día 2. En la **Tabla 4.9** se muestra la composición porcentual de las muestras correspondientes al Día 1 y en la **Tabla 4.10** las correspondientes al Día 2.

Para el Día 1, la empresa Alimentos Cárnicos Rionegro, se encontraba en un proceso de capacitación por lo que no entregó material orgánico. Las mezclas de este día por lo tanto se ajustaron porcentualmente dada la ausencia de flujo de esta compañía. En el Día 2, todas las empresas entregaron residuos.

Tabla 4.9. Composición porcentual de las mezclas elaboradas para análisis fisicoquímicos correspondientes al Día 1

	Mezcla Compuesta	Mezcla Solidos	Mezcla Líquidos	Mezcla Tres grandes	Ranchero	Alimento Cárnicos La Ceja	Panamericana
Ranchero (L)	89,27%	-	95,66%	90,00%	100,00%	-	-
Panamericana (S)	2,57%	38,42%		2,59%	-	-	40,0%
Panamericana (L)	3,85%	-	4,13%	3,88%	-	-	60,0%
Alimentos Cárnicos La Ceja (S)	3,50%	52,38%	-	3,53%	-	100,00%	-
Los valles (S)	0,32%	4,80%	-	-	-	-	-
Griffith(L)	0,19%	-	0,21%	-	-	-	-
Cristal (S)	0,18%	2,65%	-	-	-	-	-
UCO (S)	0,12%	1,75%	-	-	-	-	-

Tabla 4.10. Composición porcentual de las mezclas elaboradas para análisis fisicoquímicos correspondientes al Día 2

	Mezcla Compuesta	Mezcla Solidos	Mezcla Líquidos	Mezcla Tres grandes	Ranchero	Alimento Cárnicos La Ceja	Panamericana
Ranchero (L)	88,75%	-	95,46%	90,00%	100,00%	-	-
Panamericana (S)	2,55%	36,32%	-	2,59%	-	-	40,0%
Panamericana (L)	3,83%	-	4,12%	3,88%	-	-	60,0%
Alimentos Cárnicos La Ceja (S)	3,48%	49,53%	-	3,53%	-	100,00%	-
Los valles (S)	0,32%	4,54%	-	-	-	-	-
Griffith(L)	0,19%	-	0,21%	-	-	-	-
Cristal (S)	0,18%	2,51%	-	-	-	-	-
UCO (S)	0,12%	1,65%	-	-	-	-	-
Alimentos Cárnicos Rionegro (S)	0,38%	5,45%	-	-	-	-	-
Alimentos Cárnicos Rionegro (L)	0,20%	-	0,21%	-	-	-	-

4.3.1 Reporte de pruebas de laboratorio

El análisis fisicoquímico y elemental para cada una de las 14 muestras se realizó en el laboratorio del GIEM (Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares) de la Universidad de Antioquia. Los resultados correspondientes al análisis elemental de las muestras del Día 1 se presentan en la **Tabla 4.11** y el análisis fisicoquímico correspondiente al mismo día en la **Tabla 4.12**. El reporte oficial de resultados se encuentra en el **Anexo 2**.

Los análisis correspondientes a las muestras del Día 2 se encuentran en la **Tabla 4.13** y **Tabla 4.14**. El análisis elemental correspondiente a la mezcla de las 3 empresas más grandes no fue realizado por el laboratorio GIEM debido a dificultades técnicas. El reporte oficial de resultados se encuentra en el **Anexo 3**.

Tabla 4.11. Análisis elemental de las mezclas del Día 1

Primer día de recolección						
Mezcla	%C	%H	%O	%N	%S	TOTAL %
Compuesta	37,8	6,58	27,4	1,81	0,540	74,1
Ranchero	31,3	5,89	31,8	1,70	0,530	71,3
Panamericana	41,98	6,41	26,9	0,560	0,520	76,4
Alimentos Cárnicos La Ceja	36,9	5,14	27,9	0,990	0,460	71,5
Solidos	41,9	6,11	25,9	1,81	0,430	76,2
Líquidos	28,3	10,7	20,4	0,610	0,590	60,6
Tres grandes	41,44	6,39	27,8	1,19	0,450	77,2

Tabla 4.12. Análisis fisicoquímico de las mezclas del Día 1

Mezcla	Humedad total (%)	pH	Sólidos totales (mg/L)	Cenizas (%)
Compuesta	-	4,32	92 980	-
Ranchero	-	3,89	61 120	-
Panamericana	-	4,25	414 235	-
Alimentos Cárnicos La Ceja	95,3	4,40	-	5,98
Solidos	82,0	4,84	-	2,67

Mezcla	Humedad total (%)	pH	Sólidos totales (mg/L)	Cenizas (%)
Líquidos	-	4,50	96 200	-
Tres grandes	-	3,98	121 920	-

Tabla 4.13. Análisis elemental de las mezclas del Día 2

Primer día de Recolección						
Mezcla	%C	%H	%O	%N	%S	TOTAL %
Compuesta	30,1	4,35	20,0	1,66	0,530	56,7
Ranchero	37,2	5,04	19,6	4,27	0,590	66,8
Panamericana	39,1	5,21	23,3	2,32	0,500	70,5
Alimentos Cárnicos La Ceja	39,6	5,74	16,6	1,08	0,730	63,8
Sólidos	47,5	6,72	26,1	1,18	0,560	82,1
Líquidos	42,0	5,81	6,55	2,50	0,600	57,5
Tres grandes	-	-	-	-	-	-

Tabla 4.14. Análisis fisicoquímico de las mezclas del Día 2

Mezcla	Humedad Total (%)	pH	Sólidos Totales (mg/L)	Cenizas (%)
Compuesta	-	3,9	74 850	-
Ranchero	-	3,89	48 960	-
Panamericana	71,5	3,12	-	7,76
Alimentos Cárnicos La Ceja	91,9	4,12	-	4,79
Sólidos	86,3	4,11	-	4,35
Líquidos	-	4,05	61 170	-
Tres grandes	-	3,84	86 400	-

Como se puede observar en la **Tabla 4.11** y en la **Tabla 4.13**, el análisis elemental realizado no totaliza el 100%, sino que la suma de los porcentajes de cada elemento en promedio es igual al 72,5% y 66,3% respectivamente. Esto se debe a que los residuos

orgánicos recolectados no están compuestos únicamente por C, H, O, N, y S, sino que en su composición existen otros elementos inorgánicos como podrían ser P, K, Ca, entre otros.

Al encontrar que la composición de inorgánicos en los residuos recolectados es bastante significativa (27,5% para las muestras del Día 1 y 33,7% para las del Día 2), se decidió realizar nuevas pruebas en el laboratorio GIEM de la Universidad de Antioquia para caracterizar el contenido de compuestos inorgánicos. Para esta ocasión, se realizaron pruebas de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Na, Cu, Fe, Mn, B que permitirán caracterizar el digestato y adicionalmente se solicitaron pruebas de DBO y DQO. Esta prueba se realizó una sola vez para una mezcla compuesta de todas las empresas seleccionadas. Los resultados se muestran en la **Tabla 4.15** y el reporte oficial de resultados se encuentra en el **Anexo 4**.

Tabla 4.15. Caracterización de material inorgánico y otros análisis físicos para la mezcla compuesta de las empresas seleccionadas

Calcio Total (CaO)	Magnesio Total (MgO)	Potasio Total (K ₂ O)	Sodio Total (Na)	Zinc Total (Zn)	Hierro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganeso (Mn)	Boro (B)	Fósforo (P ₂ O ₅)
g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	ppm	g/L
0,820	0,353	2,085	1,021	<0,01	0,00569	<0,01	N.D	2,13	0,71

Carbono Orgánico Oxidable	DBO Total	DQO total	pH	Densidad
%	mgO ₂ /L	mgO ₂ /L	-	mg/L
65,7	13.700	171.528	4,46	1

4.3.2 Cálculo del potencial de biogás

Se eligió el modelo de Buswell extendido (CAPITULO 2.4.1) para determinar teóricamente el potencial de biogás de las 14 muestras consideradas, ya que los análisis realizados a las muestras proporcionan la información que requiere este modelo para calcular el flujo de biogás y su composición. Adicionalmente, para tener seguridad respecto a la robustez del modelo, ya que no se realizaron pruebas experimentales para validarlo con resultados propios, se probó la capacidad predictiva de dicho modelo aplicándolo a resultados de trabajos reportados en la literatura con material orgánico de una fuente similar a la del proyecto. Si la diferencia entre el resultado reportado y el resultado que se logra predecir con el modelo es menor al 10,0%, se considerará una predicción satisfactoria, indicando que es un modelo adecuado.

➤ **Validación del modelo de cálculo empleado**

Se realizó la validación del modelo de Buswell empleando los resultados reportados en cuatro artículos diferentes sobre la composición volumétrica de metano a partir de diferentes modelos de descomposición orgánica como se muestra en la **Tabla 4.16**.

Tabla 4.16. Modelos de descomposición biológica empleados en los artículos de referencia

Artículo de referencia	Composición elemental	ST (%)	Modelo de descomposición orgánico
1 [58]	$C_{76.9}H_{192.2}O_{45.2}N$	7,02	$C_nH_aO_bN_c + (n - 0,25a - 0,5b + 1,75c)H_2O \rightarrow$ $(0,5n + 0,125a - 0,25b - 0,375c)CH_4$ $+ (0,5n - 0,125a + 0,25b - 0,625c)CO_2 + cNH_4 + cHCO_3$
2 [59]	$C_{3.8}H_{6.5}N_{0.17}S_{0.023}$	64,5	$Y_m = \frac{BMP}{350} \times 100$ <p>En la cual Y_m = Producción de metano BMP (LCH₄/kg DQO) = Potencial bioquímico de metano DQO = Demanda química de oxígeno El valor de 350 se obtiene asumiendo que por cada kg de DQO transformado se obtienen 350 litros de CH₄</p>
3 [60]	$C_{28.4}H_{44.5}O_{17.7}N$	22,0	$C_aH_bO_c + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)H_2O \rightarrow$ $\left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4}\right)CH_4$ $+ \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4}\right)CO_2$
	$C_{39.86}H_{64.94}O_{30.86}N$	36,0	
	$C_{24.32}H_{41.3}O_{20.69}N$	82,0	
4 [61, 62]	$C_{3.93}H_{5.37}N_{0.181}S_{0.014}$	3,5	La composición del biogás reportada en este artículo se mide de manera práctica utilizando un cromatógrafo de gases HP 6850 con un detector de conductividad térmica.

La **Tabla 4.17** presenta la comparación del volumen porcentual de metano calculado utilizando el modelo de Buswell y el reportado por los artículos de referencia. Se observa que los resultados obtenidos mediante la ecuación de Buswell extendida no difieren en más de un 7,00% a aquellos reportados por otros autores en sus trabajos. De esta

manera, se valida este modelo como la herramienta empleada en el desarrollo de este proyecto para calcular la composición porcentual y el volumen de biogás teórico, así como para tomar decisiones acerca del diseño del proceso.

Tabla 4.17. Comparación de la composición del biogás en metano calculada a partir del modelo extendido de Buswell con composiciones reportadas por otros autores

		%v CH ₄	
	Modelo de Buswell	Artículo de Referencia	% Diferencia
1	65,2	66,9	2,57
2	67,8	67,0	1,26
3	50,9	54,0	5,75
	48,8	51,0	4,23
	46,5	49,9	6,80
4	62,2	60,0	3,62

➤ **Cálculo del potencial de biogás del material orgánico**

Una vez comprobada la validez del modelo de Buswell, este se aplicó tanto a las mezclas del Día 1 como del Día 2 para estimar los productos de su descomposición anaeróbica en lo que serían dos días diferentes de operación. Para estos días se aplicó el modelo sin tener en cuenta recirculación y asumiendo degradación completa del material orgánico, con el fin de seleccionar la mezcla con mayor generación de biogás y realizar a partir de estos datos el diseño de diferentes equipos involucrados en el proceso.

En segundo lugar se aplicó el modelo de Buswell a la mezcla seleccionada considerando un porcentaje de recirculación del 50,0% de la materia fresca alimentada [63] y el porcentaje de degradación de carbono de 65,7% reportado en la **Tabla 4.15** para determinar el flujo del digestato y de biogás real y sus respectivas composiciones. Por último, se aplicó el modelo de Dulong para conocer el poder calorífico del biogás producido por la muestra seleccionada.

➤ **Cálculo de producción de biogás para selección de mezcla**

Antes de realizar los cálculos para determinar la producción de biogás de las mezclas consideradas, se realizó una validación de los resultados obtenidos del análisis elemental para la mezcla de líquidos correspondiente al Día 1 pues tal como se muestra en la **Tabla 4.11**, esta posee un porcentaje de hidrógeno significativamente mayor al de las otras

mezclas (10,7% de H). La mezcla de líquidos del día 1 está conformada por las empresas Ranchero, Panamericana y Griffith, que aportan un flujo porcentual de 95,7%; 4,13% y 0,208% respectivamente, por lo que en teoría debería tener una composición elemental similar a la de la mezcla compuesta únicamente por el Ranchero, sin embargo el contenido de hidrógeno de esta es de 5,89%.

Empleando el flujo porcentual aportado por cada empresa a la mezcla de líquidos, una base de cálculo de 100 kg y los resultados del análisis elemental de las mezclas individuales de cada empresa, se realizó un ajuste de los resultados que se empleó en los cálculos posteriores y se muestra en la **Tabla 4.18**.

Tabla 4.18 Validación de la composición elemental reportada en las pruebas de laboratorio para la mezcla de líquidos- Día 1

Empresa	Aporte Mezcla	Aporte de C	Aporte de H	Aporte de O	Aporte de N	Aporte de S
	%	kg	kg	kg	kg	kg
Ranchero	95,7	30,0	5,60	30,5	1,60	0,50
Panamericana	4,13	1,73	0,265	1,11	0,0231	0,0215
Griffith	0,208	0,0744	0,0121	0,0452	0,0022	0,00130
Total	100	31,8	5,90	31,6	1,650	0,530
Porcentaje	%	31,8	5,90	31,6	1,70	0,50

Empleando la misma metodología anterior, se calculó la composición elemental para la mezcla correspondiente a las tres empresas que aportan mayor flujo orgánico del Día 2 debido a que como se mencionó con anterioridad no pudo ser realizada por el GIEM por dificultades técnicas. Los resultados se muestran en la **Tabla 4.19**.

Tabla 4.19 Cálculo de la composición elemental reportada en las pruebas de laboratorio para la mezcla de las empresas más grandes –Día 2

	Aporte Mezcla	Aporte de C	Aporte de H	Aporte de O	Aporte de N	Aporte de S
Empresa	%	Kg	kg	kg	kg	kg
Ranchero	0,90	33,5	4,54	17,7	1,50	0,477
Panamericana	0,0647	2,53	0,340	1,51	0,300	0,0382
Alimentos Cárnicos La Ceja	0,0388	1,54	0,220	0,650	0,100	0,0194
Total	100	37,6	5,10	19,8	1,86	0,53

Porcentaje	%	37,6	5,10	19,8	1,86	0,50
------------	---	------	------	------	------	------

Teniendo estos resultados se procedió a calcular el potencial de biogás de las mezclas. Para comenzar, se calcularon los índices estequiométricos de cada uno de los elementos que Buswell considera en su modelo (C, H, O, N, S). Esto se hizo a partir de la composición química conocida presentada en la **Tabla 4.11** y **Tabla 4.13**, los ajustes realizados previamente a las mezclas de líquidos y de las tres empresas más grandes y los pesos moleculares presentados en la **Tabla 4.20**.

En la **Tabla 4.21** y **Tabla 4.22** se presentan los índices estequiométricos (a, b, c, d y e) y los coeficientes molares calculados para cada compuesto.

Tabla 4.20. Pesos moleculares

Elemento	C	H	O	N	S
PM	12,0	1,00	15,99	14,0	32,1

Tabla 4.21. Índices estequiométricos y coeficientes del modelo de Buswell para mezclas del Día 1

	a	b	c	d	e		Coeficientes				
Mezcla	C	H	O	N	S	PM	H ₂ O	CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ S
Compuesta	3,15	6,58	1,71	0,129	0,0169	74,2	0,76	1,92	1,23	0,129	0,0169
Ranchero	2,61	5,89	1,99	0,121	0,0166	71,3	0,24	1,49	1,12	0,121	0,0166
Panamericana	3,50	6,41	1,68	0,040	0,0163	76,4	1,09	2,11	1,39	0,040	0,0163
Cárnicos Ceja	3,08	5,14	1,75	0,071	0,0144	71,5	0,98	1,72	1,37	0,071	0,0144
Sólidos	3,49	6,11	1,62	0,129	0,0134	76,2	1,26	2,05	1,44	0,129	0,0134
Líquidos	2,65	5,91	1,98	0,118	0,0166	71,5	0,28	1,52	1,13	0,118	0,0166
Cpta. Grandes	3,45	6,39	1,74	0,085	0,0141	77,2	1,05	2,05	1,39	0,085	0,0141

Tabla 4.22. Índices estequiométricos y coeficientes del modelo de Buswell para mezclas del Día 2

	a	b	c	d	e		Coeficientes				
Mezcla	C	H	O	N	S	PM	H ₂ O	CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ S
Compuesta	2,51	4,35	1,25	0,119	0,530	73,0	1,15	1,31	1,20	0,119	0,530
Ranchero	3,10	5,04	1,23	0,305	0,590	84,9	1,75	1,61	1,49	0,305	0,590

	a	b	c	d	e		Coeficientes				
Mezcla	C	H	O	N	S	PM	H ₂ O	CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ S
Panamericana	3,26	5,21	1,46	0,166	0,500	85,9	1,60	1,73	1,53	0,166	0,500
Cárnicos Ceja	3,30	5,74	1,04	0,0770	0,730	86,3	1,77	1,90	1,41	0,077	0,730
Sólidos	3,96	6,72	1,63	0,0840	0,560	99,4	1,81	2,24	1,72	0,084	0,560
Líquidos	3,50	5,81	0,41	0,179	0,600	76,0	2,28	2,16	1,35	0,179	0,600
Cpta. Grandes	3,13	5,05	1,24	0,133	0,529	81,4	1,61	1,70	1,43	0,133	0,529

El siguiente paso es, es calcular el flujo molar del sustrato que se va a degradar para producir biogás. Como en este caso no se considera recirculación pero si degradación completa, entonces este flujo corresponde al alimento total que ingresa al biodigestor. En la **Tabla 4.23** y **Tabla 4.24** se presenta información del flujo total de alimento en unidades másicas y molares y algunos parámetros de entrada como la relación C/N y el % de humedad. Para calcular el flujo másico en kg/día se tomaron los datos del día de la semana en el que se daría mayor suministro de materia prima tanto líquida como sólida (**Tabla 4.6** y **Tabla 4.7**).

El modelo de Buswell separa el sustrato que se va a degradar en su contenido de agua y su contenido de materia orgánica en base seca, por lo tanto fue necesario calcular el flujo másico en base seca para poder aplicar este modelo. Para ello se emplearon los datos suministrados por el análisis fisicoquímico: humedad en el caso de las mezclas sólidas, y sólidos totales con las muestras líquidas. El cálculo de flujo másico en base seca se hizo tomando la densidad del suero (1 020 kg/m³) ya que este es el componente presente en mayor proporción en todas las muestras que lo contienen.

Tabla 4.23. Información del alimento al digestor de las mezclas del Día 1

Mezcla	Flujo alimento	Flujo alimento en base seca	Flujo de agua alimentada	Flujo alimento en base seca	C/N	Humedad
	kg/día	kg/día	kg/día	moles/día		
Compuesta	20 265	1 842	18 423	24 839	21/1	90,9
Ranchero	16 393	979	15 413	13 742	18/1	94,0
Panamericana	2 750	1 114	1 636	14 573	75/1	59,5
Cárnicos Ceja	900	42,3	858	591	37/1	95,3

Sólidos	2 130	383	1 747	5 033	23/1	82,0
Líquidos	18 135	1 705	16 429	23.861	46/1	90,6
Cpta. Grandes	20 043	2 389	17 654	30 950	35/1	88,1

Tabla 4.24. Información del alimento al digestor de las mezclas del Día 2

Mezcla	Flujo alimento	Flujo alimento en base seca	Flujo de agua alimentada	Flujo alimento en base seca	C/N	Humedad
	kg/día	kg/día	kg/día	moles/día		%
Compuesta	20 265	1 483	18 782	20 301	18/1	92,7
Ranchero	16 393	785	15 608	9 236	9/1	95,2
Panamericana	2 750	782,9	1 967	9 114	17/1	71,5
Cárnicos Ceja	900	72,1	828	835	37/1	92,0
Sólidos	2 130	291	1 839	2 931	40/1	86,3
Líquidos	18 135	1 084	17 050	14 276	17/1	94,0
Cpta. Grandes	20 043	1 693	18 350	20 804	20/1	91,6

Una vez calculado el coeficiente molar de cada uno de los productos, y el flujo molar en base seca de alimento que se va a degradar ($C_a H_b O_c N_d S_e$ en el modelo de Buswell), mediante estequiometría, se calculó el flujo molar y la composición en base seca de cada uno de los productos de la reacción, los cuales en conjunto forman el biogás en base seca. A partir del flujo molar y el peso molecular de los compuestos presentados en la **Tabla 4.20**, se calculó el flujo másico y a partir de este último y las densidades presentadas en la **Tabla 4.25**, se calculó el flujo volumétrico. Posteriormente se calcularon estos mismo datos en base húmeda, asumiendo que la composición de agua en el biogás es del 5% v/v (caso más crítico según la **Tabla 2.2**). La composición del biogás en base húmeda se presenta en la **Tabla 4.26 y 4.27**

Tabla 4.25. Densidad de los componentes del biogás

Datos ecuación de gases ideales			Calculo de la densidad (kg/m ³)				(kg/m ³)
R	Temperatura	Presión	CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ S	H ₂ O
atm·L/K·mol	K	atm					
0,0821	298,1	1	0,654	1,79	0,695	1,39	1,00

Tabla 4.26. Composición del biogás producido por las mezclas del Día 1 en base húmeda.

Mezcla	CH ₄		CO ₂		NH ₃		H ₂ S		H ₂ O	
	m ³ /d	%v	m ³ /d	%v	m ³ /d	%v	m ³ /d	%v	m ³ /d	%v
Compuesta	1 161	55,0%	755	35,8%	78,5	3,72%	10,2	0,49%	105	5,0%
Ranchero	500	51,4%	377	38,8%	40,8	4,20%	5,56	0,57%	48,6	5,0%
Panamericana	749	56,2%	497	37,3%	14,3	1,07%	5,78	0,43%	66,6	5,0%
Cárnicos Ceja	25,7	51,3%	19,8	41,1%	1,02	2,12%	0,208	0,43%	2,41	5,0%
Solidos	251	53,5%	178	37,8%	15,9	3,38%	1,65	0,35%	23,5	5,0%
Líquidos	883	51,7%	662	38,7%	68,8	4,03%	9,64	0,56%	85,4	5,0%
Cpta. Grandes	1 547	54,8%	1 061	37,6%	64,3	2,28%	10,6	0,38%	141	5,0%

Tabla 4.27. Composición del biogás producido por las mezclas del Día 2 en base húmeda.

Mezcla	CH ₄		CO ₂		NH ₃		H ₂ S		H ₂ O	
	m ³ /d	%v	m ³ /d	%v	m ³ /d	%v	m ³ /d	%v	m ³ /d	%v
Compuesta	648	39,3%	599	36,3%	58,9	3,57%	261	15,8%	60,7	5,0%
Ranchero	363	38,3%	338	35,6%	68,9	7,26%	132	13,9%	35,0	5,0%
Panamericana	384	41,8%	342	37,2%	36,9	4,01%	110	12,0%	33,9	5,0%
Cárnicos Ceja	38,7	43,8%	28,8	32,7%	1,58	1,79%	14,8	16,7%	3,25	5,0%
Solidos	160	46,1%	124	35,7%	6,04	1,74%	39,8	11,5%	12,8	5,0%
Líquidos	752	47,8%	471	30,0%	62,3	3,97%	207	13,2%	57,9	5,0%
Cpta. Grandes	867	42,7%	726	35,7%	67,6	3,33%	269	13,3%	74,8	5,0%

Al sumar el flujo de producción de cada uno de los componentes del biogás en base húmeda, se obtiene el flujo total de biogás, presentado en la **Tabla 4.28** y **Tabla 4.29**.

Tabla 4.28. Producción de biogás en diferentes unidades en base húmeda, Día 1

Mezcla	Flujo másico de biogás	Flujo volumétrico de biogás	Generación específica de biogás
	kg de biogás/d	m ³ de biogás/d	m ³ de biogás/ton alimentada base h.

Compuesta	2 293	2 109	104
Ranchero	1 091	972	59
Panamericana	1 470	1 333	485
Cárnicos Ceja	55,3	48,2	54
Sólidos	522	470	221
Líquidos	1 916	1 708	94
Cpta. Grandes	3 123	2 824	141

Tabla 4.29. Producción de biogás en diferentes unidades en base húmeda, Día 2

Mezcla	Flujo másico de biogás	Flujo volumétrico de biogás	Generación específica de biogás
	<i>kg de biogás/d</i>	<i>m³ de biogás/d</i>	<i>m³ de biogás/ton alimentada</i>
Compuesta	1 967	1 627	80,3
Ranchero	1 113	937	57,1
Panamericana	1 082	908	330
Cárnicos Ceja	102	87,1	96,7
Sólidos	400	342	161
Líquidos	1 731	1 550	85,5
Cpta. Grandes	2 372	2 005	100

En ambos días se observa que la mayor producción de biogás corresponde a la mezcla *Compuesta Grandes* (2 824 m³/d y 2 005 m³/d), la cual está conformada por residuos de las tres empresas más grandes: El Ranchero, Panamericana y Alimentos Cárnicos de La Ceja. De igual manera, el flujo de metano producido en esta mezcla es el más alto para los dos días (1 574 m³/d y 867 m³/d). En base a los datos anteriores y dado que las tres empresas más grandes aportan el 99,19% y el 98,62% del material orgánico de la planta para el día uno y dos respectivamente como lo muestran la **Tabla 4.9** y **Tabla 4.10**, se realizarán los cálculos para la producción de biogás real y los diseños de los equipos involucrados empleando la caracterización fisicoquímica de la mezcla de las 3 empresas más grandes y específicamente la correspondiente al **Día 1** para así, cubrir una máxima capacidad instalada de producción de biogás dentro de la planta. Adicionalmente, se observa que los parámetros de C/N y el % de humedad para la mezcla de este día son de 35,0 y 88,1% respectivamente, encontrándose en rangos aceptables para trabajarlos en planta sin necesidad de realizar grandes ajustes.

➤ *Ajuste de la composición elemental de las muestras*

Antes de proceder a estimar la “producción real” de biogás, es necesario realizar un ajuste de la composición de la mezcla seleccionada, pues como se mostró en la **Tabla 4.11** y **Tabla 4.12**, el material orgánico analizado no está 100% compuesto por C, H, O, N y S, sino que contiene otros metales que no se convierten en biogás pero que entran a hacer parte del digestato formado en el proceso de digestión anaerobia. Para realizar este cálculo se empleó el contenido de los elementos inorgánicos reportados en la **Tabla 4.15** y se asumió que las demás mezclas contienen la misma proporción de elementos. El zinc y el Cobre se despreciaron debido a que presentaron un bajo contenido dentro de la materia prima (<0.01 g/L). La composición ajustada se presenta en la **Tabla 4.30**.

Tabla 4.30. Composición elemental ajustada para las muestras del Día 1.

Compuesta Grandes					
%C	41,4	%S	0,45	%Fe	0,034
%H	6,39	%Ca	3,46	%B	0,013
%O	27,8	%Mg	1,26	%P	1,83
%N	1,19	%K	10,2	% TOTAL	100
%S	0,45	%Na	6,02		

De acuerdo a la recopilación teórica realizada en el CAPÍTULO 2, se sabe que el Ca, Mg, K y Na pueden llegar a ser tóxicos para los microorganismos que llevan a cabo el proceso de la biodigestión si se encuentran en concentraciones muy altas. La **Tabla 4.31** muestra la concentración teórica de los elementos tóxicos y la concentración en las muestras del Día 1.

Tabla 4.31. Concentraciones de elementos tóxicos en las muestras del Día 1.

	Ca	Mg	K	Na
	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>
Concentración teórica máxima	4 500	1 500	4 500	5 500
Concentración en la muestra	34 571	12 557	102 102	60 228

Los resultados muestran que todos los elementos se encuentran significativamente sobre las concentraciones tóxicas teóricas, sin embargo para poder saber si realmente estos elementos pueden llegar a inhibir la digestión anaerobia es necesario realizar una prueba a escala laboratorio para verificar el desarrollo del proceso. Este análisis se sale del

alcance del proyecto por lo que se propone verificarlo en trabajos futuros y se continuarán desarrollando los cálculos de la producción real de biogás teórica basada en la composición elemental de C, H, O, N y S.

➤ *Producción de biogás real*

Para calcular la producción real de biogás de la mezcla elegida: *Compuesta Grandes-Día 1*, se empleó el mismo procedimiento usado anteriormente para determinar la producción de biogás de las mezclas de los Días 1 y 2 con el modelo de Buswell, pero considerando ahora un porcentaje de degradación del carbono del 65,7% según los resultados reportados en la **Tabla 4.15**. Una vez obtenido el flujo de biogás y del digestato bajo estas condiciones, se estableció un porcentaje de recirculación del digestato equivalente al 50,0% de la materia prima fresca que ingresa al reactor y se recalculó la producción de gas. La **Tabla 4.32** muestra la cantidad de materia prima que se degrada y algunas de sus características antes de la recirculación y después de que se reintegra una porción del digestato.

Tabla 4.32. Flujo de alimento para la producción de biogás antes y después de la recirculación.

Mezcla	Flujo alimento	Flujo alimento en base seca	C/N	Humedad
	kg/día	kg/día		%
Antes de recircular	835	100	35/1	88,1
Después de recircular	1 253	126,1	35/1	89,9

El cálculo del potencial real de biogás se realizó empleando el análisis elemental ajustado para la mezcla de las tres empresas más grandes y las características del flujo alimentado de la misma, lo que permitió determinar el flujo de materia prima por componentes antes de la recirculación y posteriormente con ella como lo muestra la **Tabla 4.33**.

Tabla 4.33. Flujo de materia prima por componentes para la producción de biogás antes y después de recirculación.

Componente	Antes de recircular		Después de recircular	
	kg/h	kmol/h	kg/h	kmol/h
C	41,2	3,43	48,8	4,06
H	6,36	6,30	7,54	7,47
O	27,7	1,73	32,8	2,05

Componente	Antes de recircular		Después de recircular	
	kg/h	kmol/h	kg/h	kmol/h
N	1,18	0,0846	1,40	0,100
S	0,448	0,0140	0,531	0,0166
Ca	3,44	0,0859	5,31	0,132
Mg	1,25	0,0514	1,93	0,0793
K	10,2	0,260	15,7	0,401
Na	5,99	0,261	9,25	0,402
Fe	0,0334	0,000598	0,0515	0,000923
B	0,0128	0,00118	0,0197	0,00183
P	1,82	0,0587	2,81	0,0906
H ₂ O	736	40,8	1 127	62,5
Total	835	53,1	1.253	77,3

A partir del flujo de materia prima por componentes se creó una fórmula molecular con los elementos degradables de tipo $C_aH_bO_cN_dS_e$, considerando una degradación del carbono del 65,7% como se mencionó anteriormente. Los subíndices para la fórmula molecular empírica del material a degradar se presentan en la **Tabla 4.34**.

Tabla 4.34 Fórmula molecular empírica para la degradación de material orgánico de la mezcla de las tres empresas más grandes.

	C	H	O	N	S
	a	b	c	d	e
Antes de recirculación	2,25	4,14	1,14	0,0600	0,0100
Después de recirculación	2,67	4,91	1,35	0,0659	0,0109

Estos subíndices permitieron aplicar la ecuación de Buswell y determinar tanto la composición como el flujo real de biogás que se generaría en la planta de biodigestión y posteriormente conocer el flujo y la composición del digestato. La **Tabla 4.35** muestra los resultados obtenidos antes y después de recircular para la producción de biogás real.

Tabla 4.35. Flujo y composición del biogás real producido a partir de la ecuación de Buswell antes y después de recirculación.

Flujo de biogás producido	Antes de recircular			Después de recircular		
	%v	m ³ /h	kg/h	%v	m ³ /h	kg/h
CH ₄	55,5	32,7	21,4	55,5	38,8	25,4
CO ₂	38,1	22,4	40,3	38,1	26,6	47,8
NH ₃	2,31	1,36	0,946	2,31	1,61	1,12
H ₂ S	0,381	0,225	0,313	0,381	0,266	0,371
H ₂ O	3,73	2,20	2,197	3,73	2,61	2,61
TOTAL	100	58,9	65,2	100	69,8	77,3

Se puede observar como el proceso de recirculación permite aprovechar mejor el material orgánico que se degrada y obtener un flujo mayor de biogás. Antes de la recirculación, se obtuvo un flujo de 58,9 m³/h mientras que después de esta el flujo fue de 69,8 m³/h.

Además del biogás, se calculó el flujo de digestato producido durante la digestión anaerobia antes y después de la recirculación sabiendo que un 34,3% del carbono orgánico no se degrada durante la reacción. Los resultados se muestran en la **Tabla 4.36**.

Tabla 4.36 Composición por componente del digestato generado durante el proceso

Flujo del digestato por componente	Antes de recircular	Después de recircular
	kg/h	kg/h
C	14,1	16,7
H	2,18	2,59
O	9,49	11,3
N	0,406	0,482
S	0,154	0,182
Ca	3,44	5,31
Mg	1,25	1,93
K	10,2	15,7
Na	5,99	9,25
Fe	0,0334	0,0515
B	0,0128	0,0197

Flujo del digestato por componente	Antes de recircular	Después de recircular
	kg/h	kg/h
P	1,82	2,81
H₂O	721	1 109
Total	770	1 175

Como se ha mencionado anteriormente, el digestato recirculado actúa como un inóculo y permite que la digestión anaerobia comience más rápido y por lo tanto se tengan menos tiempos de retención de las mezclas dentro del reactor. El digestato que no es recirculado, puede ser dispuesto para otros usos ya sea como fertilizante o quemado para aprovecharlo como biocombustible. La **Tabla 4.37** muestra el flujo de digestato recirculado por componente, equivalente al 50,0% de la materia fresca alimentada (835 kg/h) así como el flujo y la composición del digestato que no se reintegra al reactor después de recirculación sabiendo que en total se forman 1 175 kg/h de digestato una vez la operación se estabiliza.

Tabla 4.37 Flujo de digestato recirculado y extraído por componentes.

Componente	Flujo recirculado	Flujo extraído
	kg/h	kg/h
C	7,7	9,09
H	1,2	1,404
O	5,1	6,107
N	0,2	0,2615
S	0,1	0,0989
Ca	1,9	3,441
Mg	0,7	1,250
K	5,5	10,16
Na	3,3	5,994
Fe	0,0	0,03341
B	0,0	0,01279
P	1,0	1,819
H₂O	391,0	718,1
Total	418	758

La **Figura 4.3** muestra de manera global el balance de masa a la entrada del reactor sin recirculación y con recirculación de acuerdo a los resultados presentados en las tablas anteriores.

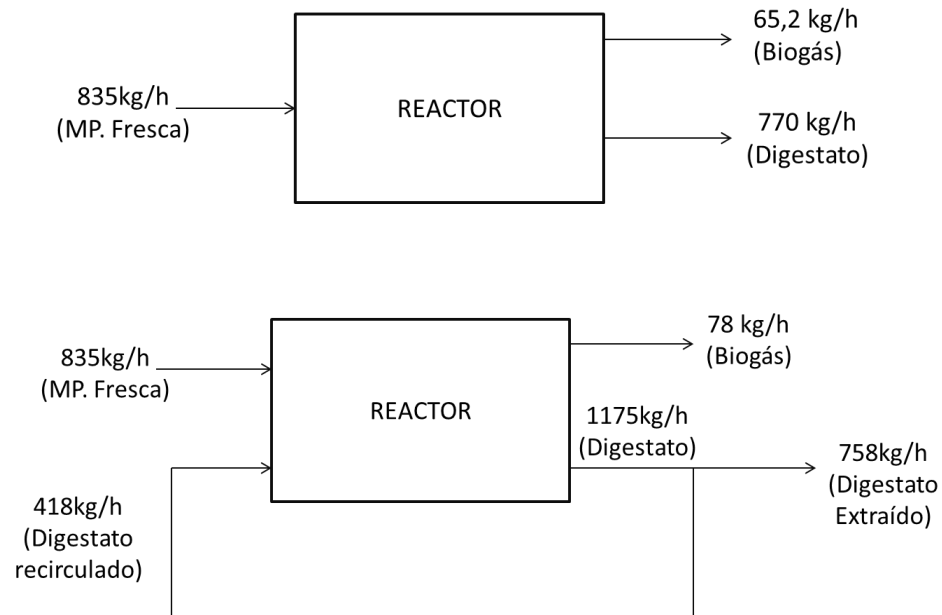


Figura 4.3. Balance de masa global para la producción de biogás en el reactor antes y después de recircular

4.3.3 Análisis de disposición de los bio-lodos

Como se ha visto en la literatura, los lodos que salen del proceso de biodigestión constituyen un subproducto que con ciertos tratamientos puede ser muy valioso y tener incluso un valor comercial. En el caso de la planta de biodigestión objeto de estudio, se generan 770 kg/h de digestato de los cuales 385 kg/h no se recirculan como se observa en la **Tabla 4.37** y por lo tanto son susceptibles de ser aprovechados. Para este proyecto de grado se analizaron conceptualmente tres usos finales para aprovechar o disponer el digestato, la primera, empleándolo como combustible, la segunda aplicándolo como fertilizante líquido y la tercera disponiéndolo en un relleno sanitario.

El digestato no ha sido usado frecuentemente como combustible, pero algunas referencias encontradas en la literatura han mostrado que podría ser una alternativa interesante al permitir la reducción de los altos costos asociados al transporte y almacenamiento de los lodos debido a su contenido de humedad de hasta un 90,0% [64].

Para ser usado como combustible el digestato debe someterse a un proceso de secado y así obtener un porcentaje de sólidos de hasta un 10,0%.

El flujo por componentes del digestato, reportado en la **Tabla 4.36**, muestra que de los 1 175 kg/h de digestato resultante cuando la operación es estable, 1 109 kg/h son agua, es decir, los lodos poseen una humedad del 94,7% mientras que el resto es material sólido. De la misma tabla, se observa que el flujo de carbono es de 16,7 kg/h. Con estos datos entonces se calculó en primer lugar, la energía requerida para secar el digestato asumiendo que sale a 55,0°C del reactor y en segundo lugar, se calculó la energía disponible en el carbono. Los resultados se presentan en la **Tabla 4.38**.

De dicha tabla se puede apreciar que la energía requerida para secar el digestato es mayor que la energía disponible en el contenido de carbono del mismo en un 34,2% lo que lleva a concluir que emplear este lodo como combustible no es rentable pues será más costoso realizar los pretratamientos necesarios para ajustarlo que su valor final.

Tabla 4.38 Flujos de energía asociados al uso del digestato como combustible.

Flujo de energía requerido para secar el digestato ¹	kcal/h	206 189
Flujo de energía disponible en el carbono ²	kcal/h	52 600
Déficit de energía	kcal/h	153 589
Déficit de energía	%	34,2

¹Flujo calculado bajo las siguientes condiciones: $C_{pH_2O}=1$ kcal/kg °C; $T_f=100^\circ\text{C}$; $T_i=55^\circ\text{C}$; $\Delta H_{\text{vap}}=539$ kcal/kg

²Flujo calculado empleando un poder calorífico del carbono de 8140 kcal/kg [33]

La otra opción sujeta a análisis es emplear el digestato como un fertilizante. Esta opción es la más difundida para este subproducto debido a su riqueza en nutrientes. En el mercado es común encontrar los fertilizantes tradicionales codificados con un índice NPK, acrónimo de los elementos nitrógeno, fósforo (en forma de P_2O_5) y potasio (en forma de K_2O), considerados en la agricultura como macronutrientes fundamentales en suelos destinados al cultivo. Otro tipo de fertilizantes más complejos, contienen además de macronutrientes, elementos secundarios como azufre, magnesio o calcio y micronutrientes como boro y zinc [65]. Un buen fertilizante posee una relación C/N de al menos 30/1 y las composiciones típicamente fabricadas son: NPK 7-12-27, NPK 8-15-15, NPK 8-24-8, NPK 8-24-16, NPK 9-18-27, NPK 12-24-12 y NPK 15-15-15 [66].

La tabla **Tabla 4.39** muestra la composición porcentual de los nutrientes contenidos en el digestato disponible para aprovechamiento en la planta de biodigestión. Se observa una relación de C/N de 35 a 1, siendo la ideal para un fertilizante de al menos 30 a 1. Aunque

el contenido de nitrógeno es bajo (0,828%), el contenido de fósforo y potasio es significativo (10,6% y 30,7% respectivamente) por lo que ajustando el contenido de nitrógeno con otros materiales ricos en este elemento se puede obtener un fertilizante con valor comercial. Además, el digestato contiene azufre, magnesio, calcio y boro dándole riqueza en micronutrientes y la posibilidad de convertirse en un fertilizante NPK complejo que aumenta su valor.

Tabla 4.39 Composición porcentual de macro y micronutrientes del digestato extraído

	Relación C/N del digestato		35/1
Macronutrientes	Porcentaje de N, bs	%	0,828
	Porcentaje de P ₂ O ₅ , bs	%	10,6
	Porcentaje de K ₂ O, bs	%	30,7
Micronutrientes	Porcentaje de S, bs	%	0,249
	Porcentaje de MgO, bs	%	4,41
	Porcentaje de CaO, bs	%	5,23
	Porcentaje de B, bs	%	0,0322

Aunque el análisis de los pretratamientos que deben aplicarse al digestato para convertirlo en abono no está dentro del alcance del proyecto, el análisis muestra que el digestato tiene todo el potencial en nutrientes para serlo y con un procesamiento adecuado para ajustar las composición a niveles usuales podría realizarse y considerar la posibilidad de comercializarlo en caso de ser rentable financieramente.

La tercera y última opción que se va a analizar, es disponer el digestato en un relleno sanitario. Esta última opción requiere realizar a los lodos un proceso de separación de fases. La fase líquida se lleva a una planta de tratamiento para posteriormente verterla en una fuente hídrica y la fase sólida se lleva a un vertedero. Para fines prácticos de este proyecto se considerará únicamente un costo de disposición con terceros de 15 000 \$/m³ de lixiviados [67], asumiendo que todos los tratamientos correspondientes serán realizados por estos.

4.3.4 Poder calorífico del biogás

Para calcular el poder calorífico superior e inferior del biogás de la mezcla seleccionada (Compuesta Grandes –Día 1), se empleó el modelo de Dulong extendido para combustibles secos ((E 2.10 y(E 2.11). El cálculo poder calorífico superior en kcal/kg,

requiere la composición elemental másica de C, H, O, N y S en base seca del combustible como se muestra en la **Tabla 4.40**.

Tabla 4.40. Composición elemental del biogás en base seca para la mezcla compuesta grandes-Día 1.

Compuesto	Composición (%w)
C	42,9
H	8,86
O	46,5
N	1,24
S	0,467
TOTAL	100,0

El poder calorífico inferior, desde el punto de vista de la combustión, da una idea más clara de la energía que realmente se tiene disponible en el combustible, para calcularlo empleando el modelo de Dulong es necesario conocer el porcentaje de humedad másico del biogás. Este dato se calculó a partir de las composiciones conocidas del biogás mostradas en la **Tabla 4.35**, pues para un flujo de biogás de 77,3 kg/h, el 3,47% es agua. Los resultados para el biogás sin remoción de impurezas se muestran en la **Tabla 4.41**.

Tabla 4.41. Poder calorífico inferior y superior del biogás sin remoción de contaminantes

Poder calorífico superior (PCS)	kcal/kg	4 547
	kcal/m ³	4 970 ¹
Poder calorífico inferior (PCI)	kcal/kg	4 521
	kcal/m ³	4 942 ¹

¹ Este cálculo se realizó empleando la densidad del biogás húmeda: 1,09kg/m³

Los datos anteriores muestran la energía contenida en el biogás producido con la mezcla de las tres compañías más grandes al salir del reactor, sin embargo, en la práctica, las impurezas y contaminantes del biogás deben ser removidos. Se recalculó el poder calorífico superior e inferior para la misma mezcla considerando una remoción completa del H₂S y del NH₃ como se muestra en la **Tabla 4.42**.

Tabla 4.42. Poder calorífico inferior y superior del biogás con remoción de contaminantes

Poder calorífico superior (PCS)	kcal/kg	4 505
	kcal/m ³	4 924 ¹
Poder calorífico inferior (PCI)	kcal/kg	4 479
	kcal/m ³	4 895 ¹

¹ Este cálculo se realizó empleando la densidad del biogás húmeda: 1,09kg/m³

Al remover los contaminantes del biogás (H₂S y NH₃) se observa una leve reducción en el PCI, esto se debe a que durante la combustión, la oxidación de estos compuestos, forma SO_x y NO_x, mediante reacciones exotérmicas que aportan energía al biogás. A pesar de esto, se hace necesario eliminar estos compuestos pues son corrosivos y por lo tanto deterioran los equipos y acortan su vida útil.

4.4 Evaluación de tecnologías de biodigestión

Se evaluó la opción de construir la planta de biodigestión con tecnología importada suministrada por proveedores con experiencia en el área y se evaluó la opción de realizar el diseño y la selección de los equipos para dicha planta.

4.4.1 Proveedores internacionales de tecnologías de biodigestión

Con el fin de analizar y comparar tecnologías extranjeras con el diseño de la planta de biodigestión que se desarrollaría en este proyecto, se buscaron compañías internacionales especializadas en la construcción de plantas de biogás y generación de energía.

La tecnología desarrollada para la producción de biogás en Europa, especialmente en Alemania es altamente efectiva y son reconocidos como los más grandes productores de biogás del mundo. Dado lo anterior se decidió que la mejor opción era seleccionar compañías Europeas debido a su trayectoria y experiencia. Adicionalmente, Ambiental Mente S.A.S. para la cual se desarrolla el proyecto ha mantenido un contacto previo al inicio de este estudio de pre-factibilidad con dos empresas especializadas en el diseño y construcción de estas plantas: Biogas Nord y Organic Waste Systems (OWS) ubicadas en Alemania y Bélgica respectivamente por lo que se encontró conveniente seleccionar estas dos compañías y contactarlas para solicitar una cotización de sus productos y servicios.

Las plantas de biogás instaladas por Biogas Nord utilizan un procedimiento de flujo continuo de digestión, utilizando uno o más digestores de hormigón a través de los cuales se bombea sustrato continuamente. Los digestores están equipados con hasta cuatro dispositivos de agitación y techos de doble membrana para el almacenamiento de gas. Los calefactores están instalados dentro de los muros de los digestores. El biogás producido se convierte en energía eléctrica y térmica mediante un generador eléctrico. Parte de la energía eléctrica producida en las plantas de biogás se utiliza en ella misma, mientras que el resto se introduce a la red pública de electricidad. La compañía se encarga de todos los aspectos relacionados con el diseño, construcción, puesta en marcha, mantenimiento y reparación. Su planta más pequeña instalada hasta el momento produce 75,0 kW, mientras que la más grande produce 12,0 MW.

Por su parte, OWS, ubicada en Bélgica diseñó y patentó el proceso DRANCO (Dry Anaerobic Composting) que permite un tratamiento avanzado y confiable para realizar biodigestión Anaerobia. El proceso DRANCO es único debido al diseño vertical del reactor, la alta concentración de sólidos y la ausencia de agitación dentro del digestor. El biogás producido se utiliza para producir calor o electricidad o se trata y se convierte en biometano que puede ser inyectado a las redes industriales o domésticas de gas natural.

De estas dos compañías internacionales contactadas para la cotización de tecnologías de biodigestión, se recibió respuesta únicamente de OWS, detallando el proceso DRANCO.

➤ ***Tecnología de biodigestión de OWS***

Este proceso, inicia con el almacenamiento de la materia prima. La instalación incluye silos para almacenar únicamente material orgánico sólido. En caso de poseer material orgánico líquido debe solicitarse por separado el diseño de este.

Los pre-tratamientos realizados a la materia prima deben garantizar que esta se encuentre en condiciones óptimas para ingresar al reactor. Se recomienda mantener un tamaño de partícula inferior a 10 mm y mantener una relación C/N entre 22,0 y 40,0.

Después del almacenamiento y los pre-tratamientos, la materia prima es llevada a una unidad de mezclado donde se mezcla con digestato proveniente del reactor. Esto permite que la degradación de la materia orgánica fresca comience más rápidamente dentro del reactor, que se reduzcan costos al evitar la instalación de un agitador en el digestor y evitar problemas por posibles fluctuaciones en la composición de la mezcla. El transporte y dosificación de la materia prima sólida hacia la unidad de mezclado se realiza mediante tornillos sinfín y tornillos dosificadores respectivamente.

La mezcla de digestato y materia prima fresca es bombeada al reactor por una tubería que ingresa desde la parte inferior del mismo hasta la parte superior y permite al sustrato caer por gravedad sin requerir un proceso de agitación. En el reactor ocurren todas las etapas de biodigestión en un período de 30 días.

Los reactores de DRANCO son cilindros verticales hechos de acero aislado térmicamente que trabajan en un rango de temperaturas entre 48,0 y 55,0°C. Cuentan con una salida superior para la extracción del biogás y una salida inferior para extraer el digestato tanto para el reciclo como para almacenaje. El digestato recirculado debe mantener la misma temperatura del reactor por lo que los tornillos sinfín encargados de transportarlo se calientan empleando agua. El biogás por su parte, sale del digestor por la diferencia de presión y está compuesto por metano en un 54% y dióxido de carbono en un 46% aunque es claro que esta composición depende del tipo de sustrato empleado.

El biogás se almacena en un tanque de membranas y a continuación es enviado a tratamientos para su valorización. Una chimenea de emergencia instalada entre el digestor y el tanque de almacenamiento del biogás permite quemar el producto que no pueda ser consumido.

Para la valorización del biogás se realiza un proceso de enfriamiento en el que se remueve la humedad y posteriormente se emplean filtros de carbón activado para remover el CO₂ contenido. Por último se utilizan ventiladores para presurizar el gas.

Una vez se han limpiado todas las impurezas, el biogás es enviado a motores de co-generación que producen calor y electricidad.

El consumo de energía eléctrica de las plantas de biodigestión es aproximadamente un 5,00% de lo producido y un 4,00% en energía térmica, por lo que la producción energética de las plantas puede emplearse para la venta y también para su auto sostenimiento. La **Figura 4.4** muestra el diagrama de flujo del proceso de biodigestión de OWS descrito anteriormente.

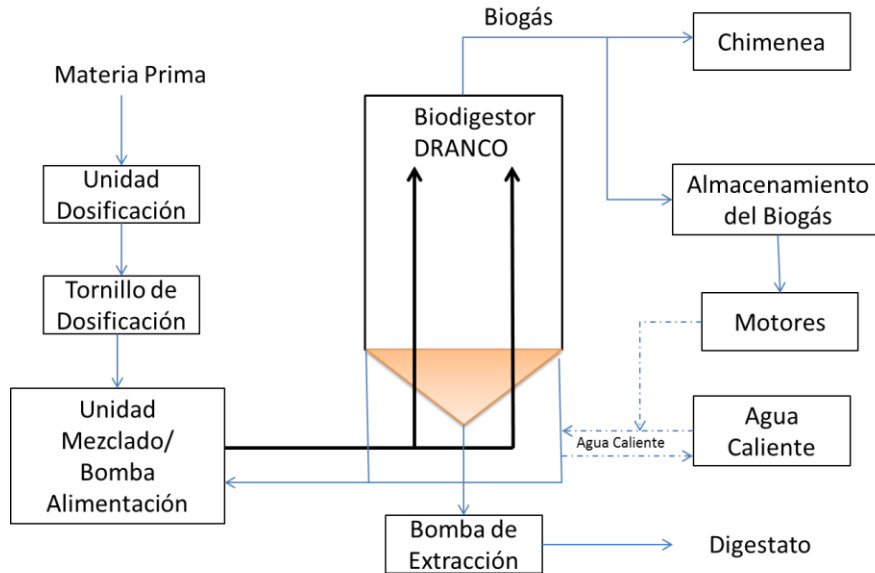


Figura 4.4. Diagrama de flujo general de las plantas de biodigestión construidas por la compañía OWS

Las plantas de biodigestión instaladas por OWS, requieren en promedio una persona durante 2-3 horas al día para realizar los procesos operativos. El costo de mantenimiento de esta planta es aproximadamente el 1,50% de los costos de inversión

A continuación se presenta información técnica y económica obtenida por OWS sobre sus tecnologías de biodigestión.

➤ **Cotización de tecnologías de proveedores internacionales.**

La **Tabla 4.43** muestra los costos de inversión recibidos por OWS asociados a la unidad de biodigestión, el post-tratamiento del biogás, motores para la generación de energía y trabajos civiles (los equipos para el pre-tratamiento de la materia prima y el post-tratamiento del digestato no están incluidos en los costos de inversión).

Se muestran también costos de operación que incluyen el personal requerido, el consumo de energía, análisis y monitoreo de la instalación, mantenimiento y garantías. Los ingresos por electricidad y calor así como la depreciación no están incluidos.

Tabla 4.43. Costos asociados a la construcción y operación de una planta de biodigestión de OWS a diferentes capacidades anuales

		Capacidad (ton/año)						
		10 000	20 000	30 000	40 000	50 000	75 000	100 000
Costo de Inversión	Millones de Euros	4,8	5,8	6,4	6,9	7,5	12,1	13,4
Costo operativo	Euros/Ton	27,9	17,7	13,8	12,9	11,4	12,1	10,4
Superficie requerida	m ²	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000	2 500	3 000
Producción eléctrica	kWh/ton	240	240	240	240	240	240	240
Producción eléctrica neta	kWh/ton	185	205	210	210	215	215	215
Producción térmica	kWh/ton	250	250	250	250	250	250	250

De la **Tabla 4.43** se observa que aunque los costos de inversión asociados a una pequeña planta que procesa 10 000 toneladas al año por residuos son casi 3 veces menores que los de una planta que procesa 100 000 toneladas por año, los costos operativos son casi 3 veces mayores en la planta de menor tamaño. Adicionalmente, aunque la producción eléctrica total por tonelada de materia prima permanece constante para capacidades instaladas entre 10 000 y 100 000 toneladas al año, el consumo eléctrico de la planta más pequeña es mayor que el de la planta más grande (55,0 kWh vs. 25,0 kWh respectivamente), dejando para la planta pequeña menos producción eléctrica neta disponible para la venta. Estos factores demuestran que a medida que las plantas instaladas por OWS procesan más cantidad de material orgánico al año, tienen menores costos operativos y mayor producción eléctrica y térmica neta disponible para la venta, aumentando en teoría su rentabilidad mientras que las plantas pequeñas traen consigo costos relativamente más altos y menores ganancias.

4.4.2 Diseño conceptual de la planta de biodigestión anaerobia

El diseño conceptual de la planta de biodigestión incluye todos los equipos y redes de transporte de líquidos y gases necesarios en el proceso. Algunos de ellos se diseñaron en base a modelos reportados en la literatura y otros se cotizaron con proveedores. El dimensionamiento de los equipos hasta el biodigestor se realizó considerando el mayor flujo de alimento, es decir, el correspondiente a la mezcla compuesta, mientras que los equipos para el manejo y tratamiento de biogás se diseñaron para la mezcla con mayor producción de biogás. Esto con el fin de diseñar la planta para recibirle material a todas las empresas seleccionadas pero trabajando con la producción más representativa de

biogás. A continuación se explican todos los equipos que se considerarán en el diseño de esta planta.

El diseño propuesto para la planta de biodigestión se presenta en la **Figura 4.5**. La lista de equipos en la **Tabla 4.44**, la de servicios industriales en la **Tabla 4.45** y la lista de corrientes en la **Tabla 4.46**.

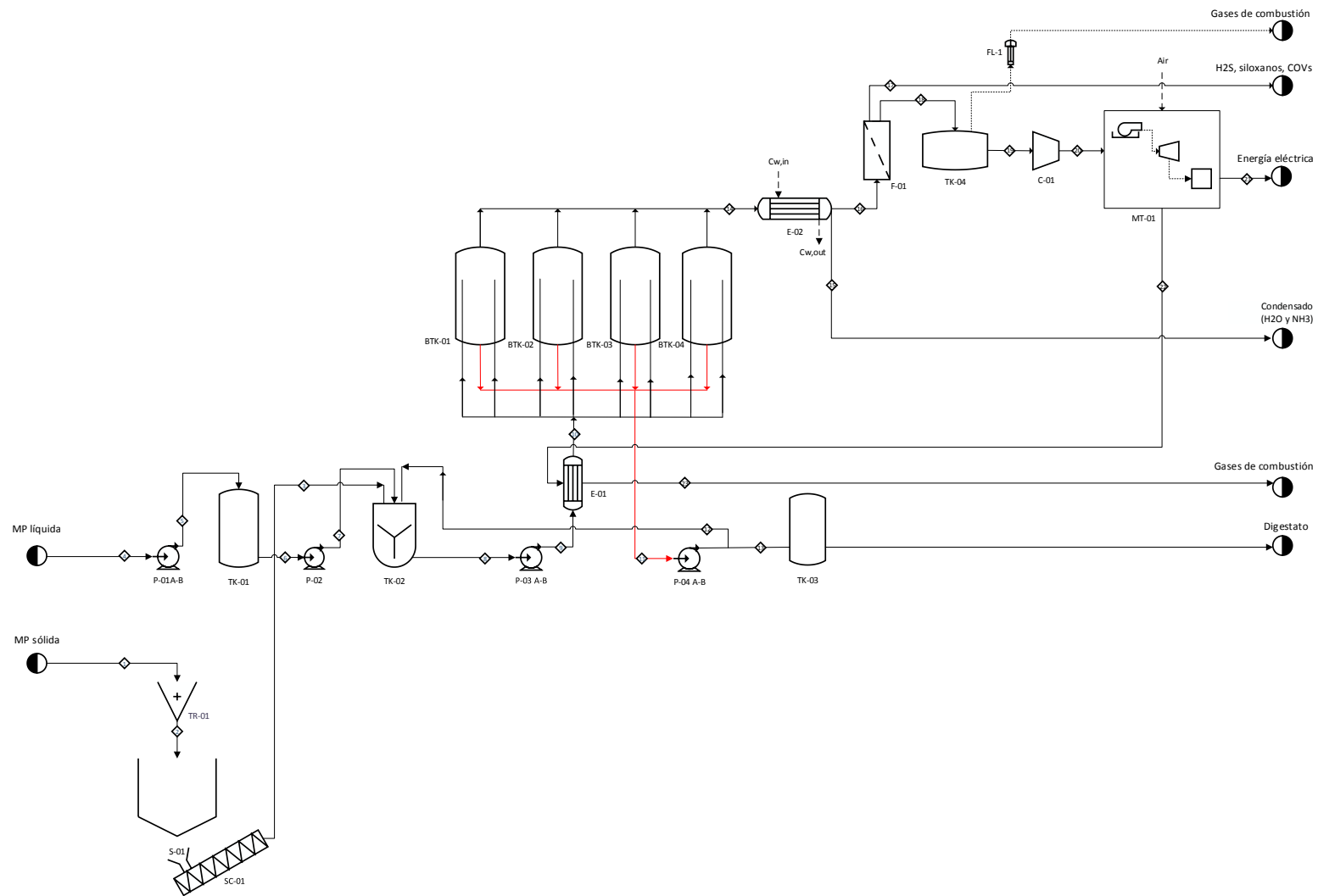


Figura 4.5. Diagrama de flujo de la planta de biodigestión

Tabla 4.44. Lista de equipos

TR-01	S-01	SC-01	P-01AB	TK-01	P-02
Triturador	Silo de almacenamiento de sólidos	Tornillo sin fin	Bomba centrífuga	Tanque de almacenamiento de líquidos	Bomba centrífuga
TK-02	P-03AB	P-04AB	TK-03	E-01	BTK-01
Tanque de mezcla	Bomba centrífuga	Bomba centrífuga	Tanque de almacenamiento de digestato	Intercambiador de tubos y coraza	Tanque de biodigestión 1
BTK-02	BTK-03	BTK-04	E-02	F-01	TK-04
Tanque de biodigestión 2	Tanque de biodigestión 3	Tanque de biodigestión 4	Intercambiador de tubos y coraza	Filtro de carbón activado	Tanque de almacenamiento de biogás
FL-01	C-01	MT-01			
Tea	Compresor	Micro turbina			

Tabla 4.45 Tabla de servicios industriales

Servicio	Unidad	Agua de enfriamiento	Aire
Equipo		E-102	MT-01
Temperatura entrada	°C	0	25
Temperatura salida	°C	3,63	ND
Flujo	m ³ /h	350	268

Tabla 4.46 Tabla de corrientes

Corriente		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Temperatura	°C	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	35,1	35,1	55,0	55,0	55,0	55,0
Presión	bar	1,0	1,0	1,0	0,994	1,61	0,532	1,17	0,10	1,0	1,0	0,02	2,15	1,90
Flujo másico	kg/h	88,8	88,8	88,8	756	756	756	756	1253	1253	1253	1175	418	758
Flujo volumétrico	m ³ /h	0,099	0,099	0,099	0,739	0,739	0,739	0,739	1,22	1,22	1,22	1,15	0,408	0,741

Corriente		14	15	16	17	18	19	20	22	23
Temperatura	°C	55,0- 20,6 ¹	3,0- 25,0 ¹	3,0- 25,0 ¹	25,0	25,0	25,0	ND	279	56,8
Presión	bar	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5,60	1,0	1,0
Flujo másico	kg/h	77,3	2,19	75,1	0,266	74,8	74,8	74,8	366	366
Flujo volumétrico	m ³ /h	69,8	2,19	67,6	0,191	67,4	67,4	67,4	0,440	0,440
Flujo volumétrico por componente										
CH ₄	m ³ /h	38,8	0,0	38,8	0,0	38,8	38,8	38,8	0,0	0,0
CO ₂	m ³ /h	26,6	0,00	26,6	0,0	26,6	26,6	26,6	0,101	0,101
NH ₃	m ³ /h	1,61	0,012	1,60	0,0	1,60	1,6	1,6	0,0	0,0
H ₂ S	m ³ /h	0,266	0,0	0,266	0,191	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
H ₂ O	m ³ /h	2,61	2,18	0,43	0,00	0,43	0,43	0,43	0,044	0,044
N ₂	m ³ /h	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,293	0,293
O ₂	m ³ /h	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00208	0,00208

¹ Temperatura al inicio del tramo – Temperatura al final del tramo (Ti-Tf)

² La corriente 21 se refiere al flujo eléctrico generado en la micro turbina

A continuación se presentan el diseño o selección de todos los equipos que conformaran la planta de biodigestión considerados en el diagrama de flujo de la **Figura 4.5**, con su respectivo costo de capital y operativos (antes de IVA).

➤ **Materiales de construcción**

Se evaluarán dos materiales diferentes para el diseño de los tanques y biodigestores. En cada caso se elegirá el más económico. En la **Tabla 4.47** se presenta la información de ambos materiales. Los datos correspondientes al acero inoxidable 304 fueron proporcionados por la empresa Acinox [68] y los datos de la fibra de vidrio por Fibratore [69].

Tabla 4.47. Información acero inoxidable y fibra de vidrio

	Espesor	Densidad	Costo unitario de material y fabricación
	cm	kg/m ³	COP/kg
Acero inoxidable 304	0,3	8 000	22 769
Fibra de vidrio	3,0	1 600	1,60 x kg fibra de vidrio + 8 723

Acero al carbono schedule 40 fue el material elegido para el diseño de las tuberías para transporte de líquidos. En la **Tabla 4.48** se presentan las dimensiones para tuberías de diferente diámetro nominal y su costo unitario de suministro, fabricación y montaje (SFM), información obtenida de la herramienta en línea Engineering Toolbox [70] y por la empresa Ferrasa [71], respectivamente.

Tabla 4.48. Información tubería en acero al carbono

Diámetro nominal	in	1	1 ½	2	2 ½	3	4
Diámetro interior	mm	26,7	40,9	52,6	62,7	78,0	102,4
Espesor	mm	3,30	3,81	3,81	5,08	5,59	6,10
Diámetro exterior	mm	33,3	48,5	60,2	72,9	89,2	115
Costo tramo de 6,0 m (sin IVA)	COP	32 983	53 432	71 770	124 941	174 350	252 000
Volumen del tramo	m ³	0,00187	0,00321	0,00405	0,00649	0,00880	0,01246
Densidad del material	kg/m ³	7 850					
Masa del tramo	kg	14,6	25,2	31,8	51,0	69,1	97,8
Costo unitario del material	COP/kg	2 252	2 120	2 258	2 451	2 523	2 576
Factor de fabricación	%	70,0					
Costo unitario de SFM	COP/kg	7 508	7 067	7 526	8 170	8 411	8 586

También se eligió acero al carbono en el diseño de ductos de transporte de gases. En este caso se tomó el mismo costo unitario de SFM para los diferentes diámetros que serán evaluados, siendo este de 12 000 COP/kg [71, 72], de forma que, el factor de fabricación esta alrededor de 80,0% para obtener un costo unitario de material cercano a los presentados en la **Tabla 4.48**, lo cual tiene lógica ya que con proveedores no se consiguen ductos de este tipo para gases, sino que deben ser fabricados.

Hay ciertas tuberías y equipos que necesitarán aislamiento. En estos casos, se consideró fibra de vidrio como material aislante protegido por una lámina de aluminio conocida como foil. Con fines prácticos, se trabajó con un único costo unitario de material y fabricación de fibra de vidrio independiente de la masa de material aislante, como es el caso para el diseño de los tanques en fibra de vidrio. El costo unitario de material es de 32 000 COP/kg con un factor de fabricación del 30% para tuberías y del 70,0% para tanques [72,73], dando como resultado un costo unitario de SFM de 45 714 y 64 000 COP/kg. De igual forma, se trabajó con un único costo unitario de SFM para el foil, siendo este de 25 000 COP/kg para tuberías y de 30 000 COP/kg para tanques [72,74].

➤ **Tuberías**

El diseño de las tuberías se realizará empleando el modelo presentado en la literatura [75]. Los datos requeridos en este modelo para el diseño de las tuberías, se presentan en la **Tabla 4.49** y todo lo relacionado con el material de construcción en la **Tabla 4.48**.

Tabla 4.49. Información de entrada para el diseño de las tuberías

Diámetro nominal		1	1 ½	2	2 ½	3	4
Densidad	kg/m ³	1 023					
Tiempo bombeo	h	2					
Viscosidad	Pa s	1,0E-03					
Long. característica de paso	m	0,0267	0,0409	0,0526	0,0627	0,0780	0,1024
Área de paso	m ²	0,00055	0,00131	0,00217	0,00309	0,00477	0,00822
Perímetro húmedo de flujo	m	0,0838	0,1285	0,1652	0,1971	0,2450	0,3216
Diámetro hidráulico de flujo	m	0,0267	0,0409	0,0526	0,0627	0,0780	0,1024
Rugosidad del material	m	4,6E-05					
Rugosidad relativa	adim	1,7E-03	1,1E-03	8,7E-04	7,3E-04	5,9E-04	4,5E-04
Factor de fricción en el tramo	adim	0,024	0,023	0,023	0,023	0,024	0,024

Diámetro nominal		1	1 ½	2	2 ½	3	4
Factor de pérdida global por accesorios	adim	2,00					

Para calcular el diámetro económico en cada tramo, se calculará un costo de capital y un costo de operación que posteriormente se graficará para encontrar cual diámetro de tubería genera el menor costo total. Los datos para calcular estos costos se presentan en la **Tabla 4.50**. El costo operativo solo se calculará con este propósito pero no va incluido en la lista de costos de la planta de biodigestión ya que el costo real es asumido por la operación de las bombas respectivas a cada tramo.

Tabla 4.50. Datos requeridos para calcular el costo de las tuberías

Porcentaje financiero	Tiempo de depreciación	Eficiencia de bombeo	Costo de energía eléctrica
% anual	años	%	COP/kWh
10,0	10,0	85,0	250

Para hallar el diámetro de cada tramo de tubería que representa el menor costo en cuanto a capital y operación (en realidad asociado a la bomba correspondiente al tramo), se calcularon los datos presentados en la **Tabla 4.51** donde se da el ejemplo para la corriente 4 que corresponde al tramo de carga de la bomba P-01. Estos datos se calcularon a partir del modelo presentado en [75] y con los datos de entrada de la **Tabla 4.49**.

Tabla 4.51. Datos calculados para el diseño de las tuberías

P-01 TC							
Diámetro nominal	in	1	1 ½	2	2 ½	3	4
Caudal de líquido	lph	8 863	8 863	8 863	8 863	8 863	8 863
Presión en la carga	bar	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Presión en la descarga	bar	0,635	0,957	0,994	1,00	1,01	1,01
Cabeza total sin pérdidas en la carga del tramo	m	11,1	10,3	10,2	10,1	10,1	10,1
Cabeza total sin pérdidas en la descarga del tramo	m	7,32	9,71	9,97	10,0	10,1	10,1
Longitud de la tubería	m	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Pérdidas totales en tramo	m	3,77	0,561	0,188	0,089	0,035	0,011

A partir de los datos suministrados en las tablas **Tabla 4.48**, **Tabla 4.50** y **Tabla 4.51** se calculó el costo anual de capital y de operación de cada tramo en cada diámetro evaluado. Estos costos se graficaron para hallar el diámetro económico, como lo muestra la **Figura 4.6** que se realizó como ejemplo con los datos obtenidos para el tramo de carga de la bomba P-01, presentados en la **Tabla 4.52**.

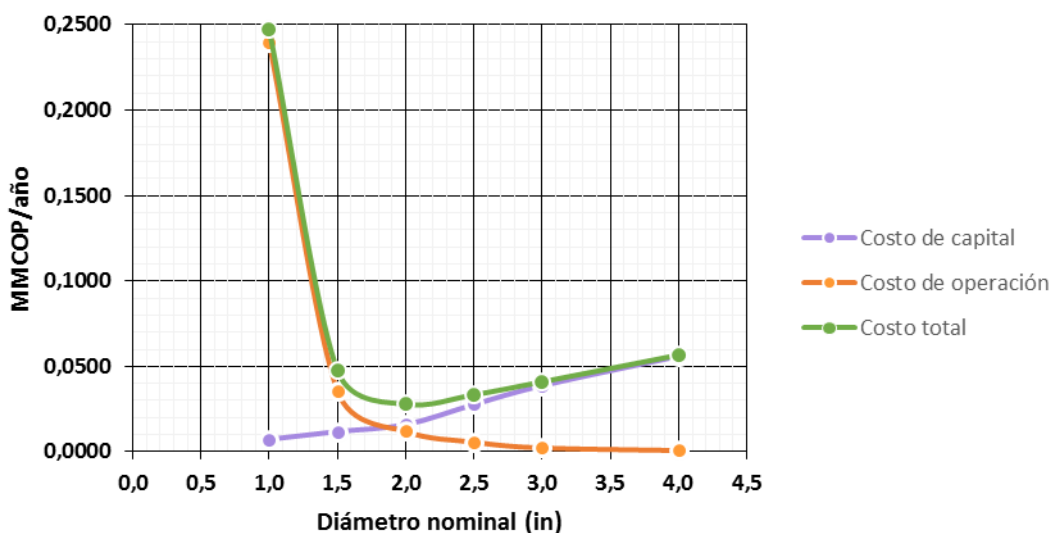


Figura 4.6. Diámetro económico para las tuberías

Tabla 4.52. Costo total para el tramo de carga de la bomba P-01

P-01 TC							
Diámetro nominal	in	1	1 ½	2	2 ½	3	4
Masa de la tubería	kg	4,88	8,40	10,60	16,99	23,03	32,61
Costo fabricación de la tubería	MMCOP	0,0366	0,0594	0,0797	0,1388	0,1937	0,2800
Costo financiero	MMCOP/año	0,0037	0,0059	0,0080	0,0139	0,0194	0,0280
Costo de depreciación	MMCOP/año	0,0037	0,0059	0,0080	0,0139	0,0194	0,0280
Costo de capital	MMCOP/año	0,0073	0,0119	0,0159	0,0278	0,0387	0,0560
Potencia equivalente de bombeo	W	110	16,3	5,48	2,57	1,03	0,329
Energía de bombeo	kWh	959	143	48,0	22,5	8,99	2,88
Costo de bombeo anual	MMCOP/año	0,2398	0,0357	0,0120	0,0056	0,0022	0,0007
Costo total del tramo	MMCOP/año	0,2472	0,0476	0,0279	0,0334	0,0410	0,0567

Como lo muestra la **Figura 4.6**, el menor costo total para el tramo de carga de P-01 corresponde al diámetro nominal de 2 in. En la **Tabla 4.53** se presenta la información relevante de diseño con el diámetro más económico para los demás tramos de tubería y su respectivo costo de capital y operación.

Tabla 4.53. Características relevantes y costos de las tuberías

Tramo	Diámetro económico	Longitud de la tubería	Flujo volumétrico	Costo fabricación tubería
	in	kg	lph	MMCOP
P-01 TC	2	2,00	8 863	0,080
P-01 TD	2	10,5	8 863	0,419
P-02 TC	2	2,00	8 863	0,080
P-02 TD	2	7,21	8 863	0,287
P-03 TC	3	2,00	14 945	0,194
P-03 TD a BTK-01	2	28,5	14 945	1,14
P-03 TD a BTK-02	2 ½	18,3	14 945	1,27
P-03 TD a BTK-03	2 ½	18,3	14 945	1,27
P-03 TD a BTK-04	2	28,5	14 945	1,14
P-04 TC desde BTK-01	2 ½	28,5	13 787	1,98
P-04 TC desde BTK-02	2 ½	18,3	13 787	1,27
P-04 TC desde BTK-03	2 ½	18,3	13 787	1,27
P-04 TC desde BTK-04	2 ½	28,5	13 787	1,98
P-04 TD a TK-02	1 ½	60,0	4 898	2,39
P-04 TD a TK-03	2	10,0	8 889	0,399

Los tramos de tubería entre el tanque de mezcla y los biodigestores, así como los de recirculación de digestato deben ser aislados para disminuir las pérdidas de calor y conservar en lo posible la temperatura de biodigestión de 55,0°C.

Como ejemplo, se presentan los datos de diseño del aislamiento del tramo de carga de la bomba P-03, datos calculados empleando el modelo presentado en [64]. El área de transferencia de calor calculado para este tramo es de 0,49 m². Se asumió una

temperatura ambiente de 25,0°C y un coeficiente de transferencia de calor entre un tanque aislado y el medio ambiente típico de 1Btu/h ft² °F.

En la **Tabla 4.54** se presenta el volumen y masa de material aislante y foil para diferentes valores de espesor de aislamiento.

Tabla 4.54. Volumen y masa de material requeridos para diferentes espesores de aislamiento de P-03 TC

Espesor del aislamiento	in	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0
Temperatura exterior de la tubería	°C	54,76	54,84	54,88	54,89	54,91
Temperatura exterior del aislamiento	°C	52,38	52,25	52,19	52,17	52,14
Temperatura exterior del Foil	°C	52,38	52,25	52,19	52,17	52,13
Volumen de material aislante	m ³	0,018	0,045	0,080	0,122	0,232
Densidad de material aislante	kg/ m ³	56,0				
Masa de material aislante	kg	1,03	2,52	4,45	6,85	13,0
Espesor del foil	mm	0,50				
Volumen del foil	m ³	0,00044	0,00060	0,00076	0,00092	0,00124
Densidad del foil	kg/ m ³	2 700				
Masa del foil	kg	1,20	1,63	2,06	2,49	3,35

Una vez calculada la masa necesaria de material aislante y foil, se calculó el costo total del aislamiento como se muestra en la **Tabla 4.55**.

Tabla 4.55. Costo del aislamiento del tramo P-03 TC

Espesor del Aislamiento	in	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0
Valor unitario de SFM aislamiento	COP/kg	45714	45714	45714	45714	45714
Valor de SFM aislamiento	MMCOP	0,047	0,115	0,204	0,313	0,594
Valor unitario de SFM foil	MMCOP/kg	25000	25000	25000	25000	25000
Valor de SFM foil	MMCOP	0,030	0,041	0,051	0,062	0,084
Costo total del aislamiento	MMCOP	0,271	0,349	0,449	0,569	1,82

Se selecciona entonces un espesor de 1,0 pulgada de aislamiento, pues como se observa, en la **Tabla 4.54** el espesor de 1,0 pulgada presenta una temperatura exterior del Foil de 52,38°C y el de 6,0 pulgadas de 52,13°C es decir hay solo una diferencia del 0,6% entre ambas temperaturas, mientras que el costo del espesor de aislamiento de 6,0 pulgadas de acuerdo **Tabla 4.55** es un 88,6% más que el de 1,0 pulgada.

En la **Tabla 4.56** se presente el costo del aislamiento de los demás tramos de tubería que lo requieren, calculado de igual manera que en el ejemplo del tramo P-03 TC. En todos los casos el espesor seleccionado de material aislante fue de 1 in.

Tabla 4.56. Costo del aislamiento de tuberías

Tramo	Costo total del aislamiento en MMCOP
P-03 TC	0,077
P-03 TD a BTK-01	0,837
P-03 TD a BTK-02	0,608
P-03 TD a BTK-03	0,608
P-03 TD a BTK-04	0,837
P-04 TC desde BTK-01	0,949
P-04 TC desde BTK-02	0,608
P-04 TC desde BTK-03	0,608
P-04 TC desde BTK-04	0,949
P-04 TD a TK-02	1,54

➤ **Bombas (P-01, 02,03 y 04)**

Una vez dimensionadas las tuberías, se pueden seleccionar las bombas y calcular su costo de capital y operación. Para ello también se empleará el modelo de la literatura [75], donde el costo de capital se calcula con la ecuación **E 4.1**.

$$4,5095 * \text{cabeza total en bares}^{0,3058} = \text{costo de la bomba en MMCOP} \quad (\text{E 4.1})$$

Esta ecuación aplica para flujos entre 1 y 100 m³/h y cabezas entre 0,5 y 2,5 bar.

Los datos de la tabla **Tabla 4.50** también se emplearon para el cálculo del costo operativo de las bombas.

El diseño de las bombas se realizó tomando la información del tramo con el diámetro económico en su carga y descarga. Se determinó un tiempo de bombeo de 2 horas para las bombas P-01 y P-02 y de 24 horas para las bombas P-03 y P-04. Toda la información relevante del diseño y costo de las bombas se presenta en la **Tabla 4.57**, recordando que se considera una eficiencia de bombeo del 85,0% y 365 días de trabajo al año.

Tabla 4.57. Diseño y costo de las bombas

Bomba	Cabeza total		Flujo del fluido	Potencia	Energía anual de bombeo	Costo de la bomba ¹
	<i>m</i>	<i>bar</i>				
P-01 A y B	6,12	0,600	8 863	0,178	130	3,86
P-02	6,34	0,621	8 863	0,184	134	3,90
P-03 A y B	18,3	1,80	14 945	0,899	7878	5,40
P-04 A y B	21,3	2,08	13 787	0,961	8418	5,64

¹ Costo por bomba

➤ **Tanque almacenamiento de líquidos (TK-01)**

Tanque cilíndrico que recibirá la materia prima líquida que entra a la planta de biodigestión. Será cargado mediante bombeo desde el carro tanque que hace la recolección. Se alimentará y extraerá la materia prima diariamente pero el tanque se diseñará para una capacidad de almacenamiento del flujo semanal de líquidos, para en casos de emergencia y mantenimiento, seguir recibiendo a los clientes el suministro de material.

La densidad de la mezcla de líquidos se asumirá como la densidad del suero (1 023 kg/m³) ya que este representa más del 90,0% de la materia prima líquida que ingresaría a la planta.

A partir del flujo semanal de líquidos (**Tabla 4.6**) se calculó el volumen del tanque como lo muestra **Tabla 4.58** y posteriormente estos datos se reemplazaron en las ecuaciones para el diseño de tanques cilíndricos (sección **3.2**).

Tabla 4.58. Volumen del tanque de almacenamiento de líquidos

% ocupación	%	90,0
Densidad líquidos	kg/m ³	1 023
Masa (semanal)	kg	120 200
Volumen ocupado	m ³	117
Volumen del tanque	m ³	131

Para calcular el costo del tanque, tanto en acero inoxidable como en fibra de vidrio, se determinaron diferentes relaciones H/D hasta encontrar la relación más económica como lo muestra la **Figura 4.7**.

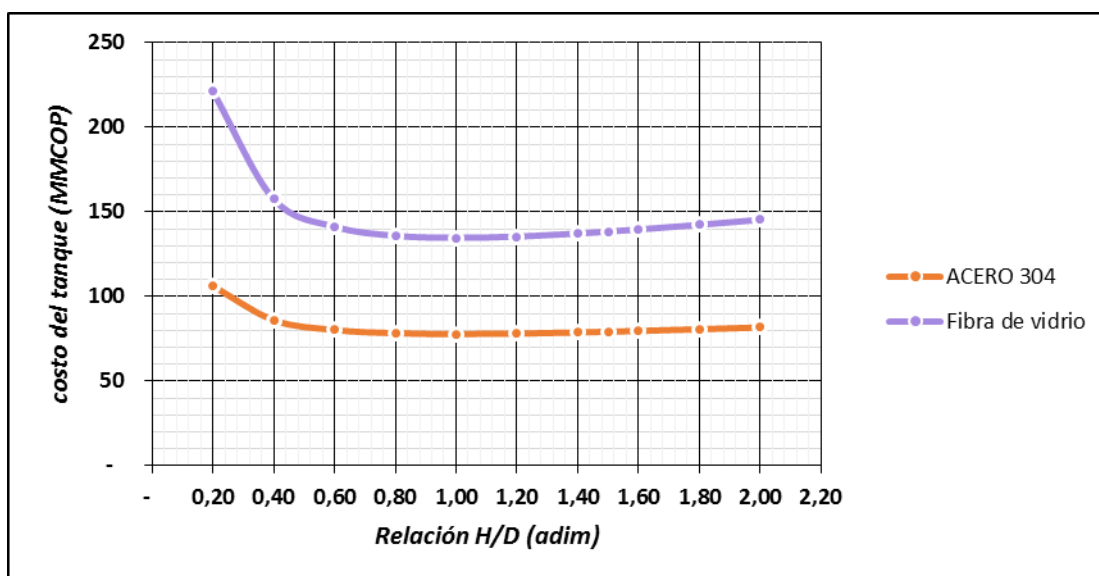


Figura 4.7. Costo del tanque de almacenamiento de líquidos vs relación H/D

Se observa que el costo mínimo corresponde a un tanque en acero inoxidable 304 con relación H/D=1. Los datos para este diseño se presentan en la **Tabla 4.59**.

Tabla 4.59. Costo del tanque de almacenamiento de líquidos

Relación H/D	adim	1,00
Diámetro	m	5,50
Altura	m	5,50
Volumen de acero 304	m ³	0,43
Masa de acero 304	kg	3 419
Costo del tanque	MM/COP	78,0

➤ **Triturador (TR-01)**

Se cotizó un triturador adecuado para el flujo de materia prima sólida para disminuir el tamaño de partícula de los sólidos que entrarían al biodigestor para mejorar la producción y calidad del biogás.

Se obtuvo una oferta comercial, **Anexo 5**, de la compañía comercializadora Durespo [76] en Colombia para un triturador JTJK500 Triturador Multiuso con producción hasta 3 000 kilos/h dependiendo de la húmeda y la dureza del producto. El costo del equipo, antes de IVA es de 1 050 000 COP. Recomiendan un motor eléctrico 2-3 HP 3600 RPM, con un valor de 663 600 COP y una potencia de 2,24 kW. Tendrá un tiempo de operación de 2 horas/día.

➤ **Silo de almacenamiento de sólidos (S-01)**

Este silo se ubicaría por debajo del nivel del suelo para poder ser llenado aprovechando la gravedad al caer los sólidos desde el triturador. Al igual que el tanque de almacenamiento de líquidos, se alimentaría y extraería la materia prima sólida diariamente pero este se diseñó con una capacidad de almacenamiento del flujo semanal de sólidos. En el diseño del silo se consideró un porcentaje de ocupación del 95,0% y una densidad aparente de la mezcla de sólidos de 900 kg/m³ [12].

A partir del flujo semanal de sólidos (**Tabla 4.7**) se calculó el volumen del silo como lo muestra la **Tabla 4.60** y posteriormente estos datos se reemplazaron en las ecuaciones para el diseño de silos (sección 3.3).

Tabla 4.60. Volumen del silo de almacenamiento de sólidos

% ocupación	%	95,0
Densidad sólidos	kg/m ³	900
Masa (semanal)	kg	9 090
Volumen ocupado	m ³	10,1
Volumen del tanque	m ³	10,6

En la **Figura 4.8** se observa el costo de material y fabricación del silo de almacenamiento de sólidos, variando su relación H/D.

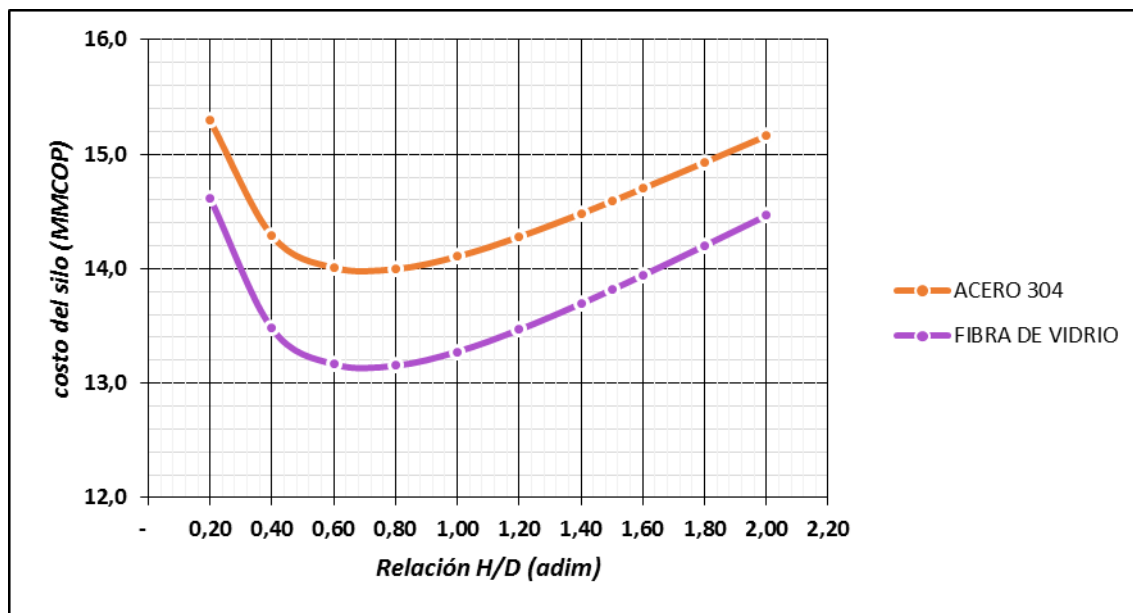


Figura 4.8. Costo del silo vs relación H/D

Se observa que el costo mínimo corresponde a un tanque construido con relación en fibra de vidrio con una relación H/D=0,8. Los datos para este diseño se presentan en la **Tabla 4.61**.

Tabla 4.61. Costo del silo de almacenamiento de sólidos

Relación H/D	adim	0,8
Diámetro	m	2,41
Altura	m	1,93
Volumen de fibra de vidrio	m ³	0,77
Masa de fibra de vidrio	kg	1 230
Costo del tanque	MMCOP	13,1

➤ **Tornillo sin fin (SC-01)**

Tornillo inclinado para el transporte de la materia prima sólida desde el silo de almacenamiento de sólidos hasta el tanque de mezcla. Se diseñó a partir del modelo planteado en [77].

En la **Tabla 4.62** se presentan todos los datos de diseño y costo del tornillo sin fin que se emplearía para el transporte de la materia prima sólida hasta el tanque de mezcla.

Tabla 4.62. Diseño del tornillo sin fin

Longitud del tornillo	m	10
Diámetro interior del tornillo	in	2,5
Espesor del tornillo	mm	5,08
Diámetro exterior del tornillo	mm	72,9
Volumen del tornillo	m ³	0,010
Densidad del material del tornillo	kg/m ³	8 000
Masa del material del tornillo	kg	86,5
Masa de la hélice del tornillo	kg	25,9
Diámetro de la carcasa del tornillo	in	3,00
Diámetro interior	mm	78,0
Espesor de la carcasa del tornillo	mm	5,59
Diámetro exterior de la carcasa del tornillo	mm	89,2
Volumen de la carcasa del tornillo	m ³	0,014
Densidad del material de la coraza del tornillo	kg/m ³	8 000
Masa del material de la coraza del tornillo	kg	117
Masa total del tornillo	kg	229
Costo de suministro fabricación y montaje del tornillo	COP/kg	40 000
Costo de SFM del sistema	MMCOP	9,20
Potencia eléctrica	HP	1,00
Tiempo de operación	horas/día	2

➤ **Tanque de mezcla (TK-02)**

Tanque cilíndrico con un porcentaje de ocupación del 90,0%. Tendría tres entradas de material: la materia prima líquida proveniente del tanque cilíndrico de almacenamiento de líquidos, la materia prima sólida transportada por el tornillo sin fin desde el silo de almacenamiento de sólidos, y el digestato recirculado proveniente de los biodigestores. Con ayuda de un agitador se mezclarán durante un tiempo de residencia determinado en 60 minutos. Posteriormente la mezcla será bombeada a los biodigestores pasando por un intercambiador de calor para aumentar su temperatura hasta el punto necesario para la biodigestión.

A partir del flujo diario de líquidos, sólidos y digestato recirculado (**Tabla 4.6**, **Tabla 4.7** y **Tabla 4.37**) se calculó el volumen del tanque como lo muestra la **Tabla 4.63** y posteriormente estos datos se reemplazaron en las ecuaciones para el diseño de tanques cilíndricos (sección **3.2**).

Tabla 4.63. Volumen del tanque de mezcla

% ocupación	%	90,0
Tiempo de residencia	minutos	60,0
Masa	kg/h	1 261
Volumen ocupado	m ³	1,25
Volumen del tanque	m ³	1,38

Para calcular el costo del tanque, tanto en acero inoxidable como en fibra de vidrio, se determinaron diferentes relaciones H/D hasta encontrar la relación más económica como lo muestra la **Figura 4.9**.

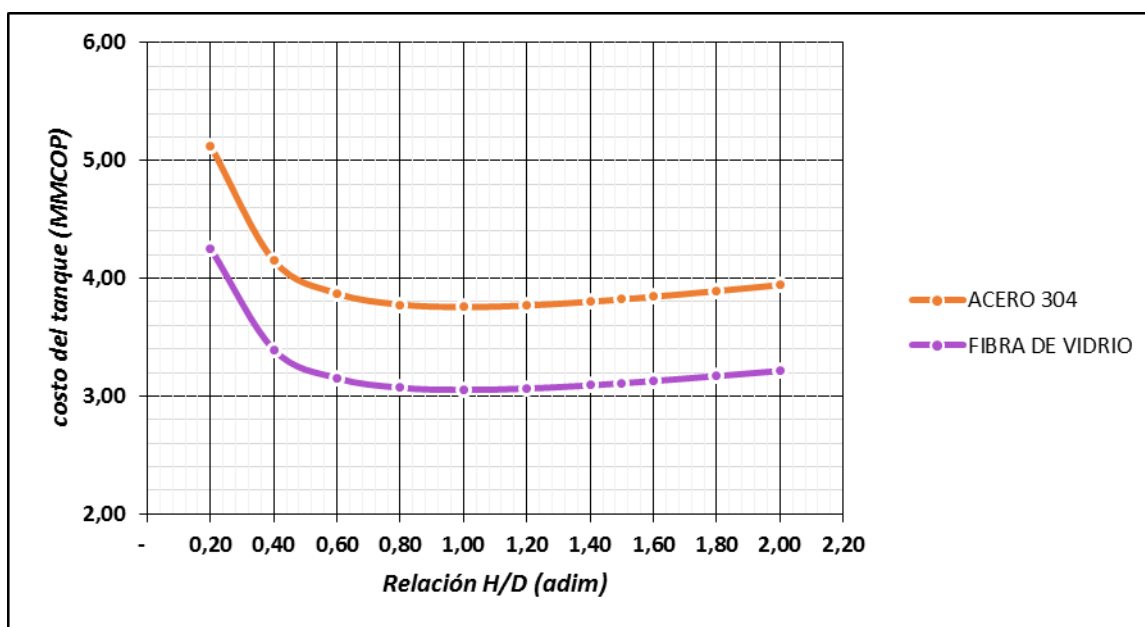


Figura 4.9. Costo del tanque de mezcla vs relación H/D

Se observa que el costo mínimo corresponde a un tanque en fibra de vidrio con relación H/D=1. Los datos para este diseño se presentan en la **Tabla 4.64**.

Tabla 4.64. Costo del tanque de mezcla

Relación H/D	adim	1,00
Diámetro	m	1,21
Altura	m	1,21
Volumen de fibra de vidrio	m ³	0,206
Masa de fibra de vidrio	Kg	330
Costo del tanque	MMCOP	3,05

El agitador del tanque de mezcla se selecciona a partir de la metodología propuesta en la literatura [78]. Para el proceso llevado a cabo en el tanque, la metodología reportada recomienda:

1. Debido a la baja concentración de sólidos, puede utilizarse un agitador tipo turbina pitched blade.
2. La relación de diámetros entre el agitador y el tanque puede ser la típica de 1/3, con lo cual el diámetro de agitador es de 0,40 m.
3. En la curva de potencia de este tipo de agitador, el número de potencia es constante y tiene un valor de 1,50 para números de Reynolds de agitación mayores a 10^3 , con las condiciones del sistema, este nivel de agitación se alcanza para velocidades de agitación superiores a 1,0 rpm.

Es recomendable, para alcanzar la mezcla satisfactoria en el equipo, tener velocidades de agitación superiores a los 100 rpm. Esto puede lograrse con un agitador acoplado a un motor de 10,0 HP, tal como se presenta en la **Figura 4.10**.

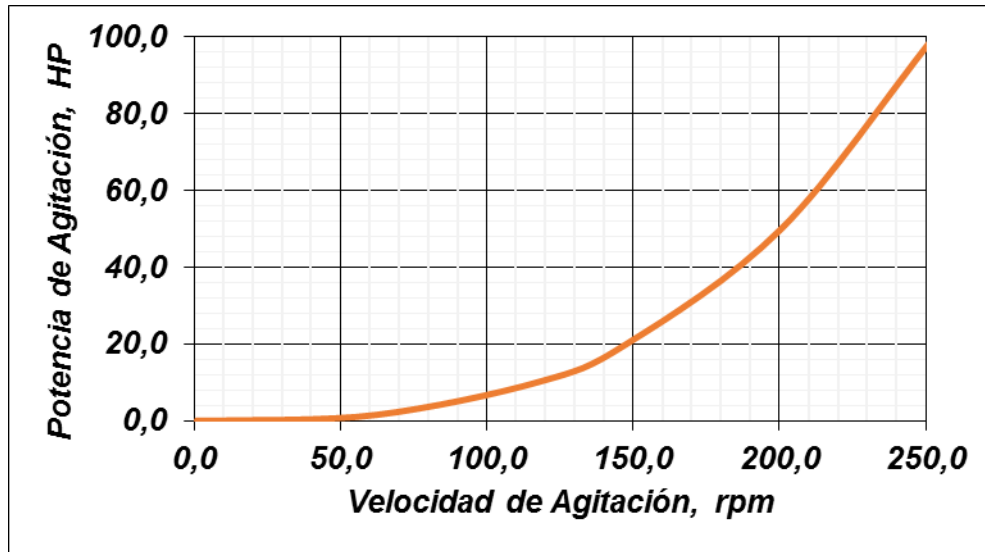


Figura 4.10 Potencia de agitación Vs. Velocidad de agitación

El costo del agitador seleccionado de 10 HP es de 7,09 MMCOP y fue calculado con la ecuación **E 4.2** [78]:

$$7,5484 * (R)^{0,1375} = \text{costo del agitador en MMCOP} \quad (\text{E 4.2})$$

Donde **R** es la relación potencia/diámetro del agitador en HP/in.

➤ **Biodigestores (BTK-01, 02,03 Y 04)**

Se diseñaron biodigestores cilíndricos con tapa basados en el modelo presentado por OWS, donde no se cuenta con agitación directa sino que el material orgánico ingresa por la parte inferior de los tanques y asciende hasta la parte superior de estos. Se empleó un tiempo de retención de 30 días y recirculación del 50,0% del digestato. Se fijó un porcentaje de ocupación máximo de un 90,0% [64] y una altura de las tuberías de alimentación correspondiente al 80,0% de la altura total del tanque. A cada biodigestor ingresa el mismo flujo proveniente del tanque de mezcla (materia orgánica sólida, líquida y digestato recirculado). Se utilizó una densidad de 1 023 kg /m³.

Se fijó un volumen individual de los biodigestores de 300 m³ y se calculó el volumen de la mezcla a partir de la expresión presentada en **(E 3.20)** de tal manera que se respetará el volumen de ocupación máximo establecido y un número entero de tanques. Se planea que el biodigestor funcione a 55,0°C y a presión atmosférica. Los datos de volumen y número de reactores se presentan en la **Tabla 4.65**.

Tabla 4.65. Flujos y volúmenes asociados a los biodigestores

Flujo volumétrico	m ³ /h	1,24
Tiempo de residencia	días	30
Tiempo de carga	horas	2
Tiempo de descarga	horas	2
Tiempo total proceso	días	30,2
Volumen de mezcla	m ³	893
Porcentaje de ocupación	%	74,4
Volumen total	m ³	1 200
Volumen de cada reactor	m ³	300
Número de reactores	adim	4

Se calculó el costo de los reactores tanto en acero inoxidable como en fibra de vidrio. Para ello, se determinaron diferentes relaciones H/D hasta encontrar la relación más económica como lo muestra la **Figura 4.11**.

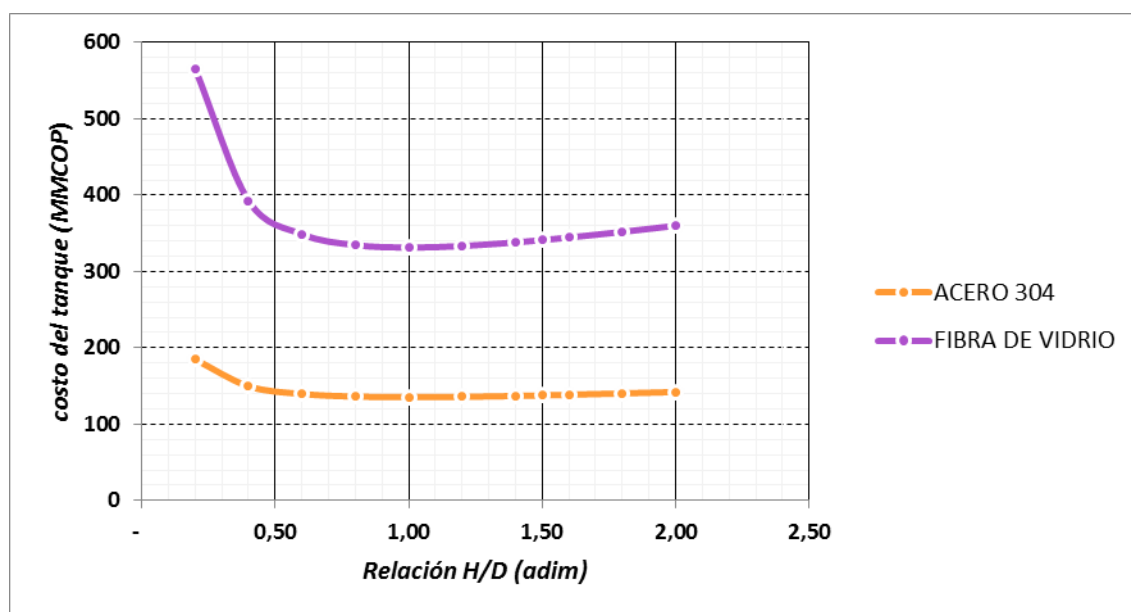


Figura 4.11 Costo del biodigestor vs relación H/D

Se observa que el costo mínimo corresponde a un tanque en acero inoxidable 304 con relación H/D=1. Los datos para este diseño se presentan en la **Tabla 4.66**.

Tabla 4.66. Dimensiones y costos para el biodigestor

Relación H/D	adim	1,0
Diámetro	m	7,26
Altura	m	7,26
Volumen de acero 304	m ³	0,744
Masa de acero 304	kg	5 954
Costo del tanque	MMCOP	136
Costo total de los tanques	MMCOP	545

Con los datos obtenidos de la tabla anterior se obtiene también la altura de las tuberías de alimentación de materia orgánica correspondiente al 80,0% de la altura del biodigestor, es decir: 5,81 m.

Debido a que el reactor es fabricado en acero inoxidable 304, es necesario diseñar un aislamiento para evitar pérdidas de calor y mantener la temperatura interior a 55,0°C. Esto se hace empleando el modelo desarrollado en [72]. El área de transferencia de calor para el digestor calculada es de 165 m². Se asumió una temperatura ambiente de 25,0°C y un coeficiente de transferencia de calor entre un tanque aislado y el medio ambiente típico de 1Btu/h ft² °F.

En la **Tabla 4.67** se presenta el volumen y masa de material para diferentes valores de espesor de aislamiento.

Tabla 4.67 Material requerido para diferentes espesores de aislamiento

Espesor del aislamiento	in	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0
Temperatura exterior del tanque	°C	54,9	54,9	55,0	55,0	55,0
Temperatura exterior del aislamiento	°C	52,4	52,2	52,1	52,1	52,1
Temperatura exterior del foil	°C	52,4	52,2	52,1	52,1	52,1
Volumen de material aislante	m ³	5,27	10,6	15,9	21,3	32,1
Densidad del material aislante	kg/ m ³	56,0				
Masa de material aislante	kg	295	592	890	1 190	1 795
Espesor del foil	mm	0,50				
Volumen del foil	m ³	0,104	0,105	0,105	0,106	0,107
Densidad del foil	kg/ m ³	2 700				

Espesor del aislamiento	in	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0
Masa del foil	kg	281	282	284	286	289

Una vez calculada la masa necesaria de material aislante y foil, se calculó el costo total del aislamiento como se muestra en la **Tabla 4.68**.

Tabla 4.68. Costo del biodigestor con aislamiento

Espesor del aislamiento	in	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0
Valor unitario de SFM aislamiento	COP/kg	64 000	64 000	64 000	64 000	64 000
Valor de SFM aislamiento	MMCOP	18,9	37,9	57,0	76,2	114,9
Valor unitario de SFM foil	COP/kg	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000
Valor de SFM foil	MMCOP	8,43	8,47	8,52	8,57	8,66
Costo total del aislamiento	MMCOP	27,3	46,3	65,5	84,7	123,6

Se selecciona entonces un espesor de 1,0 pulgada de aislamiento, pues como se observa, en la **Tabla 4.67** el espesor de 1,0 pulgada presenta una temperatura exterior del Foil de 52,4°C y el de 6,0 pulgadas de 52,1°C es decir hay solo una diferencia del 0,6% entre ambas temperaturas, mientras que el costo del espesor de aislamiento de 6,0 pulgadas de acuerdo **Tabla 4.68** es un 77,9% más que el de 1,0 pulgada.

➤ *Efecto de la recirculación de digestato en la producción de biogás.*

Como ya se ha mencionado anteriormente, para efectos de diseño de la planta se empleó un porcentaje de recirculación del digestato del 50,0% y se obtuvo una ocupación de los reactores del 74,4%, sin embargo, se realizó de manera adicional un análisis sobre el efecto que tiene aumentar el porcentaje de recirculación en el flujo de biogás y en la ocupación de los reactores. Estos datos permitieron tener una noción de la capacidad conceptual de la planta, sabiendo que el tope de ocupación de los reactores se estableció en 90,0% [64]. La **Figura 4.12** muestra la variación en la ocupación de los reactores a medida que aumenta la recirculación del digestato. Se observa que para una recirculación del 81,6%, la ocupación de los reactores equivale al 90,0%, por lo tanto esta es la máxima capacidad a la que puede trabajar esta planta si se utilizan 4 tanques de 300 m³ para procesar el material orgánico.

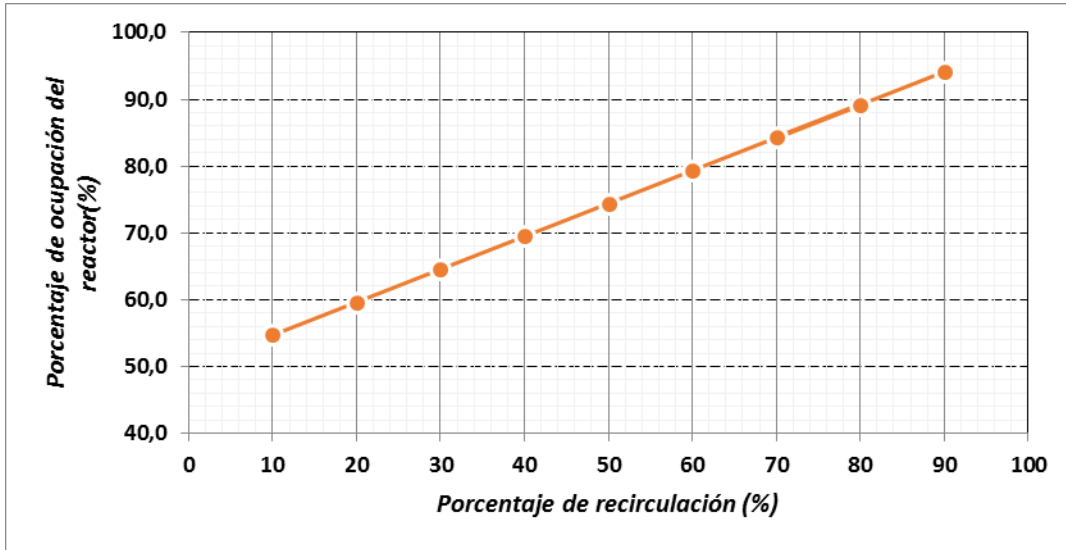


Figura 4.12. Efecto de la recirculación del digestato en la ocupación de los digestores

Por último, se observa en la **Figura 4.13**, la variación en el flujo de biogás, que como es de esperarse, a medida que aumenta el flujo de digestato recirculado aumenta la producción de biogás por hora y por lo tanto de metano. Este último, se mantiene en una composición másica del 32,9% de acuerdo a la ecuación de Dulong. Mediante esta gráfica, es posible identificar que el flujo de biogás obtenido trabajando a una capacidad máxima de ocupación de los reactores es de 85,0 kg/h y el de metano de 28,0 kg/h, es decir, los biodigestores diseñados, pueden trabajar a su máxima capacidad y aumentar la producción de biogás en un 14,8% aproximadamente.

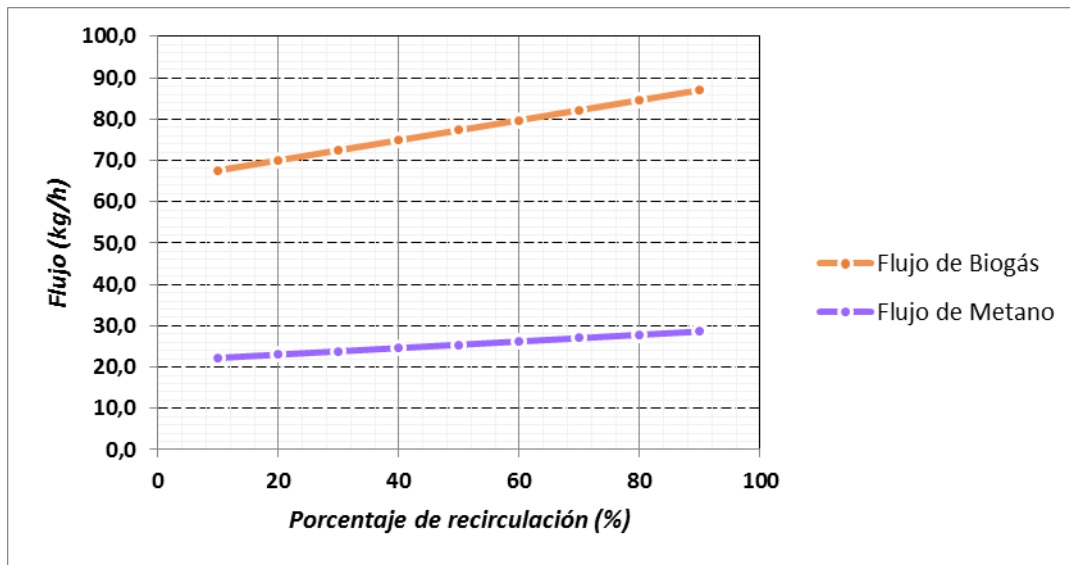


Figura 4.13. Efecto de la recirculación del digestato en el flujo de biogás y metano

➤ **Tanque de almacenamiento del digestato (TK-03)**

Tanque cilíndrico que recibirá el digestato proveniente de los biodigestores que no es recirculado. Se diseñará para tener una capacidad de almacenamiento semanal.

La densidad del digestato se asumirá como la densidad del suero ($1\,023\text{ kg/m}^3$) y el porcentaje de ocupación determinado fue del 90%.

A partir del flujo semanal de digestato (**Tabla 4.37**) se calculó el volumen del tanque como lo muestra **Tabla 4.69** y posteriormente estos datos se reemplazaron en las ecuaciones para el diseño de tanques cilíndricos (sección 3.2).

Tabla 4.69. Volumen del tanque de almacenamiento de digestato

Porcentaje de ocupación	%	90,0
Densidad del digestato	kg/m^3	1 023
Masa semanal	kg	127 308
Volumen ocupado	m^3	124
Volumen del tanque	m^3	138

Para calcular el costo del tanque, tanto en acero inoxidable como en fibra de vidrio, se determinaron diferentes relaciones H/D hasta encontrar la relación más económica como lo muestra la **Figura 4.14**.

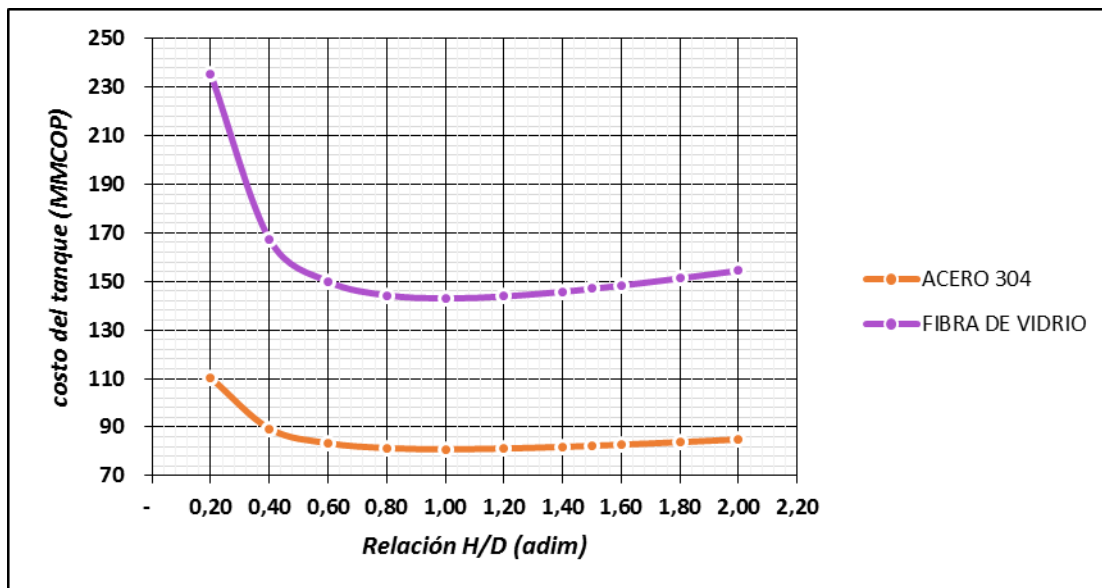


Figura 4.14. Costo del tanque de almacenamiento de digestato vs relación H/D

Se observa que el costo mínimo corresponde a un tanque en acero inoxidable 304 con relación H/D=1. Los datos para este diseño se presentan en la **Tabla 4.70**.

Tabla 4.70. Costo del tanque de almacenamiento de digestato

Relación H/D	adim	1,00
Diámetro	m	5,60
Altura	m	5,60
Volumen de acero 304	m ³	0,44
Masa de acero 304	kg	3 553
Costo del tanque	MMCOP	81,0

➤ **Intercambiador de calor para deshumidificar la corriente de biogás (E-02)**

La humedad contenida en el biogás debe ser eliminada para evitar posibles daños en los equipos generadores de energía. Para este fin, se diseñó un intercambiador de calor en el software HYSYS que permitiera la condensación del agua, sabiendo que al intercambiador ingresaría un flujo de 77,3 kg/h de biogás húmedo a 20,6°C y a la salida debe haberse condensado la mayor cantidad de agua posible. Este intercambiador se ubicará a la salida de los reactores y requerirá un chiller para obtener temperaturas lo suficientemente bajas. El agua de enfriamiento irá por la coraza del intercambiador, mientras que el biogás pasaría por los tubos como lo muestra la **Figura 4.15**.

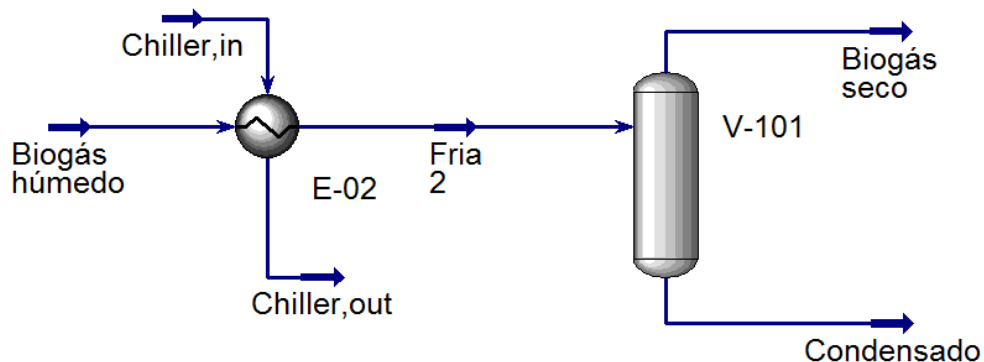


Figura 4.15. Esquema para el diseño del intercambiador de calor E-02 en el software HYSYS

Los resultados muestran que el calor requerido para condensar el 85,4% del agua es de 4 000 kJ/h si se suministra un flujo de agua de 350 kg/h a 0°C, como lo muestra la **Tabla 4.71**.

Tabla 4.71. Flujos másicos y temperaturas en E-02

		Biogás húmedo	Biogás seco	Condensado	Chiller, in	Chiller, out	
Temperatura	°C	20,6	3,0	3,0	0,0	3,63	
Presión	kPa	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	
Flujo másico	kg/h	77,3	75,05	2,25	350	350	
CH ₄	kg/h	25,6	25,6	0,0	0,0	0,0	
CO ₂	kg/h	47,6	47,6	0,0	0,0	0,0	
NH ₃	kg/h	1,124	1,113	0,0131	0,0	0,0	
H ₂ S	kg/h	0,372	0,372	0,0	0,0	0,0	
H ₂ O	kg/h	2,61	0,377	2,23	525	525	
NaCl	kg/h	0,0	0,0	0,0	350	350	
Calor requerido	kJ/h						11 335

Los resultados arrojados por HYSYS sobre las características del intercambiador que cumple con los requerimientos se listan en la **Tabla 4.72**.

Tabla 4.72. Características de diseño del intercambiador E-02

Orientación del intercambiador	adim	Horizontal Flujo a Contracorriente
Diámetro de la coraza	mm	587
Número de tubos por coraza	adim	99
Número de paso de los tubos por la coraza	adim	3
Pitch	mm	50
Configuración de los tubos	adim	Triangular – 30°
Longitud de los tubos	m	6
Diámetro externo de los tubos	mm	20
Diámetro interno de los tubos	mm	16
Espesor de los tubos	mm	2
Espesor de la coraza	mm	2
Coeficiente de transferencia de calor global UA	kJ/°C h	655

Para calcular el costo del intercambiador se consideró que será elaborado en acero inoxidable 304 con un factor de fabricación del 80,0% sin aislamiento.

El costo del intercambiador se calculó hallando el peso total de los tubos y la coraza fabricados en acero inoxidable de acuerdo a los datos obtenidos de la **Tabla 4.72**. Los resultados se muestran en la **Tabla 4.73**.

Tabla 4.73. Costo del intercambiador E-02

Costo unitario de material y fabricación	COP/kg	34 153
Volumen de los tubos	m ³	0,00746
Masa de los Tubos	kg	59,7
COSTO DE LOS TUBOS	MMCOP	2,04
Volumen de la coraza	m ³	0,0000251
Masa de la coraza	kg	0,201
COSTO DE LA CORAZA	MMCOP	0,00687
COSTO TOTAL DEL INTERCAMBIADOR	MMCOP	2,05

El costo del chiller necesario para poder llevar el agua de enfriamiento a la temperatura requerida de 0°C se calculó con el modelo empleado en [72] y este fue de 0,336 MMCOP. El chiller operará 24 horas por día durante de 365 días al año con una potencia de 14,8. Con una reposición de agua fresca del 10,0% y un valor de 1 700 COP/m³ el costo anual de agua para el chiller será de 0,521 MMCOP/año.

➤ **Filtro de carbón activado (F-01)**

Se cotizó un filtro de carbón activado para remover H₂S de la corriente de biogás y así evitar daños en los equipos y emisiones de SO_x al realizar la combustión del biogás para generar energía eléctrica.

Se obtuvo una oferta comercial, **Anexo 6**, por parte de la empresa Dimasa Grupo [79] en España de un filtro de carbón activado para la eliminación de H₂S. El costo de un filtro de carbón activo PRFV de presión 2 x 3 m, incluyendo 2 000 kg de carbón activado de alto rendimiento con un tiempo de colmatación de 3 meses, es de 14 969 €. El costo de reemplazar el carbón activado cada 3 meses es de 3,12 USD/kg. A estos costos se le debe sumar el transporte desde México ya que fueron dados para los productos puestos en un puerto de este país. De acuerdo al reporte de tarifas de Proexport Colombia de

transporte marítimo por ruta y transporte terrestre por ruta, el costo de transportar la estructura del filtro más los 2 000 kg de carbón activado desde México hasta el puerto de Buenaventura en Colombia y luego hasta Medellín es de 3,08 MMCOP [80].

Para el alcance del proyecto se considerará que cada tres meses el carbón activado colmatado se dispondrá en celdas de seguridad, lo cual tiene un costo de 1 680 COP/kg [67]. De forma que este equipo implicará unos gastos por compra y disposición de carbón activado de 18 720 USD/año y 10,1 MMCOP/año, respectivamente.

➤ **Tanque de almacenamiento de biogás (TK-04)**

Se diseñó el tanque de almacenamiento de biogás cilíndrico en acero 304 con una capacidad de almacenamiento de 30 minutos y un porcentaje de ocupación del 100%. Se dispondrá de manera horizontal y se considerará un factor de fabricación del 80,0%. Los datos de volumen se muestran en la **Tabla 4.74**.

Tabla 4.74. Volumen del tanque de almacenamiento de biogás

Suministro de biogás	m ³ /h	69,8
Suministro de biogás	m ³ /día	1 676
Tiempo de residencia	días	0,0208
Ocupación	%	100
Volumen	m ³	34,9

A partir del volumen calculado se emplearon diferentes relaciones H/D para obtener el diámetro económico del reactor como se muestra en la **Figura 4.16**.

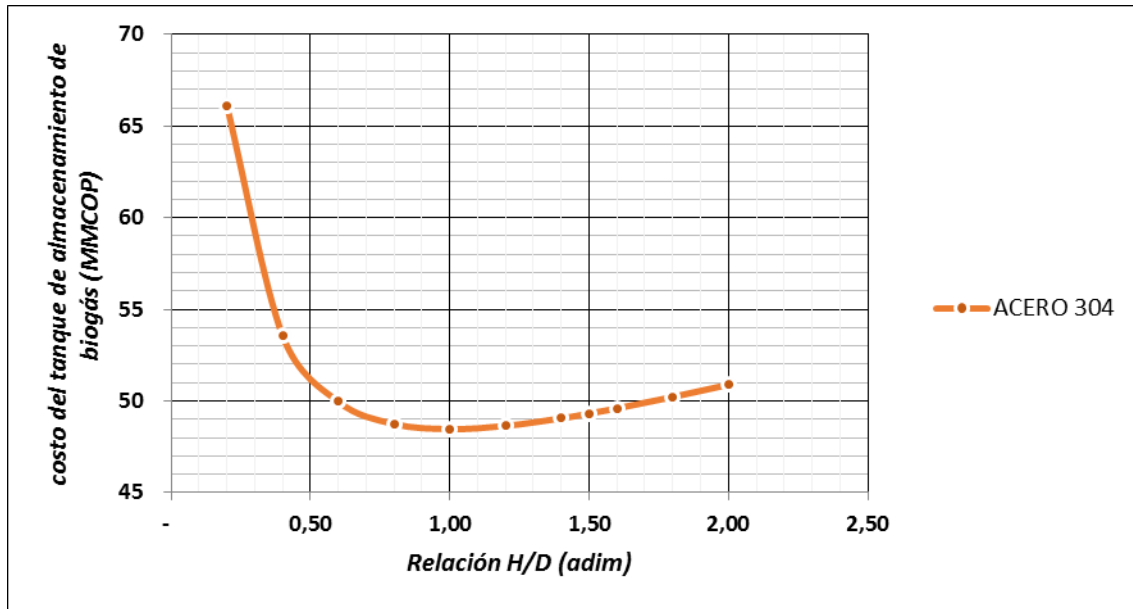


Figura 4.16. Costo del tanque de almacenamiento vs. Relación H/D para el tanque de almacenamiento de biogás

Se observa que el costo mínimo corresponde a un tanque en acero inoxidable 304 con relación H/D=1. Los datos para este diseño se presentan en la **Tabla 4.75**

Tabla 4.75. Dimensiones y costos para el tanque de almacenamiento del biogás

Relación H/D	adim	1,00
Diámetro	m	3,54
Altura	m	3,54
Volumen de acero 304	m ³	0,177
Masa de acero 304	kg	1.419
Costo del tanque	MMCOP	48,5

➤ **Tea (FL-01)**

Debido a que la producción de biogás en los reactores es constante, pero el consumo de este es variable, es necesario instalar una tea de seguridad que permitirá quemar el biogás que no pueda ser ni almacenado ni consumido. Ya que no se obtuvieron ofertas comerciales, se escaló el costo de una tea encontrada en la literatura [30] con un factor habitual para el escalamiento de equipos térmicos de 0,36.

Para un flujo de metano de 1 080 m³/h el costo de la tea es de 172 MMCOP, de forma que para el flujo de metano de 38,8 m³/h generado en la planta diseñada, el costo de la tea será de 51,9 MMCOP.

➤ **Compresor (C-01)**

Se cotizó un compresor con el que se aumentará la presión del biogás a la presión de operación de la micro turbina, la cual esta generalmente alrededor de los 80 psi.

Se obtuvo una oferta comercial, **Anexo 7**, para un compresor marca BioKomp, referencia BKB15-V90-V6-C34INV por parte de la empresa Supernova [81], con un costo de 65 748 USD antes de IVA y potencia de 13,25 kW. Operará de manera continua durante 24 horas/día.

➤ **Micro turbina (MT-01) y generación de energía eléctrica**

Para la producción eléctrica se cotizó una micro turbina ya que no requiere de un flujo muy alto de biogás. Para pedir dicha oferta se suministraron datos del flujo, composición y poder calorífico del biogás.

Se obtuvo una oferta comercial, **Anexo 7**, por parte de la empresa Colombiana Supernova [81] con un costo de 307 996 USD antes de IVA para una micro turbina que consumiría 66,95 m³/h de biogás, con una composición de %CH₄ y %CO₂, con un poder calorífico estimado por la empresa de 507 BTU/ft₃. En la **Tabla 4.76** se presentan las características de dicha micro turbina.

Tabla 4.76. Especificaciones de la micro turbina

Micro turbina referencia 200R-BG4-BUOO		
Capacidad nominal	kW	200
Presión de operación	psi	75,0 – 80,0
Eficiencia	%	31,62
Parada de mantenimiento requeridas	1 parada de 6 horas cada 6 000 horas	
Proporción aire:combustible	4:1	

El proveedor ofrece diferentes planes de mantenimiento especificados en la oferta comercial del **Anexo 7**. El plan seleccionado fue el D para un rango de operación de más de 6 000 horas/año. Este plan tiene un costo de 29 416 USD/año y garantiza que el

equipo durará 9 años o 79 999 y el mantenimiento será llevado a cabo por personal del distribuidor.

Con la información de eficiencia suministrada por el proveedor, se puede calcular la energía eléctrica real que puede ser generada a partir de la energía contenida en el biogás, para ello, se emplea el poder calorífico calculado con Dulong que se muestra en la **Tabla 4.42** para el biogás con remoción de contaminantes y se calcula entonces el flujo energético como se muestra en la **Tabla 4.77**.

Tabla 4.77. Flujo de energía eléctrico generado en la micro turbina.

Eficiencia energética de la turbina	%	31,6
Poder calorífico inferior de los gases	kcal/kg	4 479
Flujo de biogás	kg/h	73,2
Flujo de energía disponible en el biogás	kcal/h	328 016
Flujo de energía eléctrica generado	kcal/h	103 719
Flujo de energía eléctrica generado	kW	121

De la tabla anterior se calcula entonces que el flujo de energía eléctrica total producido sería de **1 056 666 kWh/año**.

➤ **Ducto de transporte de gases fríos**

Ducto en acero al carbono para el transporte de gases antes de su ingreso a la micro turbina (se considera al compresor un equipo integrado a la micro turbina). Este ducto se dividirá en tres tramos donde los gases conservan las mismas propiedades: 1) salida biodigestores – entrada intercambiador de calor, 2) salida intercambiador de calor – entrada filtro de carbón activado y 3) salida filtro de carbón activado – entrada compresor.

El diseño de estos ductos se realizó empleando el modelo para gases fríos presentado previamente en la literatura [72] donde se varía la velocidad de los gases para hallar el diámetro y costo del tramo y posteriormente se decide cual diseño resulta más adecuado según el costo y caída de presión de los gases.

Los datos principales en el diseño de los ductos de gases fríos se presentan en la **Tabla 4.78**, donde se da el ejemplo para el ducto que transporta el biogás desde la salida de los biodigestores hasta la entrada al intercambiador de calor (TKB - E-02).

Tabla 4.78. Información de diseño del ducto TKB-E-02

Ducto (desde – hasta)		TKB - E-02					
Velocidad media de paso de los gases	fpm	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
Diámetro de paso de los gases	mm	63,3	45,0	37,2	32,9	30,1	28,3
Longitud del tramo	m	50,0					
Perdida de presión en el tramo	kPa	0,409	2,29	6,09	11,8	19,2	27,7
Temperatura de entrada de los gases	°C	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0
Temperatura de salida de los gases	°C	17,5	19,3	20,6	21,5	22,2	22,7
Costo de capital	MMCOP/año	0,394	0,284	0,237	0,210	0,194	0,183
Costo anual de ventilación	MMCOP/año	3,22E-05	1,80E-04	4,78E-04	9,29E-04	1,51E-03	2,17E-03
Costo total del sistema	MMCOP/año	0,394	0,284	0,237	0,211	0,195	0,185

La velocidad media de los gases fue un parámetro de entrada que se estableció en diferentes niveles para analizar bajo que velocidad se da una pérdida de presión y un costo del ducto razonable. Como se observa en la tabla anterior, al aumentar la velocidad el diámetro del ducto disminuye y por lo tanto el costo de capital también, pero la pérdida de presión aumenta por lo que el costo de ventilación (en realidad asociado a la operación del compresor) para lograr el transporte de los gases a través del ducto también aumenta. El costo total del ducto (ventilación + capital) es menor al trabajar con la mayor velocidad de paso de los gases, sin embargo, se elige el diseño para una velocidad de paso de 3 000 fpm ya que una pérdida de presión de 27,7 kPa (111 in H₂O) implicaría mayor consumo de energía por parte del compresor C-01 para arrastrar los gases.

Este mismo criterio se mantuvo en el diseño de los demás ductos de gases fríos. La longitud de todos los ductos también se mantuvo en 50,0 m.

La temperatura de entrada de los gases al ducto E-02 – F-01 es de 3,00°C pero con fines prácticos se consideró como 25,0°C ya que los gases comienzan a calentarse inmediatamente por transferencia de calor con el medio ambiente que tiene una temperatura de 25,0°C. Adicionalmente el modelo empleado solo trabaja con temperaturas iguales o superiores a la del medio ambiente.

La temperatura de los gases se mantiene en 25,0°C durante todo el ducto E-02 – F-01 y F-01 – C-01 ya que el intercambio de calor se da con el ambiente que se encuentra a la misma temperatura y no hay equipos intermedios que generen un cambio.

El valor real que se debe invertir en los ductos de gases fríos es sólo el costo de SFM, siendo este de: 1) TKB – E-02: 1,18 MMCOP, 2) E-02 – F-01: 1,11MMCOP y 3) F-01 – C-01: 1,10 MMCOP.

➤ ***Ducto de transporte de gases calientes***

Ducto en acero al carbono con aislamiento para el transporte de los gases de combustión desde la micro turbina hasta la entrada al intercambiador de calor empleado para calentar la mezcla de alimentación a los biodigestores.

El diseño de este ducto se realizó empleando el modelo para gases calientes presentado previamente en la literatura [72] donde se evalúa el efecto simultáneo del diámetro del ducto y del espesor del aislamiento sobre el costo total equivalente del tramo y la temperatura de los gases esperada al final del tramo.

Con el fin de calentar la corriente de entrada de mezcla a los biodigestores (hasta una temperatura de 55,0°C), puede usarse la energía disponible de los gases de combustión provenientes de la micro turbina, los cuales ya han sido utilizados para generar energía eléctrica y aún conservan un remanente de energía aprovechable [81].

De acuerdo con lo indicado [81], el biogás puede quemarse en la micro turbina, para generar la energía eléctrica esperada, utilizando una relación másica aire biocombustible de 4:1. Esto es, un flujo de 73,2 kg/h de biogás y un flujo de 293 kg/h de aire ambiente. Bajo estas condiciones, la **Figura 4.17** presenta la curva de temperatura de llama adiabática para el biogás y su dependencia con la relación másica aire combustible utilizada. La construcción de la **Figura 4.17** se llevó a cabo empleando el modelo de combustión en equilibrio reportado en la literatura [72].



Figura 4.17. Curva de temperatura de llama adiabática contra la relación másica aire combustible para la combustión del biogás generado en planta.

De la **Figura 4.17** pueden hacerse las siguientes observaciones:

- La combustión del biogás llevada a cabo con una relación másica aire combustible de 4:1, permitirá obtener una temperatura de llama adiabática de 1 485 °C. Esta temperatura indica la tendencia del proceso energético que puede llevarse a cabo en la micro turbina. En efecto, la modificación de la relación aire combustible hasta niveles de 6:1 permitiría el incremento de la temperatura de llama adiabática en la combustión y por lo tanto el incremento potencial en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, es preciso someterse a las recomendaciones del fabricante que tienen en cuenta aspectos mecánicos que se salen del alcance de este análisis.
- La importancia del análisis de la combustión adiabática, radica en la obtención de información de la composición de los gases resultantes del proceso de generación de energía en la micro turbina. Esta información es relevante para el consecuente diseño de la red de transporte hasta el intercambiador de calor, toda vez que, la selección de geometría y material del ducto dependerá del proceso de transferencia de calor y este a su vez es función de la composición de la corriente transportada. De esta forma, la **Tabla 4.79** presenta la composición esperada de gases en la descarga de la micro turbina, corriente que tiene un flujo másico de 366 kg/h y una temperatura de 293 °C [81].

Tabla 4.79. Composición esperada de los gases en la descarga de la micro turbina

%w CO ₂	%w CO	%w H ₂ O	%w NO	%w H ₂	%w O ₂	%w N ₂
25,5	4,18	9,26	0,000219	0,858	0,0000117	60,2

Con esta información, se procede al diseño de la línea de transporte de gases entre la micro turbina y el intercambiador de calor (E-101). Para esto se considera que el ducto de transporte tiene una longitud de 30,0 m y se emplea la metodología propuesta en la literatura, según la cual el dimensionamiento económico de una red de gases calientes (selección del diámetro de transporte de gases y del espesor del aislamiento) debe contribuir a la minimización de los costos totales asociados al sistema, estos son: costos de capital por fabricación de la red y costos de operación por ventilación de los gases (transporte) y por pérdidas de combustible equivalentes a las pérdidas de calor [72].

Para la aplicación del modelo de diseño de la red de gases calientes, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones mecánicas:

- Los gases son transportados en un ducto de acero al carbón de 2,0 mm de espesor. El costo de suministro, fabricación y montaje de este material ha sido indicado por un proveedor comercial [71].
- El ducto será aislado utilizando canaletas de fibra de vidrio. El costo de suministro y montaje de estas canaletas ha sido indicado por un proveedor comercial [82].
- El ducto será recubierto por medio de una lámina de aluminio de 0,5 mm de espesor. El costo de suministro y montaje de este material ha sido indicado por un proveedor comercial [74].

En efecto, la **Figura 4.18** presenta el resultado del modelo aplicado en términos del efecto simultáneo del diámetro de paso de los gases y del espesor del aislamiento sobre el costo total equivalente del tramo. Por su parte, la **Figura 4.19** presenta el resultado del modelo aplicado en términos del efecto simultáneo del diámetro de paso de los gases y del espesor del aislamiento sobre la temperatura de los gases esperada al final del tramo, esto es, en la entrada del intercambiador de calor.

Se espera que el costo equivalente del sistema sea el menor posible obteniendo la mayor temperatura en la descarga de los gases. Este comportamiento se da para un diámetro de transporte de gases de 2,0 in y un espesor de aislamiento de 2,0 in, sistema en el cual se espera una temperatura de entrada de los gases al intercambiador de 279 °C.

Bajo estas condiciones, el ducto de transporte de gases calientes tendrá un precio de suministro, fabricación y montaje de 2,55 MMCOP.

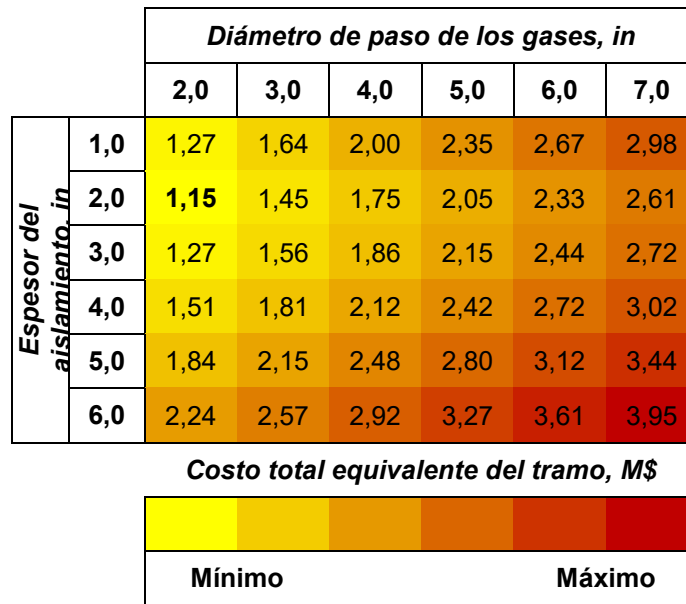


Figura 4.18. Efecto simultáneo del espesor del aislamiento y el diámetro de transporte de gases sobre el costo equivalente del tramo de conducción de gases calientes entre la micro turbina y el intercambiador de calor

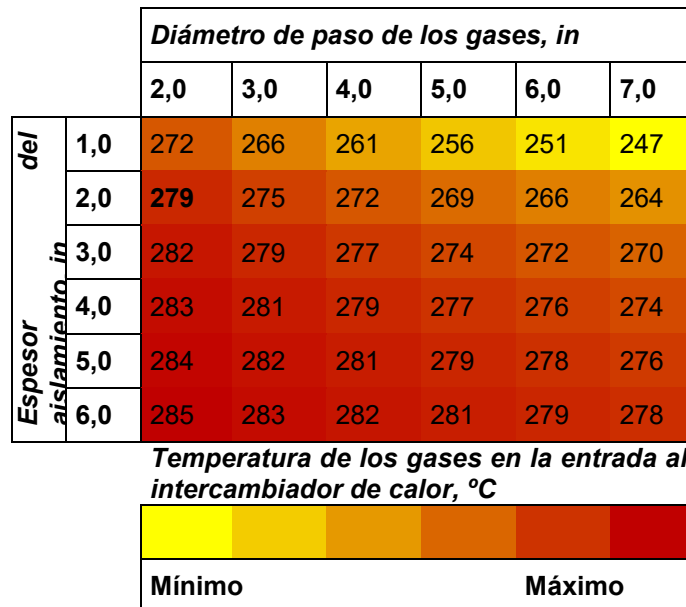


Figura 4.19. Efecto simultáneo del espesor del aislamiento y el diámetro de transporte de gases sobre la temperatura de salida de los gases en el tramo de conducción entre la micro turbina y el intercambiador de calor

➤ **Intercambiador de calor mezcla de alimentación a los biodigestores (E-01)**

La mezcla que ingresa al biodigestor debe tener una temperatura de 55,0°C para garantizar la correcta acción de los microorganismos. Para llevar el material orgánico a esta temperatura se utilizará un intercambiador de calor cuya fuente de energía serán los gases de combustión que salen de la micro turbina (MT-01). Se diseñó el intercambiador de calor en el software HYSYS, sabiendo que al intercambiador ingresa un flujo de 1 262 kg/h de mezcla a 35,1° y debe salir a 55,0°C y que los gases de combustión de la turbina salen a 279°C de acuerdo al proveedor [81] y con un flujo de 366 kg/h. La mezcla de materia orgánica atravesará la coraza mientras que los gases de combustión pasarán por los tubos como lo muestra la **Figura 4.20**. Para fines prácticos se consideró en el diseño de HYSYS una composición másica de la mezcla de 100% agua debido a que la humedad real de esta es de más del 90,0%. La composición de los gases de combustión es la misma reportada en la **Tabla 4.79**.

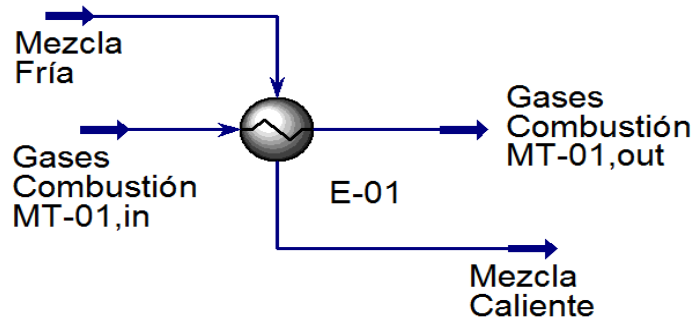


Figura 4.20. Esquema para el diseño del intercambiador de calor E-01 en el software HYSYS

Los resultados muestran que el calor requerido para elevar la temperatura de la mezcla 19,9°C es de 106 059 kJ/h y que la temperatura de salida de los gases de combustión es de 56,8°C como se muestra en la **Tabla 4.80**.

Tabla 4.80. Flujos másicos y temperaturas en E-01

		Mezcla fría	Mezcla caliente	Gases de combustión, in	Gases de combustión, out
Temperatura	°C	35,1	55,0	279	56,8
Presión	kPa	101,3	101,3	101,3	101,3
Flujo másico	kg/h	1 262	1 262	366	366
Calor requerido	kJ/h	106 059			

Los resultados arrojados por HYSYS sobre las características del intercambiador que cumple con los requerimientos se listan en la **Tabla 4.81**.

Tabla 4.81. Características de diseño del intercambiador E-01

Orientación del Intercambiador	adim	Horizontal Flujo a Contracorriente
Diámetro de la coraza	mm	739,05
Número de Tubos por Coraza	adim	160
Número de Paso de los tubos por la coraza	adim	2
Pitch	mm	50
Configuración de los Tubos	adim	Triangular – 30°
Longitud de los Tubos	m	6
Diámetro externo de los tubos	mm	20
Diámetro interno de los tubos	mm	16
Espesor de los tubos	mm	2
Espesor de la coraza	mm	2
Coefficiente de transferencia de calor global UA	kJ/°C h	1 439

Para calcular el costo del intercambiador se considerará que será elaborado en acero inoxidable 304 con un factor de fabricación del 80,0% y deberá tener un aislamiento de 4 pulgadas para evitar cualquier pérdida de calor al medio ambiente que se encuentra a 25,0°C.

El costo del intercambiador se calculó hallando el peso total de los tubos y la coraza fabricados en acero inoxidable de acuerdo a los datos obtenidos de la **Tabla 4.81** más los costos asociados al aislamiento. Los resultados se muestran en la **Tabla 4.82**.

Tabla 4.82. Costo del intercambiador E-01

Material de Fabricación	Acero inoxidable 304	
Densidad	kg/m ³	8 000
Factor de Fabricación	%	80
Costo unitario de material y fabricación	COP/kg	34 153
Volumen de los tubos	m ³	0,0121
Masa de los Tubos	kg	96,5
Costo de los tubos	MMCOP	3,30

Volumen de la coraza	m ³	0,0000377
Masa de la coraza	kg	0,302
Costo de la coraza	MMCOP	0,0103
Espesor del Aislamiento	in	4,0
Espesor del Foil	mm	0,50
Volumen del aislamiento	m ³	0,852
Masa del aislamiento	kg	47,7
Volumen del Foil	m ³	0,00468
Masa del Foil	kg	12,6
Costo unitario de aislamiento	COP/kg	45 714
Costo unitario de foil	COP/kg	25 000
Costo de aislamiento	MMCOP	2,18
Costo de foil	MMCOP	0,316
Costo total de aislamiento	MMCOP	2,50
Costo total del intercambiador	MMCOP	5,80

➤ **Área y costo del terreno**

Una vez finalizados los diseños de todos los equipos es posible realizar un plano de la planta de biodigestión para visualizar de manera general la ubicación espacial de todos los equipos y determinar el área aproximada de trabajo requerida. El Layout de la planta se muestra en la **Figura 4.21**.

Esta figura muestra que la planta tendría dimensiones aproximadas de 80,0m x 43,0m, es decir 3 440m² de área únicamente de producción. Para fines prácticos se consideró un 20,0% más de área requerida para oficinas, parqueaderos y demás instalaciones, obteniendo un área total aproximada de 4 128m².

Se cotizaron diferentes precios de terreno en la zona de Oriente Antioqueño y se obtuvo un valor promedio de 30 000 COP/m². El costo total del terreno se estima entonces en 123,84 MMCOP.

➤ **Ubicación de la planta de biodigestión.**

Para ubicar la planta de biodigestión se definió que la energía eléctrica generada será distribuida únicamente a una de las compañías visitadas, de esta manera, se ubicarán la totalidad de los equipos e instalaciones contiguos a la empresa seleccionada.

De acuerdo al aporte de material orgánico y la generación de electricidad, se estableció que la posible ubicación de la planta podría ser contigua a la compañía El Ranchero quien provee el 88,7% de la materia prima o a la compañía Panamericana que se ubica en segundo lugar y provee el 6,38% de la materia prima, adicionalmente, si se observa la **Tabla 4.8** se aprecia que el consumo anual eléctrico del Ranchero es de 504 458 kW/año mientras que el de Panamericana es de 2 092 068 kW/año.

Los datos anteriores permiten decidir que la ubicación más apropiada para la planta de biodigestión es contigua al Ranchero, pues la capacidad de generación eléctrica de la planta de biodigestión (1 056 666 kW/año en total y 726 986 kW/año disponibles para la venta) permite satisfacer completamente esta necesidad y además al ser el primer proveedor de materia prima, se ahorrarían considerablemente los gastos de transporte asociados a recolección de la materia prima. Panamericana por su parte, quedaría con un déficit de energía eléctrica del 65,2%.

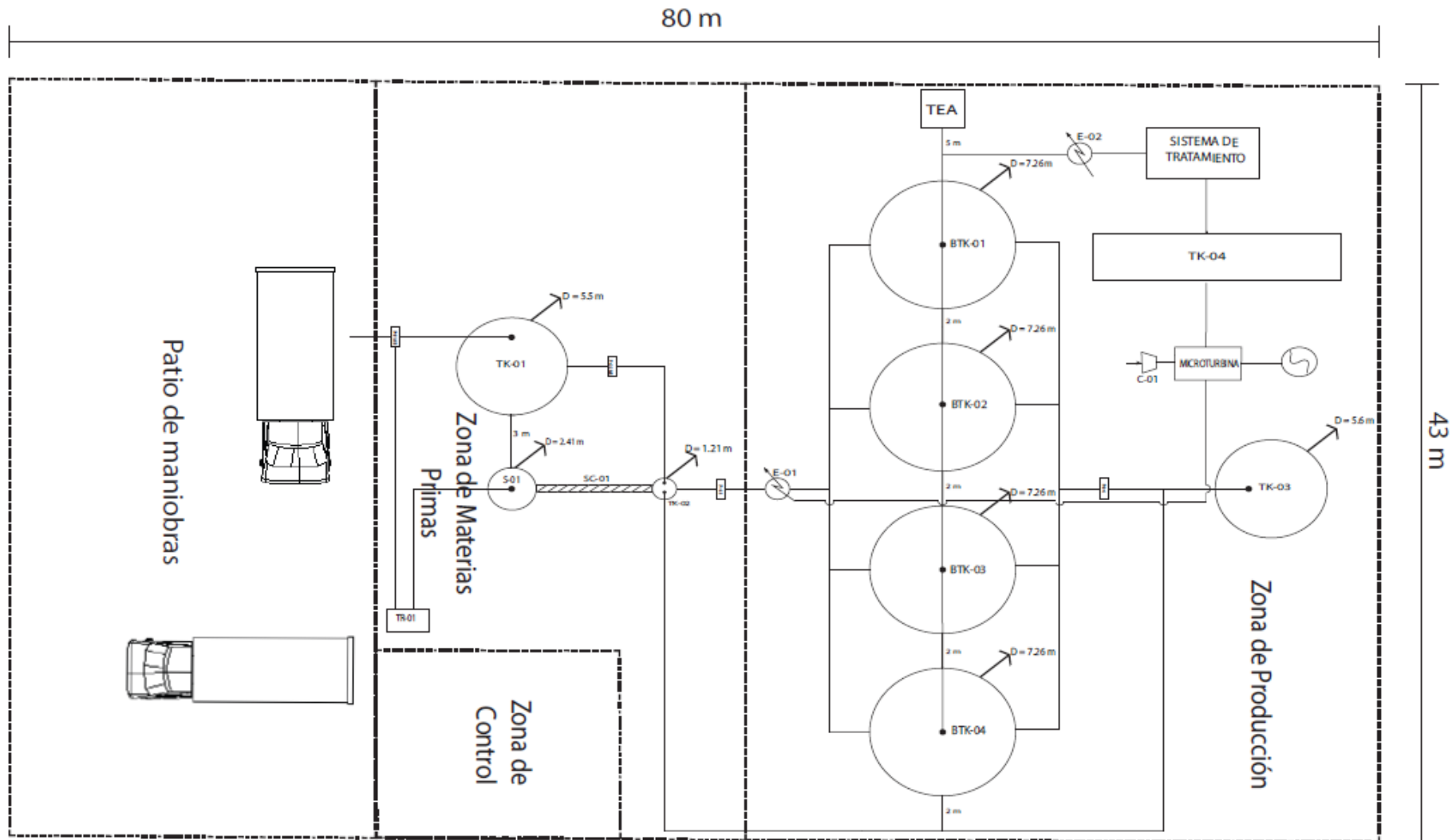


Figura 4.21. Layout general de la planta de biodigestión

4.5 Análisis económico y financiero del proyecto

A continuación se presentará el análisis económico y financiero tanto de la tecnología de OWS-DRANCO como de la planta diseñada conceptualmente. Se analizarán costos de inversión, costos operativos, costos de personal, ingresos y se calcularán diferentes variables financieras que permitirán conocer la viabilidad del proyecto.

Para el desarrollo del análisis financiero se establecieron los siguientes parámetros:

- Tasa interna de oportunidad (TIO): Es la tasa de interés mínima a la que el inversor está dispuesto a ganar al invertir en el proyecto, en otras palabras en la rentabilidad mínima que se le debe exigir a una inversión [83]. Para la evaluación del proyecto se fijó una TIO del 16%.
- Inflación: Aumento sostenido y generalizado de los bienes y servicios de un mercado durante un período específico de tiempo [84]. Para la evaluación del proyecto se fijó una inflación anual del 3,5%.
- Tasa de Interés: Es el precio del dinero o pago estipulado por encima del valor depositado que un inversionista o entidad bancaria debe recibir en un período de tiempo determinado por parte del deudor a raíz de haber usado su dinero durante este tiempo [85]. Para la evaluación del proyecto se fijó una tasa de interés del 11,0%.
- Depreciación: Es el mecanismo mediante el cual se reconoce el desgaste que sufre un bien por el uso que se haga de él [83]. Para la evaluación del proyecto se fijó un tipo de depreciación lineal.
- Valor de salvamento: Es el valor del activo que no se deprecia. Busca reconocer el valor real de un activo al finalizar el período de evaluación [83]. Para la evaluación del proyecto se fijó un valor de salvamento del 10,0%.
- Impuesto de renta: Es un impuesto que se declara y paga anualmente y recae sobre los ingresos de una persona u empresa. El impuesto sobre la renta grava todos los ingresos que obtenga un contribuyente en el año, que sean susceptibles de producir incremento neto del patrimonio en el momento de su percepción [85]. Para la evaluación del proyecto se fijó un porcentaje de impuesto de renta del 34,0%.

- Horizonte de evaluación: Período establecido para evaluar los beneficios y costos atribuibles en un proyecto de inversión [84]. Para la evaluación del proyecto se fijó un horizonte de evaluación de 10 y 20 años.
- Vida útil de los equipos: Tiempo durante el cual un equipo puede ser utilizado. [85] Para la evaluación del proyecto se fijó una vida útil de los equipos de 10 años.

Una vez fijados los parámetros anteriores, se procedió a realizar la evaluación financiera mediante el cálculo de los siguientes criterios de decisión:

- Gastos de Capital o Capital Expenditure (CAPEX): Cantidad de dinero gastado en la adquisición de los bienes de capital (equipos e instalaciones) que permiten mantener en funcionamiento un servicio, la producción o un sistema en general [83].
- Gastos de Operación (OPEX): Se refiere a los costos asociados al mantenimiento de equipos, gastos consumibles y otros gastos de funcionamiento necesarios para mantener activa la producción de un negocio [84].
- Valor presente neto (VPN): Es un parámetro utilizado frecuentemente en la evaluación de proyectos pues permite determinar la cantidad en pesos actuales equivalente a todos los ingresos y egresos presentes y futuros de un proyecto. Un VPN positivo, indica que la inversión produce ganancias y podría evaluarse la posibilidad de aceptar un proyecto dado. Un VPN negativo indica que la inversión produce pérdidas y el proyecto debería ser rechazado, mientras que un VPN igual a 0 indica que el proyecto no produce ni pérdidas ni ganancias y por lo tanto no agrega valor monetario [85].
- Tasa interna de retorno (TIR): Es la tasa con la cual el VPN es igual a 0. Se emplea para evaluar la rentabilidad de un proyecto bajo la premisa que a mayor TIR mayor rentabilidad. Se suele comparar esta tasa con una tasa mínima de corte o la TIO y si la TIR no supera este corte, se sugiere rechazar el proyecto [84].
- Tiempo de recuperación de la inversión (Payback): Es un criterio económico que permite decidir la viabilidad de un proyecto mediante el tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial [83].

4.5.1 Evaluación financiera tecnología diseñada.

➤ *Costos de capital*

Además del costo de los equipos que se presenta de manera resumida en la **Tabla 4.83**, y el costo del terreno presentado en la sección anterior, en los costos de capital debe incluirse:

Obras civiles: por adecuación del terreno y levantamiento de muros. Se consideró un costo unitario civil de 300 000 COP/m² [72].

Obras eléctricas: por instalación del circuito eléctrico y de control. Se consideró un costo unitario eléctrico de 400 000 COP/kW [72] y se tiene una potencia instalada de 61,8 kW.

Ingeniería básica, de detalle y de implementación: ingeniería que no se tiene en cuenta en el diseño conceptual es el 10,0% [72] de la suma de costo de equipos, terreno, obras civiles y obras eléctricas.

Imprevistos: por ser ingeniería conceptual se considera para imprevistos un 30,0% [72] de la suma de costo de equipos, terreno, obras civiles y obras eléctricas.

Tabla 4.83. Costo de los equipos

EQUIPO	Canti- dad	Costo unitario	Costo total
		MMCOP	MMCOP
Bomba centrífuga (P-01)	2	3,86	7,71
Bomba centrífuga (P-02)	1	3,90	3,90
Bomba centrífuga (P-03)	2	5,40	10,8
Bomba centrífuga (P-04)	2	5,64	11,3
Agitador de aspas kW de (TK-02)	1	7,09	7,09
Tornillo sin fin (SC-01)	1	9,20	9,20
Triturador (TR-01)	1	1,71	1,71
Chiller de (E-02)	1	0,336	0,336
Compresor (C-01)	1	138	138
Micro turbina (MT-01)	1	647	647
Tanque almacenamiento líquidos 131 m ³ (TK-01)	1	77,8	77,8

EQUIPO	Canti- dad	Costo unitario	Costo total
		MMCOP	MMCOP
Tanque de mezcla 1,38 m ³ (TK-02)	1	3,05	3,05
Tanque almacenamiento digestato 138 m ³ (TK-03)	1	80,9	80,9
Tanque almacenamiento biogás 35 m ³ (TK-04)	1	48,5	48,5
Silo almacenamiento sólidos 10,6 m ³ (S-01)	1	13,2	13,2
Biodigestor con aislamiento 300 m ³ (BTK-01,02,03 y 04)	4	163	651
Filtro carbón activo PRFV de presión 2 x 3 m (F-01)	1	48,2	48,2
Interc. de calor de tubos y coraza con aislamiento (E-01)	1	5,80	5,80
Intercambiador de calor de tubos y coraza (E-02)	1	2,05	2,05
Tea (FL-01)	1	51,90	51,9
Tubería 1 in	1	1,78	1,78
Tubería 2 in	1	3,54	3,54
Tubería de 2,5 in	1	9,0	9,0
Tubería de 3 in	1	0,194	0,194
Aislamiento para tuberías	1	7,62	7,62
Ducto de gases fríos	1	3,39	3,39
Ducto de gases calientes con aislamiento	1	2,55	2,6
INVERSION INICIAL EN EQUIPOS			1 848

En la **Tabla 4.84** se presentan todos los costos de capital mencionados para la planta de biodigestión diseñada.

Tabla 4.84. Costo de capital

Equipos	MMCOP	1 848
Terreno	MMCOP	124
Obras civiles	MMCOP	1 238
Obras eléctricas y de control	MMCOP	24,7
Ingeniería, básica, de detalle, y de implementación, 10%	MMCOP	323
Imprevistos, por ser ingeniería conceptual, 30%	MMCOP	970
VALOR DE CAPITAL TOTAL	MMCOP	4 529

➤ **Costos operativos**

Además de los costos operativos calculados en la sección 4.3 y 4.5 (disposición de residuos, suministro de agua de refrigeración y de carbón activado) existen otros costos que deben ser tomados en cuenta y serán explicados a continuación:

Operación de equipos: como se observa en la **Tabla 4.85** hay un consumo eléctrico en planta de 330 078 kW/año, sin embargo, este consumo no representa un costo operativo ya que la planta puede autoabastecerse a partir de la energía eléctrica generada en la micro turbina. En total se generan 1 056 666 kW/año, de forma que el porcentaje de energía eléctrica disponible para la venta es el 68,8%.

Tabla 4.85. Consumo eléctrico en planta

Maquina	Consumo eléctrico de equipos de la planta		Tiempo de trabajo	Energía consumida
	HP	kW	h/día	(kWh/año)
Bomba centrifuga P-01	0,238	0,178	2	129,85
Bomba centrifuga P-02	0,247	0,184	2	134,44
Bomba centrifuga P-03	1,20	0,899	24	7878,46
Bomba centrifuga P-04	1,29	0,961	24	8417,88
Agitador de aspas TK-02	10,00	7,47	24	65436,23
Tornillo sin fin SC-01	1,34	1,00	2	730,00
Triturador TR-01	2,99	2,24	2	1633,06
Chiller 35,6 kW	19,8	14,8	24	311680,80
Compresor C-01	17,7	13,3	24	116070,00
TOTAL	54,9	41,0		330 078

Personal: para garantizar un correcto funcionamiento de la planta, se considerará necesaria la presencia de 1 supervisor de planta, 1 técnico mecánico, 1 técnico eléctrico y 6 operarios. De manera adicional, se contará con personal administrativo: 1 gerente general, 1 auxiliar y 1 secretaria. La información asociada a costos de personal por remuneración se muestra en la **Tabla 4.86**.

Tabla 4.86. Balance de personal operativo y costos asociados.

Cargo	3 turnos por día (24 horas)		
	Numero de puestos por día	Remuneración mensual	
		Unitario(COP)	Total(COP)
Supervisor de planta	1	3 150 000	3 150 000
Técnico 1	2	2 100 000	4 200 000
Operario	6	1 260 000	7 560 000
Gerente General	1	4 200 000	4 200 000
Auxiliar	1	3 150 000	3 150 000
Secretaria	1	1 260 000	1 260 000
Total	12		
Costo total del personal MMCOP/mes			23,5
Costo total del personal MMCOP/año			282

Costos de mantenimiento: se asumió como el 2% del costo total de los equipos, sin incluir la micro turbina ya que el proveedor suministró su costo anual de mantenimiento.

Transporte de materia prima: será realizado por terceros. Se tendrá una ruta para materia prima líquida y otra para material prima sólida. No es necesario transportar los residuos del rancho porque como se explicó anteriormente, la planta estará ubicada contigua a esta empresa. Se asumió un costo de transporte de 130 COP/kg [80] y el total de materia prima que será recolectada es de 758 170 kg/año, es decir, el 11,3% del total de la materia prima que ingresa a la planta.

En la **Tabla 4.87** se presentan todos los costos de capital mencionados para la planta de biodigestión.

Tabla 4.87. Costos operativos

Transporte de materias primas líquidas	MM COP/año	36,9
Transporte de materias primas sólidas	MM COP/año	61,6
Carbón activado	MM COP/año	52,4
Agua para chiller	MM COP/año	0,521
Energía eléctrica para la planta	MM COP/año	0,00
Disposición de residuos líquidos	MM COP/año	97,3
Disposición de residuos sólidos (carbón activado)	MM COP/año	13,4

Personal	MM COP/año	282
Mantenimiento de micro turbina	MM COP/año	49,2
Mantenimiento de la planta sin micro turbina	MM COP/año	24,2
COSTOS OPERATIVOS TOTALES	MM COP/año	618

➤ **Ingresos**

Los ingresos que se van a considerar para la planta de biodigestión están asociados a la venta de energía eléctrica y el cobro del transporte de los residuos de las compañías que van a suministrarlos. Estos datos están presentados en la **Tabla 4.88**.

Venta de energía eléctrica: como se explicó anteriormente, la energía generada dentro de la planta será utilizada para su auto abastecimiento (31,2%) y el resto de energía disponible será vendida a la empresa el Ranchero. Se estima ofrecer un precio de venta del kWh un 10% menor al que la compañía paga en promedio en la actualidad para que resulte atractivo el negocio de forma que, en lugar de cobrar 360 \$/ kWh , se estarían cobrando 324 \$/kWh.

Transporte de materia prima: se fijó una tasa de 130 \$/kg que será cobrada a las empresas generadoras para transportar el material orgánico generado desde sus instalaciones hacia la planta de biodigestión. A la empresa El Ranchero no se le cobraría ya que no hay necesidad de transportar sus residuos.

Los ingresos se evaluaron en un período de 10 años considerando una tasa de crecimiento anual de material orgánico recibido del 1,0%.

Tabla 4.88. Ingresos en el primer año de funcionamiento de la planta de biodigestión asociados a venta de energía eléctrica y disposición de materia prima

Energía eléctrica disponible para la venta	kWh/año	726 588
Precio de venta kWh	COP/kWh	324
Ingresos por venta de energía	MMCOP/año	176
Materia prima recibida para disposición	ton/año	6 742
% de materia prima para transportar	%	11,3
Precio por transporte	\$/kg	130
Ingresos por transporte de materia prima	MMCOP/año	98,6
INGRESOS TOTALES	MMCOP/año	275

El Ranchero consume 504 468 kWh/año en electricidad, por lo que la compañía de biodigestión está en capacidad de abastecer completamente esta necesidad.

Considerando la reducción del precio de venta del kWh, el Ranchero estaría ahorrando en promedio un total de MMCOP 18,2 anualmente.

Se observa además, que se estarían dejando de entregar 222 120 kWh/ año de electricidad valorizados MMCOP 71,9 pero para fines prácticos del proyecto se considerará que la totalidad de la energía eléctrica es vendida.

➤ **Análisis financiero**

El análisis financiero se llevó a cabo en un modelo desarrollado por la empresa Ambientalmente [67]. En la **Tabla 4.89** se presentan los parámetros de evaluación del proyecto.

Tabla 4.89. Parámetros de evaluación del proyecto

ECONÓMICOS	Unidad	Valor
Precio de energía eléctrica para la venta	COP/kWh	324
Tasa de cambio utilizada (COP a USD)	COP/USD	2 100
Tasa de cambio utilizada (COP a Euro)	COP/Euro	2 600
Inflación anual	%	3,50
Costo de disposición de lixiviados	COP/m3	15 000
Costo de disposición en celda de seguridad	COP/kg	1 680
Precio por recepción de materia prima	COP/kg	130
Costo de m ² de terreno	COP/m2	30 000
Costo de transporte de materia prima	COP/kg	130
FINANCIEROS	Unidad	Valor
Porcentaje de financiación del proyecto	%	50,0
Tasa de interés	%	11,0
Tiempo de gracia del préstamo	años	0
Meses de capital de trabajo	meses	6
TIO	%	16,0
Año base (Año 0)	años	2015
Horizonte de evaluación	años	10
Vida útil de los activos	años	10
Depreciación	N.A	Lineal

Valor de salvamento	%	10,0
Impuesto en la renta	%	34,0
TÉCNICOS		
	Unidad	Valor
Capacidad de planta	Ton	7 374
Ton/año de residuos para tratar (Actuales)	Ton	6 742
Tasa de crecimiento de residuos	%	1,00
Área requerida	m ²	4 128
Fracción de materia prima para transportar	%	11,3
Porcentaje de CH ₄ en el biogás	%	57,9
Porcentaje de energía para autoconsumo	%	31,2
Porcentaje de digestato no recirculado	%	64,5
CAPEX		
Tecnología	MMCOP	4 344
Capital de trabajo	MMCOP	432
Terreno	MMCOP	173
CAPEX totales	MMCOP	4 950
OPEX		
OPEX totales	MMCOP	618

Respecto al precio de la energía no se modificó ya que es poco probable precios más altos al dado inclusive si se le vendiera a otra empresa, ya que la seleccionada (Lácteos El Ranchero) es de las que paga una mayor tarifa.

En cuanto al dato técnico de la capacidad requerida en planta, es importante tener en cuenta que está es la capacidad que debe tener la planta dentro de 10 años según el incremento anual de residuos. A pesar de que el diseño de los equipos se realizó para recibir 6 742 ton/año, la planta está en capacidad de tratar 7 374 ton ya que los tanques no están actualmente al máximo porcentaje de ocupación.

Los resultados importantes se presentan en la **Tabla 4.90**.

Tabla 4.90. Resultados del análisis financiero del diseño de la planta

VPN	COP	- 5 564 342 031
TIR	%	-
INDICE DE RENTABILIDAD	COP	- 2 361
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN	años	-

De la tabla anterior se puede decir lo siguiente:

El valor presente neto del proyecto (VPN) es de aproximadamente 5 564 MMCOP negativo, lo que significa que la planta reducirá su riqueza en esta cantidad de planta cada año.

La tasa interna de retorno (TIR) no tiene valor ya que el horizonte de evaluación del proyecto (10 años) no presenta flujo de caja positivo. A su vez, se realizó un análisis adicional aumentando el horizonte de evaluación a 20 años, sin embargo persisten los flujos de caja negativos.

El índice de rentabilidad negativo indica que por cada peso invertido se perderán 2 361 COP y el proyecto no presenta tiempo de recuperación para el horizonte de evaluación.

De lo anterior se observa que la construcción de la planta de biodigestión a partir del diseño y selección de equipos no resulta factible para el tratamiento de las 6 742 ton/año actuales de residuos consideradas y teniendo ingresos netos únicamente a partir de la venta de energía eléctrica.

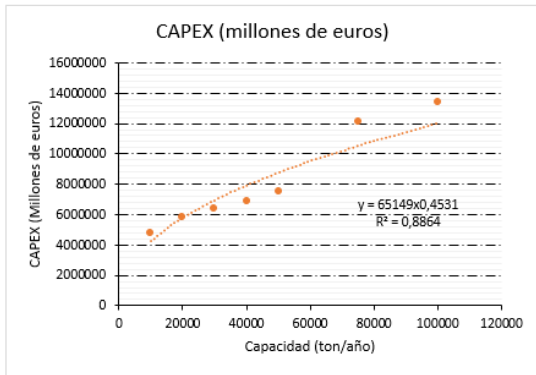
Sin embargo, al realizar un análisis superficial para la producción y venta de metano en lugar de energía eléctrica, los resultados fueron menos satisfactorios. Para ello, se cotizó un equipo para remoción de dióxido de carbono y se obtuvo una oferta comercial por parte de un proveedor internacional [79] por un valor de 750 000 USD. En el costo total de los equipos se eliminó el costo de la micro turbina, siendo este de 307 996 USD y se sumó el costo de este equipo. Se consideró un precio de venta de metano de 773 COP/m³ [67]. Los otros datos requeridos en el análisis financiero se mantuvieron constantes. El VPN en este caso fue de 6 806 MMCOP negativo, es decir, resulta menos factible el diseño de la planta de biodigestión para producir metano que energía eléctrica, teniendo en cuenta solo el cambio en el equipo principal.

4.5.2 Evaluación financiera tecnología OWS-DRANCO

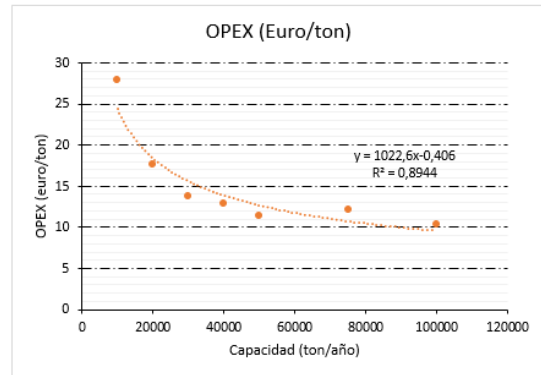
En el caso de la construcción de la planta de biodigestión a partir de la tecnología DRANCO de la empresa OWS, no se cuenta con algunos parámetros requeridos para el análisis financiero, tales como inversión, costos operacionales, área requerida, entre otros, para una planta que trate 6 742 toneladas/año actualmente y 7374 en 10 años. Sin embargo, a partir de los datos suministrados por el proveedor, los cuales están presentados en la **Tabla 4.43**, se realizó una regresión mediante una función potencial

para escalar los datos asociados a una planta que trate las toneladas consideradas en el proyecto. En la

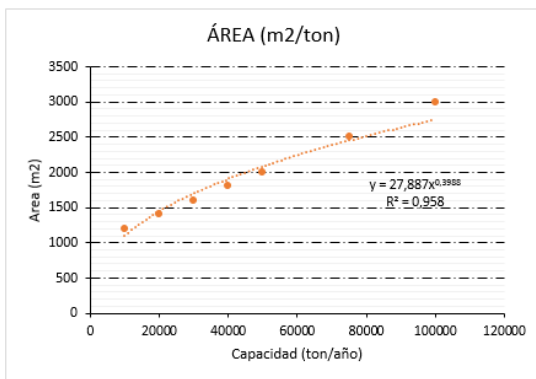
Figura 4.22 se presentan las regresiones realizadas.



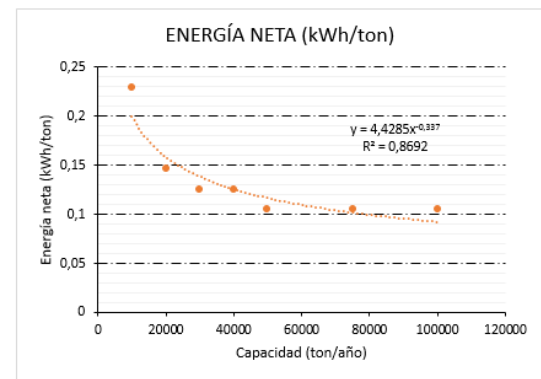
Y=65149* Capacidad^{0,4531}
 Capacidad (ton/año) 7374
 CAPEX (Euros) 3684377
 CAPEX (MMCOP) 9579



Y= 1022,6* Capacidad^{-0,406}
 Capacidad (ton/año) 6742
 OPEX (Euro/ton) 28,5
 OPEX (Euro) 192312
 OPEX (MMCOP) 500



Y= 27,887* Capacidad^{0,3988}
 Capacidad (ton/año) 7374
 ÁREA (m²) 972



Y= 4,4285* Capacidad^{-0,337}
 Capacidad (ton/año) 6742
 ENERGÍA NETA (%) 22,7

Figura 4.22. Regresiones potenciales

En la **Tabla 4.91** se presentan de manera resumida el CAPEX y OPEX calculado para realizar el análisis financiero a partir de esta tecnología. Se consideraron los mismos parámetros financieros presentados en la **Tabla 4.89**.

Tabla 4.91. CAPEX Y OPEX planta de biodigestión con tecnología DRANCO

CAPEX		
Tecnología	MMCOP	9 579
Capital de trabajo	MMCOP	250

Terreno	MMCOP	29,4
CAPEX totales	MMCOP	9 859
OPEX		
Tecnología	MMCOP	5 000
Disposición sub producto (64,5%)	MMCOP	65,2
OPEX totales	MMCOP	565

Al aplicar el modelo ya mencionado, desarrollado por Ambiental Mente S.A.S [67], se obtuvieron los resultados que se presentan en la **Tabla 4.92**.

Tabla 4.92. Resultados del análisis financiero de la planta con tecnología DRANCO

VPN	COP	- 9 728 808 724
TIR	%	-
INDICE DE RENTABILIDAD	COP	-2 072
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN	años	-

De la tabla anterior se puede decir lo siguiente:

El valor presente neto del proyecto (VPN) es de aproximadamente 9 729 MMCOP negativo, lo que significa que la planta reducirá su riqueza en esta cantidad de planta cada año.

La tasa interna de retorno (TIR) no tiene valor ya que el horizonte de evaluación del proyecto (10 años) no presenta flujo de caja positivo.

El índice de rentabilidad negativo indica que por cada peso invertido se perderán 2 072 COP y el proyecto no presenta tiempo de recuperación para el horizonte de evaluación.

De lo anterior se observa que la construcción de la planta de biodigestión con tecnología DRANCO no resulta factible para el tratamiento de las 6 742 ton/año actuales de residuos consideradas y teniendo ingresos netos únicamente a partir de la venta de energía eléctrica.

Al comparar estos resultados con los del diseño de la planta, se observa que resulta menos factible, construir la planta con tecnología suministrada por el proveedor internacional OWS especialista en tecnologías de biodigestión.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Mediante una encuesta realizada a 13 empresas de Oriente Antioqueño pertenecientes a los sectores alimenticio, agrícola y restaurantes industriales, fue posible seleccionar una muestra de 8 empresas adecuadas para participar en el proyecto. Se identificó una oferta de material orgánico para la planta de biodigestión de 6 742 ton/año, de las cuales un 88,7% es aportado por la compañía productora de derivados lácteos El Ranchero.

La misma encuesta mencionada anteriormente permitió identificar las necesidades energéticas de las compañías visitadas, tanto eléctricas como térmicas y se encontró que mensualmente se consumen en promedio por todas las compañías 1 051 787 kWh eléctricos y 16 510 294 kWh térmicos, es decir un 6% de energía eléctrica y un 94,0% de energía térmica. A pesar de lo anterior, se encontró información reportada en la literatura y por proveedores especializados acerca de la complejidad y los altos costos que traen las instalaciones, redes de transporte y equipos necesarios para la distribución y venta de metano para generar energía térmica. Por esta razón se decidió generar y distribuir energía eléctrica.

Conociendo la oferta de materia prima y la demanda de energía eléctrica de las compañías seleccionadas, se realizaron pruebas fisicoquímicas a muestras recolectadas en cada empresa y se determinó que el material orgánico con el que se cuenta posee un potencial de producción de biogás de 611 647 m³/año con un porcentaje de metano del 55,5%v y un poder calorífico de 4479 kcal/kg.

Se realizó el diseño conceptual de una planta de biodigestión productora de energía eléctrica y se calculó el potencial de producción de electricidad en 1 056 666 kWh/año, de los cuales el 31,2% se emplearía para autoabastecer la planta de biodigestión y el porcentaje restante, equivalente a 726 588 kWh/año, se encontraría disponible para la venta. Se decidió ubicar las instalaciones de la planta contiguas a la compañía El Ranchero para facilitar no solo la recolección de materia prima sino que además se decidió que la energía eléctrica generada sería vendida a esta compañía que consume en promedio 504 468 kWh/año y se ofrecerá un precio de venta del kWh un 10,0% menor al pagado actualmente por la compañía, es decir 324\$/kWh. Para la planta diseñada se realizó una evaluación financiera en un horizonte de 10 años y una tasa interna de oportunidad (TIO) del 16,0%. Se obtuvo un valor presente neto (VPN) negativo con un valor de 5 564 MMCOP. Además se encontró que por cada peso invertido en la compañía se estarían perdiendo 2 361 COP.

Paralelamente al diseño conceptual de la planta, se realizó una búsqueda de ofertas con la compañía belga Organic Waste Systems (OWS) para cotizar tecnologías de biodigestión procedentes de aquel país y estudiar la viabilidad de importar e instalar dicha tecnología en el Oriente Antioqueño. Se realizó la evaluación financiera para las plantas de OWS, considerando el flujo de material orgánico, producción de biogás y producción de electricidad identificados previamente y se encontró que a un horizonte de 10 años y una TIO del 16,0% el VPN sería negativo con un valor de 9 729 MMCOP.

La evaluación financiera permite concluir que bajo los parámetros y condiciones evaluadas en el Oriente Antioqueño, el proyecto no resulta económicamente factible ni para la tecnología ofrecida por OWS, ni para la planta diseñada de manera conceptual.

Es probable que la factibilidad de construir la planta de biodigestión mejore si se considerarán ingresos por el aprovechamiento del digestato. Para el alcance del proyecto no se diseñó un proceso para generarle valor agregado a estos residuos sino que por el contrario implican un gran gasto por su disposición.

CAPITULO 6. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio de oferta de material orgánico más extenso y profundo para lograr conseguir un número mayor de proveedores y por lo tanto incrementar el número de toneladas a procesar y el biogás producido ya que de acuerdo a la teoría en la economía de escala, al aumentar la producción, los costos operacionales van a disminuir y por lo tanto el margen de utilidad será mayor proporcionando una nueva posibilidad para que el proyecto sea viable. En cuanto a la oferta de energía eléctrica, se recomienda de ser posible realizar un estudio que involucre a profundidad la posibilidad de vender metano o inyectarlo a la red de gas municipal para tener una mejor noción del comportamiento económico del proyecto bajo estas circunstancias.

Se recomienda realizar a futuro un modelo piloto a escala para digerir las mezclas consideradas en este proyecto y obtener la producción de biogás y la tasa real de metano. Además, se recomienda verificar los aspectos relacionados con los elementos tóxicos contenidos en la materia prima (Ca, K, Na y Mg), para comprobar si estos realmente causarían inhibición del proceso de digestión anaerobia, así como buscar posibles tratamientos y soluciones en caso de que así sea.

Se recomienda también para trabajos futuros, evaluar el digestato obtenido como fertilizante y los tratamientos que deben llevarse a cabo para su transformación, costos asociados, los resultados de su aplicación en campo y los posibles impactos que tendría dentro de una evaluación financiera.

Se recomienda realizar una evaluación de vigilancia tecnológica para encontrar otros proveedores nacionales e internacionales de tecnologías de biodigestión y evaluar sus propuestas comerciales técnica y económicamente.

Se recomienda adicionalmente, realizar un estudio para comprobar bajo cuantas toneladas de residuos a tratar sería rentable el proyecto pues en el desarrollo del estudio actual no fue posible ya que solo se tienen los costos para los equipos diseñados y sería necesario tener los CAPEX y OPEX para las toneladas que se quieran analizar.

Por último se sugiere a futuro analizar posibles zonas con potencial y alto nivel de generación de residuos orgánicos para plantear la posibilidad de repetir este estudio de pre factibilidad bajo otras condiciones.

CAPITULO 7. REFERENCIAS

- [1] Afzal, S., y Fleten, S. E. (2010). How to proceed with competing alternative energy technologies: A real options analysis. *Energy Economics*, 32, 817–830.
- [2] Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A. G., y Kumar, K. S. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846-859.
- [3] Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares. (2014). *Línea de recuperación energética y material de residuos agroindustriales*. Universidad de Antioquía, Medellín.
- [4] Aguilar, Q., Taboada, P., Ojeda, S., y Cruz, S. (2014). Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 412-419
- [5] Ríos, O., Betancur, A., Salazar, P., y García, J. M. (2011). *Bases para una gestión integral de los residuos sólidos en el Oriente Antioqueño*. Fundación Universitaria CEIPA, Medellín, Colombia. Obtenido de Fundación Universitaria CEIPA: http://aplicaciones.ceipa.edu.co/biblioteca/biblio_digital/virtualteca/monografias/bas_e_para_la_gestion_integral_de_los_residuos_solidos.pdf
- [6] Chará, J., Pedraza, G. X., Preston, T. R., Rodríguez, L., Guerrero, C. A., Pérez, A., . . . Dolberg, F. (2002). *Biodigestores plásticos de flujo continuo: Investigación y transferencia en países tropicales*. Cali, Colombia: Fundación CIPAV.
- [7] Centro Nacional de Producción Más Limpia. (2009). *Resource assessment for livestock and agroindustrial wastes*. Colombia: Methane to Markets Program.
- [8] Decreto 1713. (2002).
- [9] Arredondo, L., y Restrepo, J. P. (2012). Producción de acondicionadores para suelos con base en residuos orgánicos sólidos mediante un proceso de compostaje. Caldas, Antioquía: Corporación Universitaria La Sallista.
- [10] Cuellar, J. F., y Duque, C. M. (2013). Gestión integral de residuos sólidos. Florencia, Caqueta: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- [11] Mancillas, S. E., Rios, L., y Rodriguez, J. A. (2012). La digestión anaerobia para la producción de biogás y el uso de residuos sólidos urbanos. *Cienciaviva*, 32.
- [12] Jaramillo, G., y Zapata, L. M. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Universidad de Antioquía, Medellín, Colombia.

- [13] Paniagua, N. M., Giraldo, E. C., y Castro, L. M. (2011). Manual para el manejo de residuos sólidos. Envigado, Antioquia: SENA.
- [14] Tchobanoglous, G., Theissen, H., y Eliassen, R. (1982). *Desechos Sólidos- Principios de Ingeniería y Administración*. Mérida- Venezuela.
- [15] Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol*, 85, 849–860.
- [16] United States Environmental Protection Agency. (2012). *Technology market summit. Case study primer for participant discussion: Biodigesters and biogas*. Washington, DC: EPA.
- [17] SCS Engineers. (2007). *Informe de evaluación relleno sanitario La Pradera*. Medellín, Colombia: Methane to Markets Program.
- [18] Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Madrid, España: IDAE.
- [19] Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación. (2013). *Digestión Anaerobia*. España: Agro Waste.
- [20] Wellinger, A., Murphy, J., y Baxter, D. (2013). *The Biogas Handbook: Science, production and applications*. Woodhead Publishing.
- [21] Sakar, S., Yetilmezsoy, K., y Kocak, E. (2009). Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment: A literature review. *Waste Management and Research*, 27, 3-18.
- [22] Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *El Sector del biogás agroindustrial en España*. Madrid, España: Ministerio.
- [23] Ministry of Environment B.C. (No Año). Biogas Cleaning. En *Biogas from on-farm anaerobic digestion* (pág. Chapter 6). British Columbia.
- [24] Bitir, I., Tazerout, M., y Le Corre, O. (2002). Optimal Use of the Generated Biogas from Manure. *Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources*, 387-395.
- [25] Q. Zhao, E., Leonhardt, C., y MacConnell, C. F. (2010). Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion. *Climate Friendly Farming*, 3-24.
- [26] Wellinger, A., y Lindberg, A. (2001). *Biogas Upgrading and Utilisation*. IEA Bioenergy.
- [27] Harasek, M. (2011). *Biogas: Characteristics, Clean-up Technologies and Upgrading*. Vienna University of Technology, Vienna, Austria.
- [28] Curry, N., y Pillay, P. (2012). Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy*, (41) 200-209.

- [29] Kiely, G. (1999). *Ingeniería Ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. McGraw Hill.
- [30] Estudio y técnicas especializadas en ingeniería. (Enero de 2006). Estudio de pre-factibilidad para el aprovechamiento de biogás generado en el relleno sanitario "Don Juanito" municipio de Villavicencio, Colombia. Villavicencio, Colombia.
- [31] Martínez, I. (1992). *Termodinámica básica y aplicada*. Dossat SA.
- [32] Díaz, C., Arrieta, A.-A., y Suárez, J.-L. (2009). Comparison of Combustion properties of simulated biogas and methane. *Ciencia y Futuro*, 225-236.
- [33] Cengel, Y., y Boles, M. (2011). *Termodinámica*. McGraw Hill.
- [34] Hosseini, S., Bagheri, G., y Wahin, M. (2014). Numerical investigation of biogas flameless combustion. *Energy conversion and management*, 41-50.
- [35] Trzepierzynska, I., Kazimierz, G., y Knop, F. (2009). Technological and environmental issues of biogas combustion at municipal sewage treatment plant. *Environment Protection Engineering*, 73-79.
- [36] Van Haren, M., y Ron, F. (2005). *Electricity and heat production using biogas from the anaerobic digestion of livestock manure: A literature review*. Ridgetown College y University of Guelph, Ontario, Canadá.
- [37] Wheeler, P., Jaatinen, T., Wellinger, A., Lindberg, A., Holm-Nielsen, J. B., y Pettigrew, A. (2001). *Biogas upgrading and utilisation: Energy from biological conversion of organic waste*. Oxford: IEA Bioenergy.
- [38] AGROMEC. (2010). Generación eléctrica con biogás. *ECAG*, 52, 13-19.
- [39] Alberta Agriculture Food and Rural Development. (2006). *Biogas Energy Electricity Generation and Interconnection to the Power Grid*. Alberta, Canadá: AAFRD.
- [40] Wiltsee, G., y Emerson, H. (2004). Clean power from microturbines using biogas. *Biocycle*, 53-55.
- [41] Al Seadi, T., Bernhard Drosig, W. F., y Dominik Rutz, R. J. (2013). *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*. Wood Head Publishing.
- [42] Daldur. (2010). *Funcionamiento de una planta de biogás*. España: Biogas Regions.
- [43] Samayoa, S., Bueso, C., y Viquez, J. (2012). *Implementación de sistemas de biodigestión en eco empresas*. Honduras: Comunica.
- [44] Albuquerque, J., De la Fuente, C., Campoy, M., Carrasco, L., Najera, I., Baixauli, C., Bernal, M. (2012). Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. *European Journey of Agronomy*, (43) 119-128 .

- [45] Alfa, M., Adie, D., Igboro, S., Oranusi, U., Dahunsi, S., y Akali, D. (2014). Assessment of biofertilizer quality and health implications of anaerobic digestion effluent of cow dung and chicken droppings. *Renewable Energy*, (63) 681-686.
- [46] De la Fuente, C., Alburquerque, J., Ferrer-Costa, A., Carrasco, L., Cegarra, J., y Abad, M. (2012). Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and Bioenergy*, (40)181-189.
- [47] Owamah, H., Dahunsi, S., Oranusi, U., y Alfa, M. (2014). Fertilizer and sanitary quality of digestate biofertilizer from the co-digestion of food waste and human excreta. *Waste Management*, (34) 747-752.
- [48] Evangelisti, S., Lettieri, P., Borello, D., y Clift, R. (2014). Life cycle assessment of energy from waste via anaerobic digestion: a Uk case study. *Waste Management*, (34)226-237.
- [49] Bernstad, A., y Cour Jansen, J. (2011). A life cycle approach to the management of household food waste. *Waste Management*, 31: 1879-1896.
- [50] Hilbert, J. A. (2010). *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural, Castelar, Argentina.
- [51] Schuppenhauer, M. R. (2013). *Comparison of operational, economical AD performance: Europe vs. US*. Obtenido de <http://www.epa.gov/agstar/documents/conf13/Comparison%20of%20Operational%20and%20Economical%20Performance%20of%20European%20vs%20US%20Digesters,%20Michael%20Schuppenauer.pdf>
- [52] Conil, P. (2011). *Biogas: un gas natural renovable para Colombia*. Obtenido de <http://www.bio-tec.net>
- [53] Ministerio de Minas y Energía República de Colombia. (2008). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Colombia.
- [54] Conil, P. (1989). Biodigestores para lodos de palma: la experiencia colombiana. Colombia.
- [55] Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares. (2012). *Evaluación de los residuos orgánicos urbanos del oriente antioqueño para la producción de fertilizantes mineral-orgánicos*. Universidad de Antioquía, Medellín, Colombia.
- [56] Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural y Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares. (2014). Estrategias para optimizar procesos de manejo integral de residuos sólidos orgánicos en los municipios del oriente antioqueño. Medellín, Colombia.

- [57] Álvarez, S. (2014). Carmen de Viboral, Colombia.
- [58] Syaichurrozi, I., Budiyono, y Sumardiono, S. (2013). Predicting kinetic model of biogas production and biodegradability organic materials: Biogas production from vinasse at variation of COD/N ratio. *Bioresource Technology*, 390-397.
- [59] Osojnik, I., Muri, P., Dijinovic, P., y Pintar, A. (2014). Biogas production from spent rose hips (*Rosa canina* L.): Fraction separation, organic loading and co-digestion with N-rich microbial biomass. *Bioresource Technology*, 375-383.
- [60] Goulding, D., y Power, N. (2013). Which is the preferable biogas utilisation technology for anaerobic digestion of agricultural crops in Ireland: Biogas to CHP or biomethane as a transport fuel? *Renewable Energy*, 121-131.
- [61] Alkanok, G., Burak, D., y Onay, T. (2014). Determination of biogas generation potential as a renewable energy source from supermarket wastes. *Waste Management*, 134-140.
- [62] Borowski, S., Doman, J., y Weatherley, L. (2014). Anaerobic co-digestion of swine and poultry manure with municipal sewage sludge. *Waste Management*, 34, 513 - 521.
- [64] Quintero, A., Profesional de operación de aguas. Área de tratamiento de aguas residuales. (2014). Planta de tratamiento de San Fernando
- [65] Kratzeisen, M., StarceviC, N., Martinov, N., Maurer, C., y Muller, J. (2010). Applicability of biogas digestate as solid fuel. *Fuel*, 2544-2548.
- [66] Fertiberia S.A. (2014). *Fertilizantes NPK complejos*. España.
- [67] Ambiental Mente S.A.S (Noviembre 20 de 2014). Costo de disposición de lixiviados. Medellín, Antioquia, Colombia. Carrera 43a #7-50 – E-mail: andresdelgado@ambientalmente.com
- [68] Acinox S.A. (Septiembre 1 de 2014). Precio de la lamina de acero inoxidable 304. Medellín, Colombia: PBX: (574) 444 42 44 – Carrera 52 No 7 30, Medellín, Antioquía, Colombia. Johana Botero.
- [69] Fibratore S.A. (Septiembre 1 de 2014). Precio de la fibra de vidrio. La Estrella, Colombia: PBX: (574) 448 78 36 - Calle 100 B Sur No. 51-10, La Estrella, Antioquia, Colombia.
- [70] Engineering Tool box (Septiembre 1 de 2014). Diámetros y espesores nominales de tuberías de acero al carbono. www.engineeringtoolbox.com

- [71] Aceros Ferrasa (Septiembre 1 de 2014). Precio de tubería en acero al carbono. Medellín, Colombia: PBX: (574) 444 77 99 – Carrera 42 No 26 18 Itagui, Antioquía, Colombia. Email: alvaro.betancur@ferrasa.com.co
- [72] Pablo Ignacio, H. A. (2014). Diseño de un sistema Urea-RSNC para el control de NOx provenientes de un horno de fritas. *Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería*. Universidad de Antioquía, Medellín
- [73] Suministros ingeniería y soluciones SIS S.A. (10 de Noviembre de 2014). Precios de la cañuela de lana de vidrio rígida sin folio de aluminio. Medellín, Colombia: PBX: (574) 444 18 04 - Carrera 51 B No 12 Sur 77. Medellín, Antioquia, Colombia. Email: comercial@sissa.com.co.
- [74] EMMA Y CIA S.A (10 de Noviembre de 2014). Precio de la lamina de aluminio. Medellín, Colombia: PBX: (574)371 75 03 – Carrera 64 A No 33 40 Itagui, Antioquía, Colombia. Email: gperez@grupoalumina.com.co.
- [75] Mott L., R. (1996). *Mecánica de fluidos aplicada* (Cuarta ed.). Mexico: Prentice hall.
- [76] Durespo (Septiembre 9 de 2014) Cotización de trituradora de Residuos. Itagui, Colombia: PBX: (574) 444 62 62- Autopista Sur # 29- 97. Itagui, Antioquia, Colombia. E-mail: alondono@durespo.com.es
- [77] Indisa S.A (2011). Programa para diseño de tornillos transportadores sin fin. Medellín, Colombia
- [78] Treyball, R. (1981). *Mass Transfer Operations* (Tercera ed.). Singapore: McGraw Hill Book Company.
- [79] Dimasa Grupo (Octubre 31 de 2014) Cotización Filtro de Carbón Activado. Barcelona, España. PBX: (34) 93 835 91 04
- [80] PROCOLOMBIA (Noviembre 19 de 2014) Rutas y tarifas de transporte. <http://www.colombiatrade.com.co/herramientas/rutas-y-tarifas-de-transporte>
- [81] Supernova (Noviembre 4 de 2014) Cotización de micro turbina y compresor para generación de energía). Medellín, Colombia. PBX: (574) 311 13 50 – Calle 7 # 39-215. Medellín, Antioquia, Colombia. E-mail: santiago.saldarriaga@supernova-es.com
- [82] Suministros ingeniería y soluciones SIS S.A. (10 de Noviembre de 2014). Precios de la cañuela de lana de vidrio rígida sin folio de aluminio. Medellín, Colombia: PBX: (574) 444 18 04 - Carrera 51 B No 12 Sur 77. Medellín, Antioquia, Colombia. Email: comercial@sissa.com.co.
- [83] Blank, L., & Tarquin, A. (1999). *Ingeniería Económica*. Colombia: McGraw Hill.

[84] Hernández, A. (2002). Matemáticas Financieras. México: Thomson.

[85] Riggs, Bedworth, & Randhawa. (2002). Ingeniería Económica. México, Alfaomega.

CAPITULO 8. ANEXOS

Anexo 1. Encuesta para empresas sobre generación de residuos orgánicos

1. INFORMACIÓN GENERAL

N° de cuestionario:

Fecha:

Empresa:

N° de empleados:

Tipo de actividad industrial que desarrolla la empresa:

Teléfono:

Dirección:

Responsable del cuestionario:

Cargo:

Email:

Móvil:

Otros:

2. PROCESO PRODUCTIVO

Productos:

Unidad de producción:

Se produce energía a partir de biomasa: no ___ calor/vapor ___ electricidad ___

Consumo de energía anual:

Fuente de energía	Cantidad	Unidad	Costo	Unidad	Uso en proceso
Vapor					
Electricidad autogenerada					
Electricidad comprada a la red					
Otros					

3. GENERACIÓN DE RESIDUOS

Tipo de residuo	Cantidad	Actividad que lo genera	Destino	CARACTERÍSTICAS (densidad, pH, %humedad, ST, SV, N, P)



Empresa de recolección de residuos orgánicos:

Frecuencia de recolección:

Costo de disposición:

4. COMENTARIOS ADICIONALES

Anexo 2. Reporte de pruebas de laboratorio para muestras del Día 1



 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1912</p>	REPORTE DE RESULTADOS GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES (GIEM) FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES INSTITUTO DE QUÍMICA CORPORACIÓN ACADÉMICA PARA EL ESTUDIO DE PATOLOGÍAS TROPICALES PROCESO GESTIÓN DE LOS SERVICIOS ASOCIADOS A LA INVESTIGACIÓN	 <p>CÓDIGO: F-8840-06-S002 VERSIÓN: 02</p>
		Página 1 de 2

Fecha de elaboración (dd-mm-aaaa): 24-09-2014	Usuario: Ambientalmente S.A.S (Daniela)
NIT: 900.046.501-1	Teléfono: 4483170
Fecha recepción muestra (dd-mm-aaaa): 21-08-2014	Dirección: Cra 43 A # 7 - 50 Of. 513 Medellín
	Código interno de la muestra: 21ago1411 a 21ago1418

Nota aclaratoria: El presente reporte está basado en el análisis de la(s) muestra(s) entregada(s) por el usuario. Los resultados sólo afectan al material suministrado y por lo tanto no avalan ninguna tecnología o producto comercial.

Código interno	Descripción de la muestra
21ago1411	Muestra # 1 Mezcla compuesta
21ago1412	Muestra # 2 Ranchero 0.6 kg
21ago1413	Muestra # 3 panamericana 1.0 kg
21ago1414	Muestra # 4 Camilos Ceja Zanahoria 0.5 kg
21ago1415	Muestra # 5 Sólidos 1.0 Kg
21ago1416	Muestra # 6 Compuesta líquida 0.5 kg
21ago1417	Muestra # 7 compuesta (ranchero, gamlico, panade)
21ago1418	Muestra # 8 Griffith

-Fin de la hoja-

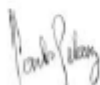
 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1912	REPORTE DE RESULTADOS GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES (GIEM) FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES INSTITUTO DE QUÍMICA CORPORACIÓN ACADÉMICA PARA EL ESTUDIO DE PATOLOGÍAS TROPICALES PROCESO GESTIÓN DE LOS SERVICIOS ASOCIADOS A LA INVESTIGACIÓN	 CÓDIGO: F-8840-06-8002 VERSIÓN: 02
	Página 2 de 2	

MUESTRA	RESULTADOS ANALISIS FISICOS			
	HUMEDAD TOTAL (%)	pH	SÓLIDOS TOTALES (mg/L)	CENIZAS (%)
21ago1411	-	4.32	92980	-
21ago1412	-	3.89	81120	-
21ago1413	-	4.25	414235	-
21ago1414	95.3	4.40	-	5.98
21ago1415	82.0	4.84	-	2.67
21ago1416	-	4.50	98200	-
21ago1417	-	3.98	121920	-
21ago1418	25.8	6.53	-	20.6

MUESTRA	RESULTADOS ANALISIS ELEMENTAL %				
	CARBONO	HIDROGENO	NITROGENO	AZUFRE	OXIGENO
21ago1411	37.85	6.58	1.81	0.54	27.37
21ago1412	31.32	5.89	1.70	0.53	31.83
21ago1413	41.98	6.41	0.56	0.52	26.94
21ago1414	36.98	5.14	0.99	0.46	27.95
21ago1415	41.88	6.11	1.81	0.43	25.95
21ago1416	28.27	10.67	0.61	0.59	20.44
21ago1417	41.36	6.39	1.19	0.45	27.79
21ago1418	35.71	5.80	1.05	0.61	21.70

El análisis elemental se realizó en un equipo marca LECO modelo Truspec (ASTM D-6373)

Atentamente,





CARLOS ALBERTO PELÁEZ JARAMILLO
Líder del grupo GIEM



JAIRO ALEJANDRO HURTADO A.
Coordinador de Servicios

El usuario dispone de 10 días hábiles a partir de la recepción del resultado para hacer reclamos o solicitar repetición del ensayo, el cual se hará sobre la submuestra guardada por el laboratorio. Si el nuevo resultado corresponde al anterior, considerando la desviación estándar presentada en original, el usuario asume nuevamente el costo del ensayo.

Anexo 3. Reporte de pruebas de laboratorio para muestras del Día 2



	REPORTE DE RESULTADOS GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES (GIEM)	
	FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES INSTITUTO DE QUÍMICA	
	CORPORACIÓN ACADÉMICA PARA EL ESTUDIO DE PATOLOGÍAS TROPICALES PROCESO GESTIÓN DE LOS SERVICIOS ASOCIADOS A LA INVESTIGACIÓN	Página 1 de 2

Fecha de elaboración (dd-mm-aaaa): 15-10-2014	Usuario: Ambientalmenta S.A.S (Daniela)
NIT: 900.046.501-1	Teléfono: 4483170
Fecha recepción muestra (dd-mm-aaaa): 01-09-2014	Dirección: Cra 43 A # 7 - 50 Of. 513 Medellín
	Código interno de la muestra: 01sep1407 a 01sep1413

Nota aclaratoria: El presente reporte está basado en el análisis de la(s) muestra(s) entregada(s) por el usuario. Los resultados sólo afectan al material suministrado y por lo tanto no avalan ninguna tecnología o producto comercial.

Código Interno	Descripción de la muestra
01sep1407	Muestra # 1 Compuesta todos
01sep1408	Muestra # 2 Alimentos Cárnicos La Ceja
01sep1409	Muestra # 3 Panamericana
01sep1410	Muestra # 4 Líquidos
01sep1411	Muestra # 5 Sólidos
01sep1412	Muestra # 6 El Ranchero
01sep1413	Muestra # 7 Grandes

-Fin de la hoja-

	REPORTE DE RESULTADOS GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES (GIEM) FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES INSTITUTO DE QUÍMICA CORPORACIÓN ACADÉMICA PARA EL ESTUDIO DE PATOLOGÍAS TROPICALES PROCESO GESTIÓN DE LOS SERVICIOS ASOCIADOS A LA INVESTIGACIÓN	 CÓDIGO: F-8840-06-8002 VERSIÓN: 02
	Página 2 de 2	

MUESTRA	RESULTADOS ANALISIS FISICOS			
	HUMEDAD TOTAL (%)	pH	SÓLIDOS TOTALES (mg/L)	CENIZAS (%)
01sep1407	-	3.90	74850	-
01sep1408	91.99	4.12	-	4.79
01sep1409	71.53	3.12	-	7.76
01sep1410	-	4.05	61170	-
01sep1411	66.33	4.11	-	4.35
01sep1412	-	3.89	48960	-
01sep1413	-	3.84	86400	-

MUESTRA	RESULTADOS ANALISIS ELEMENTAL %				
	CARBONO	HIDROGENO	NITROGENO	AZUFRE	OXIGENO
01sep1407	30.15	4.35	1.66	0.53	20.05
01sep1408	39.65	5.74	1.08	0.73	16.65
01sep1409	39.15	5.21	2.32	0.5	23.35
01sep1410	42.05	5.81	2.5	0.6	6.55
01sep1411	47.55	6.72	1.18	0.56	26.13
01sep1412	37.25	5.04	4.27	0.59	19.65

El análisis elemental se realizó en un equipo marca LECO modelo Truspec (A8TM D-6373)

Atentamente,





CARLOS ALBERTO PELÁEZ JARAMILLO
Líder del grupo GIEM



JAIRO ALEJANDRO HURTADO A.
Coordinador de Servicios

El usuario dispone de 10 días hábiles a partir de la recepción del resultado para hacer reclamos o solicitar repetición del ensayo, el cual se hará sobre la submuestra guardada por el laboratorio. Si el nuevo resultado corresponde al anterior, considerando la desviación estándar presentada en original, el usuario asume nuevamente el costo del ensayo.

Anexo 4. Reporte de resultados de análisis de especies fundamentales para abonos orgánicos.

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1912</p>	<p>REPORTE DE RESULTADOS GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES (GIEM)</p> <p>FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES INSTITUTO DE QUÍMICA</p> <p>CORPORACIÓN ACADÉMICA PARA EL ESTUDIO DE PATOLOGÍAS TROPICALES PROCESO GESTIÓN DE LOS SERVICIOS ASOCIADOS A LA INVESTIGACIÓN</p>	 <p>CÓDIGO: F-8840-06-8002 VERSIÓN: 02</p>
	Página 1 de 4	

Fecha de elaboración (dd-mm-aaaa): 31-10-2014		Usuario: Ambientalente S.A.S (Daniela Duque Garcia)
NIT: 900.046.501-1	Teléfono: 4483170	Dirección: Cra 43 A # 7 - 50 Of. 513 Medellín
Fecha recepción muestra (dd-mm-aaaa): 03-10-2014		Código Interno de la muestra: 03oct1403



Nota aclaratoria: El presente reporte está basado en el análisis de la(s) muestra(s) entregada(s) por el usuario. Los resultados sólo afectan al material suministrado y por lo tanto no avalan ninguna tecnología o producto comercial.

Código Interno	Descripción de la muestra
03oct1403	Mezcla compuesta digerada

ANÁLISIS ORGANOLÉPTICOS

Código Interno	Estado	Textura/Aspecto
03oct1403	Sólido húmedo	Heterogénea

-Fin de la hoja-

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1912</p>	REPORTE DE RESULTADOS GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES (GIEM) FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES INSTITUTO DE QUÍMICA CORPORACIÓN ACADÉMICA PARA EL ESTUDIO DE PATOLOGÍAS TROPICALES PROCESO GESTIÓN DE LOS SERVICIOS ASOCIADOS A LA INVESTIGACIÓN	 <p>CÓDIGO: F-8840-06-8002 VERSIÓN: 02</p>
	Página 2 de 4	



ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS (03oct1403)

Convenciones: CO: Carbono orgánico, CRA: Capacidad de Retención de Agua, CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico, CIC/CO, CIC en términos de CO, EC: Electroforesis capilar, PDP: Polarografía diferencial de pulso, ND: No Detectado, NC: No cuantificable, de: desviación estándar, C/N: carbono/nitrógeno, g: gramos, meq: miliequivalentes, mS: milisimens, cm: centímetros, cm³: centímetro cúbico, LD: Límite de detección, NTC: Norma Técnica Colombiana, SSLMM-42-2-92: Soil Survey Laboratory Methods Manual Reporte N°42, Versión 2.0, 1992, SM: Standard Methods, APHA: American Public Health Association, AWWA: American Water Works Association, WPCF: Water Pollution Control Federation, AOAC: Association of Official Analytical Chemists, FAO: food and agriculture organization, A.A. Absorción Atómica

Parámetro	Expresado como	Técnica	Norma	Resultado	d.e	Unid.
Calcio total	CaO	A.A	SM 3111B	0.820	0.001	g/L
Magnesio total	MgO	A.A	SM 3111B	0.353	0.002	g/L
Potasio total	K ₂ O	A.A	SM 3111B	2.085	0.005	g/L
Sodio total	Na	A.A	SM 3111B	1.021	0.005	g/L
Zinc total	Zn	A.A	SM 3111B	< 0.01	-	g/L
Cobre	Cu	A.A	SM 3111B	< 0.01	-	g/L
Hierro	Fe	A.A	SM 3111B	0.00569	0.00001	g/L
Manganeso	Mn	A.A	SM 3111B	N.D	-	g/L


Línea de Cuantificación GIEM
GIEM




 Amilvia Yanett Ortiz Villa
 Auxiliar de Investigación.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1912	REPORTE DE RESULTADOS GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES (GIEM) FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES INSTITUTO DE QUÍMICA CORPORACIÓN ACADÉMICA PARA EL ESTUDIO DE PATOLOGÍAS TROPICALES PROCESO GESTIÓN DE LOS SERVICIOS ASOCIADOS A LA INVESTIGACIÓN	 CÓDIGO: F-8840-06-S002 VERSIÓN: 02
	Página 3 de 4	

Parámetro	Expresado como	Técnica	Norma	Resultado	d.e	Unid.
Azufre	S	Gravimetría	AOAC 98002	1.54	-	g/L
Carbono orgánico oxidable total	No aplica	Titulométrica	NTC 5167	65.7	-	%
Conductividad eléctrica (1/200)	No aplica	Potenciometría	NTC 5167	0.11	-	dS/m
Sólidos Totales	ST	Gravimetría	SM 2540 B	142520	-	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	SST	Gravimetría	SM 2540 D	61000	-	mg/L
Sólidos Disueltos Totales	SDT	Gravimetría	SM 2540 D	81520	-	mg/L
DBO ₅	mgO ₂ /L	OXITOP	NIS	137000	-	mg/L
DQO Total	mgO ₂ /L	Reflujo Cerrado	SM 5220-D	171528	5413	mg/L
Boro	B	Espectrofotometría	NTC 1880	2.13	0.02	ppm
Fósforo total	P ₂ O ₅	Espectrofotometría	NTC 234	0.71	-	g/L
Nitrógeno orgánico total	N total	Kjeldahl	NTC 370	4.40	-	g/L
pH (10%)	No aplica	Potenciometría	NTC 5167	4.46	-	-
Relación C/N	No aplica	No aplica	No aplica	14.9	-	-
Densidad (20°C)	No aplica	Gravimetría	NTC 5167	1.0	-	g/ml

Línea de Transformación de la Materia Orgánica
GIEM


Jairo Alejandro Hurtado A.
Coordinador Extensión

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1912</p>	REPORTE DE RESULTADOS GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES (GIEM)	 <p>GIEM Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares</p>
	FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES INSTITUTO DE QUÍMICA	
	CORPORACIÓN ACADÉMICA PARA EL ESTUDIO DE PATOLOGÍAS TROPICALES PROCESO GESTIÓN DE LOS SERVICIOS ASOCIADOS A LA INVESTIGACIÓN	Página 4 de 4

Atentamente,



CARLOS ALBERTO PELAEZ JARAMILLO
Lider del grupo GIEM



JAIRO ALEJANDRO HURTADO A.
Coordinador de Servicios

El usuario dispone de 10 días hábiles a partir de la recepción del resultado para hacer reclamos o solicitar repetición del ensayo, el cual se hará sobre la submuestra guardada por el laboratorio. Si el nuevo resultado corresponde al anterior, considerando la desviación estándar presentada en original, el usuario asume nuevamente el costo del ensayo.

Anexo 5. Oferta comercial triturador



Medellin, 26 de nov de 2014

Señor

Susana ~~alvarez~~

Cordial saludo:

Durespo S.A. es una compañía Importadora y comercializadora de productos Agroforestales, Sistemas para Cercas Eléctricas, Inmunizantes para madera, Equipos generadores de Energía Eléctrica-Solar.

Representar las marcas de la mejor calidad nos ha permitido ubicar nuestra empresa como una de las más importantes del sector en Colombia.

Tenemos una cobertura total del país a través de una red de más de 240 puntos de ventas independientes que cuentan con repuestos y talleres para un buen servicio Posventa.

Con la presente encontrará una propuesta de venta que le ayudará a solucionar sus necesidades anteriormente planteadas.

Cuando usted compra nuestros equipos, podrá estar seguro de su excelente desempeño. Cuento además con el suministro de REPUESTOS ORIGINALES y el respaldo de nuestro servicio técnico.

MAQUINA		JTJK	500.TRITURADOR	MULTIUSO)MOTOR
PRECIO	CON IVA	\$ 1.250.000	SIN MOTOR	DESC. - 5%.
INCLUIDO				
VALIDEZ DE LA OFERTA	15 días		MOTOR JSIEMENS3HP3600	\$ 790.000

JTJK500 Triturador Multiuso
 Producción hasta 3.000 Kilos Hora dependiendo de la ~~húmeda~~ y la dureza del producto
 El material debe ser grueso y blando
 Motor recomendado eléctrico 2-3 HP 3600 RPM
 Incluye ~~Switch~~ de encendido, polea y correas
 \$ 1.250.000 Motor no incluido

Itagüí ; Autopista Sur N° 29 97 Tel.N° (4) 4446262 Fax.N° (4) 3755701
 Bogotá; Calle 118 #26-59 Tels: 6588800 -Email- contact@durespo.com.co

Anexo 6. Oferta comercial filtro de carbón activado



FILTRO DE CARBÓN ACTIVO

(Reducción H₂S, siloxanos y COVs)

AMBIENTALMENTE
COLOMBIA

CLIENTE:	AMBIENTALMENTE
PROYECTO:	COLOMBIA
PETICIONARIO:	SRITA. SUSANA ALVAREZ
FECHA PETICIÓN:	_____
Nº OFERTA:	DW-1410135
INGENIERIA:	Dim Water Solutions
FECHA:	06/11/2014
REALIZADO POR:	Carles Cruz Morató
APROBADO POR:	Francesc Andrés





1.- DESCRIPCIÓN DE LA OFERTA

Ate.: Srta. Susana Alvarez

De acuerdo a la solicitud de oferta realizada por la Srta. Susana Alvarez a nuestro grupo, nos es grato ofrecerle nuestra mejor oferta técnica de un filtro de carbón activo para biogás. Se dan dos opciones para la eliminación de H₂S y para sloxanos y COVs. Para garantizar una óptima operación se requerirá una temperatura de entrada entre 25 y 30°C, y humedad por debajo del 30% HR.



Carles Cruz Morató
Ingeniero de procesos
DimWater S.L.- Dimasa Grupo
Waste Water and Biogas Technologies



Francesc Andrés
Director Técnico
DimWater S.L.- Dimasa Grupo
Waste Water and Biogas Technologies



5.- PRESUPUESTO

FICHA CLIENTE	
CLIENTE	AMBIENTALMENTE
OBRA	FILTRO DE CARBÓN ACTIVO
PRESUP. Nº	DW-1410135
FECHA	06/11/2014

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	IMPORTE TOT.
	Opción indicada (3 meses operación)	
1	Filtro carbón activo PRFV de presión 2 x 3 m	
2000	Carbón activo para COVs y Siloxanos (KG)	
	SUBTOTAL	14.969,50 €
1	Filtro carbón activo PRFV de presión 1,5 x 3 m	
1200	Carbón activo para COVs y Siloxanos (KG)	
	SUBTOTAL	10.426,00 €
TOTAL PRESUPUESTO		25.395,50 €

PRECIOS EXWORKS EN FABRICAS DE VACARISSES (BARCELONA-ESPAÑA)
 SEGÚN ICOTERMS 2010.

Anexo 7. Oferta comercial compresor y micro turbina

QUOTATION

PROJECT	RESIDUOS IND. ORIENTE ANTIOQUEÑO	Quote Information
BUYER	AMENDAL-MENTE ATN. PABLO HERNÁNDEZ	Date: 18/11/2014 Quote Number: 2014-0149 Valid until: 18/12/2014

Item	Reference	Description	Nominal Capacity	Qty	Unit Price	Total Value
110	2008-8G4-BL00	CR200, DIGSTR GAS, GC, JNDPKG, IUL	200 KW	1	306,986,00	306,986,00
					USD	306,986,00

Main equipment characteristics						
Fuel	Digester Gas	Mode of Operation	Grid Connect	Certifications	UL	
Working pressure	75-80 psi	Type of enclosure	Industrial Package	Emissions	Standard	

Item	Reference	Description	Qty	Unit Price	Total Value	
210	SKB15-490-V6-C349W	BIOGAS COMPRESSOR UNIT	1	65,748	65,748,38	
					USD	65,748,38

Yes/No	Reference	Qty	Yes/No	Reference	Qty	
No	Emergency Stop Switch		No	Customer Witness Test		
No	CEMS Software User Edition		Yes	Engine Manufacturing report		
Yes	Mova Serial to Ethernet	1	Yes	User's Manual		
No	Multipac cable		No	Backflow dampers		
					USD	1,020,00
Subtotal (DDP)					USD	373,745,00
					IVA 16%	59,800,00
Valor Total (DDP)					USD	433,545,00

FPP (Factory Protection Plan)			
Options	Range of Operation (in hours per module)		
	0 to 4,000 hours/year	4,000 to 6,000 hours/year	More than 6,000 hours/year
A	5,492	6,897	9,154
B	9,251	11,656	15,418
C	30,118	32,795	36,863
D	34,049	37,642	33,416

Remarks: The values correspond to the total yearly value for all the Capstone equipment included in the present quotation. All value in US Dollars

For options A and C the buyer will have to train an operator in order to perform the maintenance to the equipment. If the buyer doesn't have qualified personnel to develop these labors, those would be realized by the distributor's personnel and charged according to the Capstone's Maintenance Flat Rate Schedule

Description of the FPP Contracts	
A	Parts only during 5 years or 39,999 hours (whichever occurs first)
B	Parts and labor during 5 years or 39,999 hours (whichever occurs first)
C	Parts only during 9 years or 79,999 hours (whichever occurs first). Includes the overhaul at 40,000 hours
D	Parts and labor during 9 years or 79,999 hours (whichever occurs first). Includes the overhaul at 40,000 hours

REMARKS:
The fuel must be kept dry and clean before entering the Microturbine