

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA
DEL USO DEL BIOGÁS OBTENIDO DEL EXCREMENTO
DE GANADO PARA SUPLIR NECESIDADES
ENERGÉTICAS EN EL SECTOR RURAL**

**WILSON ARMANDO BARRIENTOS VERJEL
ARNOLDO BLANCO PEÑARETE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2010**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA
DEL USO DEL BIOGÁS OBTENIDO DEL EXCREMENTO
DE GANADO PARA SUPLIR NECESIDADES
ENERGÉTICAS EN EL SECTOR RURAL**

**WILSON ARMANDO BARRIENTOS VERJEL
ARNOLDO BLANCO PEÑARETE**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista
MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN**

**Director
Dr. GILBERTO CARRILLO CAICEDO**

**Codirector
Ing. GERMÁN ALONSO OSMA PINTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2010**

AGRADECIMIENTOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

Profesor: Dr. GILBERTO CARRILLO CAICEDO

Estudiante de maestría: Ing. GERMAN ALONSO OSMA PINTO

Familias Ariza, Churco Méndez, Saldarriaga, Grajales Agudelo y Escobar, en el
corregimiento la India en el departamento de Santander (Colombia)

A nuestros padres y familiares

A todos los compañeros y amigos que nos apoyaron y acompañaron durante
toda la carrera

Y a todos aquellos que de alguna manera aportaron en la ejecución de proyecto

A todos... ¡ MUCHAS GRACIAS !

Dedicado a mi familia

Para mis padres Wilson Antonio Barrientos Ortiz y Ramona Exilda Verjel Ortiz, por su apoyo incondicional. Me han dado la vida y todo lo que soy como persona, mis valores y mis principios. Son el mejor ejemplo de perseverancia y empeño. Este logro también es de ustedes.

A mis hermanos Juan David, Angie Liceth y Leidy Johanna quien fue la compañía durante toda la carrera y con quien compartí los alti-bajos de todo este proceso.

A Dios, por la vida, las bendiciones recibidas, por acompañarme en todo momento, por permitirme culminar la carrera y por darme fortaleza en momentos de crisis y humildad en momentos de gloria.

A todos los familiares y amigos por sus oraciones y buenos deseos en mi crecimiento personal.

Wilson Armando Barrientos Verjel

Dedico este trabajo de grado a mi padre celestial, a quien doy gracias por iluminar mi camino y ayudarme en cada una de mis dificultades, al señor Jesucristo, mi hermano celestial.

También a mis padres Arnoldo Blanco Amado y Luz Mila Peñarete quienes con su apoyo incondicional, motivaron mis esfuerzos e hicieron mas agradable el desarrollo del trabajo.

Al igual que es para mi un orgullo dedicar este trabajo de grado a mi hija Mariangel Blanco Ramírez, mis hermanos Norberto Blanco Peñarete y Feidys Johanna Blanco Peñarete, a toda mi familia y a todas las personas que aportaron con sus conocimientos en la culminación del proyecto.

Arnoldo Blanco Peñarete

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. OBJETIVOS	25
1.1 OBJETIVO GENERAL	25
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	26
2.1 DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	26
2.1.1 Etapas de la digestión anaeróbica.	26
2.1.1.1 Hidrólisis y/o licuefacción.....	27
2.1.1.2 Fermentación acidogénica o acidogénesis.....	28
2.1.1.3 Acetogénesis.	29
2.1.1.4 Metanogénesis.	30
2.1.2 Variables que influyen en el proceso de digestión anaerobia.....	33
2.1.2.1 Temperatura de operación.	33
2.1.2.2 Valores de pH en la fase líquida.....	34
2.1.2.3 Relación Carbono:Nitrógeno (C:N).	35
2.1.2.4 Niveles de amoníaco	35
2.1.2.5 Potencial Redox	35
2.1.2.6 Contenido de sólidos	36
2.1.2.7 Inhibidores y/o tóxicos.....	36
2.2 BIOGÁS.....	37
2.2.1 Reacciones bioquímicas en la generación de biogás	41
2.2.2 Componentes presentes en el biogás y sus efectos	41
2.2.3 Aplicaciones del biogás.....	43
2.3 FERTILIZANTE	44

2.4 BIODIGESTORES.....	46
2.4.1 Características de operación del biodigestor.....	46
2.4.1.1 Temperatura	46
2.4.1.2 Método de carga	46
2.4.1.3 Proporción entre excretas y agua	47
2.4.1.4 Tiempo de retención.....	47
2.4.2 Tipos de biodigestores	49
2.4.2.1 Biodigestores de flujo discontinuo.....	49
2.4.2.2 Biodigestores de flujo continuo.....	49
2.4.2.3 Biodigestor de domo fijo (tipo Chino).....	49
2.4.2.4 Biodigestor de domo flotante (tipo Hindú).....	51
2.4.2.5 Biodigestor de balón de plástico o de estructura flexible	52
2.4.2.6 Biodigestor flotante	53
2.4.2.7 Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.....	53
2.4.2.8 Biodigestores de alta velocidad o flujo inducido	54
2.4.2.9 Instalaciones industriales.....	55
2.5 CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	57
2.5.1 Principio de funcionamiento de una celda de combustible.....	57
2.5.2 Tipos de celdas de combustible.....	60
2.5.2.1 Pilas de combustible de membrana polimérica (Proton Exchange Membrane Fuel Cell o PEMFC).....	62
2.5.2.2 Pilas de combustible alcalinas (Alkaline fuel Cell o AFC).	63
2.5.2.3 Pilas de combustible de ácido fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell o PAFC).	64
2.5.2.4 Pilas de combustible de carbonatos fundidos (Molten Carbonate Fuel Cell o MCFC).....	65
2.5.2.5 Pilas de combustible de óxidos sólidos (Solid Oxide Fuel Cell o SOFC). ...	67
2.5.3 Ventajas de las celdas de combustible.....	69
2.5.4 Desventajas de las celdas de combustible.	70

2.5.5 Biogás y celdas de combustible.	72
3. DISEÑO DE BIODIGESTORES	75
3.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PERTINENTE	77
3.2 CÁLCULOS DE DISEÑO	77
3.2.1 Estiércol (E) y orín (O) en kilogramos por día.	79
3.2.2 Materia prima para carga en kilogramos por día (MPC).....	80
3.2.3 Masa de agua para mezcla en kilogramos por día (MH ₂ O).	80
3.2.4 Carga de mezcla diaria en litros por día (C.....	81
3.2.5 Cálculo del tiempo de retención en días (TR).	81
3.2.6 Volumen del digestor en litros (Vd).	81
3.2.6.1 Volumen líquido.....	82
3.2.6.2 Volumen gaseoso	82
3.2.7 Cálculo del gas producido en litros por día (PG).	82
3.3 DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR	83
3.3.1 Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor.....	85
3.3.2 Tanque de mezcla.....	86
4. SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA.....	87
4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN Y ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO	88
4.1.1 Características demográficas de la población	88
4.1.2 Censo poblacional y ganadero.....	88
4.1.3 Demanda máxima de energía eléctrica	89
4.1.4 Requerimientos de combustible.....	92
4.1.4.1 Combustible para generación de energía eléctrica.	92
4.1.4.2 Combustible para energía térmica	95
4.2 PLANTA DE BIOGÁS	97
4.3 DISEÑO DEL BIODIGESTOR GENERAL.....	99

4.3.1 Producción de biogás.....	102
4.3.2 Volumen del biodigestor.....	103
4.3.3 Dimensionamiento del biodigestor	104
4.3.4 Tanque de mezcla.....	107
4.3.5 Reservorio de biogás.....	107
4.4 DISEÑO DEL BIODIGESTOR FAMILIAR PARA ENERGÍA TÉRMICA	108
4.5 CONDUCCION Y ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS	112
4.5.1 Tubería.....	112
4.5.2 Válvulas de gas	113
4.5.3 Válvula de seguridad	113
4.5.4 Trampas de ácido sulfhídrico	114
4.5.5 Trampas de agua	115
4.6 RESULTADOS DE DISEÑO.....	116
4.7 PLANOS.....	117
4.8 SELECCIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE	117
4.9 COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE CELDA DE COMBUSTIBLE CON MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	119
5. DISEÑO RED DE DISTRIBUCIÓN.....	122
5.1 MEMORIA DE CÁLCULO	122
5.1.1 Cálculo tipo.....	123
5.1.2 Acometidas.....	128
6. EVALUACIÓN FINANCIERA	129
6.1 FACTORES A TENER EN CUENTA.....	129
6.2 MATERIALES Y COSTOS DEL SISTEMA	130
6.2.1 Materiales y costos biodigestor general	131
6.2.2 Materiales y costos biodigestor familiar.....	132
6.2.3 Materiales y costos de la red de distribución de la energía eléctrica.....	132

6.2.4 Costos de operación	133
6.2.5 Total inversión inicial.....	134
6.3 INGRESOS.....	134
6.3.1 Ahorro en energía eléctrica.	134
6.3.2 Ahorro en energía térmica	135
6.3.3 Ahorro en tala de árboles.....	136
6.4 EVALUACIÓN FINANCIERA.....	136
6.4.1 Valor presente neto (VPN).....	137
6.4.2 Relación beneficio-costo (RBC).....	137
6.4.3 Precio del kWh generado.....	140
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	142
8. BIBLIOGRAFIA	147
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de las etapas del proceso de digestión anaeróbica	27
Figura 2. Formación de los monómeros en la hidrólisis	28
Figura 3. Degradación acidogénica (del Piruvato)	29
Figura 4. Degradación acetogénica	30
Figura 5. Formación de metano a partir de acetato, esto para el mecanismo generado por las coenzimas A y M.....	32
Figura 6. Rangos de operación para organismos mesofilicos o termofilicos.....	33
Figura 7. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía	40
Figura 8. Tiempo de retención en función de la temperatura	48
Figura 9. Biodigestor de domo fijo (tipo Chino)	50
Figura 10. Biodigestor de domo flotante (tipo Hindú)	51
Figura 11. Biodigestor de balón de plástico	53
Figura 12. Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.....	54
Figura 13. Estructura de una celda de combustible	58
Figura 14. Esquema de sistema de generación de energía basado en celda de combustible.....	59
Figura 15. Diagrama celda de combustible tipo PEM	63
Figura 16. Diagrama celda de combustible tipo AFC	64
Figura 17. Diagrama celda de combustible tipo PAFC.....	65
Figura 18. Diagrama celda de combustible tipo MCFC.....	66
Figura 19. Diagrama celda de combustible tipo SOFC	68
Figura 20. Instalaciones de pila de combustible clasificadas según el origen del biogás, el tipo de pila de combustible utilizado y el país de ubicación.....	72

Figura 21. Etapas de tratamiento del biogás para su utilización en pilas de combustible.....	74
Figura 22. Esquema de metodología de diseño del biodigestor	76
Figura 23. Cilindro de radio r y longitud L	83
Figura 24. Parámetros técnicos de la zanja	84
Figura 25. Forma semi-elíptica de la cúpula del biodigestor	84
Figura 26. Esquema tanque de mezcla.....	86
Figura 27. Diagrama generación de energía.....	87
Figura 28. Viviendas: a) familia Ariza, b) familia Churco Mendez, c) familia Saldarriaga, d) familia Grajales Agudelo, e) familia Escobar	90
Figura 29. Curva de demanda diaria en por unidad (sector rural en La India, Santander)	93
Figura 30. Curva de demanda diaria en m^3 de biogás (Entrada de la celda).....	94
Figura 31. Curva de demanda acumulada durante el día en m^3 de biogás	95
Figura 32. Curva de demanda diaria de energía térmica	97
Figura 33. Establo Familia Ariza	98
Figura 34. Materia prima para carga: estiércol.....	101
Figura 35. Ganado	102
Figura 36. Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.....	105
Figura 37. Reservorio de biogás	108
Figura 38. Zanja del biodigestor de polietileno.....	111
Figura 39. Esquema típico de una línea de conducción de gas.....	112
Figura 40. Válvulas para gas.....	113
Figura 41. Válvula de seguridad.....	114
Figura 42. Accesorios para la purificación de gas.....	115
Figura 43. Diagrama topológico	123

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Reacciones acetogénicas.....	30
Tabla 2. Inhibidores y concentración inhibidora de la digestión anaerobia.....	37
Tabla 3. Composición del biogás.....	38
Tabla 4. Características del metano	38
Tabla 5. Propiedades de una composición estándar de biogás	39
Tabla 6. Composición del biogás según el substrato utilizado	40
Tabla 7. Productor en la generación de biogás	41
Tabla 8. Componentes del biogás y sus efectos en las propiedades	42
Tabla 9. Utilización y consumo de biogás	44
Tabla 10. Tiempo de retención en días reportado por varias fuentes.....	48
Tabla 11. Resumen de las características de algunos tipos de biodigestores	56
Tabla 12. Características de los diferentes tipos de celdas de combustible.....	61
Tabla 13. Tolerancia de los distintos tipos de pilas de combustible a diferentes compuestos.....	73
Tabla 14. Características de tecnologías que operan con biogás	73
Tabla 15. Valores y características del estiércol de algunos animales.....	77
Tabla 16. Criterios de evaluación de tecnologías pertinentes	78
Tabla 17. Valores y características de algunos desechos vegetales.....	79
Tabla 18. Encuesta población a beneficiar	89
Tabla 19. Demanda de energía por hora.....	96
Tabla 20. Diferentes dimensiones de la zanja	105
Tabla 21. Posibles dimensiones de la zanja.....	106
Tabla 22. Dimensiones del reservorio	108
Tabla 23. Parámetros según el ancho del rollo	110
Tabla 24. Longitud del biodigestor según el ancho del rollo.....	110

Tabla 25. Resultados de diseño – biodigestores	116
Tabla 26. Resultados de diseño – Dimensiones tanque de alimentación.....	116
Tabla 27. Resultados de diseño – dimensiones biodigestores.....	117
Tabla 28. Especificaciones técnicas generador.....	120
Tabla 29. Comparación entre el generador y la celda de combustible	120
Tabla 30. Parámetros básicos de diseño	122
Tabla 31. Matriz de cálculo de la red de distribución – circuito 3.....	126
Tabla 32. Matriz de cálculo de la red de distribución – circuito 2.....	127
Tabla 33. Matriz de cálculo de la red de distribución – circuito 1.....	127
Tabla 34. Cuadro de cargas	128
Tabla 35. Acometidas.....	128
Tabla 36. Materiales y costos biodigestor general.....	131
Tabla 37. Materiales y costos biodigestor familiar	132
Tabla 38. Materiales y costos red de distribución.....	133
Tabla 39. Presupuesto de inversión año 0	134
Tabla 40. Facturación de energía eléctrica	135
Tabla 41. Facturación de energía térmica	135
Tabla 42. Flujo de fondos del proyecto.....	138

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PLANOS	151
ANEXO B. BIOMASA	155
ANEXO C. SISTEMA HÍBRIDO SOFC/MICRO TURBINA A GAS	172

RESUMEN

TITULO: Estudio de factibilidad técnica y financiera del uso del biogás obtenido del excremento de ganado para suplir necesidades energéticas del sector rural *

AUTORES: Wilson Armando Barrientos Verjel, Arnoldo Blanco Peñarete **

PALABRAS CLAVES: Biomasa, digestión anaeróbica, biogás, biodigestores, diseño de biodigestores, celda de Combustible.

Este proyecto presenta una propuesta de solución al problema de falta de suministro de energía eléctrica en el sector rural. Específicamente está planteado para suplir las necesidades energéticas de cinco familias campesinas ubicadas en cercanías al corregimiento La India en el departamento de Santander (Colombia) y cuya principal actividad económica es la ganadería. Para ello, se diseña un sistema de generación de energía eléctrica utilizando un biodigestor de tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno y una celda de combustible tipo SOFC.

Uno de los desechos contaminantes de la ganadería es el estiércol producido por el ganado. El estiércol es un tipo de biomasa con un alto valor energético que puede ser aprovechado mediante la construcción de biodigestores a pequeña y gran escala, para la obtención de biogás. El biogás representa una fuente de energía, cuyo componente principal es el metano, el cual se genera a través de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica a través de la actividad bacteriológica.

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica. Se propone el uso de una celda de combustible de óxido sólido (SOFC) debido a que éste tipo de celda tolera el biogás como combustible de entrada y no es necesario una etapa previa de reformado.

Además, en este trabajo de grado se propone construir para cada una de las cinco viviendas un biodigestor de estructura flexible para generar el biogás que satisfaga los requerimientos de energía térmica de cada una de las familias.

Finalmente, se desarrolla un análisis financiero del sistema de generación de energía eléctrica y térmica y se determina la viabilidad del proyecto.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director: Dr Gilberto Carrillo Caicedo. Codirector Ing. Germán Alonso Osma Pinto

ABSTRACT

TITLE: Technique and financial feasibility study of the use of biogas get from cattle dung to supply rural sector energetic needs *

AUTHORS: Wilson Armando Barrientos Verjel, Arnolando Blanco Peñarete **

KEY WORDS: Biomass, anaerobic digestion, biogas, biodigesters, biodigester design, fuel cell

This project is a proposed solution to the problem of lack of supply of electrical energy in the rural sector. Specifically, it is proposed to supply the energetic needs of five peasant families located near to township La India in the department of Santander (Colombia) and whose principal economic activity is the livestock. For this, it is designed a system generation using a traditional storage tank and polyethylene dome biodigester and a fuel cell type SOFC.

One contaminant waste of livestock is the dung produced by cattle. Dung is a form of biomass with high energetic value that can be take advantage through the construction of biodigesters to small and large scale, to obtain biogas. Biogas is an energy source, whose main component is methane, which is generated through the organic material anaerobic decomposition through the bacteriologic activity.

A fuel cell is an electrochemical device that transforms chemical energy to electric energy. It is proposed use a solid oxide fuel cell (SOFC) because it kind of cell permits biogas as fuel input and it does not necessary a previous stage of reform.

In addition, this degree work proposes construct for each of five housing a flexible structure biodigester for generate the biogas to supply the thermal energy requirements of each of the families.

Finally, it develops a financial analysis of the electric and thermal energy system generation and it determines the viability of the project.

* Degree work

** Physical-Mechanic Science Department. School electric, Electronic Engineerings and Telecommunications.
Director: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo. Codirectores: Ing. Germán Alonso Osma Pinto

INTRODUCCIÓN

En países en vía de desarrollo como Colombia, el uso de tecnologías alternativas para la generación de energía tiene entre sus objetivos posibilitar el acceso a fuentes confiables de energía a las áreas rurales, buscando tomar medidas en pro de la disminución de los niveles de pobreza. Además, las tecnologías alternativas buscan mantener un equilibrio entre lo ecológico, lo económico y lo social posibilitando cumplir con las metas de desarrollo sostenible y desarrollo humano propuestas por el país.

El índice de desarrollo humano de un país se mide en función del cubrimiento de las áreas que envuelven dicho desarrollo tales como salud, educación, vivienda, seguridad y suministros básicos como agua, luz, telecomunicaciones.

La generación de energía eléctrica en sitio es una de las soluciones al problema de falta de electrificación de áreas rurales del país. Una de las alternativas viables para la generación a pequeña escala es el aprovechamiento de la biomasa. Esto comúnmente se propone en áreas lejanas a los tendidos eléctricos, en los cuales los costos y los impedimentos técnicos dificultan la interconexión con el sistema nacional.

En Colombia, el sector rural ha sido históricamente un gran productor de riqueza para el país y en el manejo y extracción de sus recursos se ha fundamentado su base económica. Las actividades productivas más representativas del sector son la agricultura y las actividades pecuarias como la ganadería, la porcicultura y la avicultura, siendo la combinación de estas un factor común de las familias campesinas.

Sin embargo, estas actividades económicas del sector rural presentan una serie de desechos, los cuales, en la mayoría de los casos, no presentan un tratamiento adecuado y por lo general terminan contaminando el suelo y las fuentes hídricas cercanas, generando un problema adicional de tipo ecológico y ambiental para la población.

El desecho más abundante generado por los animales es la materia fecal. Estos residuos orgánicos han tenido amplio estudio para su utilización como biomasa que permite la obtención de energía, particularmente la generación de biogás.

El biogás es un producto de la digestión anaerobia la cual consiste en la descomposición de la materia orgánica en un ambiente húmedo y carente de oxígeno. Está compuesto principalmente por metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 y puede ser utilizado en aplicaciones térmicas o para la generación de energía eléctrica. La tecnología utilizada para la producción de biogás se conoce como biodigestores.

Por otra parte, la generación de energía eléctrica a través de la combustión de los combustibles fósiles trae consigo la emisión a la atmósfera de elevadas concentraciones de dióxido de carbono CO_2 , uno de los principales gases que contribuye al efecto invernadero. Desde 1997, a través del protocolo de Kyoto, la comunidad internacional, preocupados por los efectos del calentamiento global, se compromete a la reducción en las emisiones de estos gases. Es por ello que se justifica la necesidad de desarrollar e implementar nuevas tecnologías para la generación de energía eléctrica de forma limpia, eficiente y confiable.

Es aquí donde las celdas de combustibles juegan un papel relevante. Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica. A diferencia de las máquinas

de combustión, su eficiencia no está regida por el ciclo de Carnot, lo cual les otorga el beneficio de alcanzar altas eficiencias.

La utilización de biogás en celdas de combustible combina la utilización de una tecnología de generación prometedora de alta eficiencia y bajo impacto medioambiental con el uso de un combustible de buena calidad y atractivo económico.

La presente memoria pretende presentar el diseño un sistema de generación de energía eléctrica a través de biodigestores y celda de combustible utilizando como materia prima el estiércol de ganado para la producción de biogás. Dentro de este marco de acción, el diseño está encaminado a suplir las necesidades de energía eléctrica y térmica de cinco familias de una población rural adscrita al corregimiento de la India en Santander, Colombia.

Inicialmente, en el capítulo 2 se presenta una fundamentación teórica en donde se contextualiza el proceso de digestión anaerobia, las características del biogás, los biodigestores y las celdas de combustible. El capítulo 3 describe la metodología de diseño de biodigestores y en el capítulo 4 se presenta el diseño de dos biodigestores: uno destinado a suplir la demanda de energía eléctrica de las cinco familias y otro con la capacidad de suplir las necesidades de energía térmica de cada vivienda.

El proyecto también describe en el capítulo 5 el diseño de la red de distribución desde el punto de generación hasta cada una de las cinco viviendas y por último, en el capítulo 6 se desarrolla un análisis financiero para evaluar la factibilidad de implementar este tipo de proyectos en el sector rural.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una planta de generación de energía eléctrica y térmica a partir del biogás obtenido con excremento de ganado para suplir las necesidades energéticas de cinco (5) familias de una comunidad rural, adscrita al municipio de la India Santander.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diseño de la etapa de generación de energía eléctrica y energía térmica a partir de un biodigestor y celda de combustible.
- Diseñar una red en baja tensión para la distribución de la energía eléctrica desde la etapa de generación hasta cada una de las cinco (5) granjas seleccionadas.
- Realizar el análisis financiero de la planta de generación y de la red de distribución de energía eléctrica propuestas.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La degradación anaerobia (ausencia de oxígeno) es un proceso complejo en el que intervienen diferentes grupos microbianos, de manera coordinada y secuencial, para transformar la materia orgánica presente en la biomasa hasta los productos finales del proceso: biogás y un efluente líquido rico en nutrientes [1].

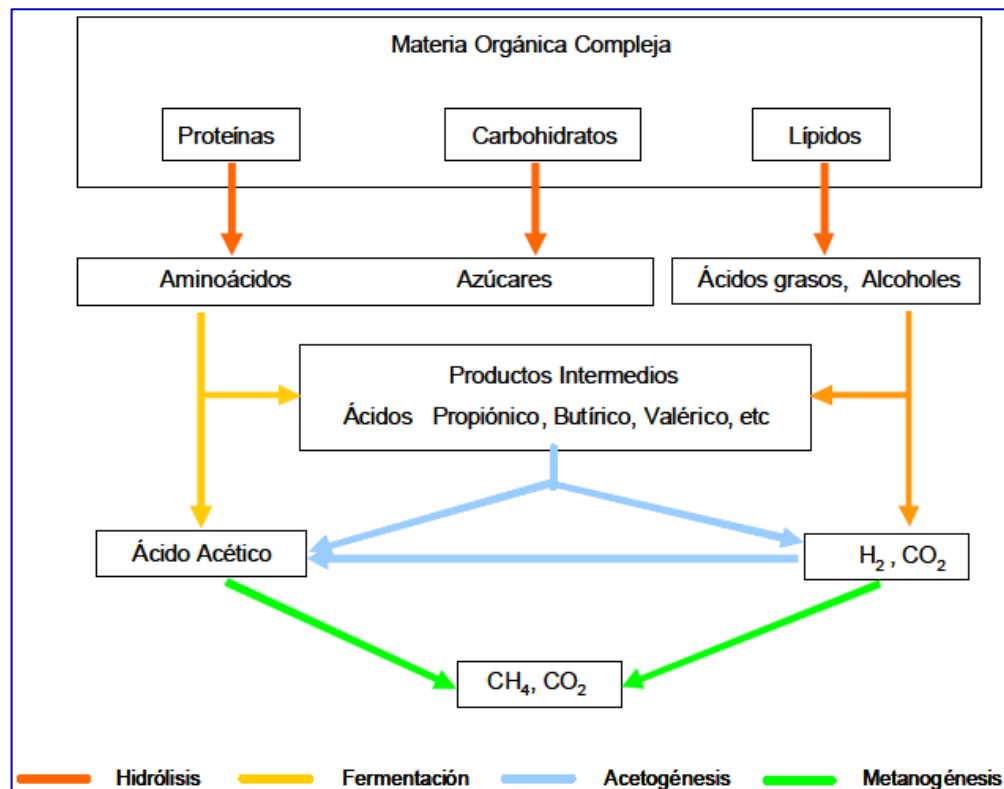
El tipo de biomasa que es tratada en un proceso de digestión anaerobia suele ser biomasa residual procedente de ganaderías y granjas, sobre todo estiércol de los animales. En general, es biomasa con un alto grado de humedad, y donde la materia orgánica se encuentra presente en azúcares, celulosa, hemicelulosa, proteínas y lignina. Hay que señalar, sin embargo, que no todas las sustancias orgánicas mencionadas presentan la misma predisposición a la descomposición bioquímica [2].

2.1.1 Etapas de la digestión anaeróbica. La digestión o fermentación anaerobia de compuestos orgánicos es un proceso complicado en el que se producen un gran número de reacciones químicas y donde se presentan una gran variedad de bacterias, no siendo fácil conocer la secuencia exacta en la que se suceden todos los pasos del proceso [2]. Sin embargo, sí se sabe que la fermentación anaerobia se desarrolla en las siguientes etapas (figura 1):

- Hidrólisis de los polímeros complejos [3].
- Acidogénesis por fermentación de los monómeros produciendo acetato, propionato, butirato, succinato, alcoholes, H_2 y CO_2 [3].
- Acetogénesis por fermentación secundaria generando acetato, H_2 , CO_2 [3].
- Metanogénesis a partir de H_2 , CO_2 , acetato [3].

Para el correcto funcionamiento del proceso de degradación anaerobia es necesario, por tanto, que las velocidades de transformación metabólica de los diferentes grupos microbianos estén equilibradas ya que los productos finales de una etapa son consumidos en la siguiente, dando lugar a una relación simbiótica¹ que estabiliza el proceso [1].

Figura 1. Esquema de las etapas del proceso de digestión anaeróbica



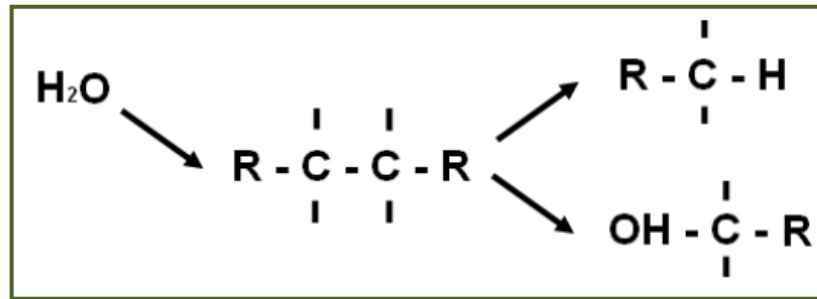
Fuente: Tomado de [8]

2.1.1.1 Hidrólisis y/o licuefacción. En esta etapa, las sustancias orgánicas de elevado peso molecular, lípidos, proteínas e hidratos de carbono, son fragmentados en monómeros (figura 2) por la acción de enzimas (hidrolasa), un grupo de bacterias hidrolíticas anaeróbicas. De esta forma, los carbohidratos se

¹ El término simbiosis hace referencia a la relación estrecha y persistente entre organismos de distintas especies.

convierten en azúcares simples; las grasas en ácidos grasos y glicerol; y las proteínas en polipéptidos y aminoácidos [8].

Figura 2. Formación de los monómeros en la hidrólisis



Fuente: tomado de [5]

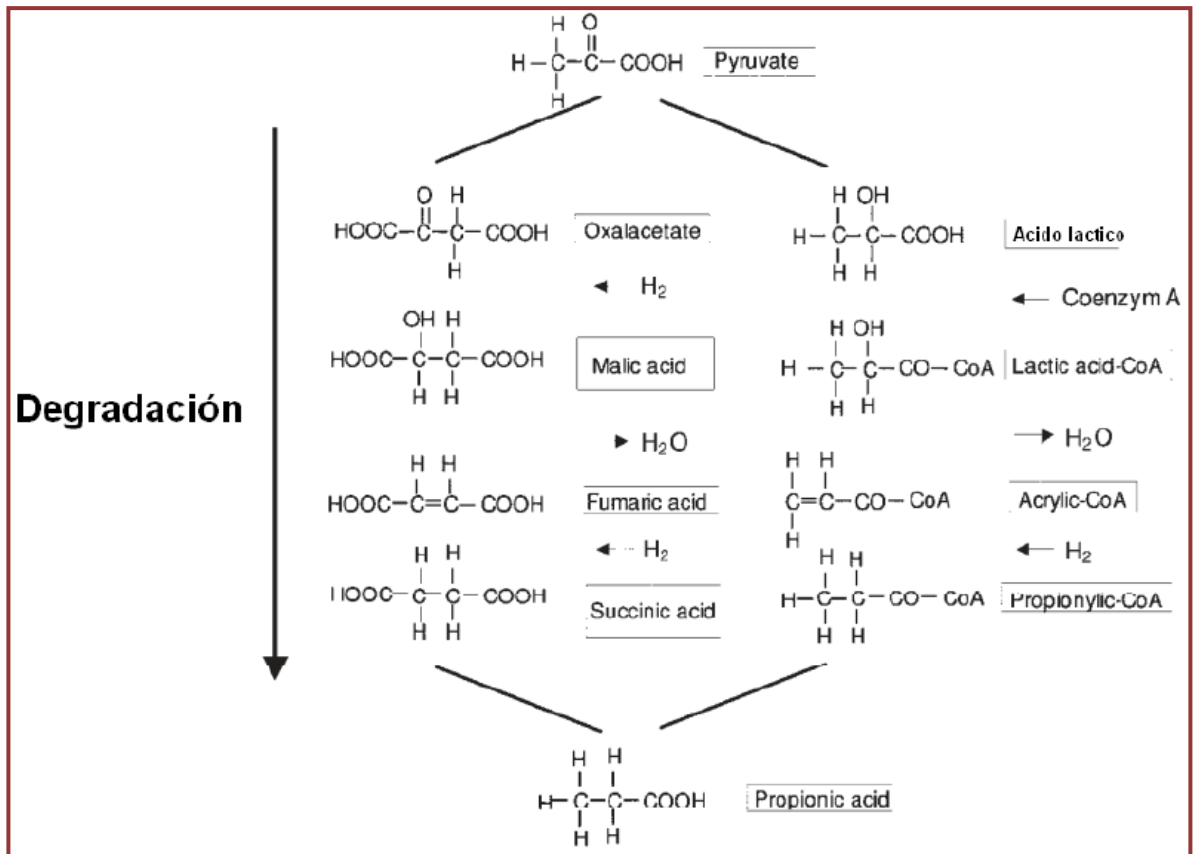
El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso dependen de muchos factores, entre otros del pH, de la temperatura, de la concentración de biomasa hidrolítica, del tipo de materia orgánica particulada y del tamaño de la partícula. [5].

2.1.1.2 Fermentación acidogénica o acidogénesis. Implica la fermentación de las pequeñas subunidades producidas en la hidrólisis a través de una serie de reacciones sucesivas, generándose gran variedad de compuestos orgánicos simples. Los productos finales de esta etapa son, principalmente, ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono e hidrógeno, así como pequeñas cantidades de ácido láctico y etanol. Estos procesos constituyen la base energética de las poblaciones no metanogénicas [1].

La concentración intermedia de iones de hidrógeno afecta los productos de la fermentación, un ejemplo de degradación acidogénica (del Piruvato²) se muestra en la figura 3.

² El piruvato es un producto que se sintetiza en el organismo durante el metabolismo de los carbohidratos y las proteínas

Figura 3. Degradación acidogénica (del Piruvato)



Fuente: tomado de [5]

2.1.1.3 Acetogénesis. En esta etapa, los componentes más reducidos de la fermentación acidogénica son oxidados, bajo condiciones anaerobias, a ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, que sirven de sustrato a las bacterias metanogénicas. Esta conversión es sólo posible si la presión parcial de hidrógeno se mantiene en valores bajos [1].

Las reacciones de esta etapa son endorgénicas (se necesita energía para la degradación de los productos de la acidogénesis). En la tabla 1 se muestran las reacciones típicas presentes en esta etapa.

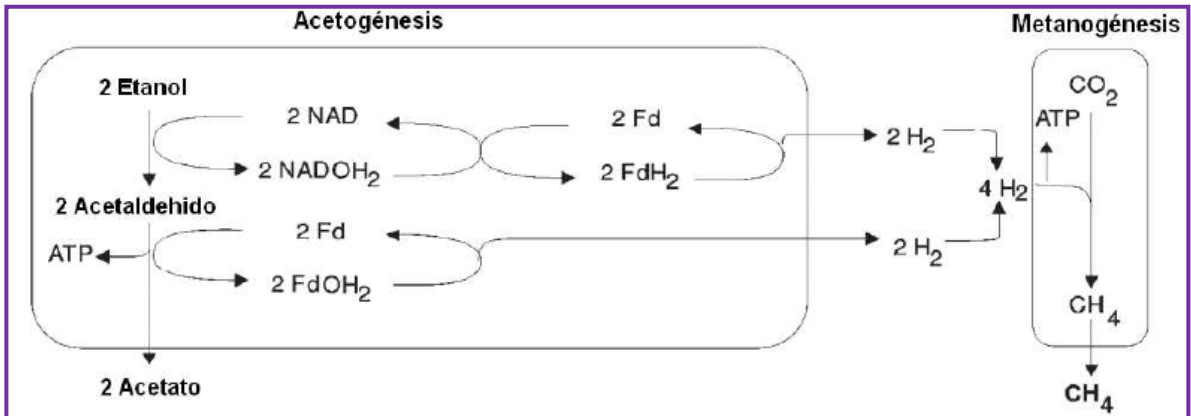
Tabla 1. Reacciones acetogénicas

Acido Propiónico	$CH_3(CH_2)COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
Acido Butírico	$CH_3(CH_2)_2COO^- + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$
Acido Valerico	$CH_3(CH_2)_3COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COO^- + CH_3CH_2COOH + H^+ + 2H_2$
Acido Isovalerico	$(CH_3)_2CHCH_2COO^- + HCO_3^- + H_2O \rightarrow 3CH_3COO^- + H_2 + H^+$
Acido Capronico	$CH_3(CH_2)_4COOH + 4H_2O \rightarrow 3CH_3COO^- + H^+ + 5H_2$
CO ₂ + H ₂	$2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + 2H_2O$
Glicerina	$C_3H_8O_3 + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$
Acido Láctico	$CH_3CHOHCOO^- + 2H_2O \rightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2$
Etanol	$CH_3(CH_2)OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2H_2$

Fuente: tomado de [4]

Un esquema que muestra la degradación acetogénica y la simbiosis con los organismos metanogénicos se muestra en la figura 4.

Figura 4. Degradación acetogénica



Fuente: Tomado de [5]

2.1.1.4 Metanogénesis. La cuarta etapa comprende la formación de metano en condiciones estrictamente anaeróbicas, esta degradación es estrictamente energética y no cualquier microorganismo metano génico puede degradar cualquier sustrato, así se pueden distinguir los siguientes grupos:

Tipo CO₂ = CO₂, HCOO⁻, CO

Tipo Metílico = CH, OH, CH₃NH₃, (CH₃)₂NH₂⁺, (CH₃)₃NH⁺, CH₃SH, (CH₃)₂S

Tipo acetato = CH₃COO⁻

Cuando la metanogénesis funciona, la etapa acetogénica también funciona sin problemas, en el caso contrario comienza una sobre-acidificación [5].

La metanogénesis es útil para la humanidad. Mediante ella, los residuos orgánicos se pueden convertir en el útil biogás metano. La metanogénesis se da en el intestino de muchos animales. Aunque se piensa que la metanogénesis no es esencial para la digestión humana, es necesaria en la nutrición de los animales rumiantes, como las vacas y las cabras. En el rumen³, organismos anaeróbicos digieren la celulosa en formas utilizables por el animal. Sin los microbios del rumen, las vacas no podrían sobrevivir sin ser alimentadas con una dieta especial.

Esta etapa final implica dos tipos de reacciones: aquellas en las que el dióxido de carbono e hidrógeno se combinan para producir metano y agua, y las que convierten el acetato en metano y dióxido de carbono. Los microorganismos responsables de la primera etapa suelen denominarse “utilizadores de hidrógeno”, mientras que los responsables de la segunda transformación se denominan “acetoclásticos” [1].

- **Producción de metano por reducción del CO₂.** La metanogénesis por reducción del CO₂ es una forma de respiración anaeróbica. Los metanógenos no utilizan el oxígeno para respirar; de hecho, el oxígeno inhibe el crecimiento de los metanógenos. El aceptor de electrones terminal en la metanogénesis no es el oxígeno, sino el carbono. El carbono puede aparecer en un pequeño número de compuestos orgánicos con poco peso molecular. Los dos caminos

³ El rumen es la primera de las cuatro cavidades de que consta el estómago de los rumiantes

mejor descritos implican la utilización de dióxido de carbono y acetato como aceptadores terminales de electrones:

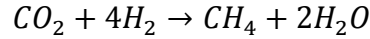
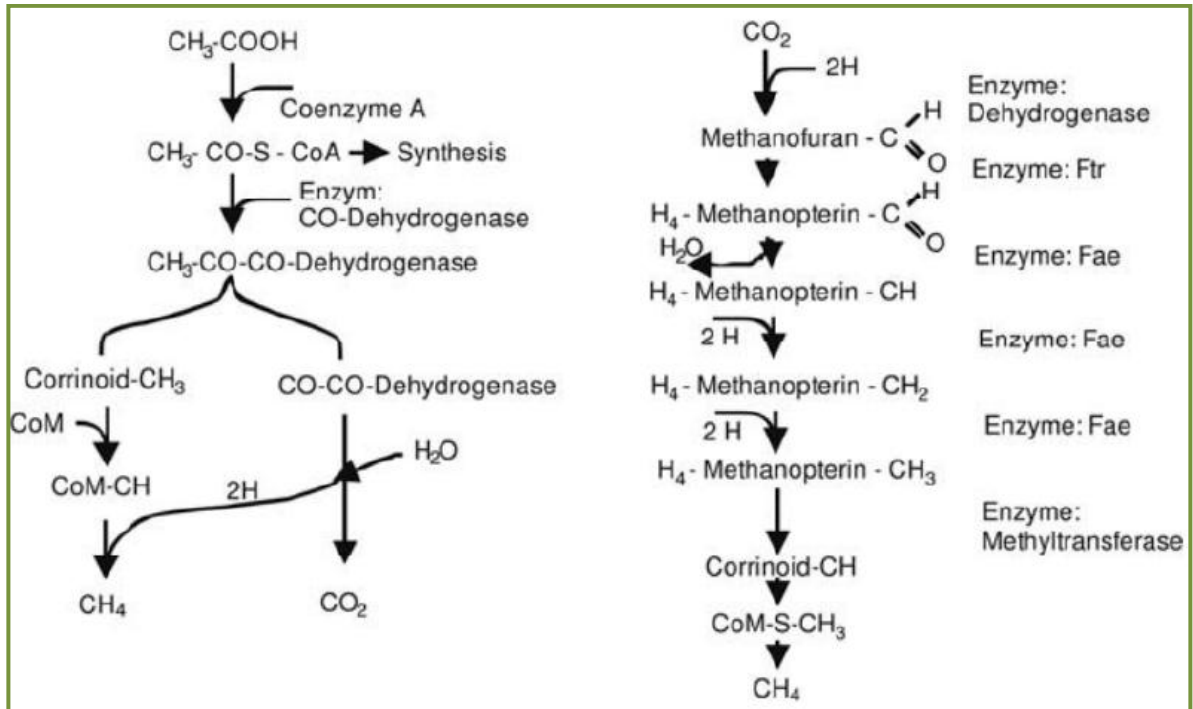
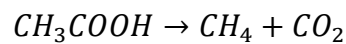


Figura 5. Formación de metano a partir de acetato, esto para el mecanismo generado por las coenzimas A y M



Fuente. Tomado de [5]

- **Producción de metano a partir de moléculas orgánicas.** Las bacterias metanógenas pueden producir también metano a partir de sustratos orgánicos sencillos como el ácido acético, el formiato, el metanol, la metilamina, el sulfuro de dimetilo y el metanotiol. Se ha demostrado que el metano se origina exclusivamente a partir del carbono metílico del ácido acético:



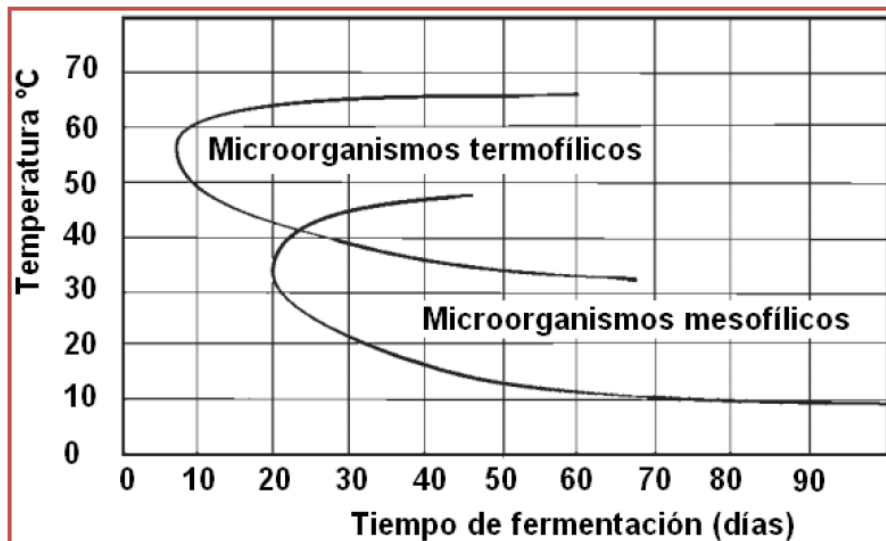
Por tanto, estas bacterias pueden producir metano a partir de formas parcialmente reducidas de carbono contenido en compuestos orgánicos; tales reacciones pueden considerarse como verdaderamente fermentaciones.

2.1.2 Variables que influyen en el proceso de digestión anaerobia. Como todo proceso biológico, la digestión anaerobia necesita la constancia de las condiciones necesarias de vida. Las variables más influyentes son la temperatura, la acidez (pH), el contenido de sólidos, el tipo de sustancia, la relación carbono nitrógeno y la presencia de inhibidores.

2.1.2.1 Temperatura de operación. La temperatura es uno de los principales factores que afectan el crecimiento de las bacterias responsables de la producción de biogás. La producción de biogás puede ocurrir en cualquier sitio que se encuentre en el rango de temperatura de 4°C a 68°C [6].

Existen tres rangos en los que pueden desarrollarse los microorganismos (Psicrofílico, mesofílico y termofílico) [1].

Figura 6. Rangos de operación para organismos mesofílicos o termofílicos



Fuente: [5]

- **Digestión Psicrófila.** Es la digestión anaerobia que se realiza a temperaturas entre 10°C y 20°C. A estas temperaturas la carga debe permanecer en el digester más de 100 días [6].

- **Digestión Mesófila.** Es la digestión anaerobia que se realiza a temperaturas entre 30°C y 35°C. La carga debe permanecer en el digester 15 a 30 días. Este tipo de procesos tiende a ser más confiable y tolerante que el proceso termofílico, pero la producción de gas es menor y se requieren digestores de gran tamaño [6].

- **Digestión Termofílica.** Es la digestión anaerobia que se realiza a temperaturas mayores de 55°C y el tiempo de residencia debe ser de 12 a 14 días. Estos sistemas ofrecen una producción de metano más alta, caudales más rápidos, mejor eliminación de patógenos y virus. Estos sistemas requieren tecnología más costosa, consumen más energía y requieren mayor asistencia y monitoreo [6].

2.1.2.2 Valores de pH en la fase líquida. El pH de la materia prima indica si el proceso de digestión se lleva a cabo en condiciones adecuadas. Las bacterias responsables del mecanismo de producción de biogás son altamente sensibles a cambios en el pH, estas permiten un rango de variación entre 6,7 y 7,5 unidades de pH teniendo como óptimo un pH de 7,0 a 7,2; fuera de este rango las bacterias no se desarrollan, la digestión comienza a inhibirse a un pH de 6,5 [3]. Las causas por las cuales se puede acidificar la fase líquida contenida dentro del biodigestor son [9]:

- Un cambio excesivo de la carga
- El permanecer por largo tiempo sin recibir carga
- La presencia de productos tóxicos en la carga
- Un cambio amplio y repentino de la temperatura interna

La concentración de CO₂ en la carga, la concentración de ácidos volátiles y la propia alcalinidad de la materia prima hacen variar el pH del biodigestor [6]. El pH influye sobre la cantidad de biogás producida y sobre la proporción de metano [5, 3, 2].

2.1.2.3 Relación Carbono:Nitrógeno (C:N). La literatura reporta que la relación carbono/nitrógeno está ligada directamente a la producción de biogás, entre mayor sea esta relación y se ajuste al intervalo recomendado (20 a 30 partes de carbono por una de nitrógeno) mayor será la producción de gas por unidad de materia útil. Esta es una de las razones por las cuales el estiércol animal constituye la materia prima de mayor difusión [6].

Si la relación C/N es alta, el nitrógeno será consumido rápidamente por las bacterias metanogénicas para formar proteínas y no reaccionará con el material restante, por tanto la producción de gas será alta. De otra parte, si dicha relación es muy baja, es decir, donde el nitrógeno sea abundante, el nitrógeno será liberado y acumulado en forma de amoníaco, el cual incrementará el pH de la carga en el digestor [6].

2.1.2.4 Niveles de amoníaco. Este parámetro cobra importancia cuando se utilizan determinados materiales que contienen un alto porcentaje de nitrógeno, como es el caso del estiércol de aves, el cual acidifica la carga del biodigestor e inhibe el proceso de gasificación [6]. Para un correcto funcionamiento, los niveles de amoníaco dentro de los digestores deben mantenerse por debajo de los 2000 mg/litro.

2.1.2.5 Potencial Redox. El potencial redox es una medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones [6].

En el biodigestor son necesarios potenciales redox bajos, por ejemplo para un monocultivo de bacteria metanogénica se necesita un potencial redox entre [-300, -330] mV como óptimo. Para controlar este parámetro se pueden agregar agentes oxidantes por ejemplo sulfatos, nitritos o nitratos [6].

2.1.2.6 Contenido de sólidos. El contenido de sólidos debe ser bajo, entre el 10% y el 12%, por lo que el grado de humedad será alto. Las bacterias necesitan un medio fluido para su desarrollo, pero con una concentración adecuada de nutrientes. Es necesario que, aproximadamente, el 10% del total de biomasa seca esté constituida por nitrógeno, y que un 2% sea fósforo. Además, deberá haber potasio y sales minerales, y no deberán encontrarse sustancias tóxicas como metales pesados o pesticidas, ya que impiden el buen desarrollo del proceso [2].

2.1.2.7 Inhibidores y/o tóxicos. Es importante saber que las sustancias tóxicas presentes en las materias primas deben ser mínimas, y que ciertos materiales no deben ser cargados al digestor ya que dañan el proceso, estos incluyen [6]:

- Materiales tóxicos que inhiben la digestión (ej. Amonio, residuos de pesticidas, metales pesados, aceites y grasas).
- Los residuos deben estar libres de sólidos y otros materiales como arena, rocas y piedras. La aglutinación de sólidos bloquea las tuberías del digestor y obstaculiza la operación.
- Otros materiales como residuos medicinales (Antibióticos) detergentes, ácidos o bases, sustancias con elementos halógenos, etc., pueden ser nocivos para la acción de las bacterias anaerobias.
- Ácidos volátiles en concentraciones superiores a 2000 ppm para la fermentación mesofílica y de 3600 para la termofílica inhibirá la digestión [8].

Tabla 2. Inhibidores y concentración inhibidora de la digestión anaerobia

INHIBIDORES	CONCENTRACIÓN INHIBIDORA
SO ₄	5000 ppm
Nitrato (Según contenido de N ₂)	0.05 mg/ml
Cromo	200 mg/ml
CN (Después de aclimatación de las bacterias)	25 mg/ml
Sodio	3500 - 5500 mg/ml
Calcio	2500 - 4500 mg/ml
NaCl	40000 ppm
Cobre	100 mg/ml
Níquel	200 - 500 mg/ml
Detergente sintético	20 - 40 mg/ml
Potasio	2500 - 4500 mg/ml
Mg	1000 - 1500 mg/ml

Fuente: Tomado de [10]

2.2 BIOGÁS

El biogás es el resultado de la descomposición de la materia orgánica reduciéndola fundamentalmente a Metano y Dióxido de Carbono a través de un complejo sistema microbiológico. El biogás está compuesto por un 50%-70% de metano CH₄ y un 30%-50% de dióxido de carbono CO₂, conteniendo pequeñas cantidades de nitrógeno N₂, sulfuro de hidrógeno H₂S, vapor de agua, amoníaco NH₃, hidrógeno H₂, pudiendo existir otros compuestos azufrados como mercaptanos, silanos, sulfuro de carbonilo y disulfuro de carbono [10]. En la tabla 3 se detallan los principales componentes del biogás y su respectivo porcentaje.

Las principales reacciones involucradas en la producción de metano son las siguientes [1]:

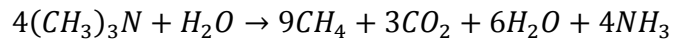
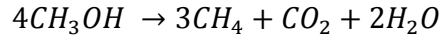
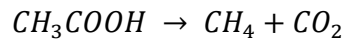
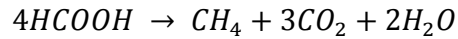
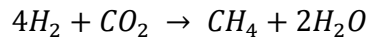


Tabla 3. Composición del biogás

COMPONENTE DEL BIOGÁS	PORCENTAJE
Metano	60 - 80
Gas Carbónico	30 - 40
Hidrógeno	5 - 10
Nitrógeno	1 - 2
Monóxido de Carbono	0 - 1,5
Oxígeno	0,1
Ácido Sulfhídrico	0 - 1
Vapor de agua	0,3

Fuente: Tomado de [6]

Tabla 4. Características del metano

CARACTERÍSTICAS DEL METANO	
Densidad	1,09 Kg/m ³
Solubilidad en agua	Baja
Presión crítica	673,1 Psia
Temperatura crítica	82,5 °C
Poder calorífico	4500 a 6500 Kcal/m ³

Fuente: Tomado de [6]

El biogás es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura de inflamación de 700 °C (diesel 350 °C, gasolina y propano cerca de los 500 °C) y su llama alcanza una temperatura de 870 °C [10, 11]

A partir de la composición química mencionada se encuentra un biogás cuyo Poder Calorífico Superior (PCS) en promedio es de 4.600 Kcal./m³. El contenido de energía de 1 m³ de biogás (60% CH₄ y 40% CO₂) es aproximadamente 6 kWh/m³ [10, 12]. En la tabla 5, se muestran propiedades de un tipo estándar de biogás.

Tabla 5. Propiedades de una composición estándar de biogás

Composición	55 - 70% Metano
	30 - 45% Dióxido de carbono
	Trazas de otros elementos
Energía contenida	6,0 - 6,5 kWh/m ³
Equivalente en combustible	0,6 - 0,65 L _{petróleo} /m ³ _{biogás}
Límite de explosión	6 - 12% biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750 °C (según metano contenido indicado)
Presión crítica	75 89 bares
Temperatura crítica	-82,5 °C
Densidad normal	1,2 Kg/m ³
Olor	Huevos en mal estado
Masa molar	16,043 Kg/kmol

Fuente: Tomado de [4]

La composición y las características del biogás dependen de la naturaleza de la materia prima digerida, así como de la tecnología utilizada. Los residuos que se emplean como material de partida para la obtención del biogás son los siguientes: residuos agrícolas y ganaderos, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), residuos industriales biodegradables generados en las industrias cervecera, azucarera, alcoholera, láctea, etc., y lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales [8]. En la Tabla 6 se resume la composición promedio del biogás según el tipo de sustrato.

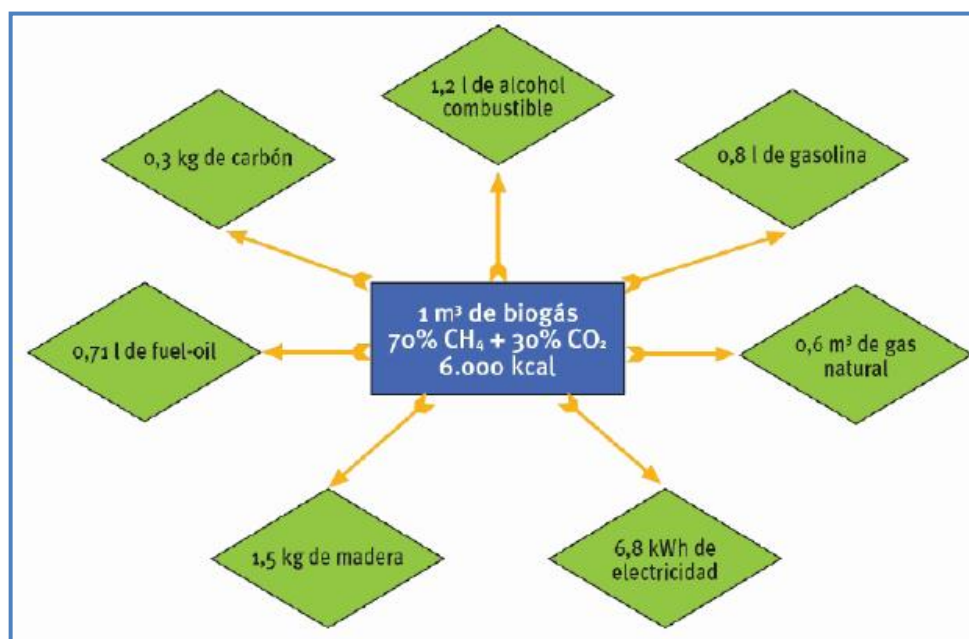
Tabla 6. Composición del biogás según el substrato utilizado

Gases	Desechos agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Propiedades
CH ₄	50 - 80 %	50 - 80 %	50 - 70 %	45 - 65 %	Combustible
CO ₂	30 - 50 %	20 - 50 %	30 - 50 %	34 - 55 %	Ácido, asfixiante
N ₂	0 - 1 %	0 - 3 %	0 - 1 %	0 - 20 %	Inerte
O ₂	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 5 %	Corrosivo
H ₂	0 - 2 %	0 - 5 %	0 - 2 %	0 - 1 %	Combustible
CO	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %	Trazas	Tóxico
H ₂ S	100 - 7000 ppm	0 - 1 %	0 - 8 %	0,5 - 100 ppm	Corrosivo, olor, tóxico
NH ₃	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	Corrosivo
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm	Corrosivos, olores

Fuente: Tomado de [8 y 3]

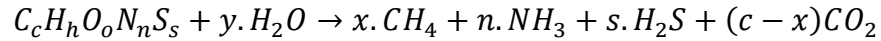
En la figura 7 se resumen las equivalencias energéticas del biogás respecto de otras fuentes de energía.

Figura 7. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía



Fuente: tomado de [33]

2.2.1 Reacciones bioquímicas en la generación de biogás. La producción de metano responde a la siguiente ecuación [1]:



Con:

$$x = \frac{1}{8}(4c + h - 20 - 3n - 2s)$$

$$y = \frac{1}{4}(4c - h - 20 + 3n + 3s)$$

Los productos generalmente obtenidos se observan en la tabla 7.

Tabla 7. Productor en la generación de biogás

Carbohidratos	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4$
Grasas	$C_{12}H_{24}O_6 + 3H_2O \rightarrow 4,5CO_2 + 7,5CH_4$
Proteínas	$C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6H_2O \rightarrow 6,5CO_2 + 6,5CH_4 + 3NH_3 + H_2S$

Fuente: Tomado de [5]

2.2.2 Componentes presentes en el biogás y sus efectos. Los componentes más comunes que se encuentran presentes en el biogás son: CO₂, H₂S, NH₃, Vapor de agua, Polvo, N₂, Siloxenos. En la tabla 8 se presentan los componentes y sus efectos en el comportamiento del biogás.

- **CO₂ en el biogás.** La presencia de CO₂ en el gas se puede ser controlada parcialmente debido a que es esencial en la formación de metano en el gas por lo que no se busca hacerlo desaparecer [5]. Los factores que afectan la composición de CO₂ son:

- Un alto contenido de líquido en el reactor influye en una alta concentración de CO₂ disuelto en el agua, lo que disminuye el nivel de CO₂ presente en la fase gaseosa [5].
- A mayor temperatura de fermentación, disminuye la cantidad de CO₂ disuelto en el agua [5].
- Una alta presión durante el proceso lleva a una mayor concentración de CO₂ presente en el agua, esto se puede aprovechar si se purga material con alto contenido en CO₂ disuelto en el agua [5].

Tabla 8. Componentes del biogás y sus efectos en las propiedades

CO₂	25 - 50 % Vol	Baja el poder calorífico
		Incrementa el número de metano
		Causa corrosión
		Daña celdas alcalinas de combustible
H₂S	0 - 0,5 % Vol	Corrosión en equipos y piling
		Emisiones de SO ₂ después de los quemadores
		Emisión de H ₂ S en combustión imperfecta
		Inhibición de la catálisis
NH₃	0 - 0,05 % Vol	Emisión de Nox
		Daño en las celdas de combustibles
Vapor de agua	1 - 5 % Vol	Corrosión en equipos y piling
		Daños de instrumentación por condensado
		Riesgo de congelar y bloquear tuberías y válvulas
Polvo	> 5 μm	Bloquea las boquillas y celdas de combustibles
N₂	0 - 5 % Vol	Baja el poder calorífico
Siloxenos	0 - 50 [mg/m ³]	Actúan como abrasivos, daño en motores

Fuente: Tomado de [5]

- **N₂ y O₂ presente en el biogás.** El nitrógeno y oxígeno presente en el biogás se encuentra normalmente en proporción 4:1 y usualmente se incorporan en

las etapas de ventilación que tienen como objetivo eliminar el ácido sulfhídrico presente en el reactor, estos gases pueden entrar también normalmente en pequeñas cantidades si el sistema de tuberías no está perfectamente hermético [5].

- **Amoniaco presente en el biogás.** Normalmente la concentración de amoniaco es baja ($<0,1 \text{ mg/m}^3$), cuando los substratos usados provienen de excrementos de aves o algunos casos particulares de basura la presencia de amoniaco se puede incrementar hasta no superar los $1,5 \text{ mg/m}^3$, por sobre este límite existe riesgo para los quemadores inclusive para la vida de los motores utilizados [5].
- **Ácido sulfhídrico H_2S .** El ácido sulfhídrico, H_2S , es un gas muy tóxico y altamente reactivo con los metales tales como hierro y cobre [3]. Un objetivo primordial es mantener el contenido de ácido sulfhídrico a los niveles más bajos posibles, porque aguas abajo la mayoría de los componentes sufren daños irreversibles debido al alto potencial de corrosión del H_2S [5].

2.2.3 Aplicaciones del biogás. Las aplicaciones energéticas del biogás pueden ser térmicas o eléctricas, en función de su grado de pureza. El biogás más impuro se emplea como combustible en equipos comerciales diseñados para gas natural o propano, como cocinas de gas, calentadores, lámparas, estufas, refrigeradores, etc., y éste ha sido el uso que tradicionalmente se le ha dado. No obstante, no cabe duda de que el uso más interesante que tiene el biogás en estos momentos es para la generación de electricidad y la cogeneración, producción conjunta de calor y electricidad. El biogás con un grado medio de pureza, se puede utilizar en motores de combustión interna (motores de ciclo Otto -gasolina- y motores diesel) y turbinas de gas.

Aplicación en el área rural. La aplicación del biogás en el área rural ha sido muy importante, en este caso la tecnología desarrollada ha buscado realizar digestores de fácil uso, mínimo costo y mantenimiento, aunque sus rendimientos son bajos, sus objetivos son dar energía, sanidad y fertilizantes orgánicos a los agricultores especialmente de zonas marginales y difícil acceso a las fuentes convencionales de energía [10].

En la tabla 9 se detalla la utilización y consumo de biogás para diferentes equipos.

Tabla 9. Utilización y consumo de biogás

EQUIPO	CONSUMO DE BIOGÁS EN m ³ /hora
Estufa de cocina de una hornalla	0,150 - 0,200
Fogón para cocinar alimentos o frutas	0,3
Lámpara de gas equivalente a una bombilla de 60 W	0,1
Calentadores para lechones o cría de levante	0,25
Calentadores para cría de pollos	0,15
Motor biogás - diesel por b.h.p	0,42
Producción de 1 kWh de corriente eléctrica con una mezcla biogás diesel	0,7

Fuente: Tomado de [6]

2.3 FERTILIZANTE

La carga de mezcla diaria de estiércol con agua que se introduce al biodigestor será digerida por las bacterias y se producirá biogás. Por otro lado quedará un líquido ya digerido, que ha producido todo el biogás que podía, y que se convierte en un excelente fertilizante [13].

El fertilizante producido tiene un contenido en nitrógeno de 2 a 3%, de fósforo de 1 a 2%, de potasio entorno al 1% y entorno a un 85% de materia orgánica con un PH de 7.5 [13].

Para producir un mejor fertilizante es interesante aumentar los tiempos de retención, de manera que el lodo se descomponga más, y sea de mayor calidad y más fácil de asimilar por las plantas [13].

Por ningún motivo el efluente puede ser descargado o vertido a cursos o cuerpos de agua naturales o a sistemas de alcantarillado, ya que no cumple los requisitos de calidad o remoción de materia orgánica que exige la Ley Colombiana [6].

Aprovechamiento del efluente:

- Existen amplias evidencias del incremento en la producción de distintas especies provocada por la aplicación de efluentes al suelo, no obstante esto dependerá de sistemas biológicos muy complejos como son: el material orgánico de carga, el digestor, el suelo y finalmente el cultivo [10].
- Debido a su acelerada descomposición el efluente brinda rápidamente nutrientes disponibles. Los ácidos húmicos presentes en este material contribuyen a mejorar la estructura del suelo y su porosidad aumentando al mismo tiempo la capacidad de intercambio [10].
- El elevado contenido de nitrógeno en forma de amonio (NH_4) presente en los efluentes ayuda a evitar la pérdida por lavado y lixiviación del nitrógeno del suelo al igual que las pérdidas por volatilización producidas por los procesos de desnitrificación biológica [10].
- El efluente de los digestores tiene otras aplicaciones entre las cuales merecen mencionarse: la alimentación de animales en raciones balanceadas, como sustrato para el crecimiento de algas y peces en estanque cerrados [10].

2.4 BIODIGESTORES

Un digester de desechos orgánicos o biodigester es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, etc.) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio [4].

2.4.1 Características de operación del biodigester. Entre los factores ambientales importantes para el correcto funcionamiento de los biodigestores figuran:

2.4.1.1 Temperatura. Casi todos los digestores funcionan dentro de los límites de temperaturas mesófilas y la digestión óptima se obtiene a unos 35°C, que puede ser alcanzado no solamente por efecto de la temperatura ambiental, sino también porque la temperatura interna se incrementa debido a la generación de calor ocurrida durante la fermentación de la materia orgánica (proceso exotérmico⁴). La velocidad de digestión a temperaturas superiores a 45°C es mayor que a temperaturas más bajas, sin embargo las bacterias son sumamente sensibles a los cambios ambientales especialmente una disminución repentina de sólo unos pocos grados [3, 7].

2.4.1.2 Método de carga. El no cargar un digester por una semana puede conducir a una pérdida en la producción de biogás. Más importante aún es que el cargar el digester en intervalos irregulares puede interrumpir el proceso biológico y causar que el sistema trabaje ineficientemente o hasta detenerlo completamente. Por lo tanto, muchos digestores son diseñados para ser cargados diariamente. Con cargas continuas y descargas de material del sistema, las bacterias trabajan

⁴ Se denomina reacción exotérmica a cualquier reacción química que desprende energía. Ej.: la combustión

eficientemente y se procesan grandes cantidades de residuos. La recolección diaria de residuos es también eficiente en términos de conservar los valores de nutrientes del residuo y preservar su potencial producción de gas [6].

2.4.1.3 Proporción entre excretas y agua. Todos los días se debe cargar el biodigestor con una carga de estiércol mezclada con agua hasta obtener una mezcla de carga diaria (estiércol más agua) con un porcentaje de sólidos totales por debajo del 10%. Por lo general, la literatura reporta una mezcla 1:3 donde una parte es de estiércol por tres partes de agua. Sin embargo también se reportan cargas con relación 1:10 (diez partes de agua por una de estiércol). La relación depende de la cantidad de materia orgánica seca y/o el porcentaje de sólidos totales.

2.4.1.4 Tiempo de retención. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor [13].

La figura 8 presenta el tiempo de retención en días en función de la temperatura ambiente. Es importante resaltar que no existe un criterio unificado para obtener el tiempo de retención, por tanto es necesario realizar un ejercicio de simulación de la variación del tiempo de retención, con los datos de temperatura reportados por varias fuentes [5].

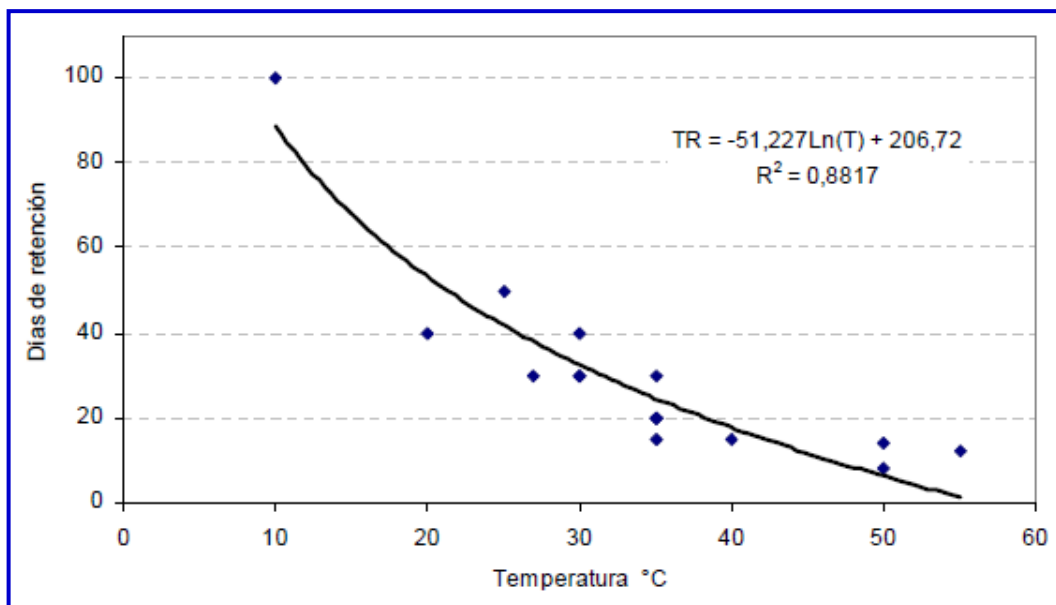
La distribución de estos datos (tabla 10) genera una curva cuya tendencia logarítmica permite obtener el valor aproximado de los días de retención necesarios para que el proceso sea completo en un biodigestor para una temperatura establecida. [6].

Tabla 10. Tiempo de retención en días reportado por varias fuentes

Temperatura °C	BRITISH BIOGEN	EPA	GTZ	IIT	CIPAV	CONICIT
5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10	ND	ND	100	ND	ND	ND
15	ND	ND	ND	ND	ND	ND
20	ND	ND	40	ND	ND	ND
25	ND	ND	ND	ND	50	ND
26	ND	ND	ND	30	ND	ND
30	30	ND	ND	ND	40	30
35	15	20	20	ND	30	20
40	ND	15	ND	ND	ND	ND
45	ND	ND	ND	ND	ND	ND
50	14	ND	8	ND	ND	ND
55	12	ND	ND	ND	ND	ND
60	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Fuente: Tomado de [6]

Figura 8. Tiempo de retención en función de la temperatura



Fuente: Tomado de [6]

2.4.2 Tipos de biodigestores. Basados en limitaciones externas como inversión, eficiencia del tratamiento, rendimiento de la energía neta y rendimiento de las operaciones, el rango de las tecnologías disponibles varía desde los sistemas muy rudimentarios hasta los más sofisticados tanto a escala doméstica como a escala comercial [6]. De acuerdo al método de carga utilizado se distinguen dos tipos genéricos de biodigestores: de flujo discontinuo y de flujo continuo.

2.4.2.1 Biodigestores de flujo discontinuo. Se cargan una vez y quedan cerrados por un tiempo fijo de retención hasta que haya terminado el proceso de fermentación y no hay producción de gas. La operación involucra principalmente cargar un biodigestor que permanecerá cerrado con sustrato, un inoculante⁵ y en algunos casos, una base para mantener el pH casi neutra. El digestor es sellado, y la fermentación se realiza entre 30 y 180 días, dependiendo de la temperatura ambiente. Durante este período, la producción de gas aumenta paulatinamente hasta un máximo y luego declina. [6].

2.4.2.2 Biodigestores de flujo continuo. Los biodigestores de flujo continuo son cargados y descargados en forma periódica, por lo general todos los días. Cualquier tipo de construcción es apropiada para una planta continua, pero el material de fermentación debe ser fluido y uniforme [6].

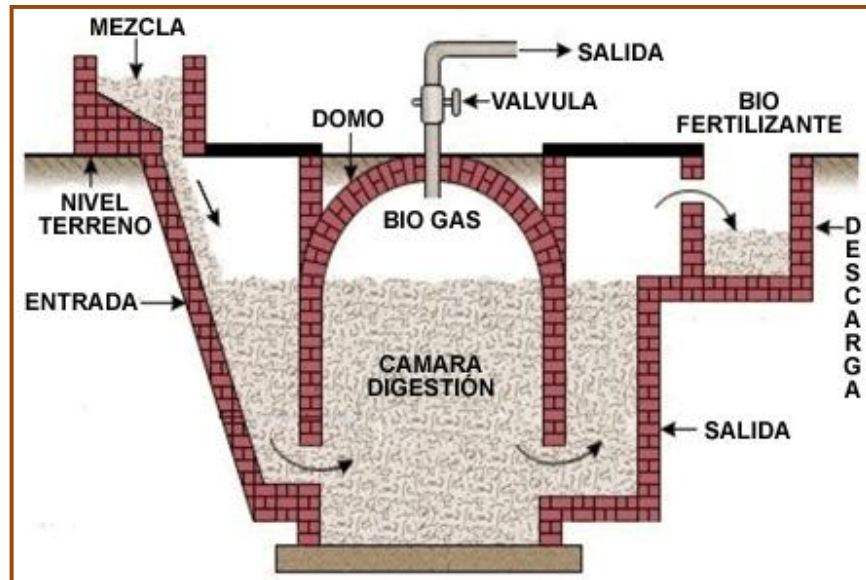
Existen muchos diseños y formas según su estructura, entre los cuales pueden citarse:

2.4.2.3 Biodigestor de domo fijo (tipo Chino). Este reactor consiste en una cámara de gas firme construida de ladrillos, piedra u hormigón. La cima y fondos son hemisféricos y son unidos por lados rectos. El digestor es alimentado por un tubo de carga que es recto y finaliza en la mitad de nivel dentro del digestor. Hay

⁵ Un inoculante biológico es un producto a base de microorganismos: hongos y/o bacterias, que aplicados a la siembra de la semilla, facilitan el crecimiento vegetal y aumentan o mantienen su rendimiento.

un tapón manual en la parte superior del digestor para facilitar su limpieza, y el conducto de salida del gas sale de la cubierta. El gas producido durante el proceso es almacenado bajo el domo y desplaza algunos de los contenidos del digestor a la cámara del efluente [14].

Figura 9. Biodigestor de domo fijo (tipo Chino)



Fuente: Tomado de [15]

Ventajas:

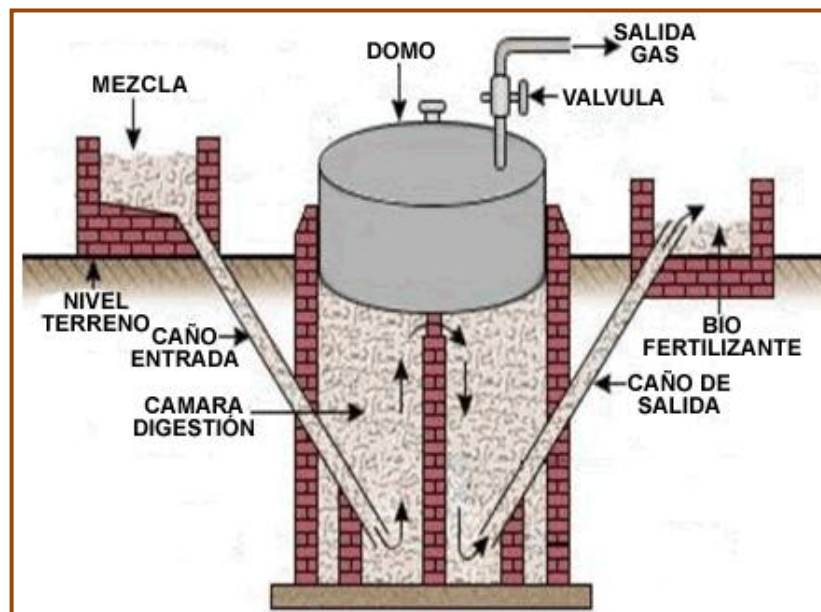
- Bajo costo de inversión y larga vida útil
- No incluye partes móviles y partes oxidables
- El diseño básico es compacto, no requiere de mucho espacio y se encuentra aislado.

Desventajas:

- Cúpula de gas requiere de impermeabilizante especial y conocimiento técnico para la construcción impermeable del reactor.
- Fugas de gas ocurren frecuentemente
- Presión variable del biogás complica su utilización.

2.4.2.4 Biodigestor de domo flotante (tipo Hindú). Este digestor es en forma de bóveda esférica (o cilíndrica) y tiene un depósito de gas móvil en forma de campana flotante. El gas se acumula en la campana, haciéndola subir y luego vuelve a bajar cuando se extrae el gas a través de un tubo instalado en la campana misma. La campana además de subir y bajar, es libre de girar, así puede mover la capa que eventualmente pueda flotar en la superficie de la carga de fermentación. Para su construcción se usa comúnmente ladrillos, cemento, arena y grava; para la campana flotante, lámina de acero [6] o polietileno de alta densidad (aumenta costo). El material de la cúpula debe ser resistente contra rayos UV y contra corrosión [16].

Figura 10. Biodigestor de domo flotante (tipo Hindú)



Fuente: Tomado de [15]

Ventajas:

- Este tipo de planta es fácilmente entendible y operable.
- Generan biogás a presión constante y la cantidad es rápidamente visible por la posición de la cúpula de gas.

- Son impermeables a fugas de gas siempre que se realicen las mantenciones adecuadas al dispositivo de almacenamiento de gas.

Desventajas:

- La cúpula de acero es relativamente costosa y requiere de mantención intensiva.
- Se debe remover óxido de la cúpula, además de ser pintada regularmente.
- La vida útil de la cúpula de acero es relativamente corta (sobre 15 años, pero en regiones costeras tropicales alrededor de cinco años).

2.4.2.5 Biodigestor de balón de plástico o de estructura flexible. Está compuesto de una bolsa de plástico, caucho, polietileno o geomembrana de PVC, completamente sellada. La parte inferior de la bolsa (75% de volumen) se rellena con la carga, mientras en la parte superior de la bolsa (25%) se almacena el gas. Los tubos de entrada y de salida están sujetos directamente a la pared de la bolsa. El material plástico o de caucho para la planta, tiene que ser elegido con cuidado: resistente a la intemperie y a los rayos ultravioleta [6].

Ventajas:

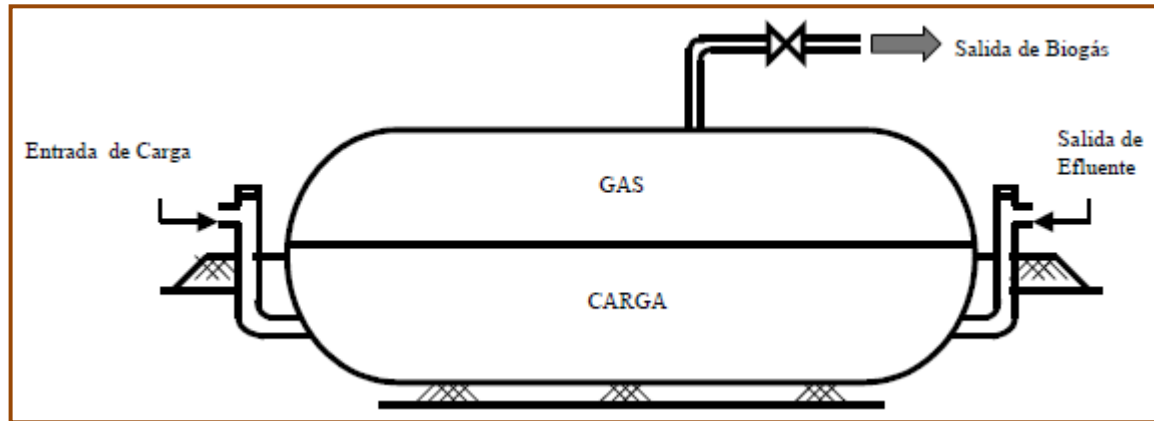
- Prefabricación estandarizada se obtiene a bajo costo.
- Uso sobre el nivel de tierra es factible en lugares con alto nivel de las aguas subterráneas.
- Se obtienen altas temperaturas de digestión en áreas cálidas.
- Fácil de limpiar, mantener y su vaciado.

Desventajas:

- Baja presión de gas por lo que se requieren bombas de gas.
- No se puede eliminar la escoria sólida en la superficie del sustrato a digerir durante la operación.

- Vida útil corta, es susceptible a daños físicos.

Figura 11. Biodigestor de balón de plástico



Fuente: Tomado de [5]

2.4.2.6 Biodigestor flotante. Un rasgo innovador de usar polietileno tubular es que los biodigestores pueden localizarse para flotar en cualquier superficie de agua, con la mitad sumergida, su boca se localiza sobre el nivel de agua más alto, mientras la toma de corriente debe ajustarse a un objeto flotante, como un coco seco o un recipiente de plástico [14].

2.4.2.7 Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno. Otro tipo de planta de producción de biogás que ha logrado disminuir los costos hasta 30 % con respecto a los prototipos tradicionales, es la que se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil y la cúpula fija, y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales. Este tipo de instalación posee a su favor que resulta más económica que los sistemas tradicionales [14].

Ventajas:

- Bajo costo de instalación
- Fácil de reparar

Desventajas:

- Vida útil corta.
- Requiere de suelo impermeable sobre el nivel de aguas subterráneas.

Figura 12. Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno



Fuente: Tomado de [14]

2.4.2.8 Biodigestores de alta velocidad o flujo inducido. Se les conoce de ordinario como CSTD (Conventional Stirred Digester). Se diferencian de los digestores convencionales en que se les ha agregado algún tipo de agitación mecánica, continua o intermitente, que permite al material aún no digerido, entrar en contacto con las bacterias activas y así obtener buena digestión de la materia orgánica, con tiempos de retención hidráulica relativamente cortos, de hasta 15 días [14].

Ventajas:

- Menor tiempo de operación.
- Evita formación de costras dentro del digestor

- Logra la dispersión de materiales inhibitorios.
- Según el sistema de agitación, se puede lograr la disminución de tamaño, logrando una mayor superficie de contacto y aumentando la velocidad de digestión.

Desventajas:

- Agitadores mecánicos requieren de mantención y tienen una vida útil de 15 años.

2.4.2.9 Instalaciones industriales. Las instalaciones industriales de producción de biogás emplean tanques de metal que sirven para almacenar la materia orgánica y el biogás por separado.

Este tipo de planta, debido al gran volumen de materia orgánica que necesita para garantizar la producción de biogás y la cantidad de biofertilizante que se obtiene, se diseña con grandes estanques de recolección y almacenamiento construidos de ladrillo u hormigón [14].

Con el objetivo de lograr su mejor funcionamiento se usan sistemas de bombeo para mover el material orgánico de los estanques de recolección hacia los biodigestores, y el biofertilizante de los digestores hacia los tanques de almacenamiento. También se utilizan sistemas de compresión en los tanques de almacenamiento de biogás con vistas a lograr que éste llegue hasta el último consumidor [14].

La tabla 11 resume las características principales de los tres tipos de biodigestores más comunes.

Tabla 11. Resumen de las características de algunos tipos de biodigestores

Características	De estructura sólida fija	De estructura sólida móvil	De balón de plástico
Cámara de digestión	Esférica / bajo tierra	Esférica/semiesférica	Semiesférica
Nivel de tecnología	Madura	Madura	Madura
Presión del gas	No constante	Constante	Muy baja presión de gas, es necesario aumentar la presión con sobrepeso
Localización óptima	Todos los climas	Todos los climas	Todos los climas
Vida útil	20 años	20 años	5 años
Ventajas	Bajos costos de construcción No posee partes móviles No posee partes metálicas que puedan oxidarse No tiene partes expuestas, por eso está protegido contra bajas temperaturas	Manejo fácil El gas almacenado es visible a través del nivel de la campana	Bajos costos de construcción Fácil transporte e instalación Construcción horizontal y plana que favorece en los lugares con alto nivel freático
Desventajas	La presión puede ser muy alta, por eso la cúpula tiene que ser cuidadosamente sellada; porosidades y grietas pueden afectar la planta	Alto costo de construcción de la campana En la mayoría de los casos, la campana es metálica y por eso sujeta a corrosión Más costos de mantenimiento causado por trabajo de pintura	El material plástico está sujeto a daños y tiene que ser protegido

Fuente: Tomado de [6]

2.5 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico cuyo concepto es similar al de una batería. Consiste en la producción de electricidad mediante el uso de químicos, que usualmente son hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno puede ser obtenido directamente del aire. También pueden ser usados otros tipos de combustible que contengan hidrógeno en su molécula, tales como el gas metano, metanol, etanol, gasolina o diesel entre otros, que tan sólo precisarían de un tratamiento adecuado (reformado, purificación) para adaptarlos a los diferentes tipos de celdas de combustible [17, 18].

2.5.1 Principio de funcionamiento de una celda de combustible. El principio de funcionamiento en el que se basan las pilas de combustible es el inverso al de la reacción electrolítica; oxígeno e hidrógeno se combinan para formar agua con producción de energía eléctrica y calor. Se trata, por lo tanto, de una reacción limpia, en la que el único producto es el vapor de agua que puede ser liberado a la atmósfera sin ningún peligro para el medio ambiente [18].

La manera en que operan es mediante una celda electroquímica consistente en dos electrodos, un ánodo y un cátodo, separados por un electrólito. El oxígeno proveniente del aire pasa sobre un electrodo y el hidrógeno gas pasa sobre el otro. Cuando el hidrógeno es ionizado en el ánodo se oxida y pierde un electrón; al ocurrir esto, el hidrógeno oxidado (ahora en forma de protón) y el electrón toman diferentes caminos migrando hacia el segundo electrodo llamado cátodo. El hidrógeno lo hará a través del electrólito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor externo (carga). Al final de su camino ambos se vuelven a reunir en el cátodo donde ocurre la reacción de reducción o ganancia de electrones del oxígeno gas para formar agua junto con el hidrógeno oxidado. Así,

este proceso produce agua 100% pura, corriente eléctrica y calor útil, por ejemplo, energía térmica [19].

El proceso químico que se lleva a cabo es el siguiente [25, 17]:

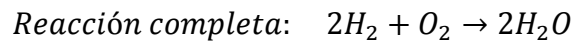
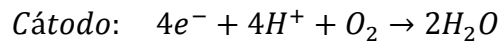
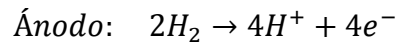
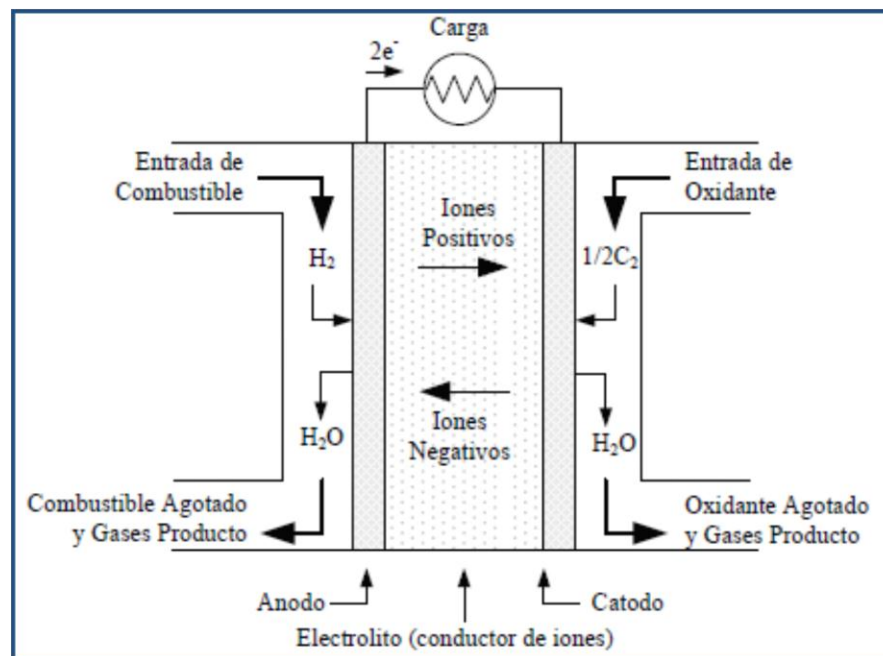


Figura 13. Estructura de una celda de combustible



Fuente: Tomado de [20]

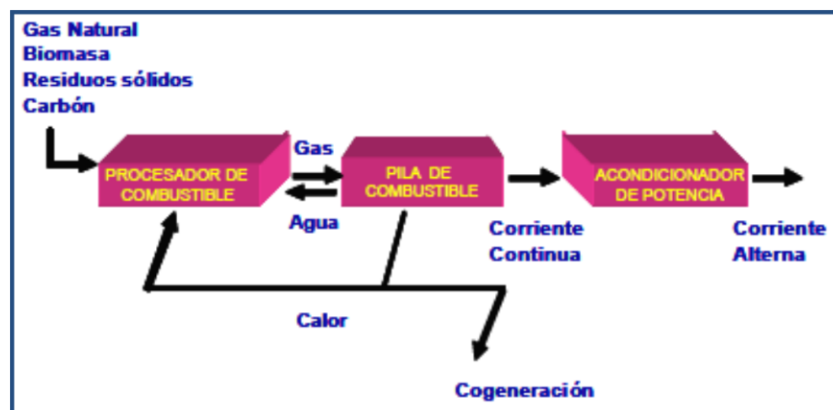
A diferencia de las máquinas de combustión cuya eficiencia está regida por el ciclo de Carnot⁶ y limitada por la temperatura, la eficiencia teórica de las celdas de combustible está dada por las leyes de Faraday, que relacionan directamente la corriente producida en una reacción electroquímica con la cantidad de material

⁶ El ciclo de Carnot es un ciclo termodinámico ideal reversible entre dos fuentes de temperatura. Consta de cuatro tramos: dos a temperatura constante (dos procesos isotérmicos), y otros dos sin absorción ni cesión de calor (dos procesos adiabáticos)

reactivo, es decir, con la cantidad de combustible. La mayor ventaja de las celdas de combustible descansa realmente en el hecho de que no están limitadas por la temperatura, lo cual les otorga el gran beneficio de alcanzar altas eficiencias. Así, en teoría, cada molécula de hidrógeno gas producirá dos electrones libres y junto con un átomo de oxígeno reducido se generará una molécula de agua. Tal reacción electroquímica es exotérmica, por lo que además el calor desprendido puede ser utilizado y así aumentar la eficiencia de las celdas de combustible [19].

Por último, señalar que las celdas de combustible son elementos eficientes en instalaciones de generación distribuida y combinada de calor y electricidad (cogeneración⁷). El sistema completo de generación de energía a partir de celda de combustible está constituido por un procesador de combustible, la celda de combustible (unidad de potencia) y un inversor/acondicionador de potencia, tal y como se muestra en la Figura 14 [8].

Figura 14. Esquema de sistema de generación de energía basado en celda de combustible



Fuente: Tomado de [8]

⁷ La cogeneración es el procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil. Si además se produce frío se llama trigeneración.

2.5.2 Tipos de celdas de combustible. Las celdas de combustible pueden ser agrupadas en diferentes categorías en función de algunos criterios. La clasificación más común es según el tipo de electrolito:

- Celdas de combustible Alcalinas (AFC)
- Celdas de combustible Metanol directo (DMFC)
- Celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC)
- Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)
- Celdas de combustible de óxido sólido (SOFC)
- Celdas de combustible de membrana de intercambio de protón (PEMFC)

Junto a esta clasificación cabe, además, distinguir las pilas de combustible de metanol directo (DMFC) y las pilas de combustible de carbón directo (DCFC).

Considerando la temperatura de operación las celdas de combustible quedan agrupadas en: las de alta temperatura, las cuales operan a temperaturas mayores a 200 °C (MCFC, ITSOFC y TSOFC) y las de baja temperatura, cuya operación puede llegar sólo hasta los 200 °C (PEMFC, AFC, PAFC) [19].

Otra importante distinción es el método usado para producir el hidrógeno para la reacción de la celda: reforma interna (MCFC, ITSOFC y TSOFC) y reforma externa (PEMFC, AFC, PAFC). Las celdas son sensibles a ciertos contaminantes del combustible que deben ser minimizados en el gas de combustible.

La tabla 12 resume las principales características de los diferentes tipos de celda de combustible.

Tabla 12. Características de los diferentes tipos de celdas de combustible

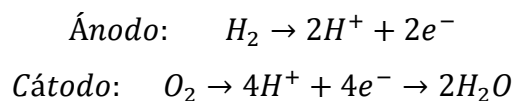
Tipo de celda	Electrolito	Conductor iónico	Temperatura de operación	Combustible	Reformado externo para CH4	Eficiencia (cogeneración)	Rango de potencia	Aplicaciones
PEMFC	Membrana de intercambio protónico. Polímero sólido	H ⁺	60 - 100 °C	H ₂ puro (tolera CO ₂ , 10 ppm CO)	Si	35 - 45 % (> 70 %)	5 - 250 kW	- Transporte - Portátil - Estacionaria de baja potencia
DMFC	Polímero sólido	H ⁺	60 - 120 °C	Metanol		30 - 40 %	5 kW	Portátil
AFC	Hidróxido de Potasio movilizado o inmovilizado. KOH	OH ⁻	50 - 100 °C	H ₂ puro	Si	40 - 60 %	5 - 150 kW	- Espacio - Militar
PAFC	Ácido fosfórico líquido	H ⁺	200 - 220 °C	H ₂ puro (tolera CO ₂ , 1% CO)	Si	40 - 45 % (80 %)	50 - 11 MW	Estacionaria de media potencia
MCFC	Carbonato fundido. Li ₂ CO ₃ / K ₂ CO ₃	CO ₃ ²⁻	600 - 700 °C	H ₂ , CO, CH ₄ , otros HCs (consume CO ₂ en el cátodo)	No	45 - 60 % (70 %)	100 kW - 2 MW	Estacionaria de alta potencia
SOFC	Óxido sólido (cerámico). ZrO ₂ / Y ₂ O ₃ (YSZ)	O ²⁻	800 - 1000 °C	H ₂ , CO, CH ₄ , otros HCs (tolera CO ₂)	No	50 - 65 % (> 80 %)	100 - 250 kW	- Estacionaria de media potencia - Transporte (APU)

Fuente: Adaptado de referencias [8, 18, 19 y 20]

2.5.2.1 Pilas de combustible de membrana polimérica (Proton Exchange Membrane Fuel Cell o PEMFC). Esta pila de combustible ofrece densidades de corriente mucho mayores que las de cualquier otro tipo de pilas de combustible, con la excepción de algunas pilas alcalinas desarrolladas para aplicaciones espaciales. Las pilas PEM pueden ser alimentadas por combustibles reformados y con aire. La utilización de un polímero sólido como electrolito elimina la corrosión y los problemas de seguridad asociados a los electrolitos líquidos [18].

Operan a temperaturas relativamente bajas lo que permite arranques instantáneos, tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial alta. El único líquido que maneja la celda PEM es agua, por lo que los efectos por corrosión son mínimos [19].

Las reacciones químicas que se llevan a cabo en el ánodo y cátodo de la celda son las siguientes [18]:

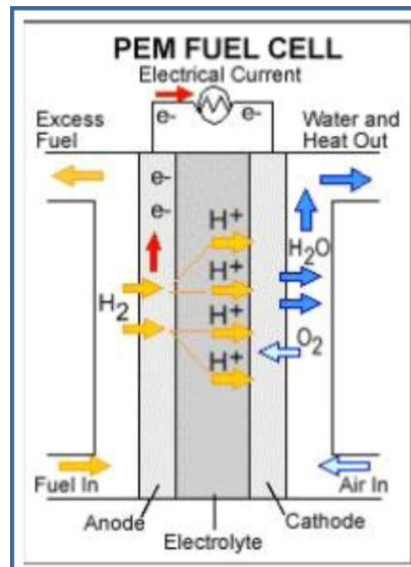


En general, el desempeño de las celdas PEM es muy variado, ya que éste depende de la presión, temperatura y calidad de los gases, entre otros parámetros [19].

Para una misma tensión, una PEM es capaz de entregar mucha más corriente y por consiguiente más potencia que pilas como las PAFC, MCFC o SOFC, o lo que es lo mismo, para una misma potencia una pila tipo PEM tiene tamaño más reducido y menor coste [18].

Puesto que las PEM operan a temperaturas bajas y el electrolito es sólido, se evitan problemas como fugas, corrosión, migración o re cristalización, por lo que se han demostrado vidas útiles cercanas a las 50.000 horas [18].

Figura 15. Diagrama celda de combustible tipo PEM



Fuente: Tomado de [18]

2.5.2.2 Pilas de combustible alcalinas (Alkaline fuel Cell o AFC). Sus primeros usos estaban orientados a suministrar energía eléctrica y agua en las naves espaciales norteamericanas de los años 60. El electrolito utilizado es una solución de hidróxido de potasio diluido y utilizan una gran variedad de metales no precisos como catalizadores [18]. Este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta un 70% y pueden operar a bajas temperaturas [17].

Las reacciones químicas en los electrodos de la celda son las siguientes [18]:

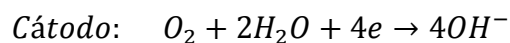
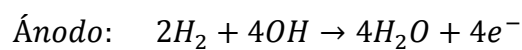
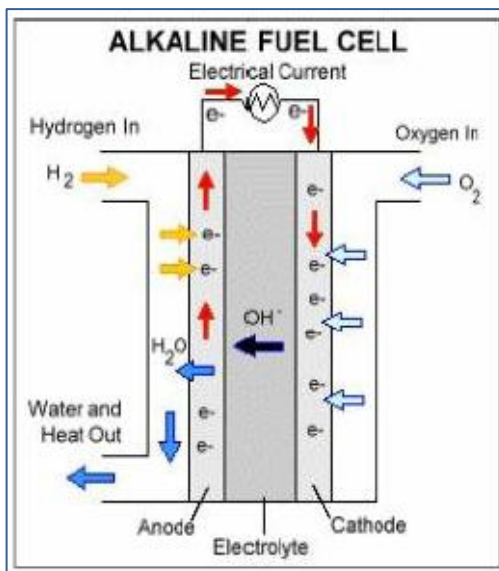


Figura 16. Diagrama celda de combustible tipo AFC



Fuente: Tomado de [18]

La temperatura de funcionamiento de las AFC ronda los 70 – 120 °C, y suelen operar a presión atmosférica. El combustible debe ser hidrógeno puro y su eficiencia ronda el 55%. La vida útil ronda el año de operación. Los electrodos suelen ser de Níquel y óxido de Níquel, o de carbono dopado con platino [18].

2.5.2.3 Pilas de combustible de ácido fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell o PAFC). La pila de combustible de ácido fosfórico es la tecnología más desarrollada comercialmente y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y varias terminales aeroportuarias. Las celdas de combustible de ácido fosfórico generan electricidad utilizando gas natural a más de 40% de eficiencia y cerca de 85% si el vapor que produce se emplea en cogeneración. El uso de un electrólito corrosivo como el ácido fosfórico y potencialmente peligroso de manejar tiende a restar la preferencia sobre este tipo de celda por parte de algunos usuarios [19].

Las reacciones químicas involucradas en este tipo de celda son las siguientes [18]:

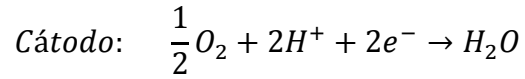
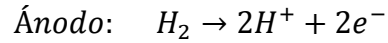
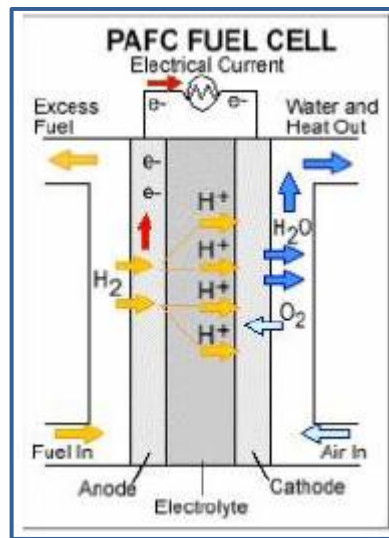


Figura 17. Diagrama celda de combustible tipo PAFC



Fuente: Tomado de [18]

El procedimiento de eliminación de esta agua requiere que el sistema opere a temperaturas cercanas a los 190 °C. A temperaturas menores, el agua se disolverá en el electrolito y no se podría eliminar. A temperaturas mayores, el ácido fosfórico se descompondría [18].

2.5.2.4 Pilas de combustible de carbonatos fundidos (Molten Carbonate Fuel Cell o MCFC). Las celdas de combustible de carbonatos fundidos utilizan sales fundidas como electrólito y prometen altas eficiencias combustible-electricidad, así como la habilidad para consumir combustibles base carbón, incluyendo CO y biocombustibles. Permite la reformación del combustible (extracción del hidrógeno

contenido en hidrocarburos) dentro de la propia celda y, además no necesita electro catalizadores de metales nobles. Algunas desventajas son la corrosividad de las sales fundidas y la necesidad de reposición de CO_2 en el cátodo para recuperación y formación de iones carbonato [19].

Las reacciones químicas que se llevan a cabo en el ánodo y cátodo de la celda son las siguientes [18]:

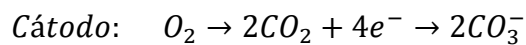
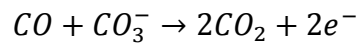
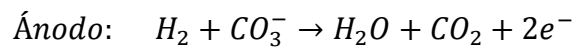
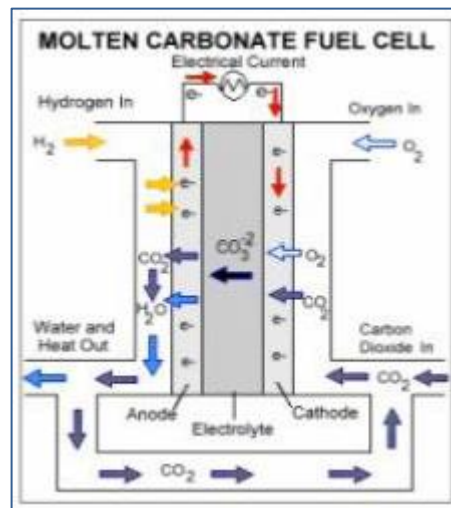


Figura 18.Diagrama celda de combustible tipo MCFC



Fuente: Tomado de [18]

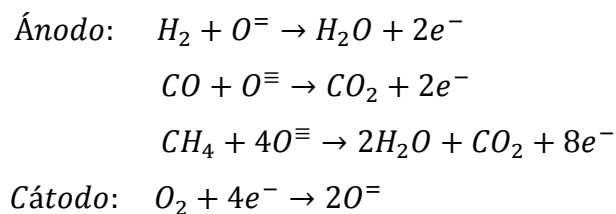
La pila de combustible de carbonatos fundidos utiliza una sal de carbonato fundido como electrolito. Normalmente se utiliza carbonato de litio o carbonato de potasio. Su temperatura de operación está en torno a los 650 °C, a la cual esta sal es líquida y se comporta como un buen conductor iónico. Este electrolito está contenido en una matriz cerámica porosa e inerte, normalmente LiAlO_2 [18].

En comparación con otras tecnologías, una MCFC es capaz de operar a tensiones más altas que una PAFC para la misma densidad de corriente [18].

Algunos de los factores significativos en las MCFC son la corrosión del cátodo que reduce la vida útil de la pila considerablemente y la necesidad de mantener la temperatura constante, ya que una caída de 30 °C reduce la tensión de salida en un 15% aproximadamente, dado al incremento de resistencia iónica y eléctrica de los electrodos [18].

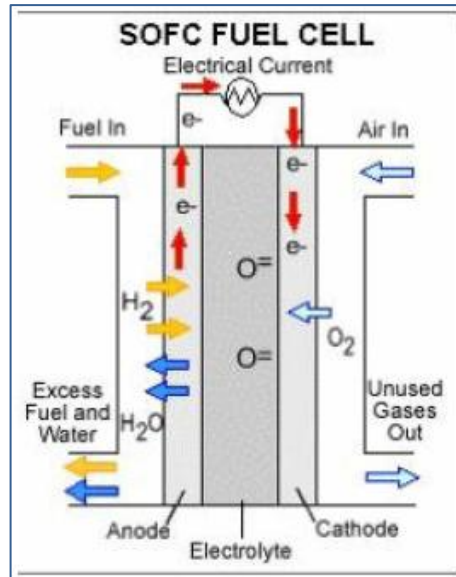
2.5.2.5 Pilas de combustible de óxidos sólidos (Solid Oxide Fuel Cell o SOFC). La pila de combustible de óxidos sólidos utiliza un electrolito sólido cerámico que reduce la corrosión y elimina los problemas asociados a la gestión de los electrolitos líquidos. Sin embargo para que una cerámica pueda alcanzar una conductividad iónica aceptable, se necesitan temperaturas cercanas a los 1000 °C. A estas temperaturas, el reformado interno también es posible, además de poder utilizar el calor residual para cogeneración y aumentar así la eficiencia del sistema global [18].

Las reacciones químicas en los electrodos de la celda son las siguientes [18]:



Las SOFC son dispositivos completamente sólidos que tienen técnicas de fabricación parecidas a las de los semiconductores. El ánodo es de zirconia/níquel poroso mientras que el cátodo es un manganato de lantano dopado con magnesio [18].

Figura 19. Diagrama celda de combustible tipo SOFC



Fuente: Tomado de [18]

Su vida útil está cercana a las 30.000 horas y pueden soportar un número bastante considerable de ciclos de calentamiento/enfriamiento. Hoy en día, SOFC con gases a presión ambiente han demostrado eficiencias cercanas al 45%, aunque hay laboratorios que publican eficiencias cercanas al 60% con los gases de entrada presurizados [18].

Como se ha mencionado anteriormente, las SOFC permiten el reformado interno, y como ocurre con las MCFC, el CO no actúa como veneno, sino que puede utilizarse como combustible. Estas pilas también tienen la ventaja de ser resistentes al azufre contenido en la mayoría de los combustibles [18].

Debido a la alta temperatura de operación de este tipo de pilas de combustible, el tiempo de arranque es bastante grande, y las presiones de las celdas son muy sensibles a variaciones de esta temperatura. Una caída del 10% en la temperatura puede suponer una caída del 12% de la eficiencia del sistema debido al aumento de la resistencia interna en la conductividad de los iones oxígeno. Las altas

temperaturas que se alcanzan también obligan a la utilización de aislantes térmicos sofisticados para proteger al personal y mantener el calor [18].

2.5.3 Ventajas de las celdas de combustible. Entre las ventajas de las celdas de combustible se pueden mencionar:

- ***Eficiencia eléctrica.*** Las pilas de combustible no están sujetas al ciclo de Carnot, por lo que son más eficientes que cualquier sistema convencional de generación de energía. Sus rendimientos eléctricos son próximos al 50 %, pero si se tiene en cuenta la energía térmica que generan (cogeneración), el rendimiento total puede ascender hasta un 80 %, aproximadamente [8].
- ***Independencia de la red.*** Cuando se usan en generación distribuida se tendrían ahorros considerables al no requerir líneas de transmisión ofreciendo energía eléctrica donde es requerida. Además, localizar la generación de energía en el punto de consumo permite la recuperación de cualquier calor generado [18].
- ***Conexión a la red.*** La conexión de pilas de combustible a la red permite a las empresas aumentar la capacidad instalada sin el capital necesario para la construcción de nuevas centrales. A diferencia de la energía fotovoltaica o eólica, las pilas de combustible están disponibles para complementar la demanda de energía de red: independientemente de las condiciones meteorológicas y la hora del día [18].
- ***Ventajas medioambientales.*** La emisión de gases contaminantes como CO, CO₂ y NO_x se ve significativamente reducida respecto a otros sistemas debido a la ausencia de combustión. Tampoco se producen emisiones de SO_x, ya que el sistema exige la depuración previa del

combustible para evitar la contaminación de los elementos constituyentes y aumentar la durabilidad [8].

- **Flexibilidad de combustible.** Pueden ser usados múltiples combustibles, incluyendo el propano, el gas natural, el metano, el etano, el gasoil, la gasolina y combustibles renovables. Más o menos cualquier combustible hidrocarburo líquido o gas puede ser usado como fuente de átomos de hidrógeno en la pila. El hidrógeno producido a partir de energía solar también podría impulsar una unidad de pila de combustible sin necesidad de un tratamiento complejo del combustible, y sería totalmente de emisión cero [18].
- **Modularidad.** Se pueden elaborar celdas de combustible de cualquier tamaño: tan pequeñas como para ser utilizadas en telefonía celular o tan grandes como para generar energía para abastecer a una comunidad entera [17].
- **Funcionamiento silencioso.** Las celdas de combustible son silenciosas (60 Db a 30 metros), ya que no contienen partes móviles, por lo que además no requieren sistemas de lubricación [19].
- **Facilidad de uso y mantenimiento.** El control de sus principales variables se presta para hacer su operación completamente automática. Sus costos de mantenimiento son menores y se ha estimado un ahorro en el costo de servicio eléctrico de un 20 a un 40% usando celdas de combustible, comparado con generación por combustión interna [19].

2.5.4 Desventajas de las celdas de combustible. Algunas de las desventajas que presenta la tecnología de celdas de combustible son:

- ***Necesidad de que el combustible sea H₂.*** Si bien es cierto que las pilas no siguen el ciclo de Carnot como limitación del rendimiento y pueden utilizar como combustible un gran número de hidrocarburos, estos han de ser convertidos en hidrógeno mediante un proceso llamado “reformado de vapor de agua”. Si se hace así, hay que añadir el rendimiento del reformado al de la pila para obtener un rendimiento global [18].

En caso de que se utilice H₂ como combustible hay que tener en cuenta que hoy en día es un producto muy caro y no es algo que pueda comprarse en las droguerías precisamente [18].

- ***Desventajas medioambientales.*** Si se usa un reformador para convertir un hidrocarburo en H₂, entonces sí se produce CO₂. Además, aunque los “humos” contengan casi exclusivamente agua, en la fabricación de la pila y sus componentes, así como en el reformador, se utilizan productos altamente contaminantes y/o perniciosos [18].
- ***Problemas de uso y mantenimiento.*** Las pilas de alta temperatura, como son las de óxido sólido someten a sus componentes a un alto grado de estrés térmico, redundando en una disminución de su vida útil. Las altas temperaturas generadas por la reacción pueden hacer que el nitrógeno del aire pase a NO_x [18].

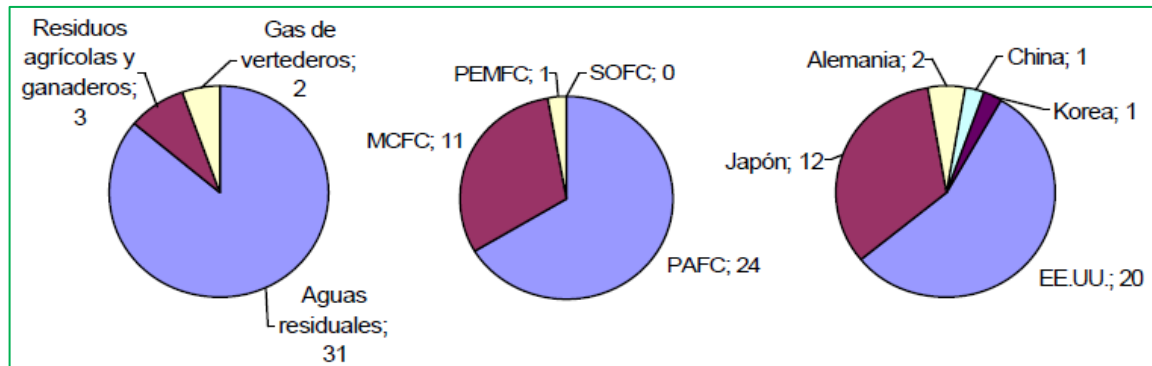
Lentitud para empezar a funcionar: a diferencia de un motor impulsado por generador que puede empezar a producir energía casi de inmediato, las pilas de combustible funcionan mejor trabajando continuamente [18].

- ***Costo.*** Aunque los precios para las pilas de combustible continúan bajando a un ritmo rápido, todavía hay un gran camino por recorrer antes de que sean ampliamente asequibles. Los materiales (oro, platino, naffón, ytrio, circonio) y

componentes (caudalímetros, termopares, compresores, electroválvulas) utilizados en las pilas de combustible son excesivamente caros [18].

2.5.5 Biogás y celdas de combustible. Las primeras utilizaciones del biogás en pilas de combustible se realizaron a comienzos de los años 90 en pilas de combustible de ácido fosfórico, cuando este tipo de sistemas ya había alcanzado un considerable grado de madurez operativa y fiabilidad. El éxito obtenido sirvió de estímulo a los fabricantes de otras tecnologías de pilas de combustible, quienes comenzaron a considerarlo como una prometedora alternativa al uso del hidrógeno y otros hidrocarburos convencionales, como el metano [8].

Figura 20. Instalaciones de pila de combustible clasificadas según el origen del biogás, el tipo de pila de combustible utilizado y el país de ubicación



Fuente: Tomado de [8]

La necesidad de utilizar metales nobles para la fabricación de los catalizadores en las pilas de combustible tipo PEM y la elevada sensibilidad de estos sistemas, que operan a temperaturas relativamente bajas, frente a la presencia de contaminantes, limita notablemente su compatibilidad con el empleo del biogás. Sin embargo, las elevadas temperaturas de operación de las MCFC y SOFC las convierten en candidatas idóneas a su utilización. Así, el CO del biogás, cuya presencia produce el envenenamiento de pilas de combustible de baja temperatura, es un combustible adicional para las de alta temperatura. Además, la elevada temperatura de los gases de salida en este tipo de dispositivos permite la

integración completa de la unidad de procesamiento de combustible con la unidad de potencia, obteniéndose rendimientos totales muy elevados [8].

En la tabla 13 se muestra el grado de tolerancia de los distintos tipos de pilas de combustible a diferentes compuestos [8].

Tabla 13. Tolerancia de los distintos tipos de pilas de combustible a diferentes compuestos

Compuesto	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H ₂	combustible	combustible	combustible	combustible	combustible
CH ₄	Inerte	Veneno	Inerte	combustible	combustible
CO ₂	Diluyente	Veneno	Diluyente	Reactivo	Diluyente
CO	< 10 ppm	Veneno	< 1%	combustible	combustible
H ₂ S, COS	< 200 ppb	Veneno	Veneno < 50 ppm	Veneno 0,1 - 0,5 ppm H ₂ S	Veneno < 1 ppm H ₂ S
NH ₃	Veneno	combustible	Veneno	combustible	combustible
Halógenos	-	-	Veneno 4 ppm	Veneno < 0,1 - 1,0 ppm	Veneno < 1 ppm

Fuente: Tomado de [8]

En la tabla 14 se comparan las características de distintos sistemas de generación eléctrica con una pila de combustible de carbonatos fundidos (MCFC), alimentados con biogás [8].

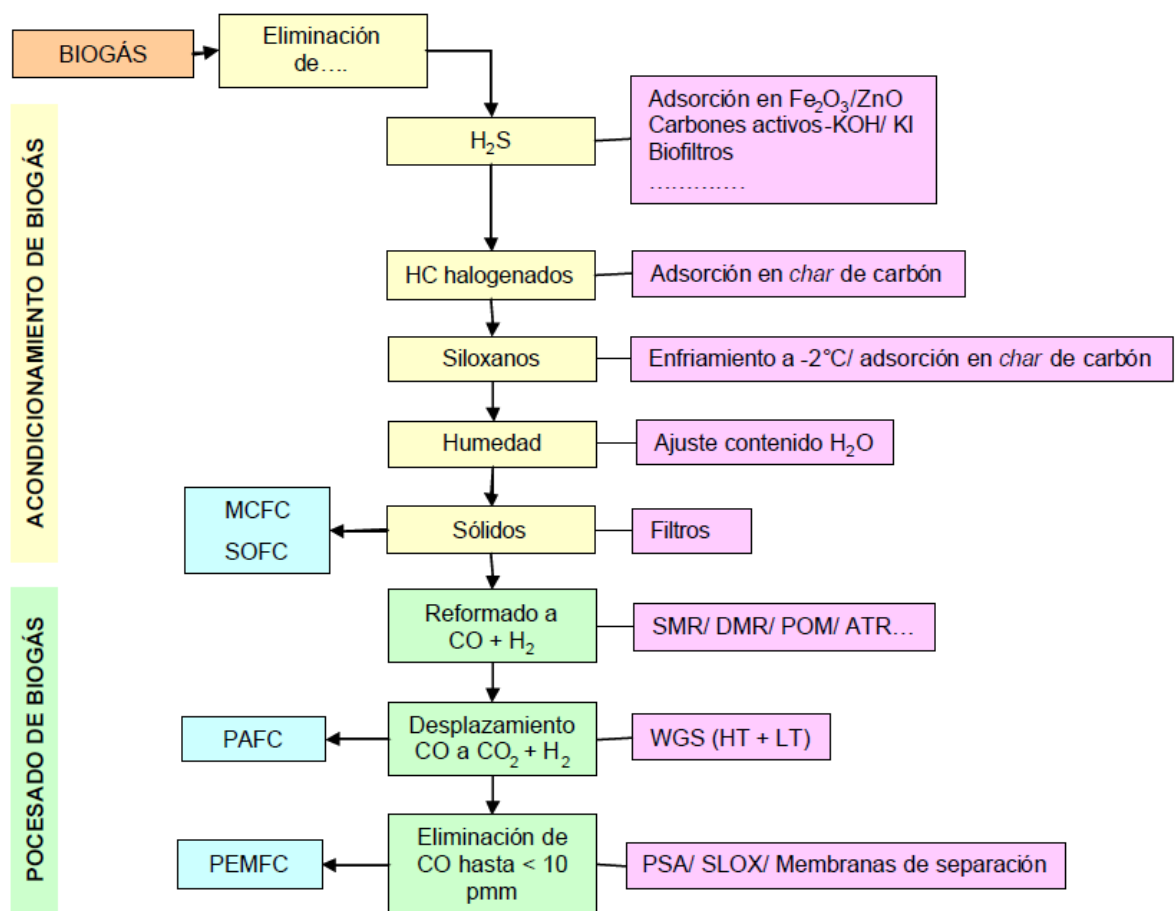
Tabla 14. Características de tecnologías que operan con biogás

Tecnología	Eficiencia eléctrica (%)	Combustible consumido (kJ/kWh)	Emisiones (µg/kJ)	
			NO _x	CO
Motor de combustión interna	33	10972	56,6	56,6
Turbina de gas	28	12872	15	18
Pilas de combustible (MCFC)	50	7174	Trazas	1,4

Fuente: Tomado de [8]

La sensibilidad de las pilas de combustible a determinado tipo de compuestos implica que, previamente a su uso, el biogás debe someterse a una primera y necesaria etapa de limpieza/acondicionamiento, seguida de otra etapa de reformado que lo convierte en un combustible rico en hidrógeno (Figura 21). No obstante, esta etapa de reformado puede tener lugar en el interior de determinadas pilas de combustible de alta temperatura [8].

Figura 21. Etapas de tratamiento del biogás para su utilización en pilas de combustible



Fuente: Tomado de [8]

3. DISEÑO DE BIODIGESTORES

El diseño de un biodigestor depende directamente de varios parámetros tales como la temperatura ambiente media del lugar donde se vaya a instalar. La temperatura marcará la actividad de las bacterias que digieren el estiércol, y cuanto menor temperatura, menor actividad tendrán éstas, y por tanto será necesario que el estiércol esté más tiempo en el interior del biodigestor. De esta forma la temperatura marca el tiempo de retención [13].

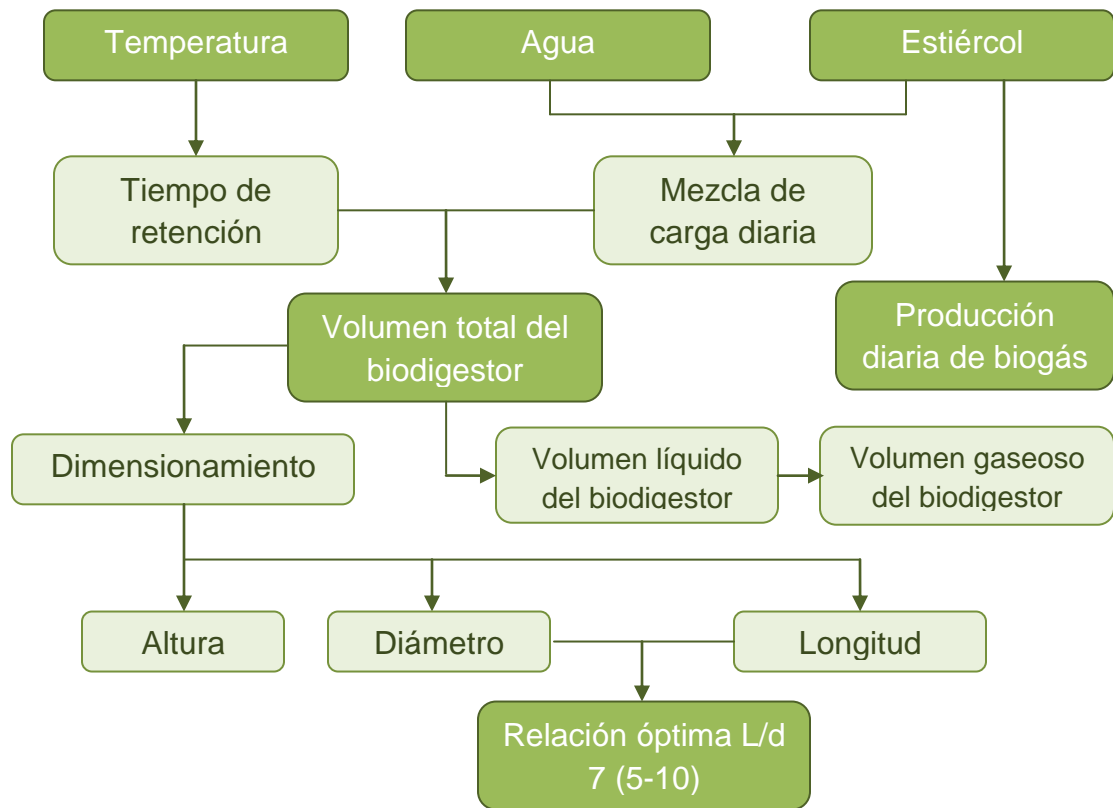
Por otro lado, la carga diaria de estiércol determinará la cantidad de biogás producido por día. La carga de estiércol diaria, junto con el tiempo de retención (determinado por la temperatura), determinarán el volumen del biodigestor [13].

La figura 22 muestra un esquema general de la metodología general para el diseño de biodigestores. Cabe destacar que el diseño y dimensionamiento es particular de cada aplicación y cada tipo de biodigestor.

Los principales requerimientos para un buen diseño de un sistema de producción de biogás son [6]:

- a)** El diseño debe ser simple tanto para la construcción como para la operación y mantenimiento.
- b)** Materiales. Se deben utilizar materiales que estén disponibles localmente. Se debe emplear un tipo de material resistente a la corrosión, con propiedades de aislamiento efectivas.

Figura 22. Esquema de metodología de diseño del biodigestor



Fuente: Los autores

c) Duración. La construcción de una planta de biogás requiere cierto grado de práctica. Una planta de corta vida podría ser económicamente rentable pero puede no ser reconstruida una vez su vida útil termine. Sería necesario construir plantas más durables, pero esto puede aumentar los costos en la inversión inicial.

d) Implementar control ambiental en la disposición y uso del efluente

e) Un sistema de producción de biogás ideal debe ser de bajo costo tanto como sea posible (en términos del costo de producción por unidad de volumen de biogás).

3.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PERTINENTE

La selección y el diseño de un tipo de biodigestor se debe ajustar a las condiciones locales de cada predio. Los criterios para la selección serán: aislamiento térmico, requerimiento de espacio, costo de inversión, vida útil y mantenimiento. En la tabla 16 se analizan los criterios de evaluación de la tecnología pertinente.

3.2 CÁLCULOS DE DISEÑO

Con el potencial de residuos producidos por animal y su peso vivo promedio, puede estimarse la cantidad de desechos orgánicos producidos diariamente en la finca y los requerimientos de adición de agua para mezcla y homogenización. Cuando no es posible obtener datos exactos sobre ésta en kg/día, puede estimarse utilizando la tabla 15.

Tabla 15. Valores y características del estiércol de algunos animales

Clase de animal	% por peso vivo:		% del material de digestión		Relación C/N	P - Producción de biogás (m ³ de gas/1 kg SO)
	PE - Estiércol	PO - Orina	% EST Sólidos	% SO Sólidos orgánicos		
Vacunos	5	4	15 - 16	13	20	0,25
Cerdos	2	3	16	12	13	0,35
Caprinos, ovejas	3	1,5	30	20	30	0,2
Caballos	5	4	25	15	20	0,25
Avícolas, gallinas	4,5	4,5	25	17	5 - 8	0,4
Humanos	1	2	20	15	8	0,3

Fuente: Tomado de [6]

Tabla 16. Criterios de evaluación de tecnologías pertinentes

	TIPOS DE BIODIGESTORES						
	Chino	Indio	Estructura flexible	Flotante	Tradicional con cúpula de PE	Alta velocidad	Instalaciones Industriales
Aislamiento térmico	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Medio - Alto	Según planta
Requerimiento de espacio	Bajo	Bajo	Alto	Alto, y requiere cuerpo de agua	Bajo	Bajo	Según planta
Costo de inversión	Bajo - Medio	Mayor que digestor tipo Chino (por cúpula flotante)	Bajo	Bajo	30% menor que el chino	Según tipo de planta y equipo de agitación. Bajo - Medio	Alto
Vida útil (años)	≥ 20	≥ 15 (5 en zonas costeras tropicales)	2 a 5	2 a 5	Digestor ≥ 20 Cúpula ≈ 5	Digestor ≥ 20 Agitador ≈ 10	≥ 20 (excepto equipos auxiliares)
Mantenimiento	Bajo	Alta (cúpula móvil)	Bajo	Bajo	Bajo	Baja - Media Según tipo de planta	Alta (equipos auxiliares)

Fuente: Tomado de [16]

También, puede realizarse la digestión anaerobia con materiales vegetales frescos o desechos agrícolas como paja, tamo, hojas, pasto, etc., varias veces, con lo que se produce más biogás que utilizando solamente estiércol. Se aconseja utilizar residuos vegetales sólo como material aditivo a los desechos [6].

Tabla 17. Valores y características de algunos desechos vegetales

Material fresco	% EST Sólidos totales	% SO Sólidos orgánicos	P - Producción de biogás (m ³ de gas/1 kg SO)
Paja de arroz	89	93	0,22
Paja de trigo	82	94	0,25
Paja de maíz	80	91	0,41
Hierba fresca	24	89	0,41
Jacinto de agua	7	75	0,325
Bagazo	65	78	0,16
Desechos de verdura	12	86	0,35
Desechos orgánicos de cocina	15	10	0,25

Fuente: Tomado de [6]

3.2.1 Estiércol (E) y orín (O) en kilogramos por día. La cantidad de estiércol y orín producida por animal se puede calcular de la siguiente manera [6]

$$E = NA * PVP * \frac{PE}{100} \quad (1)$$

$$O = NA * PVP * \frac{PO}{100} \quad (2)$$

Donde,

NA: Número de animales por una especie (vacas, cerdos, caballos, humanos, etc.)

PVP: Peso vivo promedio por animal

PE: Producción de estiércol por animal por día en porcentaje de peso vivo

PO: Producción de orín por animal por día en porcentaje de peso vivo (se asume que 1 litro de orín pesa 1 kilogramo).

3.2.2 Materia prima para carga en kilogramos por día (MPC). La materia prima para carga se define como la cantidad de estiércol más orín producidos o recolectados en un día.

$$MPC = E + O \quad (3)$$

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la materia prima para carga (%ST) debe ser inferior al 10% y es igual a

$$\%ST = \frac{E * \%EST}{MPC} \quad (4)$$

Donde,

%EST: Porcentaje de sólidos en el estiércol

Por lo tanto, los sólidos totales en la materia prima para carga, en kilogramos por día (ST) se pueden calcular utilizando la siguiente ecuación

$$ST = \frac{\%ST * MPC}{100} \quad (5)$$

3.2.3 Masa de agua para mezcla en kilogramos por día (MH₂O). Disminuye hasta un 10% los sólidos orgánicos contenidos en la materia prima. Solamente se calcula cuando el porcentaje de sólidos totales (%ST) es superior al 10%.

$$MH_2O = \frac{MPC * ST}{10} - MPC \quad (6)$$

3.2.4 Carga de mezcla diaria en litros por día (C). Mezcla de agua más la materia prima para carga.

$$C = MPC + MH_2O \quad (7)$$

3.2.5 Cálculo del tiempo de retención en días (TR). El posible tamaño del digester (volumen del digester) es determinado por el tiempo de retención (TR) y por la carga diaria. Se recomienda escoger el TR apropiado de acuerdo a la temperatura promedio del sitio en el cual va a operar, utilizando la siguiente relación

$$TR = -51,227 * Ln(T^{\circ}C) + 206,72 \quad (8)$$

Donde,

T[°]C: Temperatura promedio en grados centígrados del sitio donde se instalará el biodigestor.

3.2.6 Volumen del digester en litros (Vd). El volumen del biodigestor es igual a la carga diaria por el tiempo de retención. El factor de 1,2 corresponde al volumen adicional para el almacenamiento del biogás

$$Vd = C * TR * 1,2 \quad (9)$$

$$V_d = V_L + V_G \quad (10)$$

Donde V_L es igual al volumen líquido del biodigestor y V_G es el volumen gaseoso del biodigestor

3.2.6.1 Volumen líquido. Para que la carga diaria de entrada pueda ser digerida por las bacterias, es necesario que esté en el interior del biodigestor tanto tiempo como el tiempo de retención estimado. Ya que el biodigestor es de flujo continuo, el volumen líquido es el resultado de multiplicar el tiempo de retención por la carga diaria. De esta manera, si se imagina el biodigestor vacío inicialmente y se comienza a cargarlo de forma diaria, tardará tantos días como tiempo de retención se hayan considerado para llenarse. Y así, “tiempo de retención + 1 día”, al cargar el biodigestor, se desbordará expulsando la carga del primer día ya digerida [13].

$$V_L = V_d * 80\% \quad (11)$$

3.2.6.2 Volumen gaseoso. Dentro del biodigestor, por estar en una situación anaerobia (en ausencia de oxígeno) se va a producir biogás, y éste se acumulará en la parte superior. Al ser la cúpula del biodigestor de polietileno, se formará una campana de biogás que sirve para almacenar gas y darle forma al biodigestor [13].

$$V_G = V_d * 20\% \quad (12)$$

3.2.7 Cálculo del gas producido en litros por día (PG). La posible producción de biogás en el biodigestor puede ser estimado según la siguiente ecuación

$$PG = MPC * SO * P \quad (13)$$

Donde,

SO: Porcentaje de materia orgánica del estiércol según la especie.

P: Producción aproximada de m³ de gas/1 kg de masa orgánica seca total.

3.3 DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

Conociendo el volumen total de un biodigestor se deberá determinar las dimensiones del mismo. Estas dimensiones dependerán de la forma y tipo de biodigestor seleccionado.

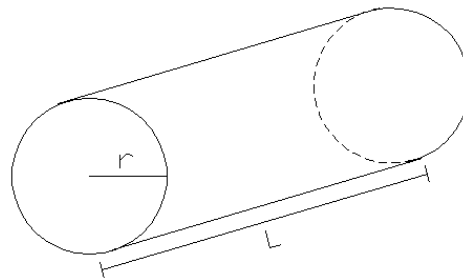
Para un biodigestor de estructura flexible o balón de plástico el volumen total equivale al volumen de un cilindro (en metros cúbicos), el cual es igual a

$$V_{cilindro} = \pi * r^2 * L \quad (14)$$

$$Sección\ eficaz_{cilindro} = \pi * r^2 \quad (15)$$

Donde r es el radio del tubo y L es la longitud del biodigestor (figura 23).

Figura 23. Cilindro de radio r y longitud L

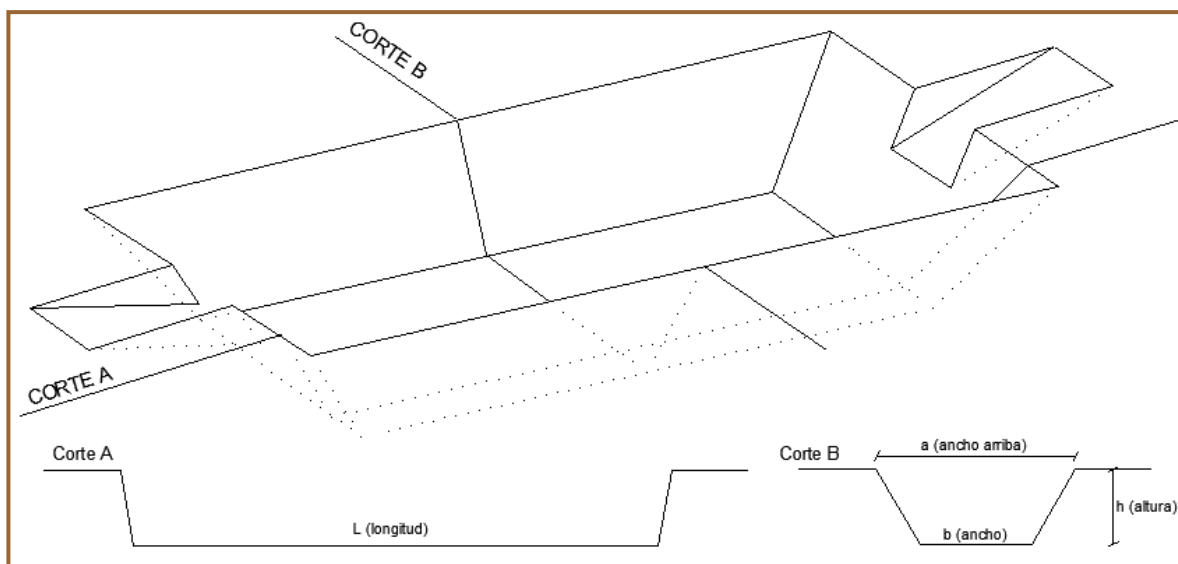


Fuente: Los autores

Para el caso de una zanja como la mostrada en la figura 24, el volumen de la zanja es igual a la longitud multiplicada por el área del trapecio con dimensiones: ancho superior (a), ancho inferior (b) y altura (h). Por lo tanto:

$$V_{zanja} = \frac{(a + b)}{2} * h * L = d * h * L \quad (16)$$

Figura 24. Parámetros técnicos de la zanja

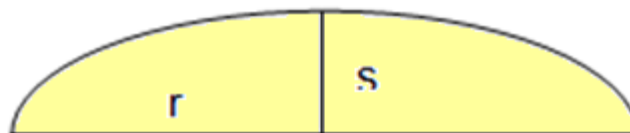


Fuente: Tomado de [19]

En caso de un biodigestor con cúpula de polietileno, el área de la cúpula (figura 25) es igual a la mitad del área de una elipse donde r es el semieje mayor y s el semieje menor. Por lo tanto, el volumen de la cúpula se puede calcular según la siguiente ecuación

$$V_{cúpula} = \frac{\pi}{2} * r * s * L \quad (17)$$

Figura 25. Forma semi-elíptica de la cúpula del biodigestor



Fuente: Los autores

Se necesita calcular la mitad del perímetro total de una elipse para determinar el ancho del plástico de polietileno que formará la cúpula del biodigestor.

El perímetro de una elipse es muy difícil de calcular, para ello se requiere del cálculo de integrales elípticas de segunda especie. Sin embargo, el matemático Ramanujan ideó una ecuación más simple que se aproxima razonablemente al perímetro de la elipse.

$$p \approx \pi \left[3(r + s) - \sqrt{(3r + s)(r + 3s)} \right] \quad (18)$$

Existe otra aproximación que está a menos del 5% del valor correcto, siempre que r no sea más de 3 veces s

$$p \approx 2\pi \sqrt{\frac{r^2 + s^2}{2}} \quad (19)$$

$$\text{Ancho del plástico de polietileno} = \frac{p}{2} \quad (20)$$

3.3.1 Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor. Para alcanzar el volumen deseado se tendrán diferentes posibilidades de longitudes y anchos. Los anchos más grandes exigirán menor longitud para alcanzar el mismo volumen deseado. No conviene biodigestores demasiado cortos ni largo y para ello existe una relación óptima entre el diámetro y la longitud que es 7 [13].

Esto significa que dividiendo la longitud estimada entre el diámetro, habrá que seleccionar las dimensiones del biodigestor que más se acerquen a una relación de 7. Esta relación es flexible en un rango de 5 – 10, siendo la mejor 7 [13]

$$\frac{L}{d} = \text{entre 5 a 10 (óptimo de 7)} \quad (21)$$

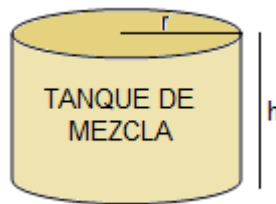
3.3.2 Tanque de mezcla. En el tanque de mezcla, el sustrato recolectado es mezclado con agua y preparado para la fermentación. El tanque debe tener la capacidad suficiente para almacenar, mínimo, la generación diaria de sustrato y presentar una forma cilíndrica, con una relación diámetro/altura de 2/1, es decir $d = 2h$ ó $r = h$ [14].

Los materiales fibrosos presentes en el sustrato se remueven de la superficie de la mezcla, mientras que piedras y arena precipitan al fondo del tanque siendo removidas una vez sea vaciado el tanque de mezcla.

El volumen del tanque de mezcla de forma cilíndrica se puede calcular de la siguiente manera:

$$V_{TM} = \pi * r^2 * h = \pi * r^3 \quad (22)$$

Figura 26. Esquema tanque de mezcla



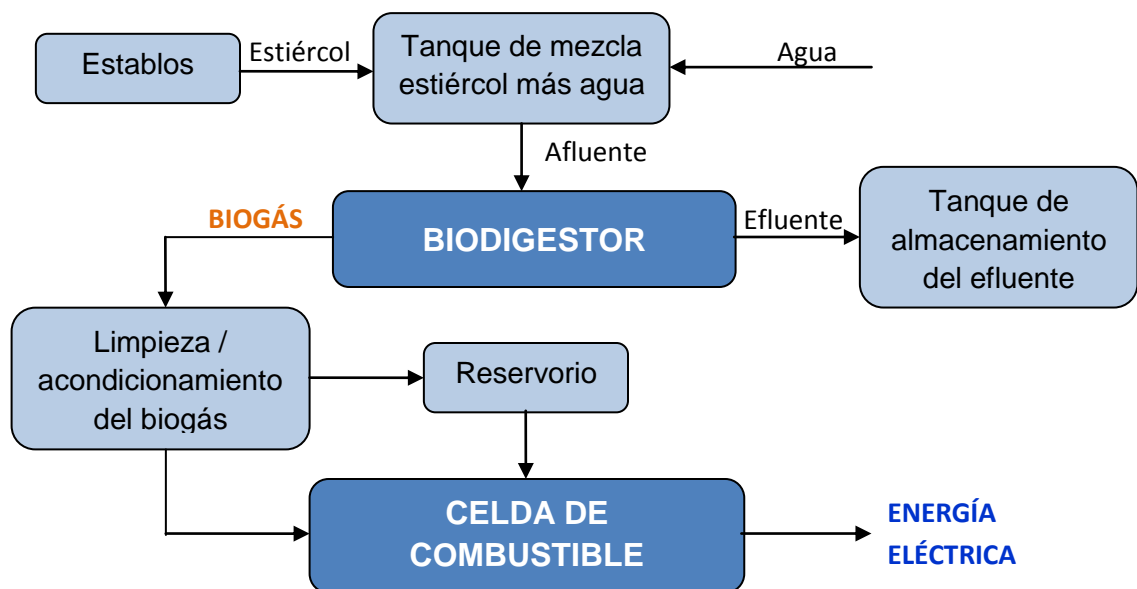
Fuente: Los autores

4. SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

El sistema de generación de energía eléctrica propuesto para la población rural adscrita al corregimiento de la India en Santander (Colombia), consta de una serie de elementos consecutivos interconectados, los cuales van desde la recolección de la materia orgánica hasta la generación de la energía eléctrica con celda de combustible (figura 27).

El presente proyecto pretende diseñar un sistema de generación que satisfaga los requerimientos básicos de energía eléctrica y energía térmica de cinco familias rurales. Por cuestiones de diseño y aprovechando las ventajas del bajo costo en la construcción de biodigestores tubulares se decide diseñar un biodigestor general para la generación de energía eléctrica y un biodigestor para cada vivienda con la capacidad de generar el biogás necesario para suplir los requerimientos de energía térmica de cada familia.

Figura 27. Diagrama generación de energía



Fuente: Los autores

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN Y ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO

En esta sección se expone las características propias de las cinco familias rurales adscritas al corregimiento de la India en Santander (Colombia), las cuales se pretende beneficiar. Además, se detallan los cálculos para la estimación de la demanda diaria de energía eléctrica y los requerimientos de combustible para generar dicha demanda y, además, satisfacer las necesidades de energía térmica.

4.1.1 Características demográficas de la población. La India es jurisdicción de Landázuri, al suroccidente de Santander, pero su cercanía geográfica lo ha vuelto un activo socio comercial de Cimitarra (Santander). Cerca de 500 personas viven en el casco urbano, pero se estima que en la región, que cubre predios de municipios vecinos, habitan más de 8.000 personas.

La región tiene una altitud de 200 metros sobre el nivel del mar y una temperatura media de 32 °C.

Al corregimiento la India se encuentran adscritas cerca de 60 fincas ubicadas al lado suroccidental, atravesando el río minero, en donde habitan alrededor de 300 personas. Su principal actividad económica es el engorde y cuidado de ganado y el manejo de pequeños cultivos agrícolas como yuca, maíz, plátano entre otros. La dificultad de acceso a estas fincas, hace que se encuentren aisladas del casco rural de la India, que no cuenten con ningún tipo de servicio público y en consecuencia las oportunidades de desarrollo económico y de mejorar su calidad de vida son escasas.

4.1.2 Censo poblacional y ganadero. Mediante pequeñas encuestas a cada una de las cinco familias a beneficiar, se identificaron algunos datos importantes para el proyecto, tales como: número de habitantes por familia, área de la

vivienda, actividad económica, cantidad de ganado y combustible utilizado para satisfacer sus necesidades energéticas. La tabla 18 recopila los resultados de las encuestas y en la figura 28 se puede observar cada una de las cinco viviendas.

Tabla 18. Encuesta población a beneficiar

Familia	No. De habitantes	Área vivienda (m ²)	Actividad económica	Ganado promedio mes	Combustible utilizado para cocinar
Ariza	4	70	Ganadería, pequeños cultivos agrícolas	140	leña
Escobar	5	60	Ganadería, pequeños cultivos agrícolas	25	leña
Churco Méndez	6	70	Ganadería, pequeños cultivos agrícolas	70	leña
Saldarriaga	5	50	Ganadería, pequeños cultivos agrícolas	20	leña
Grajales Agudelo	4	90	Ganadería, pequeños cultivos agrícolas	40	leña y gas

Fuente: Los autores

4.1.3 Demanda máxima de energía eléctrica. En zonas rurales, para usuarios individuales en estratos 1 y 2, la demanda máxima puede ser estimada como se indica a continuación [22]:

$$D_{max_rural} = S_M + [(32 VA/m^2) * (Área (m^2)) * 0,5] \quad (23)$$

Donde,

S_M: Carga aparato de mayor potencia

Figura 28. Viviendas: a) familia Ariza, b) familia Churco Mendez, c) familia Saldarriaga, d) familia Grajales Agudelo, e) familia Escobar



Fuente: Los autores

Considerando el probable uso de motores para riego o pica pastos, se asume como carga de mayor potencia un motor de 2 hp equivalente a 1491,4 W. La carga de mayor potencia se aproxima a 1500 W con un factor de potencia para el motor de 0,85. Por lo tanto se tiene:

$$S_M = \frac{P}{fp} = \frac{1500 \text{ W}}{0,85} = 1764,7 \text{ VA}$$

$$D_{max_Familia\ 1} = 1764,7 + [(32 \text{ VA/m}^2) * (70 \text{ m}^2) * 0,5] = 2884,7 \text{ VA}$$

$$D_{max_Familia\ 2} = 1764,7 + [(32 \text{ VA/m}^2) * (60 \text{ m}^2) * 0,5] = 2724,7 \text{ VA}$$

$$D_{max_Familia\ 3} = 1764,7 + [(32 \text{ VA/m}^2) * (70 \text{ m}^2) * 0,5] = 2884,7 \text{ VA}$$

$$D_{max_Familia\ 4} = 1764,7 + [(32 \text{ VA/m}^2) * (50 \text{ m}^2) * 0,5] = 2564,7 \text{ VA}$$

$$D_{max_Familia\ 5} = 1764,7 + [(32 \text{ VA/m}^2) * (90 \text{ m}^2) * 0,5] = 3204,7 \text{ VA}$$

$$D_{max_total} = \sum_{n=1}^5 D_{max_familia\ n} \quad (24)$$

$$D_{max_total} = 14263,5 \text{ VA}$$

El factor de diversidad para estratos 1, 2, 3 y 4 es igual a [22]:

$$F_{div_res} = \frac{1}{0,2 + 0,8 * e^{\left(\frac{1-N}{6}\right)}} \quad (25)$$

Donde N es el número de usuarios. Por lo tanto, el factor de diversidad para cinco usuarios de estratos bajos es igual a

$$F_{div_res} = \frac{1}{0,2 + 0,8 * e^{\left(\frac{1-5}{6}\right)}} = 1,6374$$

La demanda máxima diversificada es igual al cociente entre la demanda máxima total y el factor de diversidad. Por lo tanto, se tiene:

$$D_{\max_diversificada} = \frac{D_{\max_total}}{F_{div}} = \frac{14263,5 VA}{1,6374} \quad (26)$$

$$D_{\max_diversificada} = 8711,1 VA$$

4.1.4 Requerimientos de combustible. En esta sección se determina la cantidad de combustible (biogás) necesario para generar la demanda diaria de energía eléctrica y térmica de las cinco familias a beneficiar con el proyecto.

4.1.4.1 Combustible para generación de energía eléctrica. Para estimar el consumo de energía eléctrica de las cinco familias de la población rural adscrita al corregimiento de la India en Santander (Colombia), se utilizaron como base las curvas típicas de demanda diaria para diferentes tipos de servicios y estratos socioeconómicos de la Electrificadora de Santander S.A. (ESSA).

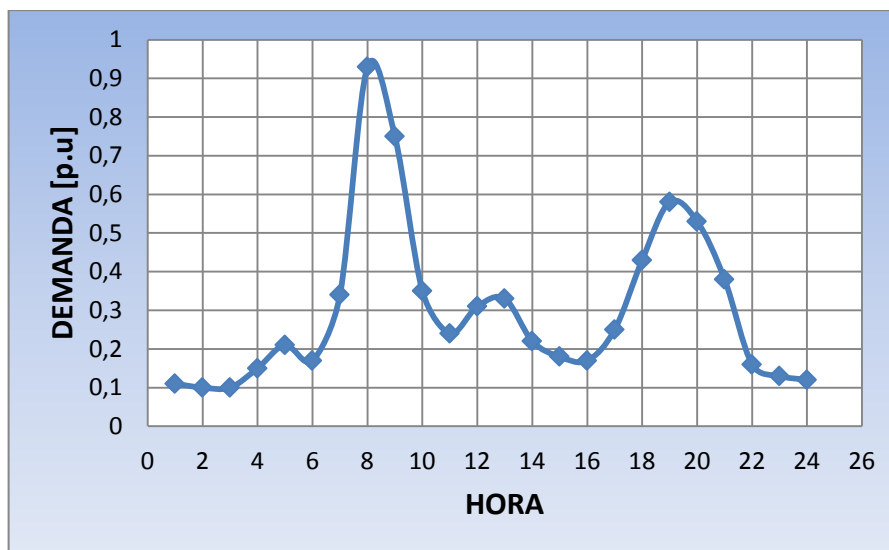
La figura 29 muestra una curva de demanda diaria de energía eléctrica en por unidad. Esta curva fue estimada teniendo en cuenta la localización, actividad económica y características propias de la población rural.

La potencia base en kW es igual a la demanda máxima diversificada multiplicada por el factor de potencia del sistema el cual es estimado en 0,9 en atraso. Por lo tanto:

$$P_{base} = D_{\max_div} * fp \quad (27)$$

$$P_{base} = 8711,1 * 0,9 = 7840 W$$

Figura 29. Curva de demanda diaria en por unidad (sector rural en La India, Santander)



Fuente: Los autores

Con la potencia base, se obtiene la curva de demanda diaria de energía eléctrica en kW que satisface las necesidades energéticas diarias de las cinco familias del corregimiento de la India en Santander.

La generación de energía eléctrica se llevará a cabo a través de una celda de combustible. Esta celda deberá tener la capacidad de generar la demanda diaria y para ello, se debe garantizar la suficiente cantidad de combustible (biogás) que satisfaga dicha demanda.

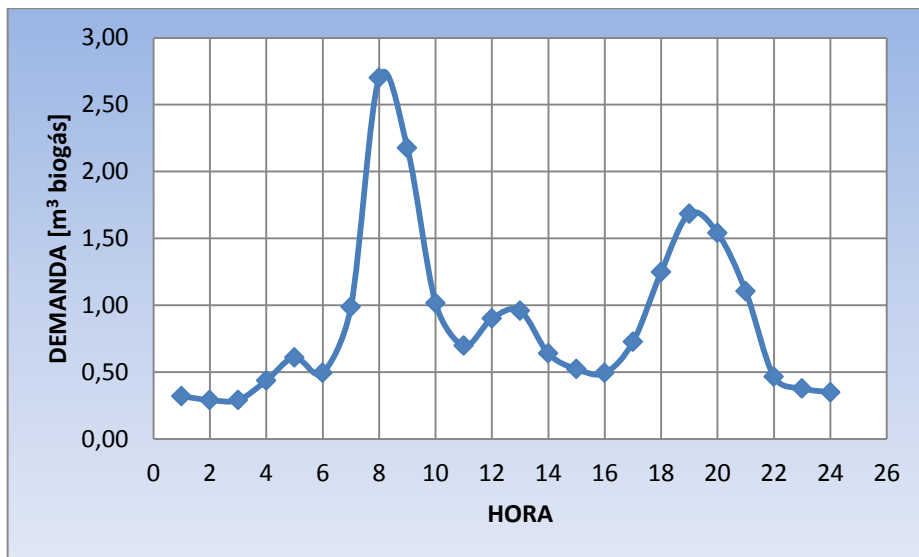
Se seleccionará una celda de combustible tipo SOFC debido a las ventajas que estas ofrecen al utilizar biogás como fuente de combustible, no siendo necesario una etapa previa de reformado del biogás. Estas celdas han demostrado eficiencias cercanas al 45%⁸, por lo tanto, la potencia que se debe garantizar a la entrada de la celda de combustible es igual a la potencia de salida (demanda diaria) dividida entre la eficiencia, esto es

⁸ La eficiencia puede aumentar hasta un 80% con cogeneración.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \rightarrow P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{P_{out}}{0,45} \quad (28)$$

El biogás tiene dentro de sus propiedades un contenido energético igual a 6 kWh/m³, de acuerdo con la tabla 5. Esta relación permite convertir la curva de demanda diaria de kWh a m³ de biogás (figura 30).

Figura 30. Curva de demanda diaria en m³ de biogás (Entrada de la celda)



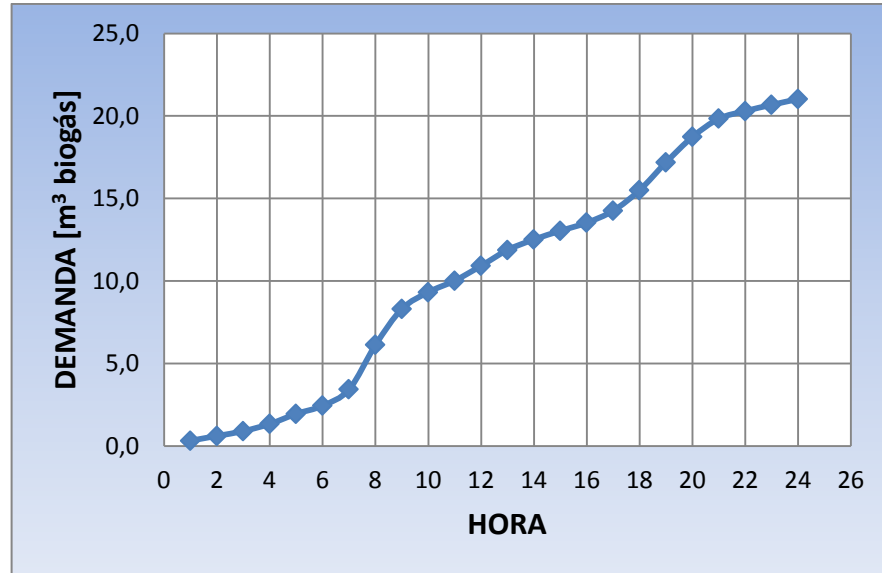
Fuente: Los autores

La demanda diaria de biogás para generar la energía eléctrica estimada de las cinco familias de la población rural de la India, Santander, es igual al área bajo la curva de la figura 30. Ésta área es aproximadamente igual a la demanda acumulada por horas durante el día. La figura 31 muestra la curva acumulada durante el día en m³ de biogás.

De acuerdo con la figura 31, el combustible mínimo diario requerido para satisfacer la demanda diaria de energía eléctrica de las cinco familias adscritas al corregimiento de la India en Santander (Colombia) es igual a

$$PG = 21,02 \text{ m}^3 \text{ biogás/día}$$

Figura 31. Curva de demanda acumulada durante el día en m³ de biogás



Fuente: Los autores

Este cálculo se puede observar con más detalle en la tabla 19 en donde se especifican los datos utilizados para obtener las curvas de demanda diaria.

4.1.4.2 Combustible para energía térmica. De acuerdo con la Unidad de planeación minero energética (UPME), el consumo de biogás de una estufa de un fogón es de 0,15 a 0,2 m³/h de biogás (tabla 9).

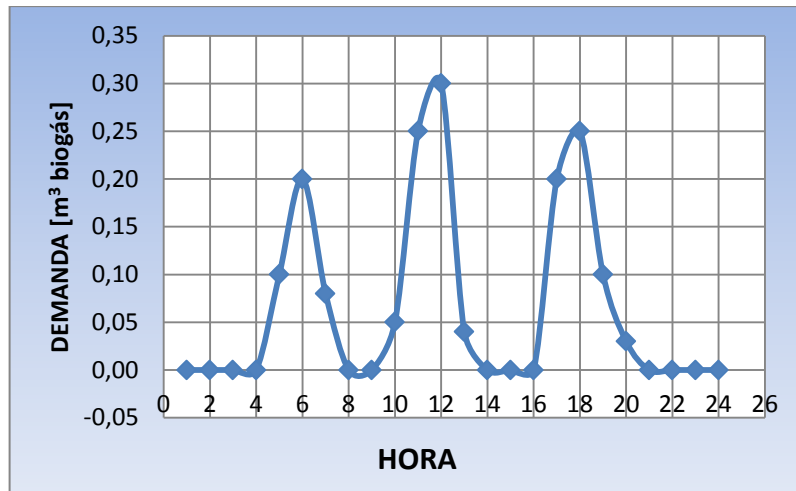
Teniendo en cuenta el consumo de biogás en una vivienda familiar, el contenido energético del biogás en comparación con el gas natural y las características propias de las familias campesinas, se estimó una curva de demanda diaria de biogás para una familia del sector rural. Ésta curva se puede ver en la figura 32.

Tabla 19. Demanda de energía por hora

HORA	DEMANDA PROMEDIO HORA [p.u]	DEMANDA SALIDA PROMEDIO HORA [kW]	DEMANDA ENTRADA PROMEDIO HORA [kW]	DEMANDA ENTRADA PROMEDIO HORA [m ³ biogás]	DEMANDA ENTRADA ACUMULADA DIA [m ³ biogás]
1	0,11	0,8624	1,9164	0,3194	0,3194
2	0,10	0,7840	1,7422	0,2904	0,6098
3	0,10	0,7840	1,7422	0,2904	0,9001
4	0,15	1,1760	2,6133	0,4356	1,3357
5	0,21	1,6464	3,6587	0,6098	1,9455
6	0,17	1,3328	2,9618	0,4936	2,4391
7	0,34	2,6656	5,9236	0,9873	3,4264
8	0,93	7,2912	16,2027	2,7004	6,1268
9	0,75	5,8800	13,0667	2,1778	8,3046
10	0,35	2,7440	6,0978	1,0163	9,3209
11	0,24	1,8816	4,1813	0,6969	10,0178
12	0,31	2,4304	5,4009	0,9001	10,9179
13	0,33	2,5872	5,7493	0,9582	11,8761
14	0,22	1,7248	3,8329	0,6388	12,5150
15	0,18	1,4112	3,1360	0,5227	13,0376
16	0,17	1,3328	2,9618	0,4936	13,5313
17	0,25	1,9600	4,3556	0,7259	14,2572
18	0,43	3,3712	7,4916	1,2486	15,5058
19	0,58	4,5472	10,1049	1,6841	17,1899
20	0,53	4,1552	9,2338	1,5390	18,7289
21	0,38	2,9792	6,6204	1,1034	19,8323
22	0,16	1,2544	2,7876	0,4646	20,2969
23	0,13	1,0192	2,2649	0,3775	20,6744
24	0,12	0,9408	2,0907	0,3484	21,0228

Fuente: Los autores

Figura 32. Curva de demanda diaria de energía térmica



Fuente: Los autores

Al calcular la demanda acumulada de energía o el área bajo la curva, se obtiene que el consumo diario de biogás es aproximadamente de 1,6 m³/día por familia, lo cual es coherente con el consumo promedio de gas natural en una vivienda, teniendo en cuenta que el poder calorífico del biogás es menor que el del gas natural.

4.2 PLANTA DE BIOGÁS

El sistema de generación de energía eléctrica estará ubicado cerca al establo con mayor número de animales, es decir, el lugar seleccionado para instalar el biodigestor general para la generación de energía eléctrica es un lugar próximo al establo de la familia Ariza (figura 33), el cual alberga la mayor cantidad del censo vacuno con un promedio de 140 vacas al mes.

En primer lugar, se recogerá el estiércol del establo principal (familia Ariza). Los demás establos estarán disponibles para suplir la carencia de excretas cuando sea requerido. Para conocer cuándo será necesario recurrir a los establos vecinos, se instalará en el tanque de mezcla una marca indicando la cantidad diaria de

estiércol requerida para alimentar el biodigestor. Si dicha marca no se satisface con la materia orgánica producida en el establo de la familia Ariza, se dispondrá del estiércol de los otros establos.

Figura 33. Establo Familia Ariza



Fuente: Los autores

Para la recolección del estiércol se propone utilizar una pala que se arrastre a través de toda la superficie del establo. Como es un proyecto de beneficio comunitario, se propone crear dentro de la comunidad un grupo de trabajo para dividirse las obligaciones diarias para la operación y buen funcionamiento del biodigestor.

El estiércol recolectado se conducirá por canalización inclinada (por gravedad) hasta el tanque de mezcla aprovechando el desnivel. Esta canalización estará prevista de una malla en la entrada para tamizar con el fin de retener los sólidos mal digeridos por las vacas o pajas que se puedan colar.

Como ya se mencionó, el estiércol se almacenará en un tanque de mezcla para la homogenización con agua y trituración antes de ingresar al biodigestor. El tanque

de mezcla alimentará el biodigestor por tubería de cemento de gres de amplio diámetro para evitar atascos.

En el biodigestor se producirá biogás debido a la transformación de la materia orgánica por metanogénesis que realizan unas bacterias específicas. También se obtendrá un efluente con una carga de nitrógeno menor al contenido inicial, y con una composición adecuada para su uso como fertilizante o abono.

El biogás se extraerá y será conducido por tubería de pvc hasta su uso final, intercalando antes unos filtros para eliminar la humedad y absorber el ácido sulfhídrico.

El biogás será almacenado en un reservorio y de ahí será conducido hasta la celda de combustible tipo SOFC para la generación de energía eléctrica.

La electricidad se aprovechará en las cinco familias más cercanas al punto de generación y será de utilidad para mejorar la productividad de la región.

El biogás también se utilizará para la cocción de alimentos. Para ello se propone la instalación de biodigestores familiares tubulares de polietileno en cada una de las viviendas. Estos biodigestores estarán ubicados en un punto intermedio entre el establo y la vivienda para optimizar el proceso y su ejecución será de la misma manera como se especificó para el biodigestor general para la generación de energía eléctrica.

4.3 DISEÑO DEL BIODIGESTOR GENERAL

El biodigestor general es el biodigestor diseñado para producir la cantidad de combustible suficiente para generar la demanda de energía eléctrica de cinco

familias en el sector rural. En el capítulo anterior, se estimó esta cantidad de biogás igual a

$$PG = 21,02 \text{ m}^3 \text{ biogás/día}$$

En primer lugar, se debe calcular el número de reces necesario para producir esta demanda de biogás. La materia prima para la producción del biogás es el estiércol fresco. Se pueden considerar otro tipo de residuos orgánicos, pero en ningún caso residuos duros (con cáscara dura) o de larga duración de descomposición (como vísceras).

A continuación se utilizarán las fórmulas expuestas en el capítulo 3 para el diseño del biodigestor. Los valores y características del estiércol de vaca se toman de la tabla 15. Por lo tanto, se tienen: PE = 5%, PO = 4%, %EST = 15, %SO = 13, P = 0,25 m³/kg.

Despejando MPC de la ecuación (13) se puede obtener la materia prima para carga, así:

$$MPC = \frac{PG}{SO * P} = \frac{21,02}{0,13 * 0,25} = 646,77 \text{ kg/día}$$

De manera general, hay que calcular cuánto estiércol se dispone al día. Para ello hay que considerar el manejo del ganado que se realiza, ya que si es de pastoreo, el ganado duerme en la noche en un corral cercano a la vivienda, y solo se podrá recoger, aproximadamente, el 40% del estiércol producido por animal a lo largo del día [11]. En caso de ganado tabulado todo el día cerca de la vivienda, todo el estiércol producido está disponible para ser introducido en el biodigestor. Se recomienda usar el estiércol necesario para la producción de biogás requerida, y dejar el sobrante para los usos tradicionales de abonado de los cultivos.

$$MPC = E + O$$

Para efectos del presente proyecto no se tendrá en cuenta el orín del ganado ya que no es posible su recolección debido a que el ganado se encuentra en terreno destapado. Por lo tanto, la materia prima para carga es igual al estiércol diario recolectado, el cuál es igual al 40% de la producción total. Se tiene entonces que:

$$E = \frac{MPC}{0,4} = \frac{646,77}{0,4} = 1616,9 \text{ kg/día}$$

Figura 34. Materia prima para carga: estiércol



Fuente: Los autores

De la ecuación (1) se puede despejar el número de animales necesarios para producir la cantidad de biogás estimada.

$$NA = \frac{E}{PVP * \frac{PE}{100}} = \frac{1616,9}{400 * \frac{5}{100}} = 80,85 \text{ vacas}$$

De acuerdo a lo anterior, se necesitan 80,85 cabezas de ganado con un peso promedio de 400 kg/cu para generar el biogás suficiente que supla los requerimientos de energía eléctrica de las cinco familias.

De acuerdo con el censo de ganado de las cinco familias, se comprueba que la población a beneficiar cuenta con la biomasa suficiente para generar su propia demanda de energía.

Para la presente aplicación se decide tomar 86 cabezas de ganado para el diseño del biodigestor, considerando un pequeño porcentaje de error o un pequeño aumento en la demanda.

Figura 35.Ganado



Fuente: Los autores

4.3.1 Producción de biogás. A continuación se detallan los pasos para calcular la posible producción de biogás según la cantidad de biomasa producida por 86 cabezas de ganado con un peso promedio de 400 kg, siguiendo la metodología propuesta por la UPME, especificada en el capítulo 3.

$$\text{Producción de estiércol: } E = NA * PVP * \frac{PE}{100} = 86 * 400 * \frac{5}{100} = 1720 \text{ kg/día}$$

$$\text{Estiércol recolectado: } E' = E * 40\% = 1720 * 0,4 = 688 \text{ kg/día}$$

$$\text{Producción de orín: } O = NA * PVP * \frac{PO}{100} = 0$$

$$\text{Materia prima para carga: } MPC = E' + O = 688 + 0 = 688 \text{ kg/día}$$

$$MPC = 688 \text{ kg/día}$$

$$\text{Producción de biogás: } PG = MPC * SO * P = 688 * 0,13 * 0,25$$

$$PG = 22,36 \text{ m}^3/\text{día}$$

4.3.2 Volumen del biodigestor. El volumen del biodigestor lo determina el tiempo de retención y la carga diaria (mezcla de estiércol y agua).

$$\text{Porcentaje de sólidos totales: } \%ST = \frac{E' * \%EST}{MPC} = \frac{688 * 15}{688} = 15\%$$

$$\text{Sólidos totales: } ST = \frac{\%ST * MPC}{100} = \frac{15 * 688}{100} = 103,2 \text{ kg/día}$$

$$\text{Masa de agua: } MH_2O = 2 * MPC = 2 * 688 = 1376 \text{ litros/día}$$

$$MH_2O = 1376 \text{ litros/día}$$

$$\text{Carga diaria: } C = MPC + MH_2O = 688 + 1376$$

$$C = 2064 \text{ litros/día}$$

$$\text{Tiempo de retención: } TR = -51,227 * \ln(T^{\circ}C) + 206,72$$

$$TR = -51,227 * \ln(35^{\circ}C) + 206,72$$

$$TR = 24,6 \text{ días}$$

$$\text{Volumen del biodigestor: } V_d = C * TR * 1,2 = 2064 * 24,6 * 1,2 = 60929,28 \text{ litros}$$

$$V_d = 60,93 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen líquido: } V_L = V_d * 80\% = 60,93 * 80\% = 48,74 \text{ m}^3$$

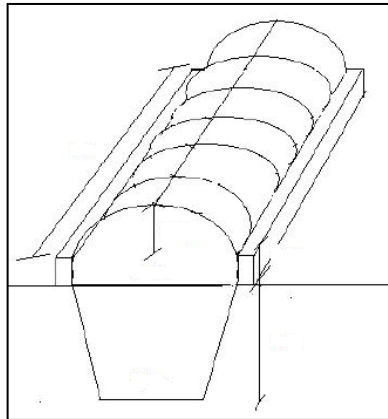
$$\text{Volumen gaseoso: } V_G = V_d * 20\% = 60,93 * 20\% = 12,19 \text{ m}^3$$

4.3.3 Dimensionamiento del biodigestor. De acuerdo a los diferentes tipos de biodigestores y según los criterios de evaluación de la tecnología pertinente (tabla 16), se determinó que el biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno (figura 36), es el más adecuado para ser implementado y satisfacer el propósito de la presente aplicación. Este biodigestor consiste en un tanque de almacenamiento tradicional de piedra, cemento y ladrillo y una cúpula de polietileno semiesférica donde se almacena el biogás. En la figura 36 se muestra el esquema general de este tipo de biodigestor.

Las dimensiones a determinar son la longitud, la altura y los anchos superior e inferior de la zanja que cumplan con el volumen líquido del biodigestor y la correspondiente longitud de la cúpula de polietileno para el almacenamiento del biogás.

Como la zanja presenta dos anchos diferentes a y b, se toma el promedio de los anchos como el diámetro de la zanja:

Figura 36. Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno



Fuente: Los autores

$$d = \frac{(a + b)}{2}$$

Para la presente aplicación y por viabilidad del proyecto, el ancho superior no deberá ser superior a 2,5 metros. A continuación se muestran diferentes configuraciones posibles:

Tabla 20. Diferentes dimensiones de la zanja

a	b	d
2,5	2	2,25
2	1,6	1,8
1,5	1,2	1,35
1	0,8	0,9

Fuente: Los autores

De la ecuación (16) se puede calcular la longitud del biodigestor según los diferentes anchos promedios de la zanja (d) mostrados en la tabla 20 para diferentes alturas, de manera que se cumpla la relación óptima L/d (ecuación 21).

$$L = \frac{V_L}{d * h}$$

En la tabla 21 se detallan las diferentes configuraciones posibles que cumplen con el volumen líquido del biodigestor

Tabla 21. Posibles dimensiones de la zanja

VL (m ³)	h (m)	d (m)	L (m)	L/d
49	1	2,25	21,78	9,68
49	1	1,8	27,22	15,12
49	1	1,35	36,3	26,89
49	1	0,9	54,44	60,49
49	1,2	2,25	18,15	8,07
49	1,2	1,8	22,69	12,6
49	1,2	1,35	30,25	22,41
49	1,2	0,9	45,37	50,41
49	1,5	2,25	14,52	6,45
49	1,5	1,8	18,15	10,08
49	1,5	1,35	24,2	17,92
49	1,5	0,9	36,3	40,33

Fuente: Los autores

De acuerdo con la tabla 21, se encuentran tres configuraciones posibles que cumplen con la relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor, siendo la más óptima (L/d = 6,45) la referente a una altura de 1,5 m, un diámetro promedio de la zanja de 2,25 m (a=2,5 m y b=2 m) y una longitud del biodigestor de 14,52 m.

El volumen gaseoso del biodigestor fue calculado en 12,19 m³. De las dimensiones de la zanja se tiene una longitud de 14,52 m y un radio del semieje mayor igual a la mitad del ancho superior de la zanja, esto es 1,25 m. Por lo tanto, despejando s (radio del semieje menor) de la ecuación (17), se tiene:

$$s = \frac{2 * V_G}{\pi * r * L} = \frac{2 * 12,19}{\pi * 1,25 * 14,52} = 0,4276 \text{ m}$$

Ahora es necesario calcular el perímetro de la cúpula de polietileno, es decir, el ancho del plástico de polietileno que formará la cúpula del biodigestor en donde se almacena el biogás producido. Este ancho es igual a la mitad del perímetro total de una elipse, ecuación (20)

$$p = \pi \sqrt{\frac{1,25^2 + 0,4276^2}{2}} = 2,9348 \text{ m}$$

4.3.4 Tanque de mezcla. El tanque de mezcla debe tener mínimo la capacidad para almacenar el volumen de carga diaria del biodigestor, el cual fue calculado en $2,1 \text{ m}^3$. Por lo tanto, utilizando la ecuación (22), se tiene

$$r = h = \sqrt[3]{\frac{V_{TM}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{2,1}{\pi}} = 0,8743 \text{ m}$$

$$d = 2 * r = 2 * 0,8743 = 1,7487 \text{ m}$$

4.3.5 Reservorio de biogás. El reservorio va a ser el tanque de almacenamiento de biogás y va a servir para aumentar la presión en caso de que ésta descienda. Debe estar colgado bajo techo para protegerlo de la intemperie y de daños físicos.

El volumen del reservorio (V_{RG}) se diseña con la capacidad de almacenar la producción diaria de biogás. De esta manera se pretende garantizar la continuidad en el suministro de biogás a la celda de combustible en caso de mantenimiento o fallas del biodigestor.

$$V_{RG} = PG = 22,5 \text{ m}^3$$

El reservorio se construye con una bolsa tubular de polietileno, la cual debe tener como mínimo las siguientes dimensiones para cumplir con el volumen especificado.

Tabla 22. Dimensiones del reservorio

Ancho del rollo (m)	Radio (m)	Diámetro (m)	Sección eficaz (m ²)	Longitud reservorio (m)
2,5	0,8	1,6	2,01	11,2

Fuente: Los autores

Figura 37. Reservorio de biogás



Fuente: Tomado de [23]

4.4 DISEÑO DEL BIODIGESTOR FAMILIAR PARA ENERGÍA TÉRMICA

Por efectos prácticos, se optó por diseñar un biodigestor familiar tipo balón de plástico o de estructura flexible para cada familia. De esta manera, cada familia

contará con un biodigestor pequeño tubular cercano a la vivienda para satisfacer sus necesidades propias de energía térmica.

El combustible necesario para cada familia se estimó en 1,6 m³ de biogás (sección 4.3.2). El método de diseño es el mismo que se utilizó en el diseño del biodigestor general para la generación de la energía eléctrica. Por lo tanto,

$$\text{Materia prima para carga: } MPC = \frac{PG}{SO * P} = \frac{1,6}{0,13 * 0,25} = 49,231 \text{ kg/día}$$

$$\text{Estiércol recolectado: } E' = \frac{MPC}{0,4} = \frac{49,231}{0,4} = 123,08 \text{ kg/día}$$

$$\text{Número de reces: } NA = \frac{E}{PVP * \frac{PE}{100}} = \frac{123,08}{400 * \frac{5}{100}} = 6,15 \text{ vacas}$$

$$\text{Masa de agua: } MH_2O = MPC * 2 = 49,231 * 2 = 98,462 \text{ litros/día}$$

$$\text{Carga diaria: } C = MPC + MH_2O = 49,231 + 98,462 = 147,69 \text{ litros/día}$$

$$\text{Volumen del biodigestor: } Vd = C * TR * 1,2 = 147,69 * 24,6 * 1,2 = 4359,9 \text{ litros}$$

$$V_d \approx 4,5 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, se necesitan aproximadamente 7 vacas por familia, con un peso promedio de 400 kg cada una para satisfacer los requerimientos de energía térmica de cada vivienda rural estimada en 1,6 m³ de biogás al día.

Dimensiones del biodigestor. Para la construcción de biodigestores tubulares, es la forma del plástico, la que permite hacer una cámara hermética. El ancho del

rollo determina el diámetro y radio del biodigestor. En la tabla 23 se detallan los anchos más comunes en el mercado.

El biodigestor es un tubo de plástico amarrado por ambos extremos a una entrada y una salida. El volumen total de este tubo equivale al volumen de un cilindro, ecuación (14). De acuerdo con esta ecuación se puede calcular la longitud del biodigestor para cada uno de los anchos disponibles y escoger la configuración que más se acerque a la relación L/d recomendada. En la tabla 24 se puede detallar todas las configuraciones posibles.

Tabla 23. Parámetros según el ancho del rollo

Ancho del rollo (m)	Perímetro de la circunferencia (m)	Radio (m)	Diámetro (m)
1	2	0,32	0,64
1,25	2,5	0,4	0,8
1,5	3	0,48	0,96
1,75	3,5	0,56	1,12
2	4	0,64	1,28

Fuente: Tomado de [13]

$$L = \frac{V_d}{\pi * r^2}$$

Tabla 24. Longitud del biodigestor según el ancho del rollo

Ancho del rollo (m)	Radio (m)	Diámetro (m)	Sección eficaz (m ²)	Volumen biodigestor (m ³)	Longitud del biodigestor (m)	Relación L/d
1	0,32	0,64	0,322	4,5	13,98	21,84
1,25	0,4	0,8	0,503	4,5	8,95	11,18
1,5	0,48	0,96	0,724	4,5	6,22	6,47
1,75	0,56	1,12	0,985	4,5	4,57	4,08
2	0,64	1,28	1,287	4,5	3,50	2,73

Fuente: Los autores

Como se puede observar en la tabla 24 las dimensiones del biodigestor tubular más óptimo ($L/d=6,47$) para ésta aplicación son: longitud de 6,22 m y un diámetro de la sección tubular del biodigestor igual a 0,96 m.

Para instalar el biodigestor plástico se necesita previamente excavar una fosa en suelo firme. Dicha fosa sirve de aislante térmico, de protección y sostén del biodigestor, evitando así que las paredes se derrumben [13]. Antes de instalar el biodigestor, se recomienda poner en el interior de la fosa una cubierta de plástico negro de polietileno, para aumentar la seguridad de que la superficie esté completamente lisa, evitando con ello posibles daños del tubo plástico y garantizando una mayor vida útil del mismo (figura 38) [13].

La zanja mencionada anteriormente debe tener una inclinación de 1% desde la entrada al biodigestor hasta la salida del mismo. Sus dimensiones para albergar adecuadamente al biodigestor seleccionado son: longitud = 6,4 metros, ancho superior de la zanja = 0,7 metros, ancho inferior de la zanja = 0,5 metros y altura = 0,8 metros.

Figura 38. Zanja del biodigestor de polietileno



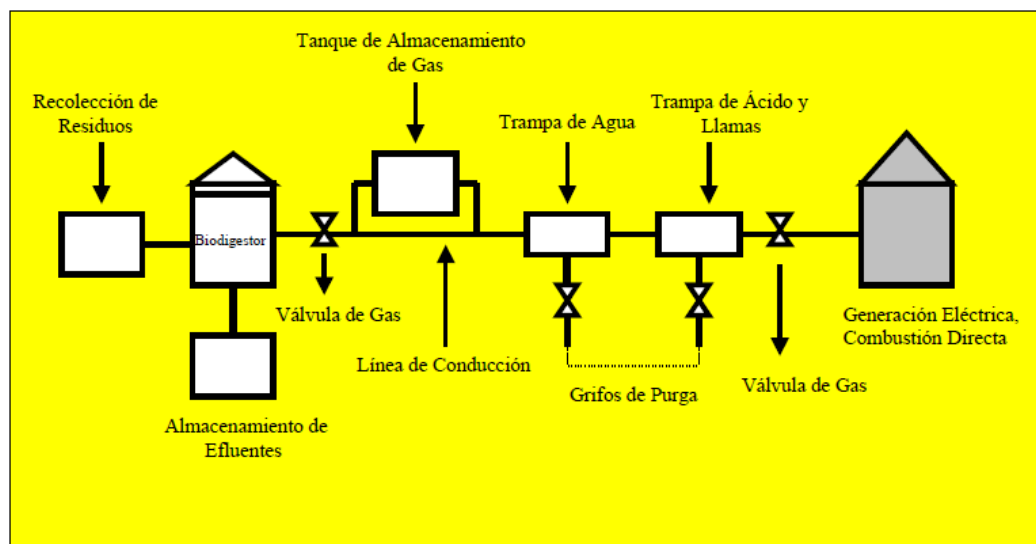
Fuente: Tomado de [23]

4.5 CONDUCCION Y ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS

El sistema de conducción de gas remueve el biogás desde el digestor y lo transporta hacia su uso final. Éste debe ser seguro, económico y deberá permitir un flujo de biogás apto para el equipo que lo consumirá.

La etapa de limpieza/condicionamiento del biogás tiene por objeto la eliminación de sus impurezas, fundamentalmente H_2S . La figura 39 muestra una línea de conducción para una instalación típica, ésta incluye: tuberías, elementos de conexión, válvulas de gas, trampas de ácido sulfhídrico y trampas de agua.

Figura 39. Esquema típico de una línea de conducción de gas



Fuente: Tomado de [6]

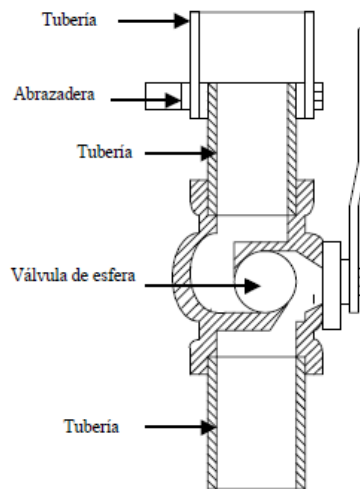
4.5.1 Tubería. Las plantas de biogás utilizan tubería de polietileno, PVC, debido a que este material no es afectado por el ácido sulfhídrico. La línea de conducción irá preferiblemente enterrada o recubierta para evitar el deterioro por la luz solar. La conexión de la tubería a cada elemento se realiza mediante adaptadores y terminales en PVC según norma NTC 1746 [6]. El diámetro de la tubería que

transporta el biogás depende del flujo de biogás requerido y la distancia que tendrá que recorrer.

Para el diseño de las tuberías hay que tener en cuenta: disminuir la cantidad de tubos y codos usados, colocar como mínimo una válvula de seguridad y nunca instalar tubos en horizontal, siempre en pendiente para resolver problemas de condensación del agua en las tuberías.

4.5.2 Válvulas de gas. Se utilizan mínimo dos válvulas para gas. La primera o principal irá instalada inmediatamente después del biodigestor, al comienzo de la conducción y sobre el niple de salida. La segunda se monta al final de la línea, en el lugar de uso. Estas válvulas, cuyo tamaño debe ser compatible con el diámetro de la tubería, deberán estar construidas en acero inoxidable, polietileno o PVC para evitar la corrosión por el ácido sulfhídrico [6].

Figura 40. Válvulas para gas



Fuente: Tomado de [6]

4.5.3 Válvula de seguridad. A la salida de la conducción de biogás, después de la primera llave de bola, se coloca una "T", de manera que el biogás pueda seguir fluyendo hacia la cocina, pero a la tercera salida de la "T" se le une una pieza de

tubería que se introduce en una botella llena de agua. La tubería debe quedar sumergida en el agua de 8 a 13 cm, dependiendo de la altura sobre el nivel del mar del lugar y la distancia a la cocina. Cuanta mayor altura, menor presión se necesita, y menos tiene que estar sumergido el tubo en el agua. Cuanta mayor distancia a la cocina mayor presión se necesita y más sumergido ha de estar el tubo. Para determinar la presión idónea es necesario ir realizando pruebas de la combustión de biogás en la cocina hasta que el usuario éste conforme [21].

La válvula de seguridad permite al gas escaparse al aire cuando la presión del digester llega a un valor límite, el equivalente a la columna de agua que sumerge el tubo (10 cm de columna de agua = 10 mbar = 0,98 kPa) [21].

Figura 41. Válvula de seguridad

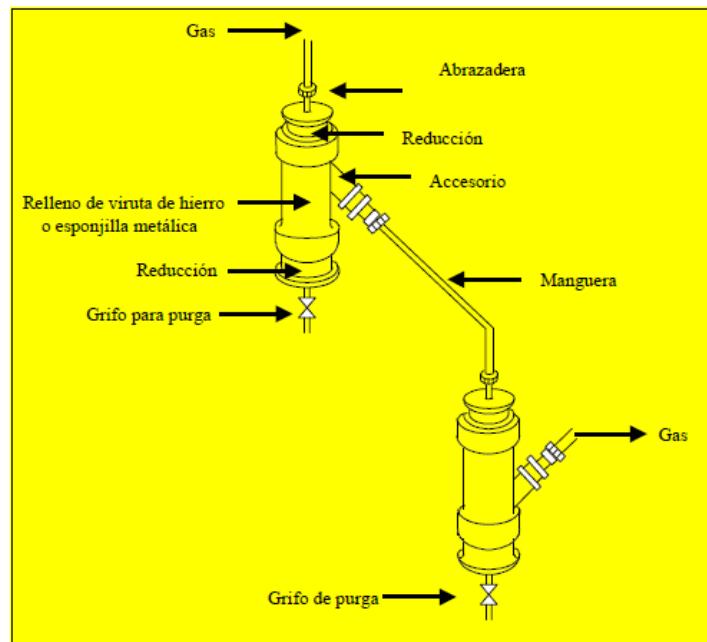


Fuente: Tomado de [21]

4.5.4 Trampas de ácido sulfhídrico. Están constituidas por un recipiente relleno con material de hierro finamente dividido formando un lecho poroso a través del cual debe circular el gas, para que el H_2S reaccione con el metal y se deposite en

el lecho. La condición de porosidad se alcanza utilizando como relleno virutas de hierro o esponjillas metálicas de cocina. Estos materiales tienen la ventaja de ser de bajo costo y de oponer poca resistencia al flujo de gas, aspecto importante en razón de las bajas presiones que se manejan en este tipo de sistemas. La forma del recipiente y las características del material utilizado para su construcción dependen del gusto del propietario de la planta. El único requisito es el de que sean completamente herméticos para evitar fugas de gas [6].

Figura 42. Accesorios para la purificación de gas



Fuente: Tomado de [6]

4.5.5 Trampas de agua. El biogás que se produce en el biodigestor es un gas saturado en vapor de agua. El gas al ser transportado en las tuberías se enfría a temperatura ambiente y se condensa en agua contenido en él [16].

El agua arrastrada por el gas se separa cuando la corriente encuentra en su trayectoria una expansión brusca y una contracción posterior. Para lograr este propósito será suficiente instalar sobre la línea un accesorio idéntico a las trampas

de sulfhídrico, con la diferencia de que no se necesitará el relleno de material de hierro. Las trampas están provistas de un grifo de purga por donde se debe evacuar periódicamente el agua depositada en el fondo [6].

4.6 RESULTADOS DE DISEÑO

Los resultados más relevantes en el diseño y dimensionamiento de los biodigestores se pueden detallar en las tablas 25, 26 y 27.

Tabla 25. Resultados de diseño – biodigestores

Nombre del biodigestor	General	Familiar
Ubicación (cercano a)	Familia Ariza	Cada familia
Temperatura promedio	35 °C	35 °C
Tiempo de retención	24 días	24 días
Materia prima para carga	688 kg/día	49,231 kg/día
Agua	1376 litros/día	98,462 litros/día
Volumen del biodigestor	61 m ³	4,5 m ³
Producción de biogás	22,36 m ³ /día	1,6 m ³ /día

Fuente: Los autores

Tabla 26. Resultados de diseño – Dimensiones tanque de alimentación (mezcla)

Biodigestor	General	Familiar
Forma	Cilíndrica	Rectangular
volumen del tanque	2,1 m ³	0,216 m ³
Diámetro	1,75 m	-
Altura	0,87 m	0,6 m
Ancho	-	0,6 m
Largo	-	0,6 m

Fuente: Los autores

Tabla 27. Resultados de diseño – dimensiones biodigestores

Biodigestor		General	Familiar
Unidades		1	5
Tipo		Tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno	Tubular de polietileno (estructura flexible)
Volumen	Líquido	48,74 m ³	3,6 m ³
	Gaseoso	12,19 m ³	0,9 m ³
Zanja	Ancho sup.	2,5 m	0,7 m
	Ancho inf.	2 m	0,5 m
	Altura	1,5 m	0,8 m
	Longitud	14,52 m	6,4 m
Altura cúpula de polietileno		0,43 m	-
Diámetro sección transversal tubular		-	0,46 m

Fuente: Los autores

4.7 PLANOS

En las figuras A-1 y A-2 del anexo A se presentan los planos en donde se detallan los cortes principales de cada biodigestor.

4.8 SELECCIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

La celda de combustible tipo SOFC tiene dentro de sus ventajas una alta tolerancia a diferentes combustibles, no siendo necesario una etapa previa de reformado del biogás. Por ese motivo, este tipo de celda se selecciona como el más apropiado para la presente aplicación.

La celda de combustible deberá tener una capacidad de generar la demanda máxima de energía de las cinco familias a beneficiar, esta demanda fue estimada en 8711,1 VA. A continuación se especifican los datos técnicos de la celda de combustible seleccionada, tomados del data sheet # 99-0025 Rev 3. de Acumetrics (Advanced Power & Energy Technologies).

Especificaciones técnicas celda de combustible

- **Referencia:** CP-SOFC-10000 *10 kWatt Solid Oxid Fuel Cell Power Plant*

- **Salida eléctrica:**
Salida de potencia SOFC: 10 kW /10 kVA
Tensión de Salida: 208/120 V_{AC} trifásico tetrafilar
Sobrecarga (3 seg): 52 amps
Tiempo de arranque: calentamiento entre 10 a 30 minutos antes de la potencia disponible.
Interruptores de salida: tripolar

- **Entrada de combustible:**
Tipos de combustible: gas natural, biogás, metano (estándar), propano, etanol, metanol e hidrogeno (opcional).
Presión de entrada: 7-14 pulgadas de columna de agua (0,25-0,50 psig)
Tamaño de la tubería de entrada: ¾ pulgada

- **Co-generación:**
Recuperación del calor residual: ~4,000 Watts

- **Características físicas:**
Tamaño: 68” largo x 36” ancho x 72” alto [1,727 (m) x 0,9144 (m) x 1,829 (m)]
Peso: < 1,500 lbs

Caja: NEMA 3R, Forest Green, bloque de puertas extraíbles
Montaje: Montados en tierra, base de concreto o compuestos.

- **Medio ambiente:**

Temperatura de operación: -20 hasta 120 °F

Altitud: 0-5000 ft (operando), 0-40,000 ft (no operando)

Ruido acústico: 65 dBA a 3 ft

- **Mantenimiento:**

Filtro de entrada de agua: Inspeccionar y limpiar anualmente o según condiciones de garantía.

Filtro de sulfuro: Reemplazar cada 9000 horas de operación (puede ser con más frecuencia en combustibles opcionales).

- **Garantía:**

Limitado a un año de garantía.

4.9 COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE CELDA DE COMBUSTIBLE CON MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

La utilización de biogás en un motor de combustión interna fue estudiada por el ingeniero Electricista de la universidad industrial de Santander, Erick Martínez Ortega en su tesis de grado “Estudio de factibilidad de uso racional y eficiente de la materia prima no tradicional del sector avícola para la generación de energía eléctrica”.

Según esa aplicación y de acuerdo con las características de una granja avícola y partiendo de que con 1 kg de paja con cascara de arroz se producen 0,049 m³ de biogás, se calculó que la demanda de energía eléctrica de la granja de 25000 pollos es aproximadamente 26 kWh. Para producir el biogás suficiente se

optó por seleccionar un biodigestor de 15 m³, con una longitud de 6 m y una profundidad de 1,2 m. Se determinó, también, que este biodigestor tendrá un consumo de 265,30 kg de pollinaza diaria [7].

El equipo seleccionado para la generación de energía a partir de biogás fue un motor de combustión interna con las siguientes características.

Tabla 28. Especificaciones técnicas generador

GENERADOR	
MODELO	BENASQUE 5500 W 230 V
Tipo Alternador	Síncrono, escobillas y regulador
Modelo Alternador	5GA400
Frecuencia	50 o 60 Hz
Voltaje	230/400V
Potencia Nominal AC	5000W
Modelo	SG130E
Tipo Motor	4 Tiempos, OHV, Refrigerado por Aire
Nivel de Ruido	79dB
Arranque	Manual/Eléctrico
Dimensiones	75cm x 59cm x 60cm

Fuente: Tomado de [7]

En la tabla 29 se podrá encontrar una comparación básica entre la celda de combustible tipo SOFC y el motor de combustión interna.

Tabla 29. Comparación entre el generador y la celda de combustible

CONSIDERACIONES	MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA	CELDA DE COMBUSTIBLE SOFC
Eficiencia	35 - 45 %	40 - 60 %
Precio	\$ 4.500.000,00	\$ 34.500.000,00

Fuente: Los autores

Los motores tienen dificultades para la operación con biogás cuando este tenga bajas concentraciones de metano (menores al 60%), también se tienen considerables pérdidas cuando este trabaja a baja potencia y las perdidas del gas se van directamente a la atmosfera.

En comparación, la celda de combustible es más eficiente, no contamina y promete mejores avances en cogeneración, la desventaja es el elevado costo pero el desarrollo y aplicación de la tecnología reducirán el costo considerablemente.

5. DISEÑO RED DE DISTRIBUCIÓN

El presente capítulo presenta el diseño eléctrico de la red de distribución rural en baja tensión a una tensión de línea de 208 V con una capacidad de distribución igual a la demanda máxima. La red se diseña cumpliendo con las especificaciones técnicas de la Norma para el cálculo y diseño de sistemas de distribución de la electrificadora de Santander (ESSA).

5.1 MEMORIA DE CÁLCULO

En la tabla 30 se especifican los parámetros básicos necesarios para el diseño de la una red de distribución. Los correspondientes valores de demanda máxima de cada vivienda fueron obtenidos en el capítulo 4 (sección 4.2).

Tabla 30. Parámetros básicos de diseño

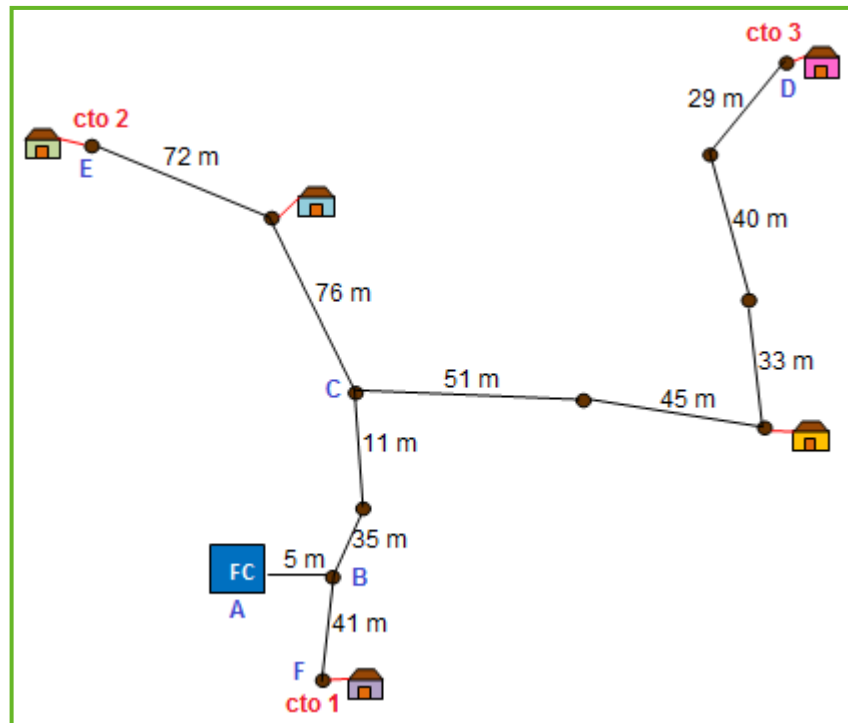
Sector	Rural
Estrato socio económico	1 - 2
Demanda máxima [kVA]	
Familia Ariza	2,885
Familia Escobar	2,725
Familia Churco Méndez	2,885
Familia Saldarriaga	2,565
Familia Grajales Agudelo	3,205
Nivel de tensión [V]	208/120
Regulación	7%
Factor de potencia	0,9

Fuente: Los autores

Acorde con la distribución de las cinco viviendas del sector rural del corregimiento la India en Santander y la ubicación del sistema de generación de energía

eléctrica, en la figura 43 se muestra el diagrama topológico de la red en donde se especifican las longitudes, el número de circuitos, los apoyos y el número de usuarios.

Figura 43. Diagrama topológico



Fuente: Los autores

Por cuestiones de diseño y para balancear el sistema, se decide que la alimentación para cada familia será bifásica trifilar. En consecuencia, las cinco familias podrán utilizar tanto equipos monofásicos como bifásicos.

5.1.1 Cálculo tipo. Todos los cálculos se hacen basados en la Norma Técnica Colombiana NTC 2050.

Momentos:

$$M_{AB} = (2,885 * 5) + (11,38 * 5) = 71,325 \text{ kVA} * m$$

$$M_{BC} = (5,61 * 46) + (5,77 * 46) = 523,48 \text{ kVA} * m$$

$$M_{CD} = (3,205 * 96) + (2,565 * 198) = 815,55 \text{ kVA} * m$$

$$M_{CE} = (2,725 * 76) + (2,885 * 148) = 634,08 \text{ kVA} * m$$

$$M_{BF} = (2,885 * 41) = 118,285 \text{ kVA} * m$$

$$\text{Circuito 1: } M_{AF} = M_{AB} + M_{BF} = 71,325 + 118,285 = 189,61 \text{ kVA} * m$$

$$\text{Circuito 2: } M_{AE} = M_{AB} + M_{BC} + M_{CE} = 1228,9 \text{ kVA} * m$$

$$\text{Circuito 3: } M_{AD} = M_{AB} + M_{BC} + M_{CD} = 1410,4 \text{ kVA} * m$$

El circuito 3 es el circuito con mayor momento.

Teniendo como guía la Norma para cálculo y diseño de sistemas de distribución de la ESSA se pueden obtener algunos datos importantes para el diseño: el factor de corrección f_c es igual a 1 para una red trifásica tetrafilar (para otros tipos de red ver tabla 3.26 de la ESSA) y el porcentaje de regulación admitido en redes de distribución, B.T., zona rural, es igual al 7% (ver tabla 2.3 de la ESSA). Por lo tanto, el valor de K_G , el cuál interesa conocer para determinar el calibre del conductor, es:

$$K_G = \frac{\delta\% * V_L^2}{f_c * M_{AD}} = \frac{7 * 208^2}{1 * 1410,4} = 214,72$$

De la tabla 3.22 para el sector urbano y 3.23 para el sector rural de la ESSA, el conductor que tiene una constante de regulación, K_G , menor o igual a la obtenida para un factor de potencia de 0,9 es:

calibre # 4 AWG $\rightarrow K_G = 158,08$

Los tramos A-B y B-C son tramos trifásicos tetrafilares, sin embargo, el tramo C-D se decide mandar bifásico. Por lo tanto, el calibre óptimo para este último tramo se puede obtener de la siguiente manera:

$$\delta\% = \frac{f_c * K_G}{V_L^2} * M$$

$$\delta_{AB}\% = \frac{f_c * K_G}{V_L^2} * M_{AB} = \frac{1 * 158,08}{208^2} * 71,325 = 0,26\%$$

$$\delta_{BC}\% = \frac{f_c * K_G}{V_L^2} * M_{AC} = \frac{1 * 158,08}{208^2} * 523,48 = 1,91\%$$

$$\delta_{CD}\% = \delta\% - \delta_{AB}\% - \delta_{BC}\% = 7 - 0,26 - 1,91 = 4,83$$

Para una red bifásica tetrafilar el factor de corrección es 2,25. Por lo tanto:

$$K_G = \frac{\delta_{CD}\% * V_L^2}{f_c * M_{CD}} = \frac{4,83 * 208^2}{2,25 * 815,55} = 113,88$$

El conductor que presenta un K_G menor o igual al obtenido es:

calibre # 2 AWG $\rightarrow K_G = 108,45$

$$\delta_{CD}\% = \frac{f_c * K_G}{V_L^2} * M_{CD} = \frac{2,25 * 108,45}{208^2} * 815,55 = 4,6\%$$

$$\delta_{AD}\% = \delta_{AB}\% + \delta_{BC}\% + \delta_{CD}\% = 0,26 + 1,91 + 4,6 = 6,77\%$$

Corriente trifásica tetrafilar:

$$\text{Tramo AB: } I_{3\phi} = \frac{D_{max} * 1000}{\sqrt{3} * V_L} = \frac{14,265 * 1000}{\sqrt{3} * 208} = 39,6 \text{ A}$$

$$\text{Tramo BC: } I_{3\phi} = \frac{D_{max} * 1000}{\sqrt{3} * V_L} = \frac{11,38 * 1000}{\sqrt{3} * 208} = 31,59 \text{ A}$$

Corriente bifásica trifilar:

$$\text{Tramo CD: } I_{2\phi} = \frac{D_{max} * 1000}{2 * V_L} = \frac{5,77 * 1000}{2 * 208} = 13,87 \text{ A}$$

El mismo procedimiento es empleado para calcular los conductores de los tramos finales de los circuitos 1 y 2. En la tabla 31, 32 y 33 se especifican todos estos resultados.

Tabla 31. Matriz de cálculo de la red de distribución – circuito 3

	Circuito 3		
Tramo	A-B	B-C	C-D
Longitud [m]	5	46	198
Demanda máx [kVA]	14,265	11,38	5,77
Momento [kVA*m]	71,33	523,48	815,55
Momento total [kVA*m]	1410,36		
Constante de regulación K_G	214,73		
Calibre del conductor AWG	# 4	# 4	# 2
Constante de regulación K_G	158,08	158,08	108,45
Regulación por tramo %	0,26	1,91	4,60
Regulación total%	6,77		
Corriente [A]	39,60	31,59	13,87

Fuente: Los autores

Tabla 32. Matriz de cálculo de la red de distribución – circuito 2

	Circuito 2		
Tramo	A-B	B-C	C-E
Longitud [m]	5	46	148
Demanda máx [kVA]	14,265	11,38	5,61
Momento [kVA*m]	71,33	523,48	634,08
Momento total [kVA*m]	1228,89		
Constante de regulación K_G	246,44		
Calibre del conductor AWG	# 4	# 4	# 2
Constante de regulación K_G	158,08	158,08	108,45
Regulación por tramo %	0,26	1,91	3,58
Regulación total%	5,75		
Corriente [A]	39,60	31,59	13,48

Fuente: Los autores

Tabla 33. Matriz de cálculo de la red de distribución – circuito 1

	Circuito 1	
Tramo	A-B	B-F
Longitud [m]	5	41
Demanda máx [kVA]	14,265	2,885
Momento [kVA*m]	71,33	71,33
Momento total [kVA*m]	142,65	
Constante de regulación K_G	2123,01	
Calibre del conductor AWG	# 4	# 4
Constante de regulación K_G	158,08	158,08
Regulación por tramo %	0,26	0,59
Regulación total%	0,85	
Corriente [A]	39,60	6,935

Fuente: Los autores

Cada uno de los circuitos es alimentado por dos fases diferentes tratando, en lo posible, de mantener el sistema balanceado. La distribución de las fases se puede detallar en la tabla 34.

Tabla 34. Cuadro de cargas

FAMILIA	FASES		
	A	B	C
Ariza	X	X	
Escobar		X	X
Churco Méndez		X	X
Saldarriaga	X		X
Grajales Agudelo	X		X

Fuente: Los autores

5.1.2 Acometidas. Los conductores no deben tener una sección transversal menor a $8,36 \text{ mm}^2$ (8 AWG) si son de cobre o a $13,29 \text{ mm}^2$ (6 AWG) si son de aluminio o cobre revestido de aluminio, excepto para lo establecido en el artículo 230-23.b y 230-31.b, del Código Eléctrico Colombiano, NTC 2050 [20].

Tabla 35. Acometidas

USUARIO	D máx. [kVA]	Corriente [A]	Conductor Cu THW	Distancia [m]	Protección [A]
Familia Ariza	2,885	24,042	2*8+8	7	2 x 40
Familia Escobar	2,725	22,708	2*8+8	7	2 x 40
Familia Churco Méndez	2,885	24,042	2*8+8	7	2 x 40
Familia Saldarriaga	2,565	21,375	2*8+8	7	2 x 40
Familia Grajales Agudelo	3,205	26,708	2*8+8	7	2 x 40

Fuente: Los autores

6. EVALUACIÓN FINANCIERA

La tecnología del biogás presenta características propias que hacen complejo su análisis pues no sólo interviene en este caso el aspecto energético sino que también existe un importante impacto de difícil evaluación en sanidad, fertilización, mejoramiento de suelos, alimentación de animales y mejoramiento de las condiciones de vida [12].

Cabe mencionar que desde el punto de vista de la inversión inicial, la diversidad de modelos, sistemas y escalas empleadas de acuerdo al tipo de clima, sustrato, eficiencia requerida y disponibilidad de recursos técnicos y económicos, el análisis de este tipo de proyectos es particular de cada aplicación [12].

6.1 FACTORES A TENER EN CUENTA

Se analizarán los distintos factores intervinientes en las etapas críticas del sistema que tienen una significativa importancia en el análisis. Las etapas intervinientes en el sistema de generación de energía propuesto, son:

- Recolección del sustrato, transporte y acondicionamiento
- Digestión anaerobia
- Almacenaje del biogás, purificación y conducción
- Almacenamiento del efluente, adecuación y utilización
- Generación y distribución de energía eléctrica

En cada una de estas etapas intervienen factores económicos, técnicos y humanos distintos debiéndose analizar para cada tipo de explotación a fin de determinar la viabilidad del proceso en su conjunto.

El análisis preliminar de todo tipo de tecnología debe tomar como punto inicial el aspecto humano. En este tema entran a jugar la capacidad de la mano de obra, el tiempo disponible que se puede dedicar a la nueva actividad y la predisposición a realizarla [12].

Desde el punto de vista de la materia prima será necesario contar con un sistema de fácil recolección y manipulación.

Con respecto a los productos del sistema la correcta utilización tanto del biogás como del biofertilizante cobra significativa importancia pues será en definitiva la retribución a la inversión y trabajos realizados. Existen distintas alternativas que deberán ser cuidadosamente evaluadas comparativamente desde el punto de vista técnico, económico y social para realizar una correcta elección [12].

6.2 MATERIALES Y COSTOS DEL SISTEMA

En la presente sección se presenta la estimación de costos de inversión y de operación de los biodigestores propuestos, la celda de combustible y la red de distribución. Los precios de los materiales y mano de obra para los biodigestores fueron suministrados por la ferretería Agrotodo en el municipio de Cimitarra y para la red de distribución, los precios fueron tomados de Centelsa S.A y electroindustrial. Dichos costos pueden variar de un sitio a otro.

Los costos que se deberán considerar han sido clasificados teniendo en cuenta todos los pasos intervinientes en el sistema, desde la recolección del sustrato hasta la distribución de la energía.

6.2.1 Materiales y costos biodigestor general. En la tabla 36 se detallan los materiales necesarios para la construcción del biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.

Tabla 36. Materiales y costos biodigestor general

Cantidad	Materiales	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
550	Ladrillo de barro	unid.	\$ 750,00	\$ 412.500,00
15	Cemento gris 50 kg	unid.	\$ 20.000,00	\$ 300.000,00
3	Arena	m3	\$ 45.000,00	\$ 135.000,00
2	Pedrisco	m3	\$ 60.000,00	\$ 120.000,00
8	Varilla 6 mm de 6 m	unid.	\$ 6.000,00	\$ 48.000,00
30	Varilla 1/2 " de 6 m	unid.	\$ 12.000,00	\$ 360.000,00
3	Alambre dulce	kg	\$ 8.000,00	\$ 24.000,00
2	Tubo de cemento de gres 10-12"	unid.	\$ 13.000,00	\$ 26.000,00
13	Bolsa de polietileno	m	\$ 9.500,00	\$ 123.500,00
17	Plástico de polietileno	m	\$ 8.000,00	\$ 136.000,00
6	Adaptador macho 1 "	unid.	\$ 2.000,00	\$ 12.000,00
6	Adapto hembra 1 "	unid.	\$ 2.000,00	\$ 12.000,00
8	Abrazadera de cremallera	unid.	\$ 3.500,00	\$ 27.000,00
3	Niples 1"	unid.	\$ 1.500,00	\$ 4.500,00
5	Tubo de PVC 1" tipo pesado 3 m	unid.	\$ 4.000,00	\$ 20.000,00
2	Válvula de paso 1"	unid.	\$ 20.000,00	\$ 40.000,00
1/8	Pegante para PVC	galón	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
2	T de PVC 1"	unid.	\$ 3.000,00	\$ 6.000,00
1	Neumático usado	unid.	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00
1	lamina de acrílico	unid.	\$ 7.000,00	\$ 7.000,00
2	Recipiente transparente	unid.	\$ 2.000,00	\$ 4.000,00
1	Mano de obra	unid.	\$ 1.000.000,00	\$ 1.000.000,00
TOTAL				\$ 2.842.500,00

Fuente: Los autores

6.2.2 Materiales y costos biodigestor familiar. En la tabla 37 se detallan los materiales necesarios para la construcción del biodigestor de estructura flexible o balón de plástico.

Tabla 37. Materiales y costos biodigestor familiar

Cantidad	Materiales	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
120	Ladrillo de barro	unid.	\$ 500,00	\$ 60.000,00
3	Cemento gris 50 kg	unid.	\$ 20.000,00	\$ 60.000,00
2	Tubo de cemento de gres 10-12"	unid.	\$ 13.000,00	\$ 26.000,00
18	Bolsa de polietileno calibre 8	m	\$ 6.500,00	\$ 117.000,00
11	Plástico de polietileno calibre 8	m	\$ 6.000,00	\$ 66.000,00
6	Adaptador macho 1 "	unid.	\$ 2.000,00	\$ 12.000,00
6	Adaptador hembra 1 "	unid.	\$ 2.000,00	\$ 12.000,00
8	Abrazadera de cremallera	unid.	\$ 3.500,00	\$ 27.000,00
3	Niples 1"	unid.	\$ 1.500,00	\$ 4.500,00
5	Tubo de PVC 1" tipo pesado	m	\$ 4.000,00	\$ 20.000,00
2	Válvula de paso 1"	unid.	\$ 20.000,00	\$ 40.000,00
1/8	Pegante para PVC	galón	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
2	T de PVC 1"	unid.	\$ 3.000,00	\$ 6.000,00
1	Neumático usado	unid.	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00
1	Lamina de acrílico	unid.	\$ 7.000,00	\$ 7.000,00
2	Recipiente transparente	unid.	\$ 2.000,00	\$ 4.000,00
1	Mano de obra	unid.	\$ 300.000,00	\$ 300.000,00
TOTAL				\$ 786.500,00

Fuente: Los autores

6.2.3 Materiales y costos de la red de distribución de la energía eléctrica. A continuación se detallan los materiales y equipos usados para la distribución de la energía eléctrica (tabla 38).

Tabla 38. Materiales y costos red de distribución

Cant.	Materiales	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
235	Cable # 4 THW ACSR aislado	m	\$ 2.257,00	\$ 530.395,00
770	Cable # 2 THW ACSR aislado	m	\$ 3.371,00	\$ 2.595.670,00
11	Postes de madera 8 m 510 kg	unid.	\$ 120.000,00	\$ 1.320.000,00
120	Cable # 8 AWG cobre	m	\$ 3.505,00	\$ 420.600,00
92	Cable # 4 AWG ACSR desnudo	m	\$ 1.445,00	\$ 132.940,00
385	Cable # 2 AWG ACSR	m	\$ 2.160,00	\$ 831.600,00
10	Interruptor automático 1x40 A	unid.	\$ 9.000,00	\$ 90.000,00
3	perchas de 4 puestos de hierro forzado y galvanizado	unid.	\$ 25.000,00	\$ 75.000,00
8	perchas de 3 puestos de hierro forzado y galvanizado	unid.	\$20.000,00	\$ 160.000,00
11	pernos de máquina de 5/8" x 8"	unid.	\$ 6.000,00	\$ 66.000,00
22	Arandela cuadrada plana para perno de 16mm (5/8")	unid.	\$ 1.800,00	\$ 39.600,00
22	Arandela de presión para perno de 16mm (5/8")	unid.	\$ 2.400,00	\$ 52.800,00
15	Tensor para acometidas	unid.	\$ 1.500,00	\$ 22.500,00
36	Aislador tipo carrete	unid.	\$ 3.500,00	\$ 126.000,00
TOTAL				\$ 6.463.105,00

Fuente. Los autores

6.2.4 Costos de operación. Los costos de operación hacen referencia a los gastos diarios para el correcto funcionamiento del sistema, estos incluye desde el costo de la materia prima hasta los costos de mano de obra. Para la presente aplicación la materia prima es gratis ya que el estiércol es un residuo de la actividad económica de las familias y el agua es obtenida por gravedad de una pequeña quebrada. Por lo tanto, los costos de operación se resumen al costo de un operario encargado de suministrar diariamente la mezcla de carga diaria y verificar que todo el sistema funcione con normalidad. Este costo es estimado en \$1.000.000,00 anual.

6.2.5 Total inversión inicial. El total de la inversión inicial está dada por la suma de los costos en maquinaria, materiales y equipos, y en los gastos de capacitación y montaje del sistema (tabla 39).

Tabla 39. Presupuesto de inversión año 0

INVERSION	VALOR
Inversiones fijas	
Biodigestor general	\$ 2.842.500,00
Biodigestor familiar (5 unidades)	\$ 3.932.500,00
Celda de combustible 10 kVA SOFC	\$ 34.750.000,00
Red eléctrica de distribución	\$ 6.463.105,00
Total inversiones fijas	\$ 47.988.105,00
Inversiones diferidas	
Gastos de montaje del sistema	\$ 500.000,00
Gastos de capacitación	\$ 500.000,00
Total inversiones diferidas	\$ 1.000.000,00
TOTAL INVERSION INICIAL	\$ 48.988.105,00

Fuente: Los autores

6.3 INGRESOS

Los ingresos en el flujo de caja son el ahorro en cuanto al consumo de energía eléctrica y térmica se refiere, siendo este el dinero que se ahorrarían con la implementación del sistema [9].

6.3.1 Ahorro en energía eléctrica. Para la evaluación financiera se asumen como ingresos el posible ahorro en la facturación de energía eléctrica en caso de contar con el servicio por parte de la electrificadora de Santander.

El precio del kWh en Santander es en promedio de \$ 365,96. De acuerdo con la curva de demanda diaria de las 5 familias (figura 29), el consumo diario de energía se estimó en 56,762 kW-h/día (tabla 19). Entonces, tenemos que la facturación de energía eléctrica sería en promedio de 340 kW-h/mes por familia.

Tabla 40. Facturación de energía eléctrica

Consumo kW-h/mes/familia	340
Precio kWh	\$ 365,96
Facturación mensual/familia	\$ 124.426,40
Facturación anual/familia	\$ 1.493.112,00
Facturación anual de las 5 familias	\$ 7.465.560,00

Fuente: Los autores

6.3.2 Ahorro en energía térmica. Otro de los ingresos estimados en la evaluación financiera es el ahorro en consumo de gas natural (asumiendo que la comunidad cuenta con el servicio). El precio del m³ de gas natural en Bucaramanga esta alrededor de \$ 469,11.

El consumo diario de biogás fue estimado en 1,6 m³ de biogás por familia. Por lo tanto:

Tabla 41. Facturación de energía térmica

Consumo m ³ biogás/día/familia	1,6
Precio m ³ gas natural	\$ 469,11
Facturación mensual/familia	\$ 22.517,28
Facturación anual/familia	\$ 270.207,36
Facturación anual de las 5 familias	\$ 1.351.036,8

Fuente: Los autores

6.3.3 Ahorro en tala de árboles. A nivel mundial se estima que son 2 mil millones de personas las que se alimentan con comida cocinada con leña y esto sumado a la depredación que realizan los grandes tala montes clandestinos, representa un problema ambiental serio para las naciones [34].

En general cada familia consume un promedio de 2,8 toneladas de madera al año, las cuales pueden ser sustituidas con la utilización del biogás [34]. De este modo las cinco familias podrían ahorrar, aproximadamente, 14 toneladas de madera al año.

La sustitución de biogás por leña, además de ser favorable para la conservación del medio ambiente, también es de gran beneficio para la salud de las personas que diariamente están expuestas a la humareda que producen los fogones a leña.

6.4 EVALUACIÓN FINANCIERA

En su aplicación más básica, la evaluación financiera mide la rentabilidad que un determinado proyecto genera para un determinado agente, para así poder tomar una decisión sobre la bondad de ejecutarlo o participar en él.

Para la evaluación financiera se asumen como egresos la inversión total del sistema y como ingresos los ahorros generados con la implementación del proyecto. Este análisis se realizará a 15 años lo cual corresponde a la vida útil del proyecto. Cada 5 años se propone el cambio de la cúpula de polietileno del biodigestor general y de la bolsa tubular de los biodigestores familiares. Se asume una tasa de interés del 6% anual y un costo de mantenimiento del 1% anual del costo total de la inversión.

6.4.1 Valor presente neto (VPN). El valor presente neto representa la equivalencia de los ingresos futuros y presentes de un proyecto. Se define según la siguiente ecuación:

$$VPN = \sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1+i)^n}$$

Donde,

F_n : Beneficio neto en el periodo n

i: tasa de interés

N: último periodo de la vida útil del proyecto

En la tabla 42 se detallan los costos totales del sistema, los beneficios estimados, el beneficio total neto anual y el valor presente neto VPN del proyecto en general, en el cual se obtuvo

$$VPN = \$ 20.699.994$$

De acuerdo con esta información, se comprueba la viabilidad del proyecto desde el punto de vista financiero, ya que el valor presente neto es mayor que cero y su inversión inicial es recuperada entre el séptimo y octavo año de ejecución del proyecto.

6.4.2 Relación beneficio-costo (RBC). La relación beneficio-costo está definida como:

$$RBC = \frac{VPB}{VPC}$$

Tabla 42. Flujo de fondos del proyecto

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Costo de inversión biodigestor general	-\$ 2.842.500					-\$ 359.500	
Costo de inversión biodigestor familiar	-\$ 3.932.500					-\$ 915.000	
Celda de combustible 10 kW (SOFC)	-\$ 34.750.000						
Costo red de distribución	-\$ 6.463.105						
Beneficios energía eléctrica		\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584
Beneficios energía térmica		\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037
Costos de operación, montaje y capacitación	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000
Costos de mantenimiento		-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250
Beneficio neto del periodo	-\$ 48.988.105	\$ 7.401.371	\$ 7.401.371	\$ 7.401.371	\$ 7.401.371	\$ 6.126.871	\$ 7.401.371
Valor presente neto VPN por periodo	-\$ 48.988.105	\$ 6.982.425	\$ 6.587.194	\$ 6.214.334	\$ 5.862.579	\$ 4.578.354	\$ 5.217.675
Valor presente neto VPN total	-\$ 48.988.105	-\$ 42.005.680	-\$ 35.418.486	-\$ 29.204.152	-\$ 23.341.573	-\$ 18.763.218	-\$ 13.545.544

Tabla 42 (continuación). Flujo de fondos

7	8	9	10	11	12	13	14	15
			-\$ 359.500					-\$ 359.500
			-\$ 915.000					-\$ 915.000
\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584	\$ 7.465.584
\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037	\$ 1.351.037
-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000	-\$ 1.000.000
-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250	-\$ 415.250
\$ 7.401.371	\$ 7.401.371	\$ 7.401.371	\$ 6.126.871	\$ 7.401.371	\$ 7.401.371	\$ 7.401.371	\$ 7.401.371	\$ 6.126.871
\$ 4.922.334	\$ 4.643.712	\$ 4.380.860	\$ 3.421.213	\$ 3.898.950	\$ 3.678.255	\$ 3.470.052	\$ 3.273.634	\$ 2.556.529
-\$ 8.623.209	-\$ 3.979.498	\$ 401.362	\$ 3.822.575	\$ 7.721.525	\$ 11.399.780	\$ 14.869.831	\$ 18.143.465	\$ 20.699.994

Fuente. Los autores

Donde:

$$VPB: \text{Valor presente de los beneficios} = \sum_{n=0}^N \frac{B_n}{(1+i)^n}$$

$$VPC: \text{Valor presente de los costos} = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+i)^n}$$

Por medio de la tabla 42 también se pueden obtener el VPB y el VPC. Teniendo,

$$VPB = \sum_{n=0}^N \frac{B_n}{(1+i)^n} = 85.629.218$$

$$VPC = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+i)^n} = 64.929.224$$

Por lo tanto, la relación beneficio-costo del proyecto es igual a

$$RBC = \frac{VPB}{VPC} = \frac{85.629.218}{64.929.224} = 1,32$$

En conclusión, el rendimiento financiero del proyecto es aceptable, pues el valor presente de los beneficios es mayor que el de los costos.

6.4.3 Precio del kWh generado. De acuerdo con la inversión inicial y los costos de operación y mantenimiento, se puede calcular el precio del kWh generado con el sistema.

Anteriormente, se obtuvo que, con el sistema propuesto, cada familia puede consumir en promedio 340 kWh/mes. Por lo tanto, el consumo de energía eléctrica de las cinco familias es de 20.400 kWh anual y durante los 15 años de vida útil del proyecto es de 306.000 kWh. Según esta información y de acuerdo con el valor presente de los costos, se tiene que el precio del kWh generado con el sistema propuesto es igual a

$$\text{\$ kWh} = \frac{VPC}{kWh} = \frac{64.929.224}{306.000} = \text{\$ 212,19}$$

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede generar un sistema técnico y financieramente viable para solventar las necesidades energéticas de familias campesinas utilizando como fuente de energía desechos agrícolas y ganaderos del sector rural.

Con el presente proyecto se puede concluir que para satisfacer los requerimientos de energía eléctrica de cinco viviendas campesinas, se necesitan 21,02 m³ de biogás al día y una celda de combustible con una eficiencia cercana al 45%.

Los beneficios obtenidos con el sistema de generación propuesto para las cinco familias son, principalmente, de índole social, ambiental y económico, brindándoles una mejor calidad de vida y oportunidades de desarrollo local.

Con un mínimo de 86 cabezas de ganado de aproximadamente 400 kg c/u es posible generar biogás del orden de 22,36 m³/día y ser aprovechado para la generación de energía eléctrica, a través de una celda de combustible tipo SOFC, para una demanda máxima diversificada de 8,7 kVA.

El biodigestor de tanque de almacenamiento tradicional con cúpula de polietileno se seleccionó como la mejor opción para la presente aplicación debido a las ventajas que este ofrece en cuanto a: costo de inversión relativamente bajo, vida útil aceptable, bajo mantenimiento y bajo requerimiento de espacio.

Una familia campesina puede reemplazar el uso de madera para la cocción de alimentos creando un sistema de generación de biogás mediante biodigestores.

Se decidió instalar en cada vivienda un biodigestor de estructura flexible para satisfacer los requerimientos de energía térmica. El consumo diario de biogás de

una vivienda rural fue estimado en 1,6 m³/día. Para producir este biogás, cada vivienda debe contar con mínimo 7 cabezas de ganado con un peso promedio de 400 kg cada una.

Los materiales de construcción de los biodigestores pueden ser conseguidos localmente, generando desarrollo y trabajo para el sector rural.

A parte de obtener biogás y generar energía eléctrica, en el proceso se deriva un efluente rico en nutrientes que puede ser utilizado como biofertilizante mejorando la calidad del suelo y por ende la productividad agrícola de la región.

Se seleccionó una celda de combustible tipo SOFC. Una celda de combustible tipo SOFC tolera diferentes clases de combustibles, entre ellos el biogás, y no es necesario una etapa previa de reformado del biogás. La celda de combustible se escogió con la capacidad de generar la demanda máxima del sistema (8,7 kVA).

En cuanto a rendimiento y eficiencia en el proceso, una celda de combustible es mucho más viable que un motor de combustión. Actualmente, el mayor inconveniente del uso de celdas de combustible es su alto costo, pero el desarrollo de la tecnología promete aumentar su producción y bajar los costos.

En el caso de un futuro aumento en la demanda de energía de las familias o la intención de ampliar la red, la cogeneración es una de las alternativas propuestas, aprovechando el calor residual de la celda de combustible y así aumentar la eficiencia total del sistema.

La red de distribución se diseñó para una alimentación bifásica a cada vivienda. Esto para poder balancear el sistema, garantizar el buen funcionamiento de la celda y garantizar el suministro de potencia requerido por cada familia.

Los precios de las celdas de combustibles no son altos cuando se les compara con los gastos anuales de electricidad y gas natural, por lo que su inversión es recuperable en poco tiempo.

La vida útil del sistema de generación es de aproximadamente 15 años, y basados en una suposición de ahorro en el consumo energético, su inversión es recuperable entre el séptimo y el octavo año de ejecución. Por lo tanto, se comprueba la viabilidad en la ejecución de este tipo de proyectos en el sector rural.

Los costos de mantenimiento de la celda de combustible son mínimos o prácticamente nulos, por lo que no es necesario conocimientos técnicos de operación por parte de la población.

RECOMENDACIONES

Selección del lugar donde estará el biodigestor

El biodigestor general debe estar en un punto cercano al lugar donde duermen la mayor cantidad de ganado. Esto para que la recogida del estiércol fresco cada mañana sea lo más fácil posible.

Es importante considerar que la zanja del biodigestor no debe interrumpir el camino de animales o personas.

La zanja deberá estar en zonas soleadas, nunca de sombra, ya que la radiación solar ayudará a calentar el terreno donde esté se encuentre. El biodigestor deberá estar protegido por el sol por una semisombra o techumbre.

Mantenimiento del biodigestor

En el caso de presentarse rupturas pequeñas, mientras el polietileno no esté degradado, se puede proceder a sellar los huecos con trozos de neumático que se fijan a la superficie de la bolsa con ayuda de un pegante.

Se debe realizar una revisión periódica de los conductos y sus uniones con el fin de evitar posibles fugas del biogás, el cual es un gas inflamable y tóxico. Siempre se debe verificar que se han cerrado las llaves de paso de la estufa después de cocinar. Una válvula abierta produce un escape de gas que puede dar mareos y asfixia.

Hay que vigilar la condensación de agua en las tuberías de conducción de biogás, ya que de acumularse agua, la llama y el suministro a la celda será intermitente.

Se deberá prestar atención a la válvula de seguridad para que nunca le falte agua, porque el biogás se escapará y después el biodigestor morirá al entrarle aire. La válvula de seguridad tiene que tener siempre suficiente agua, como para que el tubo esté sumergido de 8 a 13 cm.

Internamente, sobre la superficie de la fase líquida tiende a formarse una nata flotante, constituida por el material fibroso no digerido por las bacterias. Esta nata puede deshacerse desde el exterior haciendo presión a lo largo de la superficie cuando la campana de biogás se encuentre vacía.

Protecciones para el sistema

La fosa del biodigestor debe ser techada con materiales de producción local (guadua, bambú, caña brava, hoja de palma, etc), que disminuyen la condensación interna de humedad e impiden la entrada directa del agua lluvia y

también de los rayos ultravioletas del sol, que llegan a tostar el polietileno, lo que disminuye su vida útil.

El biodigestor debe ser protegido con una cerca para evitar la entrada accidental de animales o personas y evitar posibles actos de vandalismo o juego entre niños.

También debe construirse un cuarto donde se ubique la celda de combustible y los demás elementos que componen la etapa de generación.

Hay que tener la precaución de no permitir la entrada al biodigestor de basuras, arena, cemento, piedras, trozos de madera, hojas o tallos, puesto que puede taparse la entrada y en un futuro puede llenarse el fondo con sedimentos que disminuirán la vida útil del biodigestor. Por lo tanto, es necesario colocar una trampa para sólidos como parte del canal de conducción de las excretas.

En ningún caso deberá introducirse estiércol seco ni estiércol fresco en cantidades excesivas y que no hayan sido previamente diluidos en agua para obtener una mezcla lo más homogénea posible, puesto que se producirá un empastamiento de la fase líquida. En caso de que se presente empastamiento o acumulación de sedimentos en el fondo de la bolsa del biodigestor, estos sólidos pueden expulsarse mediante la introducción de una manguera conectada a una motobomba con abundante agua a presión para dejar salir el afluyente.

La conducción del biogás a cada una de las viviendas para uso térmico debe cumplir los reglamentos establecidos por el ministerio de minas y energías para gases combustibles.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] GARCÍA MORALES, José L., ROMERO, Luis I., SALES, Diego. “Valorización energética de la biomasa: aplicación en industrias del sector agroalimentario”. Voletín del CIDEU, 2008

[2] DELGADO CABALLERO, Ismael, ESTRANY CODA, Francesc, OLIVER PUJOL, Ramón. “El aprovechamiento energético de la biomasa”. Técnica industrial 249. Junio de 2003

[3] CARRILLO, Leonor. “Microbiología agrícola. Capítulo 5”. 2003

[4] LOPEZ VEGA, Erik Emmanuel, RUIZ DELGADO, Mario Fernando. “Celdas de combustible a partir de biogás: caracterización del proceso de generación eléctrica en el sector rural con IDEFO” Tesis de grado Universidad Industrial de Santander, escuela de Ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Bucaramanga, 2008

[5] PEREZ MEDEL, Javier Andres. “Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros”. Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, departamento de ingeniería mecánica. Santiago de Chile, 2010.

[6] UPME. “Documento ANC-0603-19-01: Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás”. Versión 01. Unión temporal ICONTEC – AENE. Bogotá, D.C., Marzo de 2003

[7] MARTINEZ, Ortega Erick. Estudio de factibilidad de uso racional y eficiente de la materia prima no tradicional del sector avícola para la generación de energía

eléctrica. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander, escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Bucaramanga, 2009

[8] PÉREZ MARTÍNEZ, Marta. CUESTA SANTIANES, M^a José. NÚÑEZ CRESPI, Sylvia. CABRERA JIMÉNEZ, Juan Antonio. “Utilización de biogás en pilas de combustible”. Prospectiva y vigilancia tecnológica. CIEMAT, Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas. VT-1/07/Ed-3, España, Marzo 2008.

[9] BOTERO BOTERO, Raúl, PRESTON, Thomas R., “Biodigestores de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización”. 1987

[10] Página web: <http://emison.es/medio-ambiente/AGUAS/biogas/biogas.pdf>

[11] ÁLVAREZ, José M., CANETA, Luciano, MOYANO, Carlos. “Biomasa y Biogás”. Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ingeniería.

[12] Ing. A. M. Sc. HILBERT Jorge A. “Manual para la producción de biogás”. Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. - Castelar

[13] MARTÍ HERRERO, Jaime. “Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación”. GTZ – Energía. Bolivia 2008

[14] “Biodigestores. Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes”. Fundación Hábitat Colombia, 2 de abril de 2005

[15] Página web:

http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/SAN_JUAN/676/otras_energias/biogas/biog_c3.htm

[16] INGENIERÍA ALEMANA S.A. “Estudio para la evaluación socioeconómica y ambiental de tres prototipos de biodigestores en predios de pequeños productores lecheros”. Oficina de estudios y políticas agrarias (ODEPA), Santiago de Chile. Marzo, 2009

[17] documento obtenido del portal del ingeniero ambiental:
<http://www.ingenieroambiental.com>, “Energías alternativas. Hidrógeno y Celdas de combustible”.

[18] Dr. Ing. Ind. ASTEASU, Carlos. “Las pilas de combustible”, 2008

[19] CANO CASTILLO, Ulises. “Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica”. Boletín iie, septiembre/octubre de 1999

[20] GONZÁLEZ-LONGATT, Francisco M. “Celdas de combustible: Perspectivas para la aplicación en la generación distribuida”. I seminario de ingeniería eléctrica, Puerto Ordaz, 13 al 15 de octubre de 2004

[21] “Manual de diseño y manejo de biodigestores familiares de bajo coste” Instrucciones para la implementación y el manejo de una planta piloto en Baños del Inca, Cajamarca. Perú.

[22] ESSA. Norma para el cálculo y diseño de sistemas de distribución.

[23] BETETA HERRERA, Tania del Carmen, GONZÁLEZ SOBALVARRO, José Adolfo. “Construcción y uso de biodigestores tubulares plásticos”. Guía técnica No. 7. Nicaragua, 2005.

[24] CASA PRIETO, Miguel Ángel, RIVAS LUCERO, Berta Alicia, SOTO ZAPATA, Manuel, SEGOVIA LERMA, Armando, MORALES MORALES, Hugo Armando, CUEVAS GONZÁLES, Martha Isela, KEISLING DAVISON, Christian Mauricio. “Estudio de factibilidad para la puesta en marcha de los digestores anaeróbicos en establos lecheros en la cuenca de delicias, CHIH”. Revista Mexicana de Agronegocios, enero-junio, 2009

[25] DEUBLEIN, Dieter. STEINHAUSER, Angelika. Biogas from waste and renewable resources. Wiley-VCH, Weinheim, 2008

[26] MENDOZA ZEGARRA, Mario. “Potencia y energía de las celdas de combustible”

[27] FOCER. “Manuales sobre energía renovable: Biomasa”, 2002

[28] MONROY, Cristóbal de. “Otras energías renovables. La energía de la biomasa”. Dpto de tecnología. Tecnología industrial.

[29] EMISON. Biomasa

[30] NOGUÉS, Fernando Sebastián, ROYO HERRER, Javier. “Ciclo energías renovables. Jornadas de biomasa”. Fundación CIRCE, abril de 2002

[31] FERNÁNDEZ CASTAÑO, Natalia. “Plantas de biomasa”. Renovetec, 2010

[32] CLAAS VISION. The magazine for Harvesting Specialists. Número 26

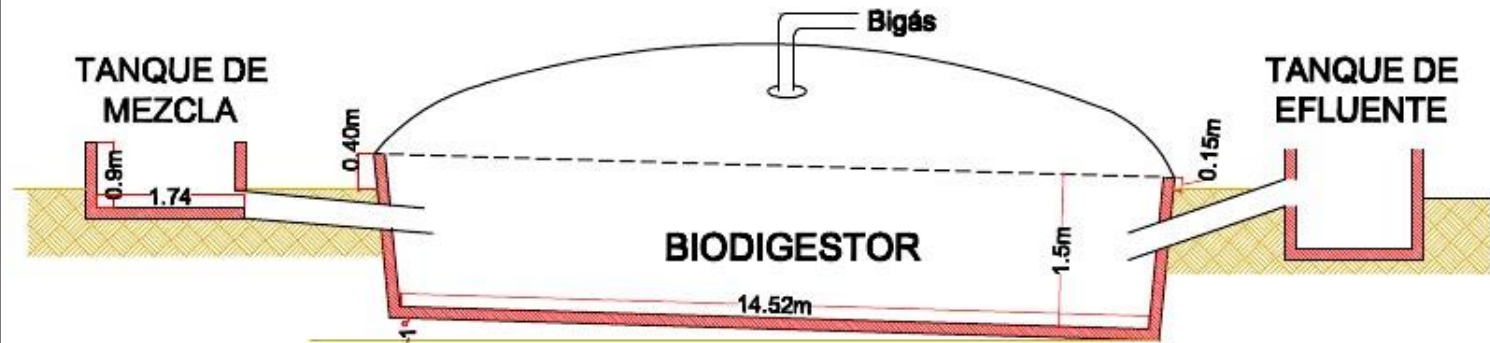
[33] Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. El sector del biogás agroindustrial en España. Madrid 16 de 2010

[34] página web: <http://www.20minutos.es/carta/407071/0/cocinando/sol/energia/>

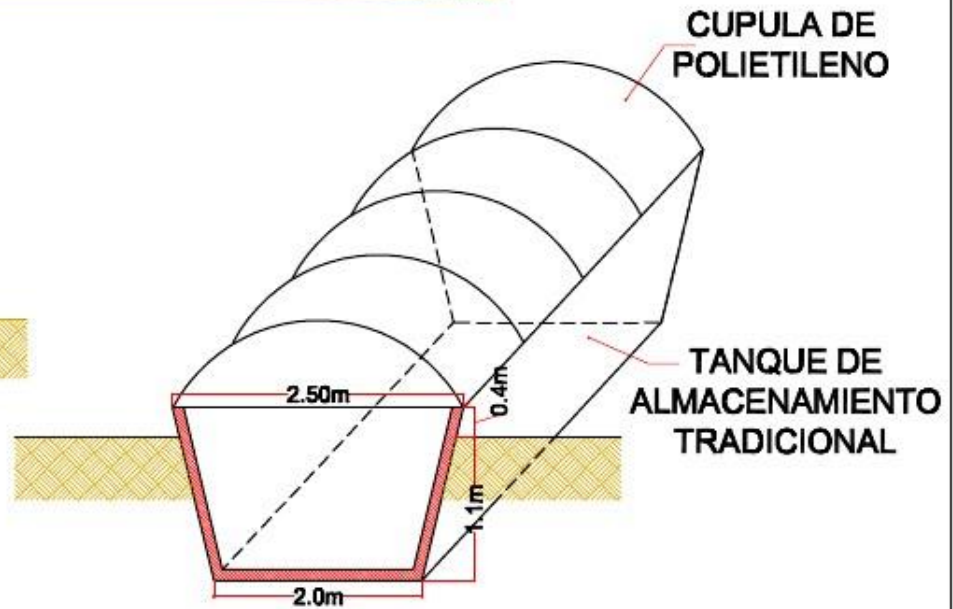
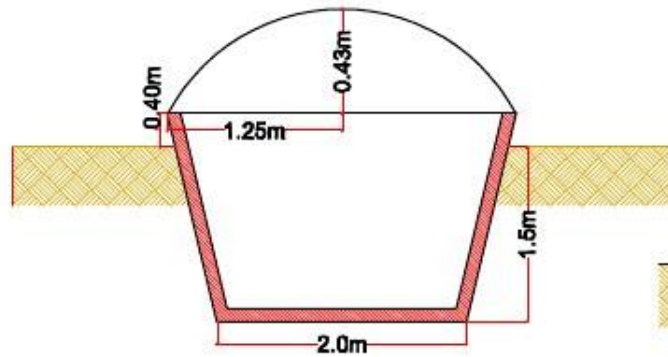
ANEXO A. PLANOS

A-1. Biodigestor general para la generacion de energia eléctrica.

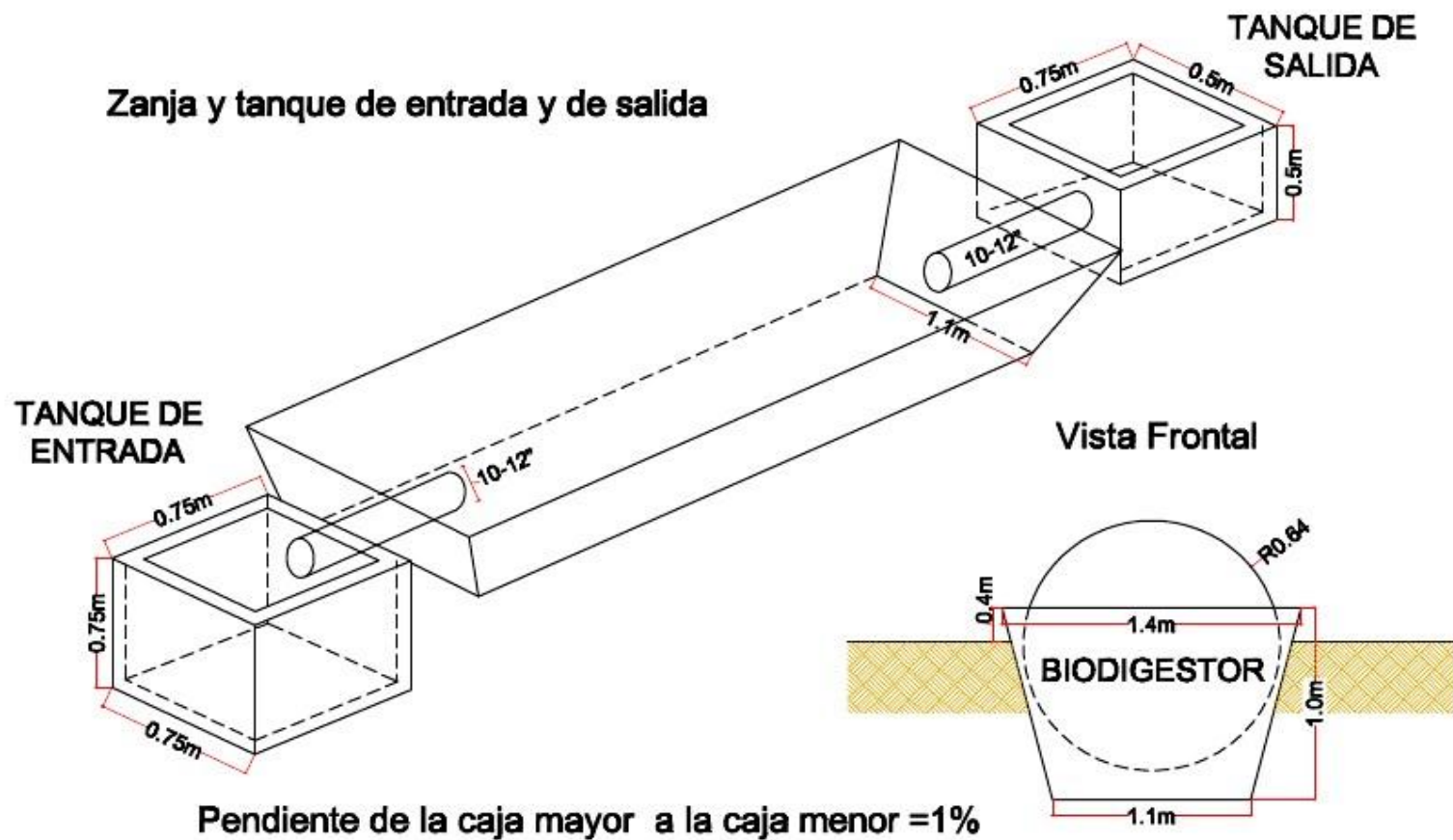
Vista de Perfil



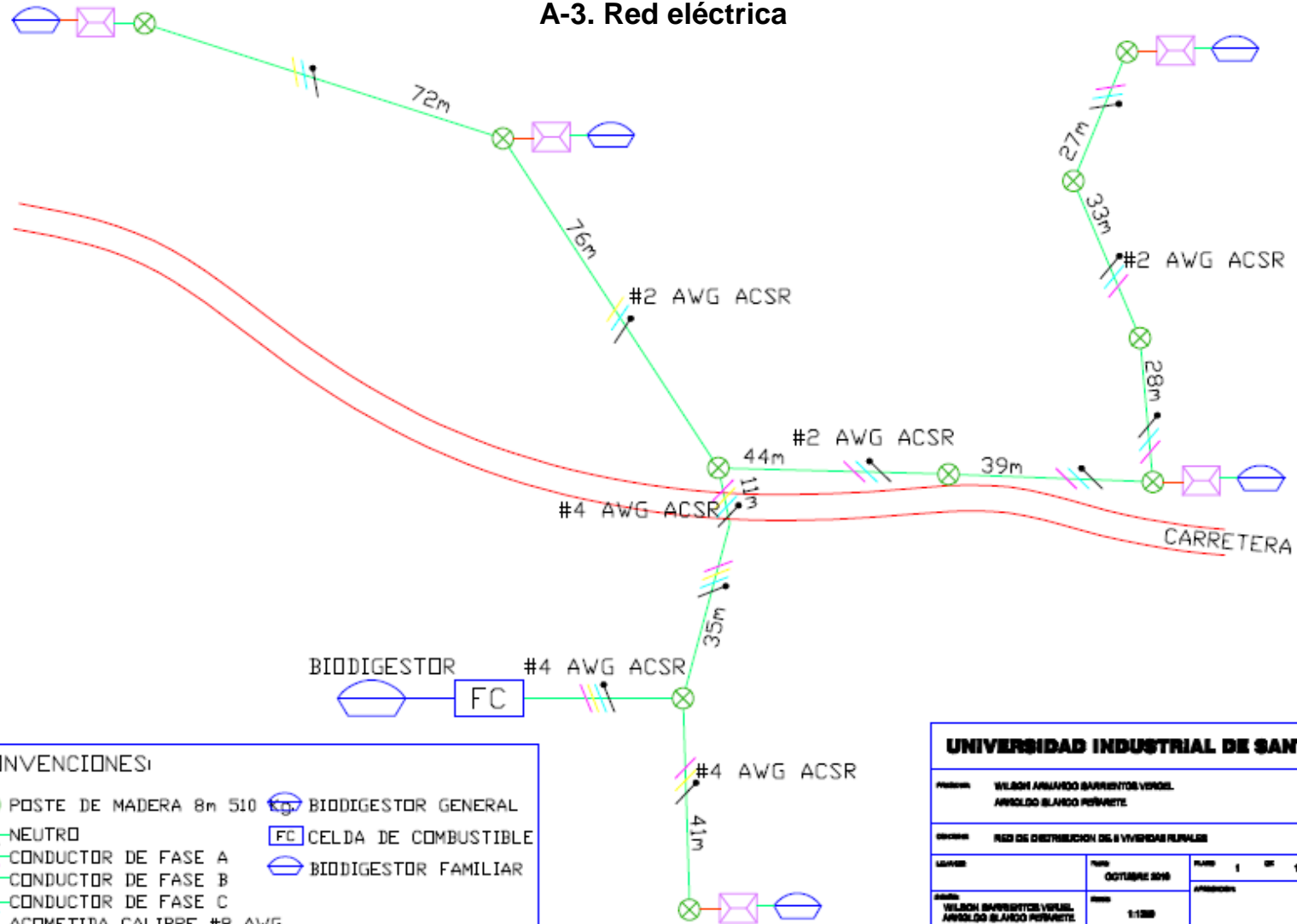
Vista Frontal



A-2. Biodigestor Familiar para energía térmica



A-3. Red eléctrica



CONVENCIONES:

- POSTE DE MADERA 8m 510 kg
- BIODIGESTOR GENERAL
- NEUTRO
- CELDA DE COMBUSTIBLE
- CONDUCTOR DE FASE A
- CONDUCTOR DE FASE B
- CONDUCTOR DE FASE C
- ACOMETIDA CALIBRE #8 AWG
- BIODIGESTOR FAMILIAR

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Profesor: WILSON ARMANDO BARRIENTOS VERGEL ARNOLDO BLANCO PEÑABETE			
Docente: RED DE DISTRIBUCION DE 8 VIVIENDAS RURALES			
Fecha: OCTUBRE 2016	PÁGINA 1 DE 1	REVISION	
Autor: WILSON BARRIENTOS VERGEL ARNOLDO BLANCO PEÑABETE	Escala: 1:1000	Aprobación:	
Profesor: WILSON ARMANDO BARRIENTOS VERGEL ARNOLDO BLANCO PEÑABETE			

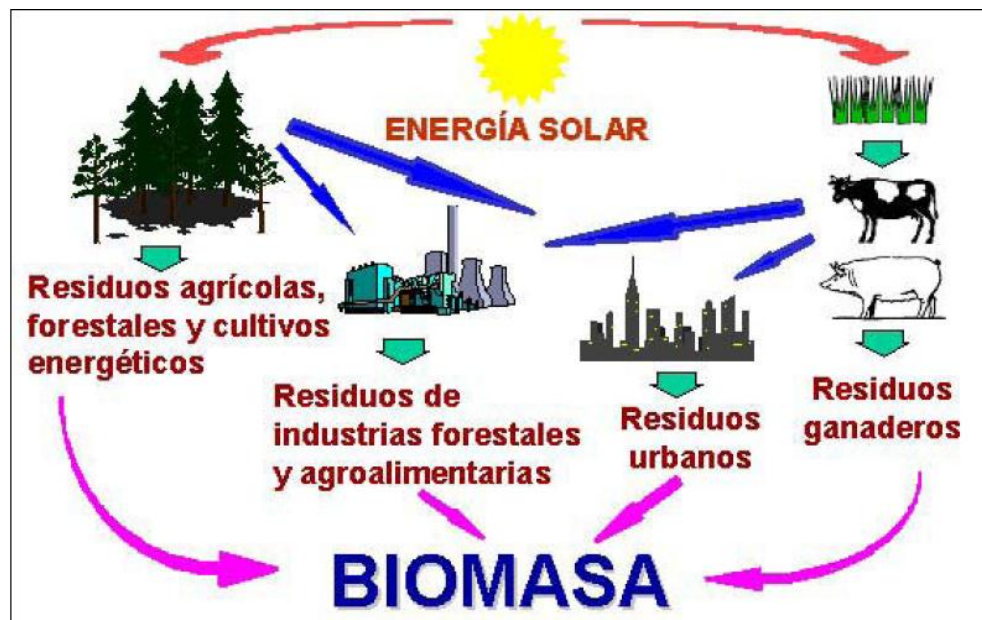
ANEXO B. BIOMASA

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros) [25].

La materia viva (biomasa) es sintetizada por las plantas mediante el proceso denominado fotosíntesis, que tiene lugar en presencia de la luz solar. Las plantas absorben agua y sales minerales del suelo y dióxido de carbono del aire, dando lugar a la formación de hidratos de carbono y oxígeno, que se desprende en forma gaseosa y es devuelto a la atmósfera [26]. Con este proceso de conversión, la energía solar se transforma en energía química que se acumula en diferentes compuestos orgánicos y que es incorporada y transformada por el reino animal y vegetal que, por su parte, la transforma mediante procedimientos artificiales para obtener bienes de consumo [27]. Los animales aprovechan parte de la biomasa de las plantas, apropiándose de su contenido energético y transformándose, así, la biomasa vegetal en animal. La parte restante se puede considerar como biomasa residual. [26]

Desde un punto de vista de aprovechamiento energético, la biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido en carbón y un elevado contenido en oxígeno y en compuestos volátiles. Los compuestos volátiles, son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa. Su poder calorífico depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad. Esta característica, junto con el bajo contenido en azufre, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente [27].

Figura C-1. Definición de biomasa



Fuente: Tomado de [28]

El aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía ofrece un amplio rango de beneficios ambientales: puede contribuir a mitigar el cambio climático y el efecto invernadero, reducir la lluvia ácida, prevenir la erosión de los suelos y la contaminación de las fuentes de agua, reducir la presión provocada por la basura urbana, enriquecer el hábitat de la vida silvestre y ayudar a mantener la salud humana y estabilidad de los ecosistemas [25].

ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan. Estos que se explican a continuación, determinan el proceso de conversión más adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados [25].

Tipo de biomasa: Los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular. Por ejemplo, los desechos forestales indican el uso de los procesos de combustión directa o procesos termo-químicos; los residuos animales indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos), etc. [25].

Composición química y física: Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar; por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado “gas pobre”, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar [25].

Contenido de humedad (H.R.): El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía [25].

Porcentaje de cenizas: El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado [25].

Poder calórico: El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material [25].

Densidad aparente: Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso [25].

Recolección, transporte y manejo: Las condiciones para la recolección, el transporte y el manejo en planta de la biomasa son factores determinantes en la estructura de costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. La ubicación del material con respecto a la planta de procesamiento y la distancia hasta el punto de utilización de la energía convertida, deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del sistema por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional [25].

TIPOS DE BIOMASA

Existen varios tipos de biomasa, dependiendo de su origen y de la idea de generar estos recursos o de recuperarlos de otras fases de nuestra economía [27]:

Biomasa Natural. Se produce en la naturaleza sin la intervención humana, en bosques, matorrales, etc. [27].

Biomasa Residual. Se genera en cualquier tipo de actividad humana, principalmente en los procesos productivos de los sectores agrícola, forestal y ganadero [27].

- ***Residuos forestales.*** Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor, y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín [25].
- ***Desechos agrícolas.*** La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): se estima que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en desechos de proceso, entre 20% y 40% [25].

Por otro lado, las granjas producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficio de su valor nutritivo. Esta práctica puede provocar una sobrefertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas [25].

- ***Desechos industriales.*** La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un

alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos [25].

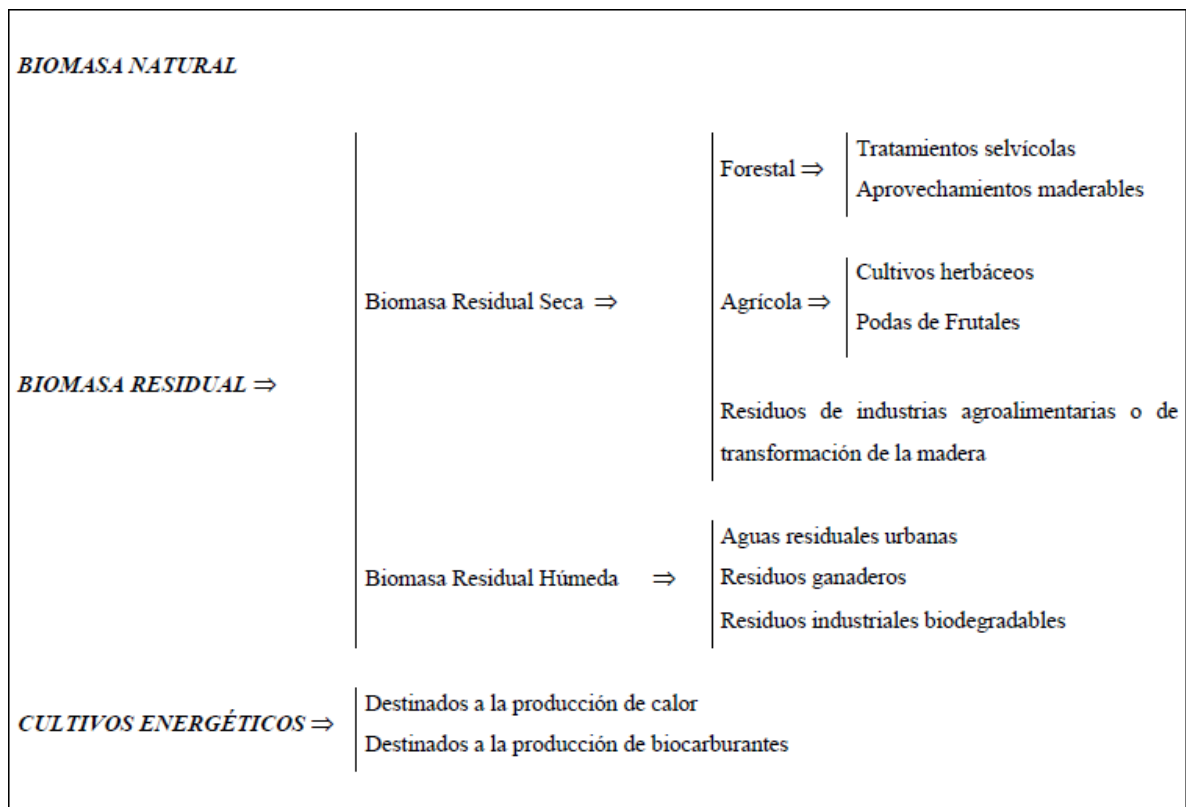
- ***Desechos urbanos.*** Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La mayoría de los países carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas [25].

Cultivos Energéticos. Cuya finalidad es la producción específica de biomasa con las mejores características posibles para la producción energética [27].

Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo [25].

Existen también muchos cultivos agrícolas que pueden ser utilizados para la generación de energía: caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas como palma de aceite, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como jacinto de agua o las algas, para producir combustibles líquidos como el etanol y el biodiesel [25].

La principal limitante para este tipo de plantaciones está en la escala, pues se requieren grandes extensiones de tierra para lograr una producción de energía rentable [25].



Tipos de biomasa. Tomado de [28]

ASPECTOS TÉCNICOS DE LA ENERGÍA DE LA BIOMASA

Composición química. Todas las formas de biomasa consisten en una parte orgánica, una inorgánica y agua. En la combustión se quema la parte orgánica. La inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido que queda después de la combustión [25].

Los elementos químicos más importantes son carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), y azufre (S) y, en algunos casos, cloro (Cl). Además, contiene oxígeno (O), lo cual no se determina directamente, sino que se calcula como diferencia entre el peso total y la suma de los otros elementos, más la ceniza. La siguiente tabla muestra la composición para varios tipos de biomasa. Se incluye el carbón mineral como punto de comparación [25].

Tipo de biomasa	Porcentaje del peso (sin humedad)						
	C	H	N	O	S	Cl	Ceniza
Madera							
Sauce	47,66	5,2	0,3	44,70	0,03	0,01	1,45
Madera suave	52,10	6,10	0,20	39,90	-	-	1,70
Corteza de madera dura	50,35	5,83	0,11	39,62	0,07	0,03	3,99
Madera dura	50,48	6,04	0,17	42,43	0,08	0,02	0,78
Eucalipto	50,43	6,01	0,17	41,53	0,08	0,02	1,76
Roble	49,89	5,98	0,21	42,57	0,05	0,01	1,29
Corteza de pino	52,30	5,80	0,29	38,76	0,03	0,01	2,90
Aserrín pino	52,49	6,24	0,15	40,45	0,03	0,04	0,60
Sub-productos agrícolas							
Brizna de trigo	39,07	4,77	0,58	50,17	0,08	0,37	4,96
Caña de azúcar	44,80	5,35	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Bagazo de caña	46,95	5,47	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Paja de arroz	39,65	4,88	0,92	35,77	0,12	0,50	18,16
Cascarilla de arroz	38,68	5,14	0,41	37,45	0,05	0,12	18,15
Paja de maíz	46,91	5,47	0,56	42,78	0,04	0,25	3,99
Olote de maíz	47,79	5,64	0,44	44,71	0,01	0,21	1,2
Fibra de coco	50,29	5,05	0,45	39,63	39,63	0,28	4,14
Carbón mineral	71,70	4,70	1,3	8,30	0,64	0,060	20,70

Composición química de diferentes formas de biomasa. Tomado de [25]

Valor calorífico. Todas las formas de biomasa tienen un valor calorífico, el cual se expresa como la cantidad de energía por unidad física; por ejemplo, joule por kilogramo. Esta es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente [25].

El valor calorífico se puede anotar de dos formas diferentes: bruto y neto. El bruto se define como la cantidad total de energía que se liberaría vía combustión, dividido por el peso. El neto es la cantidad de energía disponible después de la evaporación del agua en la biomasa; es decir, es la cantidad de energía realmente aprovechable, y siempre es menor que el valor calorífico bruto [25].

Tipo de Biomasa	Valor calorífico bruto (MJ/kg)
Madera	
Astilla de madera	20,89
Corteza de pino	20,95
Desechos industriales de madera	19,00
Sub-productos agrícolas	
Paja de trigo	18,94
Caña	18,06
Bagazo	18,09
Cáscara de coco	18,60
Olote de maíz	17,72
Paga de arroz	15,61
Cascarilla de arroz	15,58
Aserrín	19,34

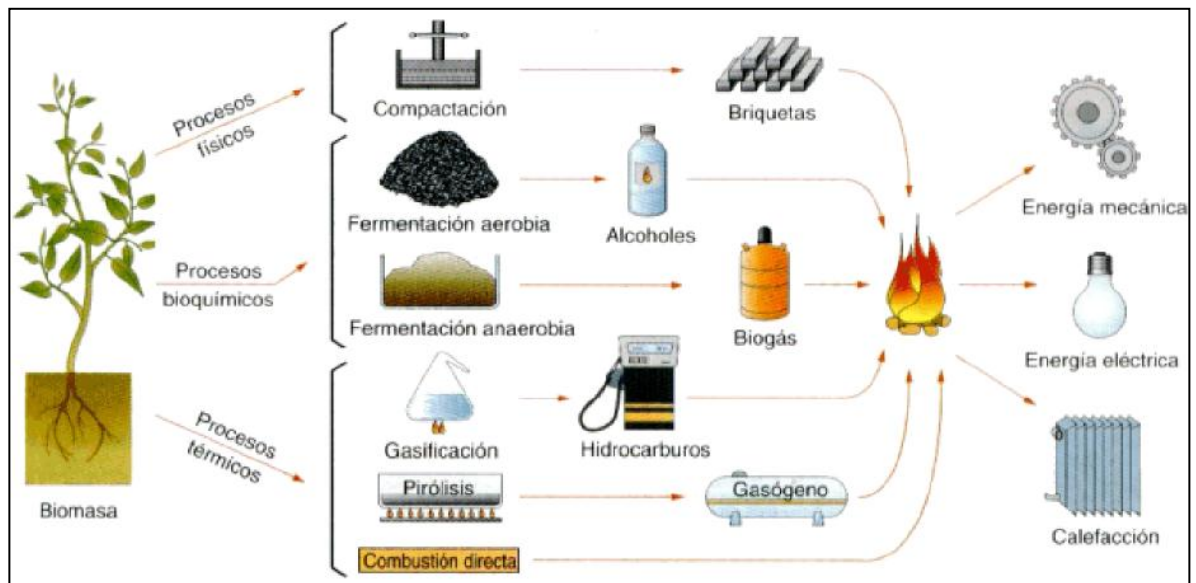
Poder calórico de algunas formas de biomasa. Tomado de [25]

Contenido de humedad. El contenido de humedad, o humedad relativa, se define como la cantidad de agua presente en la biomasa, expresada como un porcentaje del peso. Para combustibles de biomasa, este es el factor más crítico, pues determina la energía que se puede obtener por medio de la combustión. Cuando se quema la biomasa, primero se necesita evaporar el agua antes de que el calor esté disponible; por eso, cuanto más alto el contenido de humedad, menos el valor calorífico [25].

El valor de la humedad se puede indicar según sea en base seca o en base húmeda: en base seca se define como la fracción del peso del agua dentro de la biomasa y el peso del material seco, expresado como porcentaje. El contenido de humedad en base húmeda es la fracción del peso del agua dentro de la biomasa y el peso total del material. El valor en base húmeda siempre es más bajo que en base seca, por lo que es muy importante indicar el método aplicado [25].

CONVERSIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA

El aprovechamiento de la biomasa puede llevarse a cabo por métodos físicos, termoquímicos o bioquímicos.



Conversión energética de la biomasa. Tomado de [26]

Procesos físicos:

- **Densificación.** Esta se refiere al proceso de compactar la biomasa en “briquetas”, para facilitar su utilización, almacenamiento y transporte. Las briquetas son para usos domésticos, comerciales e industriales. La materia prima puede ser aserrín, desechos agrícolas y partículas de carbón vegetal, el cual se compacta bajo presión alta [25].

Procesos termoquímicos. Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un valor calorífico mayor, los cuales hacen más conveniente su utilización y transporte [25].

Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. Dependiendo de la tecnología, el producto final es un combustible sólido, gaseoso, o combustible líquido [25].

<i>TIPO DE RECURSO</i>	<i>SISTEMA DE APROVECHAMIENTO</i>	<i>PRODUCTO OBTENIDO</i>
<i>Biomasa residual seca</i> ⇒	Basado en la combustión del recurso ⇒	Vapor Aceite térmico Agua caliente Aire caliente
	Basado en la gasificación del recurso ⇒	Gas combustible ⁽¹⁾ Gas de síntesis ⁽¹⁾
	Producción de biocarburantes ⇒	Aceite vegetal ⁽²⁾ Biodiesel ⁽²⁾ Etanol ⁽²⁾ ETBE ⁽²⁾
<i>Biomasa residual húmeda</i> ⇒	Compostaje ⇒	Compost
	Digestión anaerobia ⇒	Biogás ⁽¹⁾
<i>Cultivos energéticos</i> ⇒	Basado en la combustión del recurso	
	Basado en la gasificación del recurso ⇒	
	Producción de biocarburantes ⇒	Aceite vegetal ⁽²⁾ Biodiesel ⁽²⁾ Etanol ⁽²⁾ ETBE ⁽²⁾

⁽¹⁾ Estos productos se pueden emplear para producir energía térmica o mecánica en un eje
⁽²⁾ Estos productos se pueden emplear para generar energía mecánica en un eje (motor de combustión interna)

Sistema de aprovechamiento energético en función del tipo de recurso disponible.

Tomado de [28]

En los procesos termoquímicos la descomposición térmica de la biomasa puede ser realizada en distintas condiciones de oxidación: [1]

- Exceso de oxígeno, lo que daría lugar a un proceso de combustión. [1]
 - Cierta restricción de oxígeno, obteniéndose un proceso de gasificación.[1]
 - Ausencia total de oxígeno, dando lugar al proceso de pirólisis.[1]
- **Proceso de combustión directa.** Al quemar la biomasa (tras reducir su humedad, exponiéndola previamente a la radiación solar en presencia de oxígeno), se desprende calor; éste puede emplearse directamente en viviendas, granjas, industrias, etc. [26]. La combustión de los residuos se produce como consecuencia de la oxidación exotérmica del carbono y el hidrógeno contenido en los mismos [1].

Cuando se habla de combustión, normalmente, se hace referencia a la combustión de biomasa sólida. La humedad de ésta no ha de sobrepasar el 50-55%, pues en caso contrario el aporte de energía del residuo sería menor que el necesario para evaporar su humedad [1]. Las tecnologías de combustión directa van desde sistemas simples, como estufas, hornos y calderas, hasta otros más avanzados como combustión de lecho fluidizado [25].

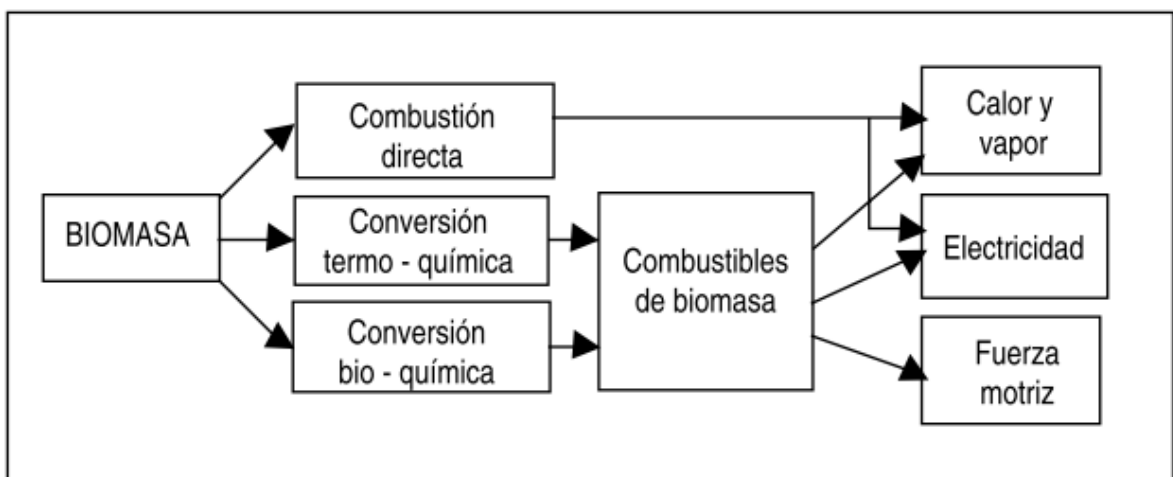
- **Proceso de gasificación.** El proceso de gasificación consiste en la oxidación parcial de la biomasa para obtener monóxido de carbono, hidrógeno, metano, nitrógeno y dióxido de carbono principalmente, en proporciones que dependen de la materia prima considerada y de las condiciones del proceso [1].

Se pueden distinguir tres tipos de procesos:

- 1) Exotérmicos, que utilizan oxígeno o aire para obtener monóxido de carbono o monóxido de carbono y nitrógeno (gas pobre) [1].
- 2) Endotérmicos, que utilizan vapor de agua para obtener monóxido de carbono e hidrógeno (gas de síntesis) [1].

3) Equilibrados o mixtos, que utilizan oxígeno y vapor de agua o aire y vapor de agua para obtener monóxido de carbono e hidrógeno o monóxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno [1].

- **Proceso de pirolisis.** Consiste en la descomposición de la biomasa a elevada temperatura (500°C) y en ausencia de oxígeno, en unas instalaciones que reciben el nombre de gasógenos [26].



Procesos de conversión y formas de energía. Tomado de [25]

Procesos bioquímicos. En los métodos bioquímicos el producto de interés se genera gracias a la acción de un conjunto de microorganismos (aerobios o anaerobios) que utilizan la biomasa para obtener energía y realizar sus funciones vitales [1]. Los procesos más importantes son:

- **Fermentación alcohólica.** Consiste en la transformación, provocada por determinados enzimas, de los hidratos de carbono en etanol. El proceso transcurre en presencia de oxígeno, y el etanol obtenido se recupera por destilación, pudiendo utilizarse como carburante de motores en sustitución de la gasolina [26]. También se puede producir metanol por medio de la destilación destructiva de madera [25].

Las materias primas utilizables suelen ser aquellas que presentan altos contenidos en azúcares (remolacha, caña de azúcar, etc.) o almidón (cereales, etc.). También últimamente ha cobrado gran interés la utilización de biomasa lignocelulósica (biomasa forestal, etc.) para producir etanol [1].

- **Digestión anaerobia.** En este proceso la materia orgánica del residuo (generalmente desechos de animales), en ausencia de oxígeno (anaeróbico), se degrada o descompone por la actividad de unos microorganismos específicos transformándose en un gas de alto contenido energético o “biogás”, constituido principalmente por metano y dióxido de carbono, y en otros productos que contienen la mayor parte de los componentes minerales y compuestos de difícil degradación que en ocasiones se denominan “fangos” [28].
- **Producción de biodiesel.** A diferencia del etanol, que es un alcohol, el biodiesel se compone de ácidos grasos y ésteres alcalinos, obtenidos de aceites vegetales, grasa animal y grasas recicladas. A partir de un proceso llamado “transesterificación”, los aceites derivados orgánicamente se combinan con alcohol (etanol o metanol) y se alteran químicamente para formar ésteres grasos como el etil o metilo éster. Estos pueden ser mezclados con diesel o usados directamente como combustibles en motores comunes [25]. El biodiesel se obtiene de cultivos o especies vegetales oleaginosas como girasol, colza, cacahuete, etc. [28].

APLICACIONES ENERGÉTICAS DE LA BIOMASA

Con biomasa se puede generar energía térmica (agua o aire caliente, vapor, etc.), energía eléctrica e incluso mecánica mediante el uso de biocarburantes en motores de combustión interna [28].

- **Generación de energía térmica:** El sistema más extendido para este tipo de aprovechamiento está basado en la combustión de biomasa sólida, aunque también es posible quemar el biogás procedente de la digestión anaerobia de un residuo líquido o el gas de síntesis generado en la gasificación de un sólido [28].

- **Generación de energía eléctrica:** En función del tipo y cantidad de biomasa disponible varía la tecnología más adecuada a emplear para este fin:
 - **Ciclo de vapor:** está basado en la combustión de biomasa, a partir de la cual se genera vapor que es posteriormente expandido en una turbina de vapor [28].
 - **Turbina de gas:** utiliza gas de síntesis procedente de la gasificación de un recurso sólido. Si los gases de escape de la turbina se aprovechan en un ciclo de vapor se habla de un “ciclo combinado” [28].
 - **Motor alternativo:** utiliza gas de síntesis procedente de la gasificación de un recurso sólido o biogás procedente de una digestión anaerobia [28].

- **Cogeneración:** Cuando una entidad presenta consumos térmicos y eléctricos importantes se puede plantear la instalación de un sistema de cogeneración, consistente en la producción conjunta de energía térmica y eléctrica. Esta tecnología presenta como gran ventaja la consecución de rendimientos superiores a los sistemas de producción de energía térmica o eléctrica por separado [28].

- **Generación de energía mecánica:** Los biocarburantes pueden ser empleados en los motores alternativos de automóviles, camiones, autobuses, etc., sustituyendo total o parcialmente a los combustibles fósiles [28].

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LA BIOMASA

Ventajas

- Su uso significa una reducción en el consumo de otras fuentes de energía no renovables, tales como el carbón o el petróleo. Como ejemplo se podría citar el estado de Colorado (FE UU), donde el estiércol producido por 40.000 cabezas de ganado se transforma en una cantidad de metano equivalente a la mitad del combustible necesario para mantener una central eléctrica de 50 MW [28].
- El empleo de la tecnología de digestión anaerobia para tratar la biomasa residual húmeda además de anular su carga contaminante, reduce fuentes de olores molestos y elimina, casi en su totalidad, los gérmenes y los microorganismos patógenos del vertido. Los fangos resultantes del proceso de digestión anaerobia pueden ser utilizados como fertilizantes en la agricultura [28].
- La implantación de cultivos energéticos en tierras abandonadas evita la erosión y degradación del suelo [28].
- La biomasa es una fuente renovable de energía y su uso no contribuye a acelerar el calentamiento global; de hecho, permite reducir los niveles de dióxido de carbono y los residuos de los procesos de conversión, aumentando los contenidos de carbono de la biosfera [25].
- Los combustibles biomásicos contienen niveles insignificantes de sulfuro y no contribuyen a las emanaciones que provocan “lluvia ácida” [25].

- El uso de los recursos de biomasa puede incentivar las economías rurales, creando más opciones de trabajo y reduciendo las presiones económicas sobre la producción agropecuaria y forestal [25].

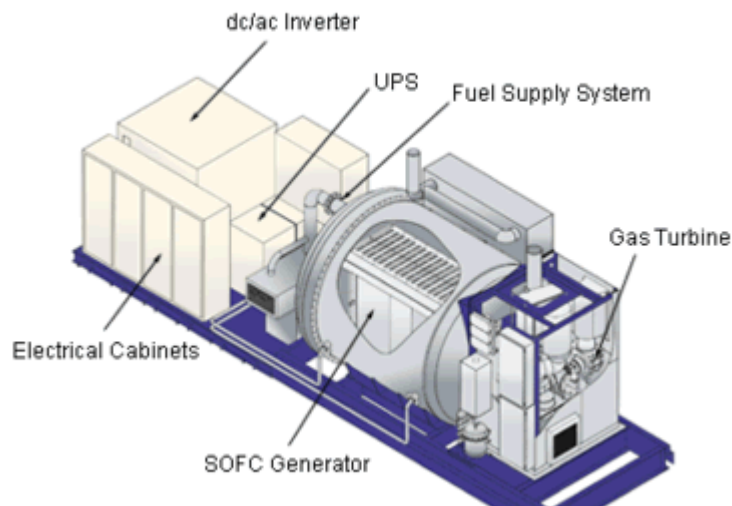
Desventajas

- La biomasa posee menor densidad energética, o lo que es lo mismo, para conseguir la misma cantidad de energía es necesario utilizar más cantidad de recurso. Esto hace que los sistemas de almacenamiento sean, en general, mayores [28].
- El alto grado de dispersión de la biomasa da lugar a que su aprovechamiento no resulte, en ocasiones, económicamente rentable [28].
- El potencial calórico de la biomasa es muy dependiente de las variaciones en el contenido de humedad, clima y la densidad de la materia prima [25].
- Los rendimientos de las calderas de biomasa son algo inferiores a los de las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso [28].

ANEXO C. SISTEMA HÍBRIDO SOFC/MICRO TURBINA A GAS

Un proyecto de investigación dirigido a crear las primeras celdas de combustibles híbridas que integran un sistema SOFC y una micro turbina a gas con una eficiencia del 70 % y una considerable reducción de emisiones.

Sistema ibrido SOFC/Micro Turbina a gas



El objetivo del nuevo proyecto de investigación iniciado por Siemens con el operador alemán EnBW (Energie Baden-Württemberg AG) es crear un sistema híbrido basado en una combinación de celdas de combustible de alta temperatura con una turbina de gas que hace uso de gases de escape procedentes de la primera.