



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Generación distribuida
a partir de biogás producido
en granjas porcinas

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

PRESENTA:
AMARANTA DE LA GUERRA CARRASCO

DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Ciudad Universitaria, México, 2011.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatorias

A mi madre Aracely por todo su amor, por su continuo apoyo y su total confianza, por dejarme ser libre y enseñarme a ser independiente, responsable y sincera.

A mi hermano Pablo por su alegría, su amor, sus consejos y por creer en mí.

A mi hermana Alejandra por ser desde siempre y para siempre mi gran ejemplo, por todo su amor y por ser la mejor amiga.

A mi padre Alejandro por enseñarme el camino a las ciencias y las artes.

A Esteban porque me hace feliz con su sonrisa y me ruboriza con sus ojos. Por compartir su sabiduría conmigo. Por apoyarme tanto en mi estancia en la facultad y fuera de ella. Por ser paciente, comprensivo y cuestionador durante realización de éste trabajo.

A Isabel Juárez y su familia por brindarme su cariño y dejarme ser parte de su bella y gran familia.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería: Marcos Anzorena, Mariel Rosas, Rocío García, Gustavo Valencia, Gerardo Palacios e Israel Vicario.

Agradecimientos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por brindarme una verdadera educación de alta calidad, porque gracias a ésta institución los jóvenes como yo accedemos a la más amplia cultura y la mejor formación científica. En especial a la **Facultad de Ingeniería** y al **Instituto de Ingeniería** por contribuir en mi formación profesional y humana.

Al **Dr. José Luis Fernández Zayas**, por ser paciente y confiar en mí, y por compartir su tiempo, y su conocimiento durante la realización de este trabajo.

Al **Ing. Norberto Chargoy Del Valle**, por la dirección y asesoría que tan atinadamente me proporciono durante el desarrollo de este trabajo

Índice

Resumen	4
1 Introducción	5
1.1 Motivación y formulación del problema	5
1.2 Objetivos y alcances	7
1.3 Organización del trabajo.....	8
2 Estado del arte.....	9
2.1 Aplicaciones en el mundo.....	9
2.1.1 China.....	9
2.1.2 India.....	10
2.1.3 Bolivia.....	11
2.1.4 España.....	12
2.1.5 Cuba.....	13
2.1.6 Estados Unidos.....	13
2.2 Aplicaciones en México.....	13
2.2.1 Coahuila.....	14
2.2.2 Chihuahua.....	14
2.2.3 Nuevo León.....	16
2.2.4 Sonora.....	17
3 Conceptos preliminares.....	18
3.1 Digestores anaerobios.....	18
3.2 Producción de biogás.....	20
3.2.1 Fermentación anaeróbica.....	20
3.2.2 Factores de influencia en el proceso metanogénico.....	21
3.2.3 Modelo de producción de CH ₄	24
3.2.4 Almacenamiento, conducción, combustión y fertilizante.....	25
3.2.5 Filtros para acondicionamiento del biogás.....	28
4 Tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de biogás.....	30
4.1 Turbinas y microturbinas.....	30
4.2 Motor de combustión interna.....	32
4.2.1 Motores de combustión interna de encendido por chispa.....	32
4.2.2 Motores de combustión interna de encendido por compresión.....	33
4.3 Celdas de hidrógeno.....	35

4.3.1 Reformado del biogás.....	35
4.3.2 Celdas de combustible alcalinas (AFC).....	36
4.3.3 Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC).....	36
4.3.4 Celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC).....	36
4.3.5 Celdas de combustible de óxido sólido (SOFC).....	37
4.3.6 Celdas de combustible poliméricas (PEMFC).....	37
4.3.7 Limpieza del biogás para celdas de combustible.....	38
4.4 Comparación entre tecnologías de generación de energía eléctrica.....	39
4.5 Cogeneración.....	40
5 Generación distribuida.....	41
5.1 Definición.....	41
5.2 Calidad de la energía proveniente de la generación distribuida.....	42
5.3 Interconexión de la generación distribuida a la red de distribución.....	42
5.3.1 Reglas generales de interconexión.....	42
5.4 Esquemas de protección para la interconexión.....	43
5.4.1 Esquemas de interconexión para red aislada.....	44
5.4.2 Esquemas de interconexión para red no aislada.....	46
5.5 Ventajas de la generación distribuida en la granja.....	49
5.6 Aspectos legales.....	50
5.7 Aspectos económicos.....	50
5.7.1 Financiamiento.....	50
5.8 Perfiles de generación de energía eléctrica.....	50
6 Conclusiones y recomendaciones.....	54
Lista de figuras y tablas.....	57
Bibliografía y referencias.....	59
Anexo A Digestores de polietileno.....	61
Anexo B Motor Stirling.....	64

Resumen

El combustible renovable de interés es conocido como biogás, y se plantea su producción en una granja porcina; esto pensando en la solución de dos grandes problemas en una granja, la primera: el manejo de las excretas de los cerdos que al ser la materia prima para la producción del biogás, compuesto principalmente de CH_4 y el CO_2 , se convierten en un recurso; la segunda: la producción de la energía eléctrica necesaria para una granja tecnificada.

El biogás es un combustible similar al gas natural, pues su poder calorífico lo obtiene del CH_4 que contiene, el producido por desechos de cerdo contiene hasta un 65% de metano, capaz de producir 6.5 kWh/m^3 de energía. El promedio de producción por cada 5 kg de estiércol es de 0.2325 m^3 de biogás al día.

Por el tipo de combustible se pueden utilizar turbinas que alcanzan hasta un 40% de eficiencia y pueden utilizar 100% de biogás como combustible; motores de combustión que pueden tener hasta un 45% de eficiencia y en el caso de los motores Otto también pueden utilizar 100% de biogás como combustible, pero si se tiene una planta de Diesel la recomendación es utilizar hasta un 60% de biogás con el 40% de Diesel pues al aumentar el nivel de sustitución de biogás a más de 60 %, se tiene una reducción de la eficiencia promedio respecto al modo Diesel de entre 3 y 10%. Las celdas de hidrógeno de alta temperatura pueden alcanzar hasta un 60% de eficiencia y pueden utilizar el biogás como combustible pues el reformado de éste es interno y parte del proceso de conversión de energía.

La generación de potencia eléctrica a través de éste combustible renovable resulta más factible si se piensa en instalaciones de pequeña escala, es decir; de decenas de kW hasta 50 MW. Existen recomendaciones técnicas sobre los tipos de interconexión que se puede hacer de los módulos de generación con la red eléctrica, y dependen de la capacidad y el tipo de aprovechamiento que se le dará a estos sistemas. Independientemente de esto el objetivo de cada configuración es garantizar que la operación de la GD ya sea continua o intermitente, no ponga en riesgo la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico.

Estos valores son solo representativos, se requiere un estudio previo para conocer la cantidad y calidad específica del biogás en la granja. Antes de comenzar con un proyecto de esta índole se deben hacer estudios previos: Volumen de producción de biogás y contenido de CH_4 , debido a las impurezas que tiene, el tipo de filtro más adecuado, perfil de demanda de potencia de la granja y en base a la cantidad de energía que es posible producir se puede hacer la elección del modulo generador mas conveniente.

1 Introducción.

1.1 Motivación y formulación del problema.

Toda actividad industrial requiere de energía eléctrica para su funcionamiento. Actualmente se depende principalmente de combustibles fósiles para la generación de potencia, pero estos al ser procesados provocan daño ambiental, y al no ser renovables resultan cada vez más escasos y por lo tanto costosos, es aquí donde las fuentes de energía renovables cobran cada vez más importancia, ya que se pueden utilizar para generación de energía eléctrica, ayudan a disminuir la dependencia de hidrocarburos fósiles y permiten contribuir a la protección del medio ambiente.

En este trabajo se aborda la generación de energía eléctrica a pequeña escala a través del biogás, un combustible renovable producido en una granja porcina, que, mediante las pertinentes transformaciones de energía se aprovechará en la propia instalación. Con éste tipo de proyectos no sólo se pretende cubrir la demanda de electricidad, sino que se proyecta la creación de infraestructura, empleando mano de obra rural, lo que permitirá incrementar el patrimonio, ingresos y bienestar, tanto de productores como de trabajadores de las granjas.

En la actualidad en México es necesario apoyar a la industria agroalimentaria mediante la aplicación de la tecnología, ya que se tienen muchos problemas, desde la deficiente administración, el poco aprovechamiento de los procesos hasta el mal manejo de residuos. Esto último además de generar conflictos para la propia empresa afecta a las comunidades aledañas pues los productos de desecho pueden provocar malos olores, generación de fauna nociva para la salud de los humanos y de los propios animales de la granja, ó, debido a su utilización directa, como abono en superficies de cultivo, puede afectar las condiciones del suelo y eutrofización de los cauces de agua. En este trabajo el centro de estudio es la industria de las granjas porcinas, y se abordará el problema del manejo de residuos.

Según datos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, (INIFAP), en cuanto al consumo de carne en México se refiere, el pollo ocupa el liderato seguido de la carne de res y en tercer lugar el cerdo. Simplemente en México anualmente se consumen 22 millones de cerdos, de estos, 8 millones se adquieren en el extranjero, principalmente en el mercado estadounidense [1]; además indica que el hecho de que se importe el 40% del consumo se debe a que los costos de producción están por arriba de los que prevalecen en el extranjero y que no se usan de manera eficiente los recursos disponibles que hay en el país. Los principales estados productores de cerdo son Sonora, Jalisco, Guanajuato, Michoacán, Puebla y Yucatán.

Se debe considerar que los animales en las granjas generan emisiones de productos contaminantes, debido al mal manejo de sus excretas, lo que genera problemas de desequilibrio físico, químico y biológico en las tierras de cultivo, y en el peor de los casos pueden tener un alcance hacia caudales o mantos acuíferos provocando la eutrofización¹.

¹ Ocurre cuando organismos que al morir se acumulan sobre el fondo y no son totalmente consumidos por organismos degradadores se almacenan y terminan por convertir al cuerpo de agua en un pantano y, posteriormente, en tierra firme.

Pero el más importante es que siendo materia orgánica de fácil fermentación, produce gas metano (CH_4) que de acuerdo al protocolo de Kioto y con objeto de homogenizar la medición de la influencia de los gases en el efecto invernadero, cada uno de estos se expresa en cantidades de dióxido de carbono equivalente; con esto se tiene una relación entre el CH_4 y el CO_2 de 21:1, es decir, que por su capacidad de absorber y reflejar la radiación emitida por el suelo y nubes, un gramo de CH_4 equivale a 21 gramos de CO_2 en una escala de tiempo de 100 años [2].



Figura 1.1 Principales estados productores de cerdo. Fuente: INIFAP.

En ese sentido se considera que el manejo correcto de los desechos de animales en las granjas porcinas tiene por un lado una potencialidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y por el otro siendo el CH_4 un gas con alto contenido energético se tiene un valioso combustible y el potencial de generación de energía eléctrica a pequeña escala y descentralizada.

El Mecanismo de Desarrollo Limpio, derivado del Protocolo de Kioto surge como resultado de los esfuerzos de los países para reducir el nivel de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Por medio de éste, se han establecido estrategias, en donde se asignan valores monetarios a estas emisiones (Bonos de carbono). Esta situación ha permitido que los países desarrollados puedan invertir en países en desarrollo, para la generación de proyectos sustentables de reducción de emisiones, las que son contabilizadas como propias por los países desarrollados. En los países en donde se aplica este tipo de proyectos se da oportunidad para generar un ingreso adicional a los dueños de las unidades productivas. Existe además en México un proyecto entre el Banco Mundial y el Fideicomiso de Riesgo Compartido, (FIRCO), del cual surge el Plan de Manejo Ambiental, documento en el cual “se considera el apoyo a agroindustrias que apliquen medidas que aseguren el cumplimiento con las normas ambientales y para que utilicen tecnologías limpias y desarrollen proyectos de eficiencia energética para atender y disminuir sus demandas energéticas”.

Existen diversas tecnologías para el aprovechamiento del biogás para generar energía eléctrica. El uso de turbinas, microturbinas, motores de combustión o celdas de combustible, permite el aprovechamiento directo del biogás, siempre que sea tratado

pertinentemente para cada caso.

En el caso particular de las granjas porcinas la utilización del biogás para generación de energía eléctrica está destinada a:

- Bombeo de agua.
- Mezcladoras y molinos para el alimento de los animales.
- Calefacción.
- Iluminación.
- Ventilación.
- Refrigeración para el laboratorio de semen.

Con el aprovechamiento del biogás se elimina la generación de malos olores que se producen durante la descomposición de estiércol, y que afectan a la población cercana a las unidades productivas, además de mejorar el ambiente productivo.

El fertilizante que resulta como subproducto de la generación de biogás, presenta muchas ventajas como fertilizante para el suelo de cultivo, ya que, en el proceso de digestión, el nitrógeno orgánico en el estiércol se convierte en gran proporción a amoníaco, el constituyente básico de fertilizante comercial, que es directamente utilizado por las plantas.

Además:

- No tiene mal olor.
- Al no tener contacto con el oxígeno, por estar dentro del digestor, la mayoría de los microorganismos dañinos mueren.
- Combate la erosión.

La utilización de biogás como fuente de energía local se presenta como una oportunidad de contribución adicional al desarrollo sustentable y como una fuente de generación de empleo, inversión extranjera y desarrollo local. La venta de energía, la venta del abono y los ahorros en energía eléctrica pueden generar ingresos adicionales para la operación de las granjas.

1.2 Objetivos y alcances.

Describir el proceso de producción de biogás a partir específicamente de desechos de cerdos, detallando la fermentación anaerobia, los factores de influencia de la misma y los filtros para el acondicionamiento del combustible, para el mejor entendimiento de las etapas de una planta de biogás.

Ejemplificar los proyectos que existen en materia de biogás en el mundo y en México, describiendo en general la ubicación, el tipo de desecho que procesa, el tamaño de la planta, etc., para profundizar el conocimiento que se tiene de ésta tecnología.

Describir el funcionamiento de 3 tecnologías que usando el biogás como combustible se integran en un sistema de generación de potencia anotando su modo de funcionamiento, las modificaciones necesarias, las potencias y eficiencias que en teoría alcanzan,

emisiones, etc. Para entender cómo funcionan los módulos de generación y desarrollar criterios de discriminación para seleccionar una planta de generación de potencia.

Describir las configuraciones que existen para la interconexión de los sistemas de generación distribuida, explicando los elementos que los integran y su objetivo específico, para conocer los elementos que se deben tomar en cuenta para el buen funcionamiento y protección de los sistemas de potencia.

Generar interés acerca de la generación distribuida a toda persona que desee desarrollar tecnología sustentable, innovadora y eficiente, para la tecnificación de una granja porcina; englobando los beneficios técnicos y económicos, buscando el desarrollo de la industria agroalimentaria, y por ende del campo en México.

1.3 Organización del trabajo.

El Capítulo 1 contiene la motivación y justificación, así como los objetivos que se persiguen en este trabajo.

En el Capítulo 2 se da un recuento de algunos proyectos que existen en el mundo y en México en materia de biogás.

En el Capítulo 3 se definen los conceptos necesarios para entender el funcionamiento de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de biogás. Desde lo que es el biogás, cómo se produce y su potencial energético.

En el Capítulo 4 se explican brevemente los principios básicos del funcionamiento de turbinas, motores de combustión interna y celdas de combustible. Además se describen los requerimientos y modificaciones que se les debe dar a los sistemas que integren estos elementos para la generación de energía eléctrica con biogás.

En el Capítulo 5 se aborda el concepto de generación distribuida, los elementos básicos que componen un sistema de este tipo para su correcto funcionamiento, así como el potencial de un sistema de generación distribuida.

En el capítulo 6 se anotan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

2 Estado del arte.

2.1 Aplicaciones en el mundo.

En Europa se tiene un gran desarrollo en países como Alemania, Austria, Dinamarca y Suecia. En Asia, son China, India, Nepal y Vietnam. En América: Cuba, Canadá, E.E.U.U., Chile, etc., tienen grandes aplicaciones en materia de biogás. En países como Suecia, Suiza y Alemania se utiliza biogás para vehículos de transporte, y se cuenta para este propósito con una red de estaciones de gas. En Alemania y Austria se introduce biogás, conocido como bio-metano a la red de gas natural. Los países generadores de tecnología anaeróbica, con mayor desarrollo en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, EE.UU., Filipinas y Alemania.

2.1.1 China.

Actualmente es uno de los países líderes en producción de biogás. La mayor parte de los digestores instalados es para uso rural a nivel familiar, pero existen empresas especializadas en China que desarrollan proyectos en gran escala para la industria.

La Planta Integrada de Puxin Biogas cuenta con una capacidad para 200 m³, está diseñada para tratar los residuos de 1000 cerdos de una granja en Miyun, Beijing. El biogás proporciona combustible a 100 familias en el campo para su uso cotidiano.



Figura 2.1 Planta de biogás en Miyun, Beijing.

En la ciudad de Shenhen, se tiene otra planta de la misma empresa construida para el tratamiento de residuos orgánicos, con una capacidad de 60 m³. El combustible generado se le proporciona a un restaurante.



Figura 2.2 Planta de biogás en Shenhen.

2.1.2 India.

En nueva Delhi, se construyó la planta en Punjab, con capacidad de 1 MW. Esta planta maneja desechos de animales de granja.



Figura 2.3 Planta biogás de Punjab.

En Ankleshwar, Gujarat, existe una planta de 2 MW, responsabilidad de las industrias Kanoria Chen. Es una planta de tratamiento de aguas residuales. Se produce biogás que

se usa para generar vapor para procesos de la industria química, además se aprovecha para generación de energía eléctrica.



Figura 2.4 Planta de biogás de Kanoria Chem, Ankleshwar.

2.1.3 Bolivia.

A través del Programa Viviendas Autoenergéticas se construyen digestores de polietileno tubular, cuyo combustible generado se utiliza para calefacción y cocción en los hogares.



Figura 2.5 Digestores tubulares. Bolivia.



Figura 2.6 Digestores de polietileno en una granja en Bolivia.

2.1.4 España.

En Valencia existe una planta de tratamiento de aguas residuales propiedad de EDAR Carraixet, En total trabaja con 32 620 m³/d de agua que son tratados por biodigestión en la planta. La potencia instalada es de 35 kW.

Esta misma empresa cuenta además con otra planta de tratamiento de aguas residuales en Sevilla, con una capacidad de 225 000 m³/d de agua tratadas anaeróbicamente, con una potencia instalada de 1 890 kW.



Figura 2.7 Planta de biogás con base en tratamiento de aguas residuales, Valencia.



Figura 2.8 Planta de biogás con base en tratamiento de aguas residuales, Sevilla.

2.1.5 Cuba.

La primera aplicación industrial del biogás en Cuba data de 1940. En aquel momento se construyeron dos digestores para procesar los residuos de la Cervecería del Cotorro.

En 1990 surgió el Movimiento Nacional de Biogás y hasta el 2006 se construyeron más de 500 plantas. Para 2009 ya existían 700 plantas de biogás en granjas estatales y en el sector campesino.

2.1.6 Estados Unidos.

En Michigan como parte del proyecto “Geerlings Hillside Farms: Methane Recovery & Electricity Generation Project”, existe una granja que recoge los desechos de alrededor de 8000 cerdos de otras granjas para su tratamiento en digestores; con lo que se obtiene biogás y fertilizante.



Figura 2.9 Granja Geerlings Hillside, Michigan.

2.2 Aplicaciones en México.

En México el Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero (COMEGEI) se encarga de promover y aprobar proyectos de reducción de emisiones de GEI. Hasta a mediados de octubre de 2007 la cartera de proyectos relacionados con el manejo de residuos en granjas porcinas, era de un total de 88 ubicados en los Estados que se muestran en la Figura 2.10 [3].



Tabla 2.10. Ubicación de proyectos de manejo de residuos porcinos acreditados por el COMEGEI.

2.2.1 Coahuila.

En Torreón, Coahuila el Grupo Agrícola Vigo produce electricidad, cuentan con 2000 Vacas en producción, donde el establo demanda 120 kW y se generan 110 kW.



Figura 2.11 Generador de planta de biogás, Torreón.



Figura 2.12 Sistema de captación de residuos vacunos. Torreón

2.2.2 Chihuahua.

En el estado de Chihuahua el Grupo Agrícola los Lujan, ubicado en Delicias Chihuahua, cuenta con 8000 Vacas en producción, para lo cual el establo demanda 350 kW y se generarán 1000 kW. Los excedentes son vendidos a CFE [4].



Figura 2.13 Granja Delicias, Chihuahua.



Figura 2.14 Construcción del digestor Granja Delicias, Chihuahua.



Figura 2.15 Generador Granja Delicias, Chihuahua

2.2.3 Nuevo León.

Granja Porcina Ana Margarita, en el municipio de Montemorelos, es una unidad productiva con 1200 vientres. Se tiene un digester con una producción de 20,478 m³ de biogás al día, parte de la cual se quema para la contabilización de Certificados de Reducción de Emisiones y otra parte se utiliza para la obtención de energía eléctrica mediante un generador con capacidad de generación de 60 kW. El consumo de energía eléctrica al interior de la unidad productiva es de 40,000 kWh al mes. La energía generada se utiliza para iluminación, calefacción en las salas de maternidad y destetes, ventiladores, líneas de alimentación, laboratorio de semen y bombeo de agua.

En Monterrey Bioenergía de Nuevo León desarrolló una planta aprovechando el biogás que se forma en los rellenos sanitarios. El sistema consiste básicamente en la extracción del biogás mediante la perforación de pozos, los cuales se conectan a un ramal central que lo dirige hacia los módulos generadores de electricidad. La Fase Monterrey I, contaba con una capacidad de generación de 7.42 MWh.



Figura 2.16 Planta de biogás en relleno sanitario en Monterrey

Se piensa en la expansión de la Planta, dentro de una segunda fase, contemplando incrementar la capacidad de generación para a un total de 12.72 MWh.



Figura 2.17 Transformadores en la planta Benlesa, Monterrey

2.2.4 Sonora.

La granja se localiza en el Valle del Yaqui y genera 600 m³/d de agua residual. La laguna anaerobia de 6800 m³ instalada en la granja porcina con capacidad de 6000 cerdos es utilizada para tratar el agua residual generada. La laguna se encuentra herméticamente cubierta con plástico a fin de coleccionar el biogás producido. El agua residual tratada anaerómicamente (ARTA). La laguna anaerobia fue monitoreada durante el año 2006. Durante este periodo, la laguna produjo 395.2 m³/d de biogás, con 70% de CH₄ y 30% de CO₂.

3 Conceptos preliminares.

3.1 Digestores anaerobios.

La energía contenida en la biomasa puede ser liberada mediante diversos procesos², entre éstos se considera que tiene un gran potencial para la generación de energía, la fermentación anaeróbica de los desechos orgánicos provenientes de las unidades ganaderas, para la producción de biogás.

Los procesos de biodegradación se realizan dentro de una instalación conocida como digestor, o, reactor anaerobio, dentro de la cual se dan las condiciones adecuadas para la fermentación anaeróbica. Debe asegurarse que esté herméticamente sellado, para evitar la entrada de oxígeno, debe tener conductos que permitan la entrada del estiércol y la salida del biogás y el subproducto: fertilizante, además de elementos extra como válvulas de seguridad y sistema de mezclado.

El digestor tipo hindú se distingue por el uso de una campana móvil, que asciende al aumentar la presión del gas dentro de ella. La base de éste digestor es un tanque de almacenamiento en forma cilíndrica parcialmente bajo tierra, que puede ser construido de piedra, ladrillo, hormigón o metálico.

El diseño del tipo chino utiliza para el almacenamiento del biogás una cúpula fija unida al tanque de almacenamiento, que puede ser de ladrillo o de elementos prefabricados de hormigón, también se construyen enterrados.

Estas dos instalaciones llamadas tradicionales, tienen como ventaja su elevada vida útil, siempre que se realice un mantenimiento constante, pero poseen como desventaja el alto costo de la inversión inicial.

Los digestores de polietileno logran disminuir considerablemente los costos iniciales de éstas instalaciones. Los componentes fundamentales de este digestor son: una bolsa de polietileno de película delgada donde se almacenan los desechos mezclados con agua, válvulas de corte, de seguridad, tuberías y adaptadores. Estas unidades, son fáciles de transportar y sencillas de instalar.

Diseño/Criterio	Digestor hindú	Digestor chino	Digestor de polietileno
Sustratos más adecuados	Estiércol animal con o sin residuos vegetales	Estiércol animal con residuos vegetales	Estiércol animal
Vida útil	8 a 12 años	12 a 20 años	2 a 5 años
Volumen del digestor	6 a 100 m ³	6 a 20 m ³	4 a 100 m ³
Producción diaria de biogás	0.3-0.6	0.2-0.5	0.3-0.8
	m ³ de biogás por m ³ de digestor		

Tabla 3.1 Comparación entre digestores [5].

² Estos procesos pueden ser físico-químicos: combustión, pirólisis, gasificación o biológicos utilizando microorganismos en: la digestión anaeróbica, o la fermentación alcohólica.

Otro modelo de digester que logra reducir el costo de instalación sin sacrificar el tiempo de vida del digester, consiste en un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo, como los digestores tradicionales, pero con una cúpula semiesférica de polietileno de película delgada.

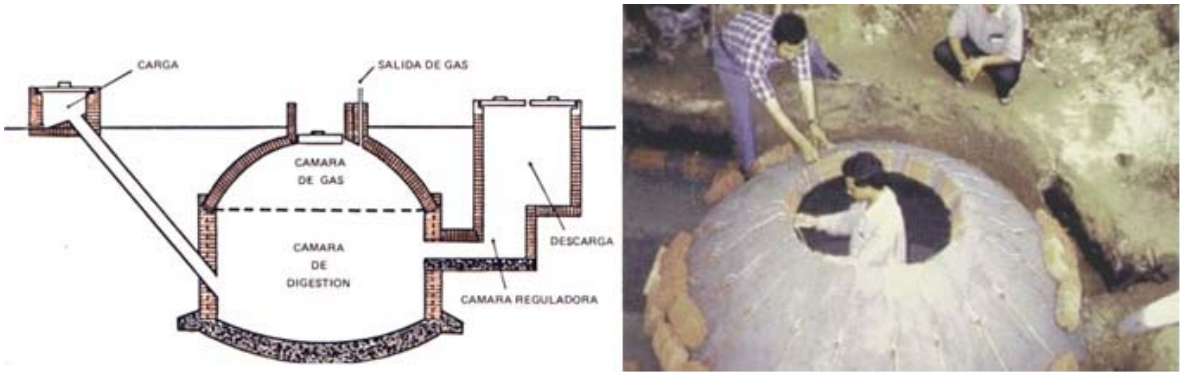


Figura 3.1 Digester tipo chino [6].



Figura 3.2 Digester polietileno [7].



Figura 3.3 a) Digester hindú [6]. b) Digester con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno [5].

3.2 Producción de biogás.

El biogás resulta del desarrollo de procesos de biodegradación del estiércol que contiene sólidos volátiles orgánicos en forma de grasas, carbohidratos, proteínas y otros nutrientes disponibles para el desarrollo y reproducción de bacterias en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno); y está compuesto por una mezcla de gases en donde predomina el CH₄ y el CO₂.

GAS	PORCENTAJE
Metano, CH ₄	55 a 70%
Dióxido de carbono, CO ₂	35 a 40%
Hidrógeno, H ₂	1 a 3%
Nitrógeno, N ₂	0.5 a 3%
Sulfuro de hidrógeno, H ₂ S	0.10%
Vapor de agua	Trazas

Tabla 3.2 Composición del biogás [6].

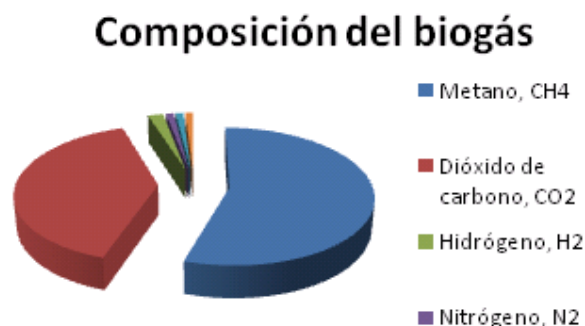


Figura 3.4 Composición del biogás [6].

3.2.1 Fermentación anaeróbica.

La fermentación anaeróbica puede dividirse en cuatro fases de degradación: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Cada fase depende de distintos tipos de bacterias que poseen una estrecha relación simbiótica y que requieren de ciertas características del ambiente donde se encuentren.

3.3.1.1 Fase de hidrólisis.

Las bacterias de esta primera etapa toman la materia orgánica con sus largas cadenas de estructuras de carbón y las van rompiendo y transformando en cadenas más cortas y simples (ácidos orgánicos) liberando H₂ y CO₂. Este trabajo es llevado a cabo por un complejo de microorganismos de distinto tipo que son en su gran mayoría anaerobios facultativos³. La hidrólisis de carbohidratos toma lugar en unas cuantas horas, mientras que la hidrólisis de proteínas y lípidos tarda unos días [8].

3.3.1.2 Fase de Acidogénesis.

Esta etapa también llamada fermentación ácida, se efectúa por la acción de las bacterias acidogénicas que convierten los productos solubles de la etapa de hidrólisis en ácidos orgánicos de cadena corta. Azúcares simples, aminoácidos y ácidos grasos son degradados en acetatos, H₂ y CO₂ (70%) así como en ácidos grasos volátiles (VFA) y alcoholes (30%) [8].

3.3.1.3 Fase de acetogénesis.

Las bacterias acetogénicas producen H₂. Los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos obtenidos en la etapa anterior se degradan produciendo el 54% del hidrógeno

³ Pueden soportar bajos niveles de oxígeno

que se utilizará en la formación de CH₄.

Los microorganismos productores de acetatos y de CH₄ son simbióticos. Los organismos metanogénicos sólo pueden sobrevivir con una alta presión de H₂, por lo que durante la baja concentración de H₂ perviven los microorganismos acetogénicos, pero cuando la concentración de H₂ sube, el ambiente es más propicio para los metanogénicos [8].

3.3.1.4 Fase metanogénica.

Esta fase sólo es posible bajo estrictas condiciones anaeróbicas. El 70% del CH₄ formado proviene de acetatos, mientras el 30% restante es producido por la conversión de H₂ y CO₂. La formación de CH₄ puede tener lugar por dos vías diferentes: la ruptura de las moléculas de ácido acético para generar CO₂ y CH₄, o la reducción del CO₂ con H₂ [8].

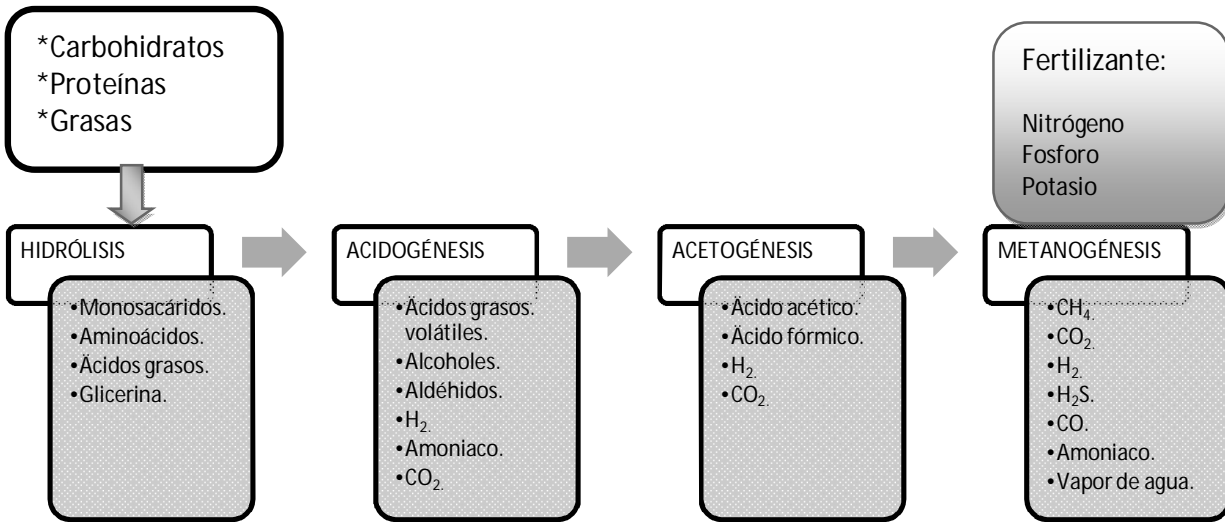


Figura 3.5 Etapas de la digestión anaerobia.

3.2.2 Factores de influencia en el proceso metanogénico.

3.2.2.1 Tipo de sustrato.

La producción de biogás dependerá fundamentalmente de estiércol producido, que a su vez depende del tipo de animal y de la calidad de los alimentos, el peso promedio de los mismos y el sistema de recolección de las excretas que se utilice. En cuanto al volumen por las distintas especies animales, se tiene por ejemplo [8].

Especie	Peso vivo	kg estiércol/ día	%CH ₄
Cerdos	100	4.5-6	65-70
Vacunos	400	25-40	65
Equinos	450	12-16	65

Tabla 3.3 Cantidad de estiércol y metano por especie animal.

No se tiene un valor estandar de cuanto biogás se produce por cerdo. Po ejemplo en [8] se menciona que 5 kg de desechos de un cerdo producen 0.165 m³ de biogás al día, mientras que [9] maneja que por cada 2 a 3 Kg. de estiércol/día se producen 0.15 m³ biogás diarios. Haciendo un promedio se tiene:

Estiércol diario (1 cerdo)	m³ de biogás/día min.	m³ de biogás/día máx.	Promedio m³ de biogás/día.
5 Kg	0.165	0.3	0.2325

Tabla 3.4 Promedio de producción de biogás al día para un cerdo.

Estos valores son solo representativos, se requiere un estudio previo para conocer la cantidad y calidad específica del biogás en la granja.

3.2.2.2 Temperatura.

Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4^o a 5^oC y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 70^oC. Se realiza generalmente una diferenciación en rangos de temperatura de acuerdo al tipo de bacterias que predomina en cada una de ellas [8]. La SAGARPA recomienda una temperatura de trabajo de entre 35 a 38 °C.

Bacterias	Rango de temperatura	Sensibilidad
Mesofílica	20°C – 40°C	+ - 1°C/hora
Termofílica	>40°C , <70°C	+ - 0.5°C/hora

Tabla 3.5 Rango temperaturas para cada bacteria.

La actividad biológica y por lo tanto la producción de gas aumenta con la temperatura. Al mismo tiempo se debe tener en cuenta que al no generar calor el proceso, la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior. A medida que se aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención, y como resultado se necesitará un menor volumen de digester para tratar una misma cantidad de biomasa [10].

3.2.2.3 Velocidad de carga volumétrica.

Volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digester. Este tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención. Existen diferentes formas de expresar este parámetro siendo los más usuales los siguientes: kg de material/día; kg de materia seca/día; kg de sólidos volátiles/día todos expresados por metro cúbico de digester.

3.2.2.4 Tiempo de retención hidráulico (T.R.H.).

Como se había mencionado, el tipo de sustrato y la temperatura del mismo tienen una influencia directa en el T.R.H. Con relación al tipo de sustrato. El límite mínimo de los T.R.H. está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas, debido a que la continua salida de efluente del digester extrae una determinada cantidad de bacterias. La SAGARPA recomienda tiempos de retención de 25 a 30 días. El primer gas de una planta recién cargada contiene muy poco metano, por esa razón se recomienda que el gas

producido en los primeros 3 a 5 días se deje escapar sin utilizarlo.

3.2.2.5 Valor de pH.

Una vez estabilizado el proceso fermentativo, el pH se mantiene en valores que oscilan entre 7 y 8.5. Las bacterias formadoras de ácidos que se desarrollan rápidamente frente a exceso de materia orgánica, producen exceso de ácidos que se acumulan y pueden disminuir el nivel pH necesario para las formadoras de CH₄. Añadir cal ayuda a disminuir la acidez en el digestor para conservar el pH óptimo [11].

3.2.2.6 Contenido de sólidos.

La SAGARPA recomienda que los sistemas de generación de biogás se realicen en granjas en donde el agua es suficiente, asumiendo que la limpieza de las instalaciones se realiza utilizando acarreo hidráulico, o bien en donde se considera el reciclado del agua obtenida. Se considera una mezcla de agua con 7 a 9% de sólidos totales para incorporarse al digestor, la cual se puede lograr a nivel de campo, mezclando 3.5 a 4 partes de agua por 1 de excreta de cerdo fresca [9] [12].

3.2.2.7 Mezclado.

La eficiencia en la producción de biogás puede verse afectada por la movilidad delimitada de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato, a medida que crece el contenido de sólidos. La agitación o mezclado es importante pues evita la formación de costras en la superficie del sustrato, elimina espacios sin bacterias, además de que se debe hacer un mezclado del sustrato nuevo.

3.2.2.8 Inhibidores.

La presencia de metales pesados como el Cu y el Zn para residuos porcinos, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones, puede inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo [9].

3.2.2.9 Relación carbono/nitrógeno C/N.

Las bacterias necesitan para su crecimiento fuentes de carbono y nitrógeno. Debe existir una relación adecuada entre nutrientes, es decir, entre carbohidratos y proteína. La relación óptima de C/N es de 30:1, cuando la relación es muy estrecha (10:1), hay pérdidas de nitrógeno asimilable, lo cual reduce la calidad del material digerido. Si la relación es muy amplia (40:1) se inhibe el crecimiento debido a la falta de nitrógeno [8] [10].

3.2.2.10 Metano y dióxido de carbono.

La composición del gas (referida a la relación entre CH₄ y CO₂) sólo puede ser parcialmente controlada. Depende de los siguientes factores [5]:

1. La adición de compuestos con largas cadenas de hidrocarburos, por ejemplo, grasas pueden ayudar a incrementar la calidad del gas adicionando cantidades

- apropiadas, no deben ser demasiado grandes para evitar la acidez.
2. El proceso de fermentación es más rápido y más equitativo si el material en el digestor está húmedo y se suministra homogéneamente.
 3. Un alto contenido de líquido en un digestor resulta en un alto contenido de CO₂ disuelto en agua, reduciendo el contenido de CO₂ del biogás.
 4. El aumento de temperatura durante el proceso de fermentación disminuye la concentración de CO₂ disuelto en agua.
 5. Es importante que el material de descarga esté totalmente descompuesto.

3.2.3 Modelo de producción de CH₄.

Se llevó a cabo un estudio sobre la duración de la digestión que permite el agotamiento de los sólidos volátiles, trabajando a diferentes temperaturas con un mismo sustrato, según se presenta en la Figura 3.6 [Dr. Schulz H.,1996 citado por Sogari Noemi, 2003].

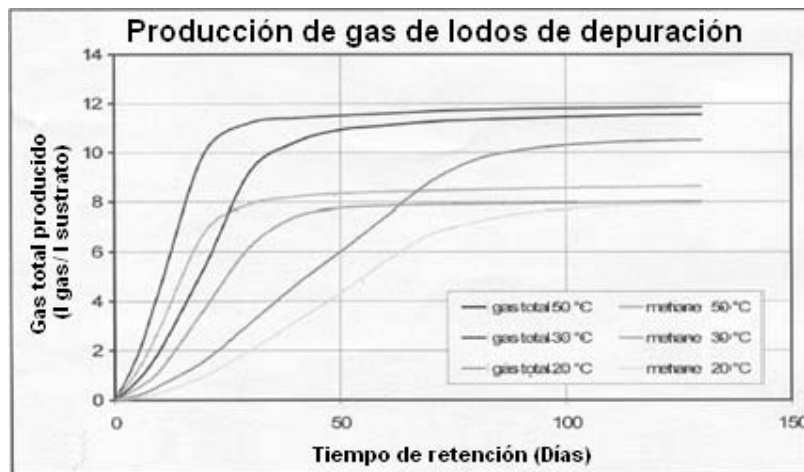


Figura 3.6 Cantidad total de gas producido por litro de materia, para diferentes temperaturas.

Cómo se había mencionado se observa que, conforme se incrementa la temperatura, la conversión de materia orgánica en biogás aumenta. En todos los casos, la forma de las curvas se asemeja a la de una función exponencial, a medida que aumenta el valor del tiempo, la curva crece hasta un tiempo determinado, para el cual la generación de gas permanece constante.

Puede expresarse de la siguiente manera:

$$M_{gen} = M_{max} * (1 - e^{-t/A}) \dots \dots \dots A$$

Donde:

M_{gen} es la cantidad de CH₄ acumulado durante el proceso de fermentación.

$M_{max} = \frac{V_{CH4}}{S_{org. total}}$ es la máxima cantidad de metano que se puede producir

V_{CH4} es el volumen de metano generado

$S_{org. total}$ cantidad de materia orgánica total utilizada en todo el proceso

t es el tiempo considerado.

A es una constante que depende de la temperatura de trabajo, el contenido de materia orgánica existente en el producto que se degrada, etc.

En un caso particular de las mediciones para estiércol de cerdo [12] a una temperatura de 35°C se tiene:

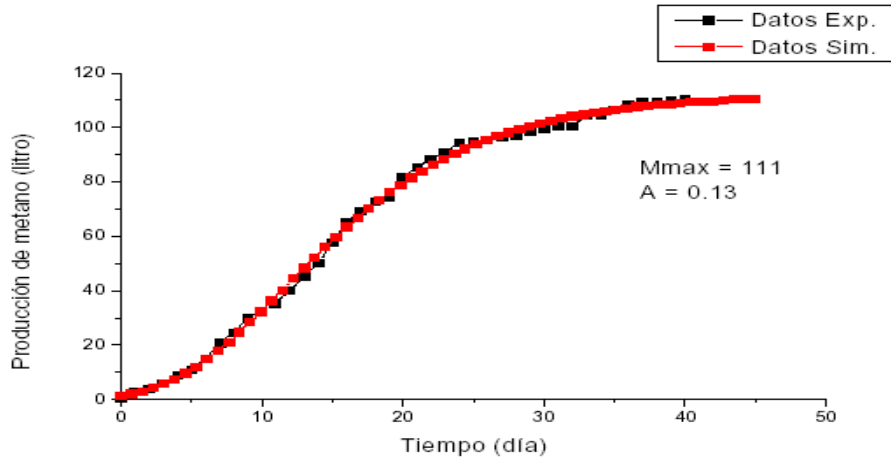


Figura 3.7 Producción de metano generado por la fermentación de estiércol de cerdo.

En este estudio se comprobó que los datos experimentales resultan muy cercanos a los datos simulados con la ecuación A. El porcentaje de CH₄ depende del material de fermentación: el estiércol de cerdo alcanza aproximadamente el 67% de contenido.

El biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de auto-ignición de alrededor de los 700°C (Diesel 350°C, Gasolina cerca de los 500°C). Con un contenido de CH₄ mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable [8].

EQUIVALENCIA ENERGÉTICA DEL BIOGÁS
1 m ³ de biogás (60% de metano) equivale a:
0.71 litros de gasolina
0.55 litros de diesel
0.45 litros de gas licuado de petróleo
1.85 kilos de leña con 10% de humedad

Tabla 3.6 Potencial energético Biogás. Fuente: FIRCO

3.2.4 Almacenamiento, conducción, combustión y fertilizante.

Podemos hablar de 4 procesos en una planta de biogás:

- Transporte, almacenamiento y pre-tratamiento de estiércol.
- Producción de biogás.
- Almacenamiento de abono, acondicionamiento y utilización.
- Almacenamiento de biogás, acondicionamiento y utilización.

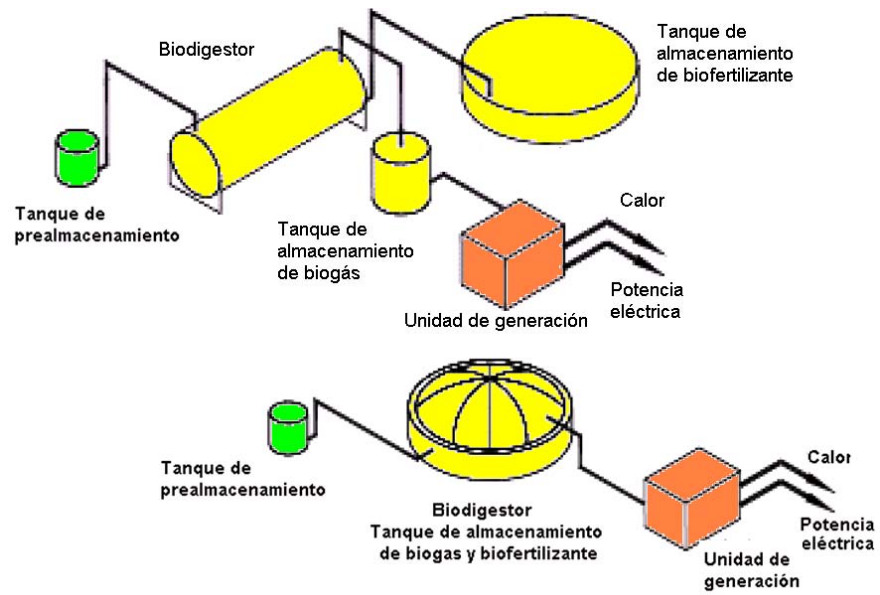


Figura 3.8 Esquemas generales de una planta de producción y aprovechamiento de biogás [5].



Figura 3.9 Planta de biogás en Alemania, procesadora de estiércol de cerdo [5].



Figura 3.10 Planta de biogás en Dinamarca [5].

3.2.4.1 Almacenamiento de estiércol.

Los dispositivos para este efecto deben tener la capacidad de almacenar el estiércol por varios días. Siendo materia casi líquida puede ser bombeada posteriormente al digestor. Se puede evitar el uso de bombas si el tanque de almacenamiento está a más altura que el digestor. Debe tener un sistema de agitación.

3.2.4.2 Almacenamiento biogás.

La forma de almacenar el biogás dependerá del tipo de digestor empleado. Se debe contar con válvulas de seguridad. La instalación de almacenamiento del biogás debe tener como mínimo la capacidad correspondiente a dos días de producción de biogás.

Tanques de baja presión.- Este tipo de almacenamiento es instalado al exterior, por ejemplo como domo encima del digestor. Se mantiene a un rango de presión de 5 Pa a 50 Pa y consiste en membranas especiales [5].

Tanques de media y alta presión.- Se mantienen a presiones de 500 KPa a 25 MPa. Como requieren cantidades adicionales de energía para mantener estas presiones no son muy usuales. Será necesaria sólo si existen excedentes de producción de biogás y se desea almacenarla por varios días [5].

3.2.4.3 Conducción.

Para la conducción, las tuberías de gas pueden estar hechas de acero, cobre o plástico. Mientras más larga sea la tubería de gas mayor será la caída de presión presentándose la necesidad de adaptar bombas a la línea. La tubería de gas debe estar provista de un sistema que permita eliminar el agua de condensación [7].

3.2.4.4 Combustión.

En caso de tener excedentes de biogás es necesario contar con un sistema de quemado del mismo. El biogás mezclado con aire puede ser quemado descomponiéndose principalmente en CO_2 y H_2O .

El aire teórico es el 21% pero debe ser mayor para lograr una buena combustión. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje entre 100 y 110. La cámara de combustión y los quemadores deben estar hechos de acero colado, de acero especial o esmalte [8].

3.2.4.5 Fertilizante.

La materia final que se extrae del digestor después de cumplido el tiempo de retención resulta un fertilizante con una fracción líquida y una sólida. En el caso del producido por desechos de cerdo está compuesto en general por nitrógeno, fósforo y potasio. Este no tiene mal olor, por lo que no atrae moscas, no deja residuos tóxicos en el suelo y eleva la calidad del mismo.

El efluente tiene una relación C/N baja en comparación con los desechos de animales no tratados. Esto se traduce en un tiempo más corto para actuar como fertilizante. Cuando la relación C/N es muy grande algunos micro-organismos son retenidos por el suelo de cultivo y compiten con las plantas por el nitrógeno [5].



Figura 3.11 Membrana instalada para almacenar biogás excedente [5].



Figura 3.12 Quemadores de biogás [8].



Figura 3.13 Aplicación de fertilizante directamente al suelo [8].

3.2.5 Filtros para acondicionamiento del biogás.

Aunque en las tecnologías del aprovechamiento del biogás no se pretende que exista un 100% de pureza de CH_4 , con objeto de aminorar los daños que ciertos compuestos tóxicos, que reducen la calidad del biogás como combustible, pueden ocasionar en los equipos de los diferentes sistemas en los que se utilice el éste para la generación distribuida, existen procedimientos de filtrado del mismo que no solo eliminan los componentes dañinos, sino que en algunos casos aumentan la producción de CH_4 .

El CO_2 disminuye el poder calorífico, daña las celdas de combustible de baja temperatura, etc. El H_2S es altamente corrosivo al reaccionar con el agua, convirtiéndose en ácido sulfúrico (H_2SO_4) que provoca corrosión. El valor recomendado de H_2S en el biogás es 200 ppm, para su uso en motores de combustión interna [8].

En 2007 en Costa Rica se realizó un estudio en la Universidad EARTH para medir la eficacia del filtrado de biogás por medio de suspensiones en agua de CaO (óxido de calcio), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de calcio) y CaSO_4 (sulfato de calcio), para determinar el mejor compuesto a utilizar como filtro para capturar el CO_2 , el CO y el H_2S del biogás. El aumento en la concentración de CH_4 se relacionó directamente con la retención del CO_2 y del CO por parte de las suspensiones [14].

Compuestos	Mediciones	CH ₄ %	H ₂ S ppm
		Antes de filtración	79.4
CaO	Sin agitación	86.6	11.5
	Con agitación	91.4	3.2
Ca(OH) ₂	Sin agitación	82.6	67.1
	Con agitación	84.0	2.4

Tabla 3.7 Resultados al utilizar filtros para capturar el CO, el CO₂ y el H₂S en el biogás.

Un estudio realizado en 2008 en la granja La Estrella en Guanajuato, con biogás en el que se comparó el empleo de un filtro de limaduras de hierro, contra métodos de absorción en fase líquida en agua, CaO, NaOH, y monoetanolamina, se observó que el filtro de limaduras de hierro elimina solo el 12% del H₂S, muy deficientemente, mientras que el agua como solución absorbente resultó de un 20%, la monoetanolamina alcanza porcentajes de remoción de un 100% por un período de tiempo superior a 15 minutos. La solución de CaO alcanza un 99.7% de remoción de H₂S, sin embargo, deja de ser funcional cuando ha pasado un tiempo aproximado de 15 minutos. La solución de NaOH remueve un 96.9%, e igualmente pierde su efectividad luego de 5 minutos [15].

En 2009 se realizó otro estudio en la Universidad EARTH, donde se evaluó la capacidad de retención de H₂S, en dos tipos de sustratos orgánicos, EM-compost y lombricompost. El filtro que mostró mayor eficiencia en la retención de H₂S es el EM-compost y el filtro de mayor eficacia utilizado con ambos sustratos fue el de 200 cm de longitud [16]. Los resultados se muestran en la Figura 3.14.

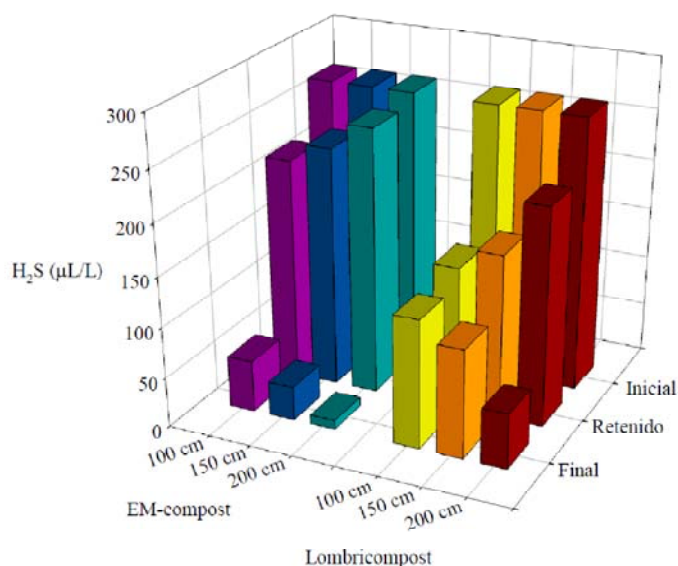


Figura 3.14 Retención de H₂S en dos tipos de sustrato y tres longitudes de filtro

Comercialmente se utilizan cuatro métodos para la remoción del CO₂ del biogás:

- Lavado con agua
- Lavado con glicol polietileno
- Tamiz de carbón molecular
- Membranas.

4 Tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de biogás.

4.1 Turbinas y microturbinas.

Generalmente las plantas con turbina de gas se utilizan para cubrir cargas pico, como sistema de respaldo o bien, si se tiene acceso a un combustible barato, para cubrir la carga base. Los componentes básicos de una planta con turbina de gas son: un compresor, una cámara de combustión y una turbina.

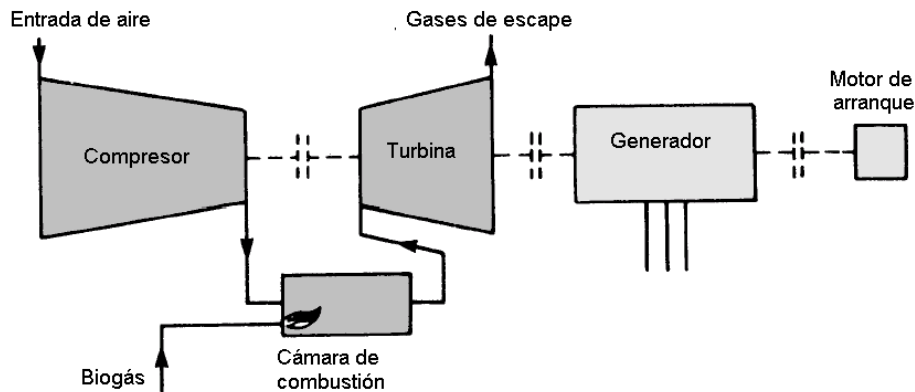


Figura 4.1 Modelo del funcionamiento de una planta con turbina de gas.

Se absorbe aire del ambiente y se comprime en el compresor, éste aire es dividido a la entrada de la cámara de combustión; parte de éste es usado para la combustión, y la otra parte actuará como enfriador. En la cámara de combustión es introducido el biogás y la combustión toma lugar. A la salida de la cámara se une el aire para enfriar con los gases de combustión para pasar a la turbina a una temperatura adecuada, donde se expanden y transfieren su energía a ésta, para finalmente ser expulsados [17].

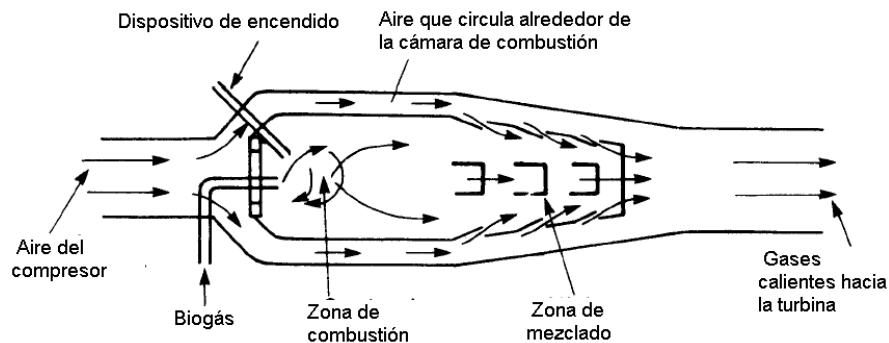


Figura 4.2 Cámara de combustión

Aproximadamente 2/3 de la potencia desarrollada por la turbina son utilizados para accionar al compresor el resto se utiliza para producir la potencia eléctrica. La turbina de gas debe ser arrancada con un motor, mientras el compresor corre lo suficientemente rápido para alcanzar los valores adecuados para proporcionar el trabajo deseado. Si la turbina de gas acciona a un generador con excitador independiente, éste puede usarse

como motor de arranque para la turbina [17]. El ciclo ideal que sirve de modelo para el estudio de este tipo de plantas es el Brayton.

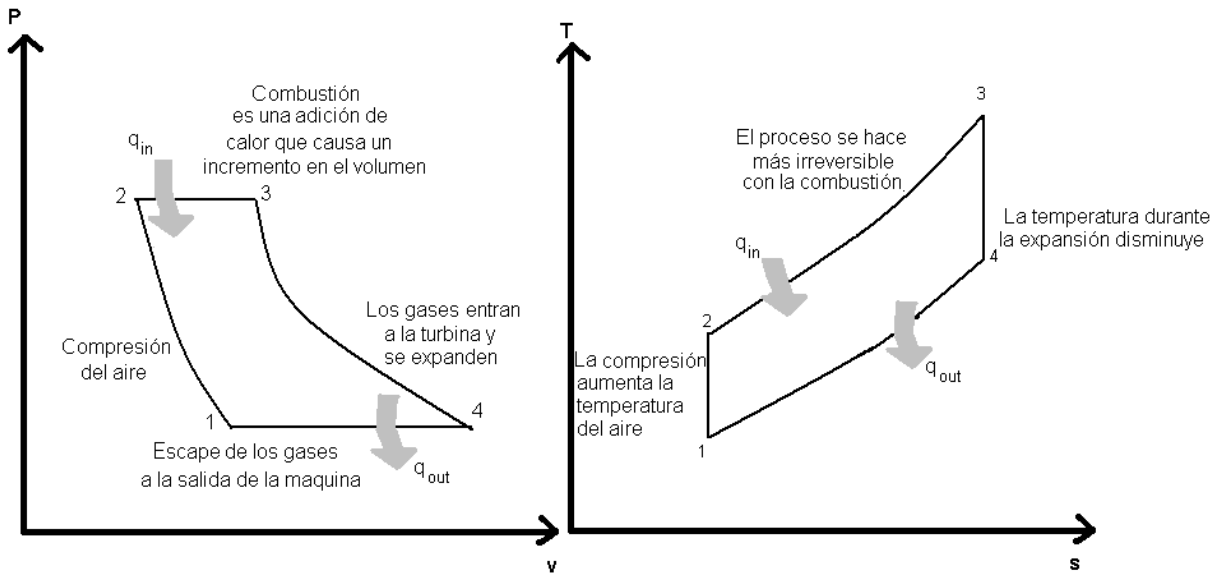


Figura 4.3 a) Diagrama P-v b) Diagrama T-s

A éste modo de operación (Fig. 4.1) se le conoce como ciclo abierto y en ésta modalidad se obtiene alrededor del 25% de eficiencia. Para mejorar ésta, se puede optar por la adición de un intercambiador de calor para aprovechar la energía en los gases de escape lo que incrementa la eficiencia hasta 40%. La forma en que se aprovecha éste calor es transferirlo de los gases de desecho al aire que sale del compresor para la cámara de combustión con lo que disminuye el calor necesario para calentar los gases para la entrada de la turbina. La potencia de salida de la planta no se incrementa pero la disminución en la cantidad de combustible quemado mejora la eficiencia.

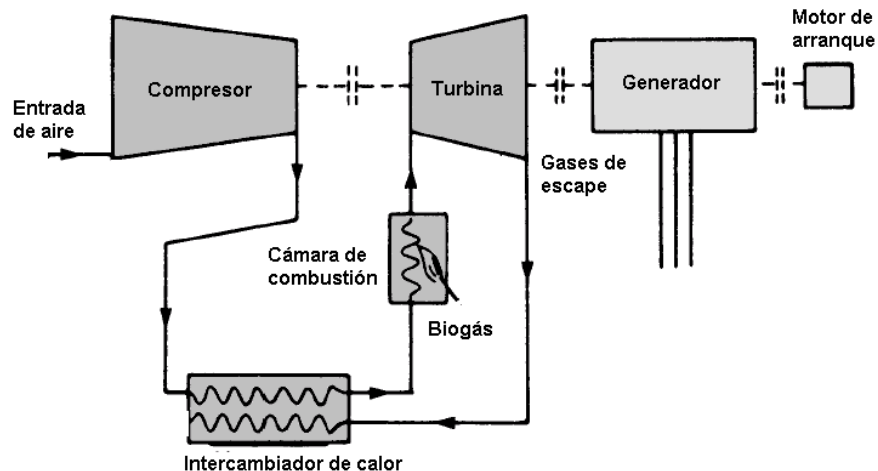


Figura 4.4 Planta con turbina de gas en ciclo cerrado.

Las microturbinas de gas son máquinas de combustión basadas en el mismo principio que las turbinas convencionales con potencias en el rango de 20 kW a 500 kW. Las diferencias principales entre estas y las turbinas de gas son que generalmente trabajan con un

intercambiador de calor y que la salida del generador es corriente eléctrica de alta frecuencia, por lo que es necesaria la incorporación de un rectificador AC/DC y de un inversor que permita obtener una corriente alterna trifásica adecuada [10].

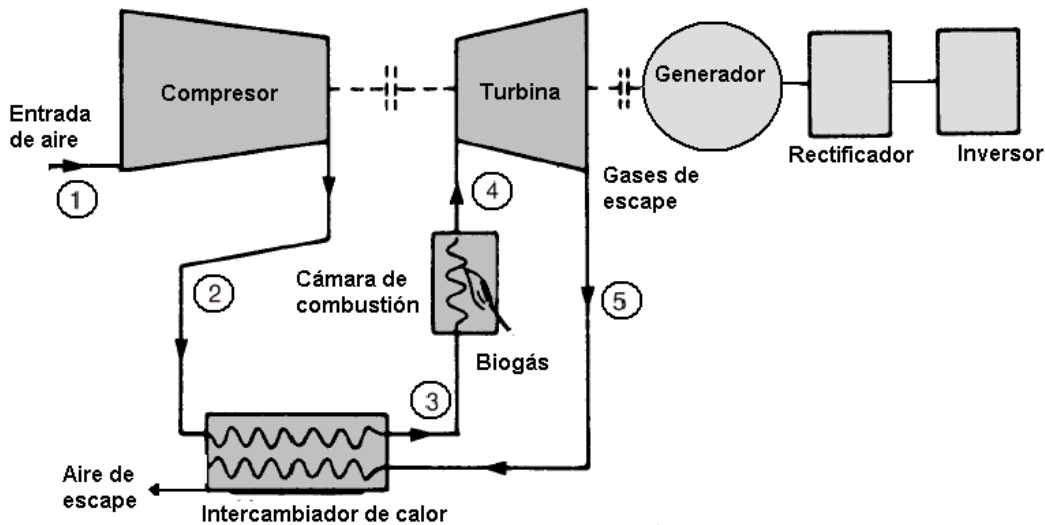


Figura 4.5 Planta de generación con microturbina de gas.

4.2 Motor de combustión interna.

Los motores de combustión interna pueden ser de dos tipos: de encendido por chispa y de encendido por compresión. Su eficiencia normalmente no excede 30-45%. Los ciclos ideales para modelar este tipo de motores son el ciclo Otto y el Diesel respectivamente.

4.2.1 Motores de combustión interna de encendido por chispa.

Los motores de encendido por chispa o motores Otto pueden funcionar con 100% de biogás como combustible. Por ejemplo para la alimentación de gas se requieren elementos extra para su pre-compresión. Pre-comprimiendo y posteriormente enfriando la mezcla la eficiencia puede incrementarse en un factor de 1.5 [10].

En un motor Otto el aire y el combustible entran a través del carburador, cuya función es mezclarlos. Ésta mezcla se comprime hasta una temperatura menor a la de auto-encendido, con el aumento de la relación de compresión aumenta la eficiencia pero si se alcanza la temperatura de auto-ignición el combustible puede “quemarse” antes de tiempo y éste se consumiría más rápidamente, además, se produciría un sonido llamado “golpeteo” del motor. Por lo tanto para el caso de los motores Otto se tiene un control de la relación de compresión de entre 7 y 10 con un máximo de 12. Es posible también adicionar un antidetonante, pero alguno usados son contaminantes.

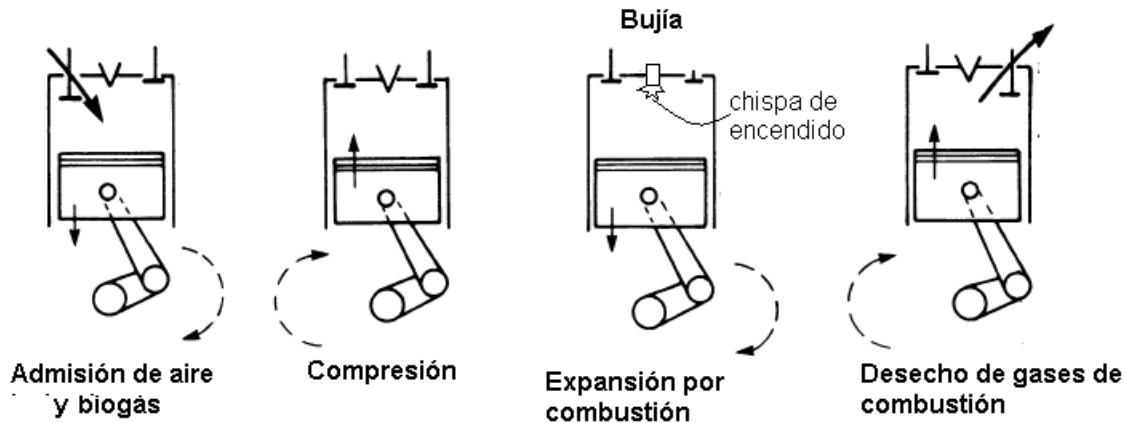


Figura 4.6 Funcionamiento básico motor Otto.

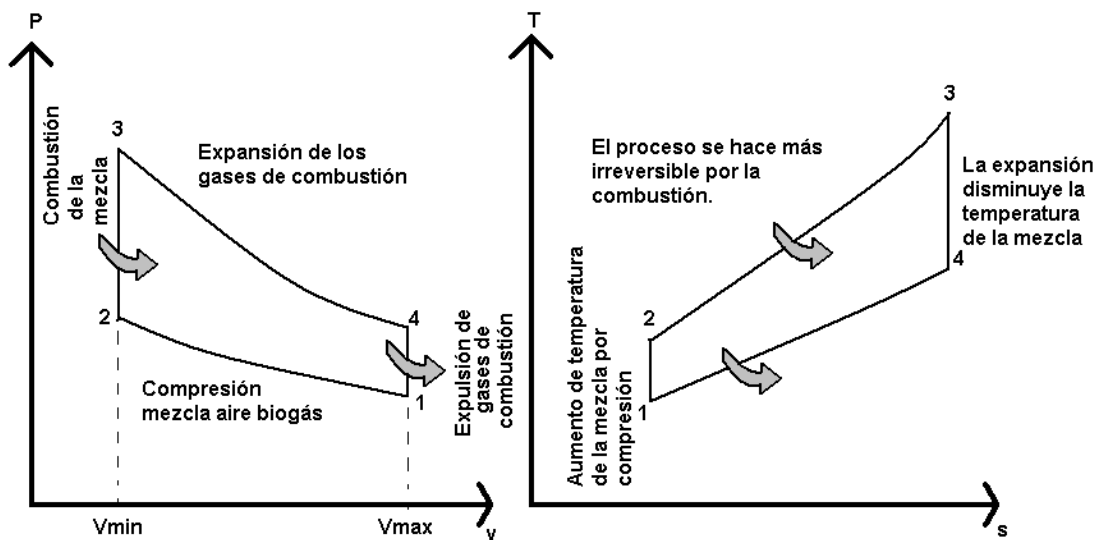


Figura 4.7 a) Diagrama P-v ciclo Otto.

b) Diagrama T-s ciclo Otto.

Motores Otto cuentan con controles de encendido de la chispa, por medio de la descarga de un capacitor lo que permite un encendido exacto lo que resulta en mejoras en los tiempos de combustión que provoca una disminución en las emisiones y más tiempo de servicio en el sistema de encendido. Es posible trabajar con gas natural, al inicio de la operación de la planta, cuando el biogás que se extrae no tiene la suficiente calidad para usarse en los motores [17].

No es recomendable que se elimine por completo el CO_2 y el CO del biogás, ya que estos compuestos impiden que el biogás detone cuando se somete a compresión. Pero a la vez, si existe una cantidad excesiva (>45 % por volumen) provoca una pérdida en fuerza de los motores [18].

4.2.2 Motores de combustión interna de encendido por compresión.

Este tipo de planta se usa para cubrir la carga base donde no hay una estación de alimentación, como reserva o para disminuir los costos en una instalación durante los

periodos pico. Requieren algunas modificaciones para permitirles que funcionen principalmente con biogás complementado con combustible Diesel; esto es una operación de combustible dual con hasta el 60% del requerimiento de combustible Diesel reemplazado por biogás [19].

El aire se comprime hasta alcanzar una temperatura mayor a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión ocurre al contacto cuando éste es inyectado (bujía y carburador sustituidos por inyector de combustible). Como solo se comprime el aire se evitan problemas de autoencendido. Las relaciones de compresión para este motor van de 12 a 24.

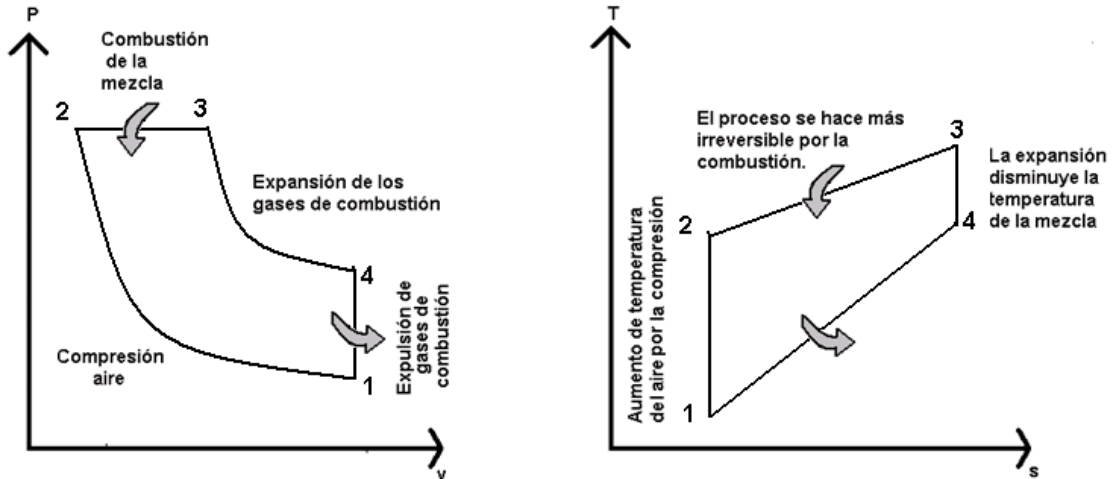


Figura 4.8 a) Diagramas P-v ciclo Diesel. b) Diagrama T-s ciclo Diesel.

La mayoría de los motores Diesel pueden ser modificados para su operación con combustible dual. En muchos casos, el arreglo más sencillo es el de conectar el tubo del suministro de biogás directamente al tubo de admisión de aire de motor, después del filtro.

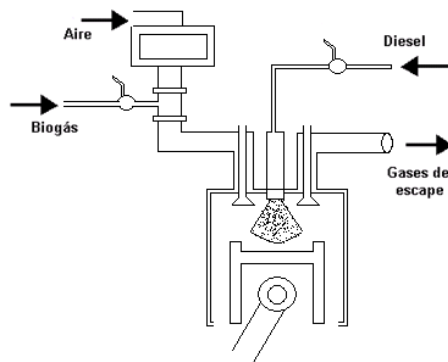


Figura 4.9 Modificación para motor Diesel.

Al aumentar el nivel de sustitución de biogás a más de 60 %, se tiene una reducción de la eficiencia promedio respecto al modo Diesel de entre 3 y 10% [19]. Para asegurar una operación satisfactoria con combustible dual, el H₂S del biogás debe ser removido.

4.3 Celdas de hidrógeno.

Las celdas de hidrógeno o de combustible son dispositivos capaces de convertir directamente la energía química producida entre un combustible y un oxidante⁴, en energía eléctrica, liberando agua y calor.

Las celdas se componen de dos electrodos –ánodo y cátodo- separados por un electrolito sólido o líquido. El H₂ entra al ánodo donde el catalizador permite la oxidación de éste, el electrolito deja pasar solo iones positivos y no electrones libres del ánodo al cátodo; por lo que el electrolito no debe ser conductor eléctrico. Los electrodos están conectados por un conductor, es por éste por el que viajan los electrones y pasan a través de la carga, finalmente en el cátodo se unen el hidrógeno, el oxígeno y los electrones, por lo que al final se libera agua y calor. El tipo de electrolito utilizado determina la temperatura de operación. El límite teórico de voltaje desarrollado por una celda es de 1.23 V, la corriente es de 0.5 A/cm² desarrollando una potencia de 0.35 W/cm², por lo que para generar más potencia las celdas están conectadas en serie formando pilas [17].

4.3.1 Reformado del biogás.

El H₂ es el combustible de las celdas y puede ser suministrado puro o puede extraerse, mediante el reformado, de otras sustancias tales como el biogás. El oxígeno que se requiere se puede obtener directamente del aire o puede suministrarse en su forma pura. Existen diversos métodos de reformado los más utilizados:

- Steam methane reforming (SMR). Reformado con vapor de agua.
- Dry methane reforming (DMR). Reformado con CO₂, también denominado reformado seco, que aprovecha el contenido de éste gas en el biogás.
- Catalytic partial oxidation of methane (POM). Oxidación parcial catalítica.
- Autothermal reforming, (ATR). Reformado auto-térmico.

● Electrón ● Oxígeno
● Hidrógeno ● Agua

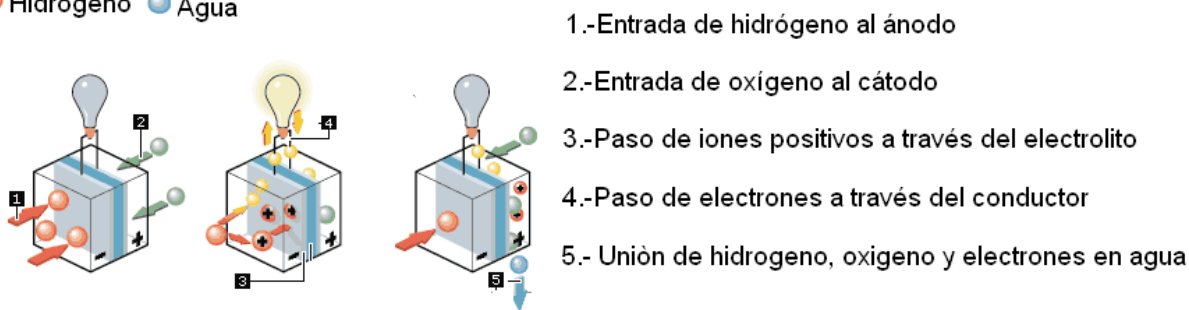


Figura 4.10 Principio de funcionamiento de una celda de hidrógeno.

En función del tipo de celda, el proceso de reformado del biogás puede ser externo o interno. El reformado externo tiene lugar en reactores diseñados para este propósito, mientras que el reformado interno se produce en el ánodo de la propia pila de combustible. La opción más habitual es la de reformado externo. No obstante, en las pilas de

⁴ El término oxidación se refiere a la reacción que involucra la pérdida de electrones.

combustible MCFC y SOFC, las elevadas temperaturas de operación permiten que tenga lugar el reformado interno del biogás y la posterior separación del ion hidrógeno.

En función de su electrolito las celdas se pueden clasificar en [8]:

Tipo de celda / electrolito	Conductor iónico	Temperatura de operación	Combustible	Rendimiento / Rango de potencia	Aplicaciones
PEFC / Polímero sólido (Nafion®)	H ⁺	60 – 80 °C	H ² puro (tolera CO ₂ , 10 ppm CO)	35-45 % / 5-250 kW	- Transporte - Portátil - Estacionaria de baja potencia
AFC / KOH	OH ⁻	50 – 100 °C	H ² puro	40-50% / 5-150 kW	Espacio
PAFC / Ácido fosfórico	H ⁺	200 –220 °C	H ² puro (tolera CO ₂ , 1% CO)	40-45% / 50kW -11 MW	Estacionaria de media potencia
MCFC / 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 cátodo)	45-50% / 100 kW – 2 MW	Estacionaria de alta potencia
SOFC / ZrO ₂ - Y ₂ O ₃	O ²⁻	800 -1000°C	H ² , CO, CH ₄ , otros HCs (tolera CO ₂)	45-50% / 100-250 kW	- Estacionaria de media potencia - Transporte (APU)

Tabla 4.1 Características de distintos tipo de celdas de combustible [8].

4.3.2 Celdas de combustible alcalinas (AFC).

Su temperatura de operación es entre 120 y 200°C. Requiere un gas rico en H₂ como combustible, libre de cualquier sustancia que pudiera hacer reacción con el electrolito como por ejemplo el CO₂ y el CO. Generan electricidad a más del 40% de eficiencia - y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración – Existen en producción comercial unidades de alrededor de 200kW. Este tipo de celdas no se aplica para generación distribuida.

4.3.3 Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC).

Las PAFC se alimentan principalmente con gas natural. Su temperatura de operación va de los 150 a 220°C. En la actualidad son las más usadas con biogás. Es importante la total remoción del CO pues actúa como veneno. El calor de desecho puede utilizarse para calentar agua o aire operando presión atmosférica. Este tipo de celdas se utiliza para generación distribuida.

4.3.4 Celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC).

Operan a una temperatura de 600 a 700°C; en las MCFC el CH₄ y el vapor son convertidos en un gas rico en H₂ en el ánodo. Su calor residual puede emplearse para

cogeneración. Muchas desventajas que presentan las celdas de baja temperatura son eliminadas en las celdas de alta temperatura. El reformado del biogás es interno, el CO puede utilizarse directamente como combustible y el calor residual tiene una temperatura suficiente para calentar el aire para una turbina de gas o para calentar agua para una turbina de vapor, o bien para cogeneración. Otra ventaja es que opera eficientemente con combustibles que contengan CO₂. Entre las desventajas de trabajar a altas temperaturas esta el desgaste mecánico que puede llegar a tener los materiales. Este tipo de celdas se utiliza para generación distribuida.

4.3.5 Celdas de combustible de óxido sólido (SOFC).

Su temperatura de operación va de 600 a 1000 °C. Características como su alta tolerancia a los contaminantes que trae el combustible, las altas temperaturas a las que trabaja que hace que no requiera catalizadores y el manejo directo del combustible las hace muy atractivas, el uso de un electrólito sólido elimina problemas de corrosión. Tiempo de vida largo, de 20 o más años. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 50%. Parte del calor que libera es utilizado para precalentar el aire que se utilizara en la misma celda. Se puede utilizar el CO como combustible y a diferencia de la MCFC no requiere CO₂. Este tipo de celdas se utiliza para generación distribuida.

4.3.6 Celdas de combustible poliméricas (PEMFC).

Su temperatura de operación es de 80°C. Esto como consecuencia permite alcanzar la temperatura de operación de forma rápida, pero el calor residual del proceso no puede utilizarse para cogeneración. El electrolito en esta celda es una membrana de intercambio de iones (un polímero) el único líquido en esta celda es el agua, por lo tanto los problemas de corrosión son mínimos. Se requiere un gas rico en H₂ como combustible, libre de CO - que es un veneno a bajas temperaturas-. Este tipo de celdas se utiliza para generación distribuida.

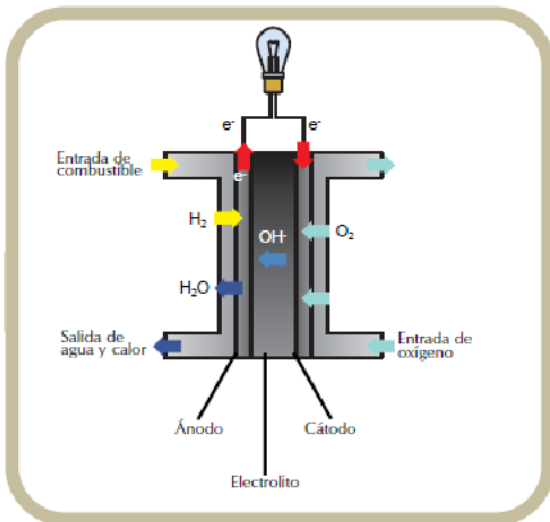


Figura 4.11 Celda tipo AFC

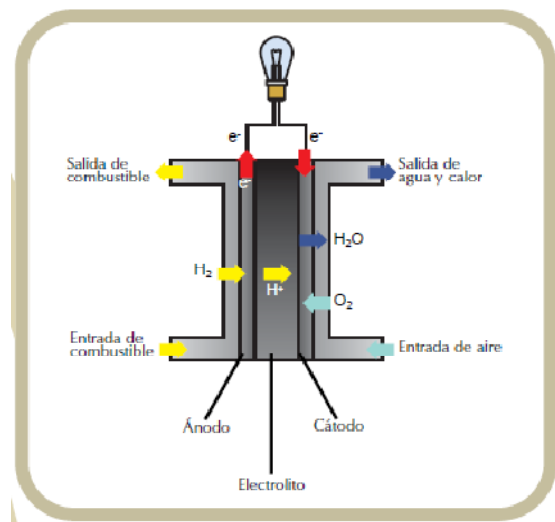


Figura 4.12 Celda tipo PAFC

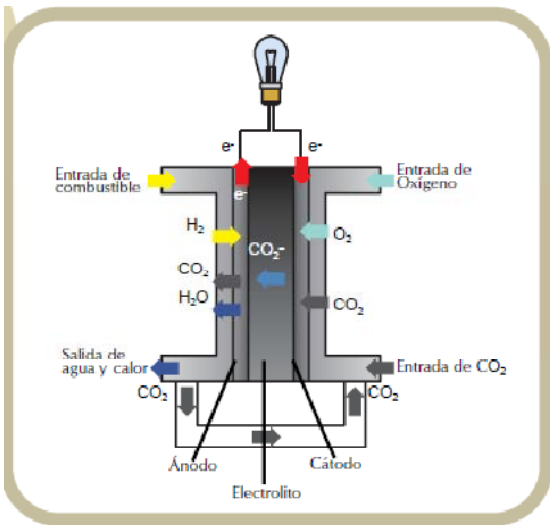


Figura 4.13 Celda tipo MCFC

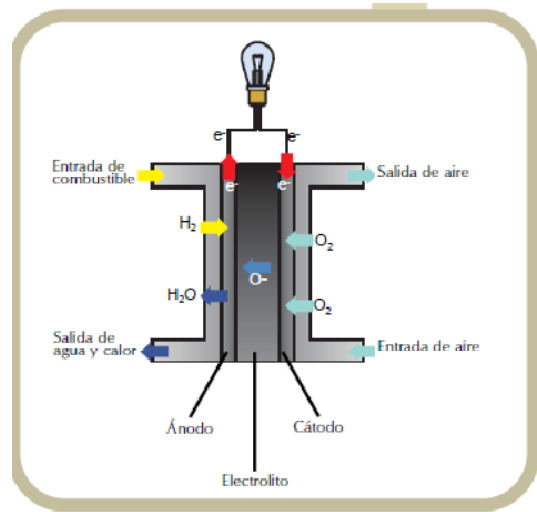


Figura 4.14 Celda tipo SOFC

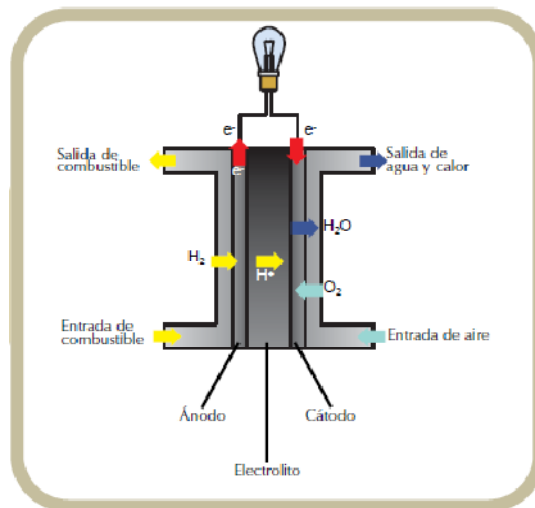


Figura 4.15 Celda tipo PEMFC

4.3.7 Limpieza del biogás para celdas de combustible.

La sensibilidad de las celdas de combustible a determinado tipo de compuestos implica que, previamente a su uso, el biogás debe someterse a una etapa de limpieza.

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	< 200 ppb	Veneno	Veneno < 50 ppm	Veneno 0.1-0.5 ppm H ₂ S	Veneno < 1 ppm H ₂ S

Tabla 4.2 Tolerancia de los distintos tipos de pilas de combustible a diferentes compuestos [8].

4.4 Comparación entre tecnologías de generación de energía eléctrica.

Aunque las turbinas responden con rapidez a los cambios en la demanda por su relativamente poca inercia, su eficiencia se ve más afectada en función del porcentaje de plena carga al que se encuentre operando en comparación con otras tecnologías como los motores Otto y Diesel.

Las elevadas temperaturas de operación de las MCFC y SOFC las convierten en candidatas idóneas a su utilización, pensando en el reformado interno que se hace del CH₄, así como que el CO del biogás, cuya presencia produce el envenenamiento de celdas de combustible de baja temperatura, es un combustible adicional para las de alta temperatura, y son más tolerantes a las impurezas.

El motor Diesel produce más potencia que el motor Otto y ocupa menos espacio que un el segundo con misma potencia. Los motores de encendido por compresión son más económicos y tiene una mayor eficiencia que los motores Otto.

A continuación para cada tecnología se muestran distintas características importantes [5] [8] [10].

Turbinas de gas		
Combustible	100% Biogás	
Tamaño	100 kW-50 MW	
Eficiencia (%)	25-40 %	
Emisiones (kg/MWh)	CO ₂	545-700
	NO _x	1.8-5
	SO ₂	0.14-0.18
	CO	0.5-4.5
Disponibilidad (%)	90-98	
Tiempo de arranque	10 min - 1 h	
Superficie (m ² /kW)	0.003-0.01	

Tabla 4.3 Características generales turbinas de gas.

Microturbinas		
Combustible	100% Biogás	
Tamaño	20-500 kW	
Eficiencia (%)	20-30	
Emisiones (kg/MWh)	CO ₂	590-800
	NO _x	0.09-0.64
	SO ₂	despreciable
	CO	0.14-0.82
Disponibilidad (%)	90-98	
Tiempo de arranque	60	
Superficie (m ² /kW)	0.025-0.065	

Tabla 4.4 Características generales microturbinas.

Motores de combustión interna.		
Combustible	Diesel	Biogás 60%, Diesel 40%
	Otto	100% Biogás
Tamaño	5 kW-5 MW	
Eficiencia (%)	30-45	
Emisiones (kg/MWh)	CO ₂	590-800
	NO _x	4.5-18.6
	SO ₂	0.18-1.36
	CO	0.18-4
Disponibilidad (%)	90-95	
Tiempo de arranque	10	
Superficie (m ² /kW)	0.003-0.03	

Tabla 4.5 Características generales MCI.

Celdas de hidrógeno alta temperatura		
Combustible	100% Biogás	
Tamaño (MW)	Baja Temp.	1 kW-200 kW
	Alta Temp.	1 kW-10 MW
Eficiencia (%)	30-50	
Emisiones (kg/MWh)	CO ₂	360-630
	NO _x	<0.023
	SO ₂	0
	CO	0.005-0.055
Disponibilidad (%)	Superior al 95	
Tiempo de arranque	3-48 h	
Superficie (m ² /kW)	0.06-0.11	

Tabla 4.6 Características generales Celdas de hidrógeno.

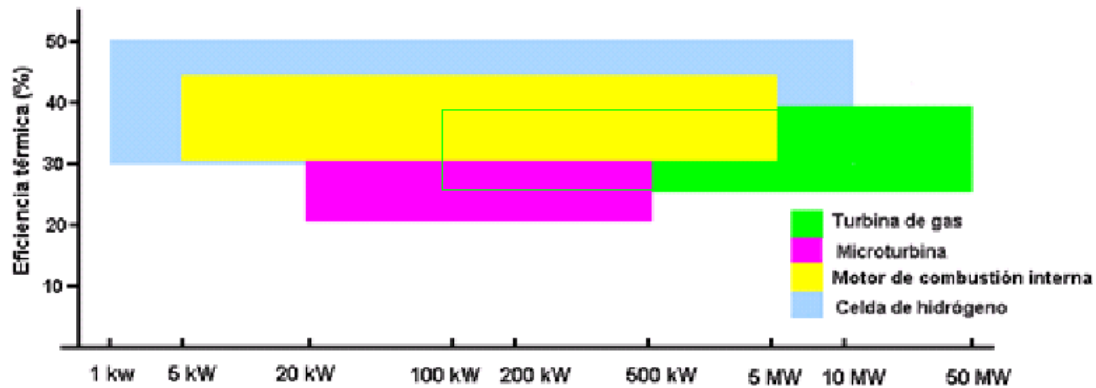


Figura 4.16 Potencias y eficiencias por tipo de planta

4.5 Cogeneración.

La cogeneración se define como la producción de dos tipos de energía –comúnmente eléctrica y térmica - a partir de una sola fuente de combustible. La cogeneración es una forma eficiente de recuperar calor y generar electricidad [20].

Para cada una de las máquinas mencionadas anteriormente una opción para provechar la gran cantidad de calor de los gases de escape, o el calor residual por las reacciones químicas, se encuentra a través de la utilización de éste para la producción de vapor o el secado de un determinado proceso industrial. Se puede pensar también en el modo de ciclo combinado donde el calor residual se emplea para calentar agua para accionar una turbina de vapor.

Cuando se hace trabajar una microturbina sin recuperador de calor, en aplicaciones de cogeneración, la eficiencia eléctrica disminuye a un 15-18%, pero el rendimiento total puede ser del orden de un 80% [5].

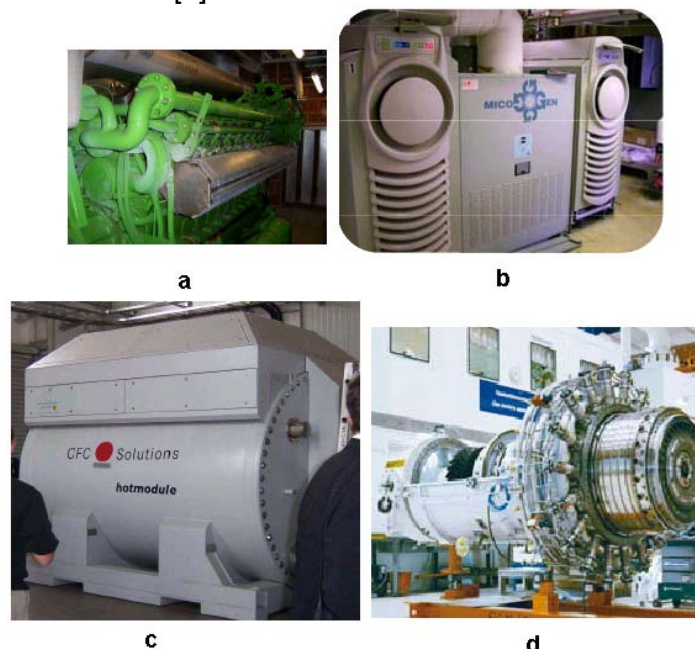


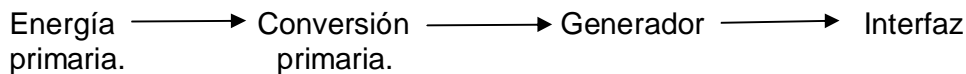
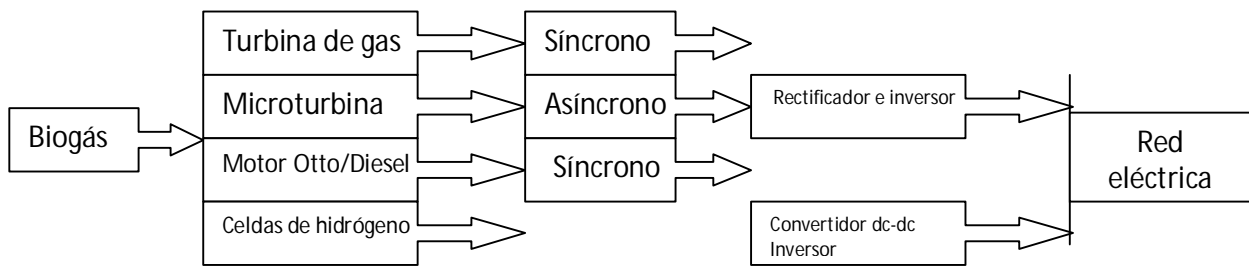
Figura 4.17 a) Motor Otto. b) Microturbina. c) MCFC. d) Turbina de gas.

5 Generación distribuida.

5.1 Definición.

Un sistema de generación distribuida (GD) está compuesto por distintos dispositivos cuyo objetivo común es la generación y almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, es decir, hasta 50 MW; cerca del sitio de consumo, sincronizada y, conectada o no, a la red eléctrica local.

Se puede emplear la generación distribuida para cubrir diferentes momentos de la demanda del usuario: carga base, carga en punta, como generación aislada o remota o como soporte a la red de distribución. Los sistemas de generación distribuida en estudio son básicamente:



Los generadores asíncronos o de inducción son típicamente pequeños, menores a los 500 kVA, pues para estos se requiere de una fuente de potencia reactiva externa (Fig. 5.1a). Éstos generadores pueden suministrar potencia real (W) a la empresa eléctrica pero requieren una fuente de potencia reactiva (var) que normalmente proviene de la misma empresa eléctrica [21].

Los generadores síncronos requieren de un devanado de campo de CD que proporción la fuente de excitación al generador. Éstos generadores representan una fuente de potencia real y una reactiva para la red de distribución (Fig. 5.1b), pero requieren equipo de sincronización para la puesta en paralelo con la red de distribución.

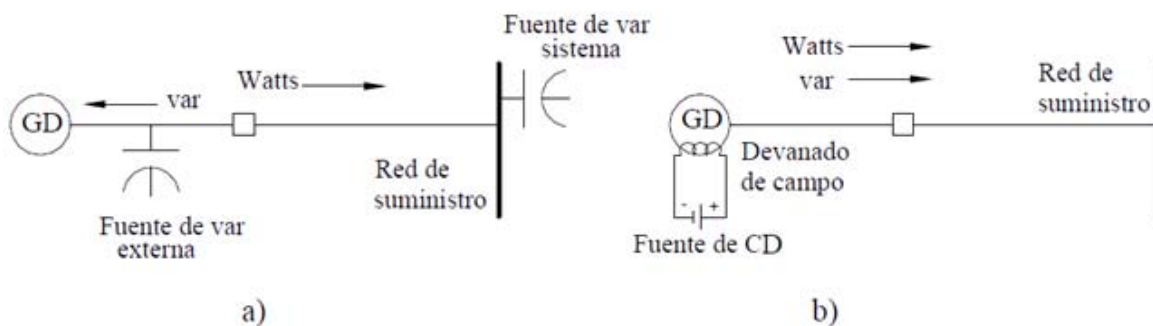


Figura 5.1 Tipos de generadores. a) Generador de inducción o asíncrono. b) Generador Síncrono [21].

5.2 Calidad de la energía proveniente de la generación distribuida.

El producto que reciben los clientes es la onda de tensión. Por lo tanto la calidad depende del cuidado que se tenga sobre sus características:

- Frecuencia.
- Amplitud.
- Forma de onda.
- Simetría del sistema trifásico.

5.3 Interconexión de la generación distribuida a la red de distribución.

Un aspecto necesario en la GD es la interconexión con la red eléctrica, para poder cubrir cualquier eventualidad del sistema de compra o venta de energía eléctrica.

5.3.1 Reglas generales de interconexión.

Las reglas generales de interconexión son los requisitos que se deben cumplir para la interconexión al Sistema Eléctrico Nacional. En estas se especifica la información que se deberá proveer al operador del sistema para la operación, planificación, estadística, predicción de la demanda, mantenimiento, disponibilidad de la generación, etc.

- a) Regulación de la tensión. Se debe mantener una tensión constante a pesar de las variaciones debidas a los cambios en la carga y la posible variabilidad en la producción de biogás.
- b) Integración con la puesta a tierra de la red de distribución. Las unidades de GD deben estar conectadas a tierra para evitar sobretensiones a lo largo de la línea.
- c) Desconexión del sistema ante interrupciones en la red eléctrica distribuida. El equipo de GD no debe suministrar corriente al sistema de distribución durante una falla.
- d) Sincronización del sistema de GD con la red de distribución. La salida de la unidad de generación debe tener la misma tensión, frecuencia y ángulo de fase que la red eléctrica a la que se requiere conectar.
- e) El equipo de GD no debe inyectar armónicos ni corriente continua por encima de los umbrales definidos
- f) Por lo que respecta al factor de potencia, este aspecto debe ser lo más cercano a la unidad.

5.3.2 Normas de interconexión.

Standard IEEE 1547 indica las especificaciones técnicas y los requerimientos para poder realizar la interconexión. En ella se detallan los límites permitidos de tensión y frecuencia, similarmente se especifican los límites de Calidad de Potencia, para perturbaciones tales como inyección de corriente continua, armónicas y flicker. Uno de los temas tratados en detalle es lo referente al funcionamiento “no intencionado en isla”, dejando sin considerar la “operación intencionada en isla”, señalando los tiempos de detección y desconexión de tal

funcionamiento. También se detallan las tolerancias en frecuencia, tensión y fase para las operaciones de sincronización. La norma IEEE 1547-1 detalla el procedimiento a seguir en las pruebas mencionadas en la norma IEEE 1547, para verificar la interconexión de la generación distribuida al sistema de potencia. La IEEE 1547-3, se refiere a los protocolos para el intercambio de información y el control de la operación, entre la generación distribuida y el sistema de potencia.

5.4 Esquemas de protección para la interconexión.

Las fuentes de GD deben operar de forma paralela a la red por lo que se deben modificar los esquemas de protección convencionales. La interconexión se establecerá en el punto de interconexión (PI) entre la fuente de GD y la red de distribución. La interconexión de un GD con la red de potencia en forma directa, es desaconsejable y riesgosa, principalmente en caso de conectarse a líneas aéreas, ya que los generadores poseen nivel de aislamiento diferente con el correspondiente del sistema de potencia. Requiriendo de un transformador de interconexión, cuyas funciones son: adecuar los niveles de tensión, evitar la inyección de corriente continua al sistema, bloquear las armónicas triples, controlar las de corrientes de cortocircuito, facilitar la detección de sobrecorrientes desde el sistema y evitar las sobretensiones por resonancia [22].

Las formas posibles de conectar este transformador son [22]:

- a) Delta del lado del GD y estrella aislada de tierra del lado del sistema.
- b) Delta del lado del GD y estrella puesta a tierra rígida en el otro.
- c) Delta del lado del GD y estrella puesta a tierra no-rígida del lado del sistema.
- d) Delta en ambos lados.
- e) Estrella puesta a tierra del lado del GD y delta del lado del sistema.
- f) Estrella puesta a tierra en ambos lados.
- g) Estrella del lado del GD y estrella puesta a tierra rígida del lado del sistema.

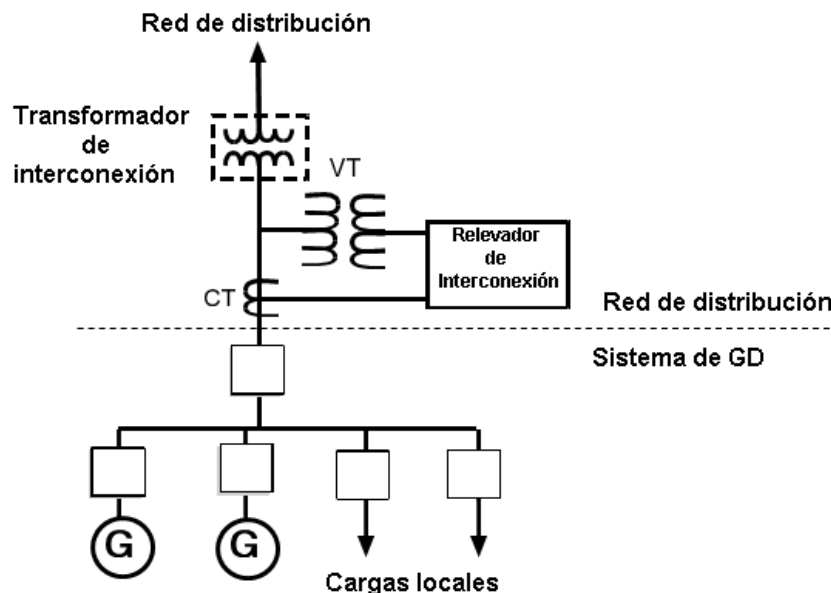


Figura 5.2 Protección típica en la interconexión [23].

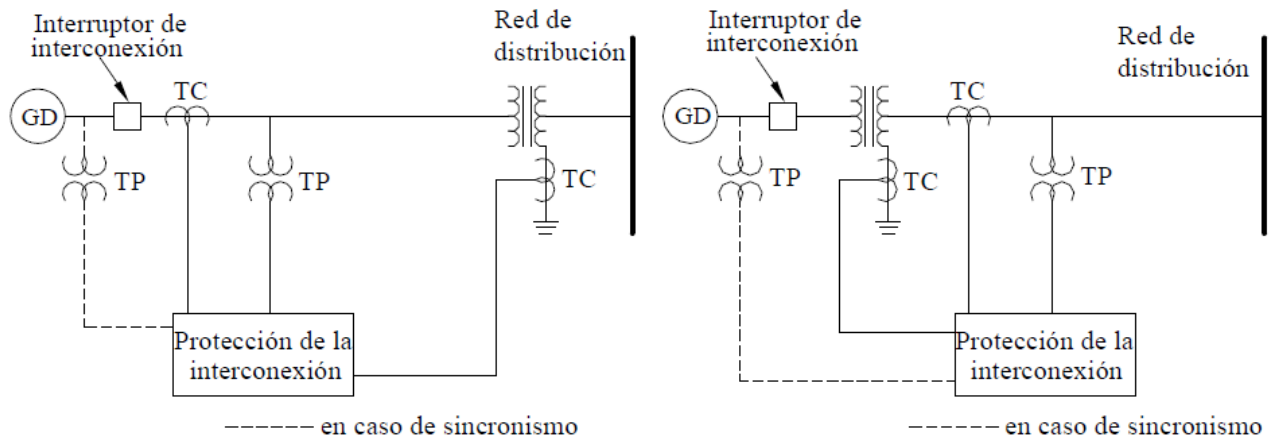


Figura 5.3 Ubicación de la protección de la interconexión de la fuente de GD a través de un transformador [21].

La función de éstos dispositivos de protección de la interconexión es proteger a la fuente de GD y a la red, de disturbios en la red de distribución, además de proteger ante fallas internas (entre el PI y las terminales de la GD) enviando la señal de disparo al interruptor de interconexión y así evitar las corrientes de falla.

Los esquemas de interconexión con la red de distribución pueden operar:

- a) Red aislada.
- b) Red no aislada (interconectada).

5.4.1 Esquemas de interconexión para red aislada.

Estas fuentes operan normalmente por periodos cortos de tiempo. En este esquema la GD se conecta a la carga a través de un interruptor automático de transferencia solo si el suministro a través de la red ha sido desconectado. En este tipo de fuentes se pueden utilizar motores de combustión o turbinas de gas, trabajando entre los potencias menores a 500 kVA en baja tensión, de 10 MVA a 50 MVA en media tensión [21]. No es posible la operación en paralelo con una red u otra fuente de distribución.

5.4.1.1 Esquema de protección de una fuente de GD de pequeña (500 kVA a 1 MVA).

La norma ANSI/IEEE Std. 242-2001 recomienda los siguientes dispositivos de protección: un relevador de sobrecorriente con restricción de voltaje (51V) para fallas de fase. Si el generador está conectado en estrella sólidamente aterrizado, los relevadores de sobrecorriente de fase captan la corriente utilizando TC's instalados en las fases que llegan al neutro del estator. También se incluye un relevador de sobrecorriente de neutro con retardo de tiempo (51N) para fallas a tierra conectando un TC en el neutro del generador (Fig. 5.4). Si el generador está conectado en delta el relevador 51V se alimenta de los TC's que están conectados en el lado de la línea en las terminales del devanado del generador (Fig.5.5). Estas redes están conectadas en baja tensión. La protección de interconexión para los generadores de inducción por lo general requiere únicamente relevadores de sobre/bajo voltaje y de frecuencia.

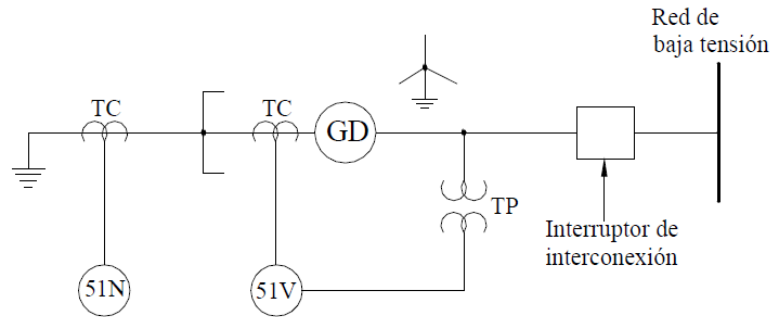


Figura 5.4 Protecciones de un pequeño generador conectado en estrella sólidamente aterrizado conectado a una red aislada de baja tensión.

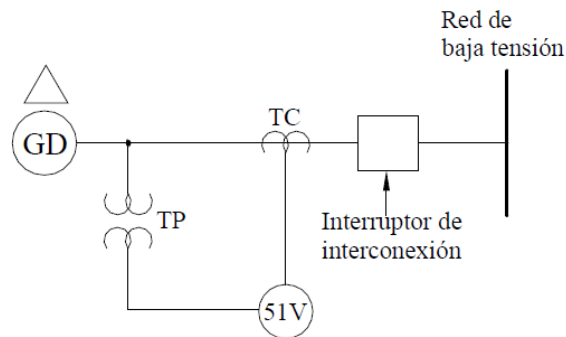


Figura 5.5 Protecciones de un pequeño generador conectado en delta conectado a una red aislada de baja tensión.

5.4.1.2 Esquema de protección de una fuente de GD mediana (hasta 12.5 MVA).

La norma ANSI/IEEE Std. 242-2001 recomienda los siguientes dispositivos de protección en media tensión:

Relevador	Falla que cubre
51V	Fallas de fase.
51N	Fallas a tierra.
87	Fallas de fase. Protección diferencial de fase para el devanado del estator.
32	Detección de la pérdida del primo motor. Relevador de potencia inversa.
46	Desbalance de corrientes. Detecta corriente de secuencia negativa.
64F	Fallas a tierra del circuito de campo Protección del rotor

Tabla 5.1 Dispositivos de protección para un generador mediano conectado a una red aislada de media tensión

Relevador	Falla que cubre
51V	Fallas de fase. Fallas sólidas a tierra en la interconexión.
51N	Fallas a tierra con retardo de tiempo.
32	Detección de la pérdida del primo motor. Relevador de potencia inversa. Detección de importación o exportación de potencia
81U	Detección de sobrecargas en el generador por pérdida parcial o total de la red
81O	Detección de pérdida de operación en paralelo con la red. Daños al generador por sobre velocidad ante la pérdida de carga.
27	Detección de depresiones de voltaje causadas por fallas cercanas a la red
59	Detección de sobrevoltajes por la re-inyección de carga Protección para la pérdida de operación en paralelo con la red

Tabla 5.2 Dispositivos de protección para un generador pequeño operando en paralelo con la red

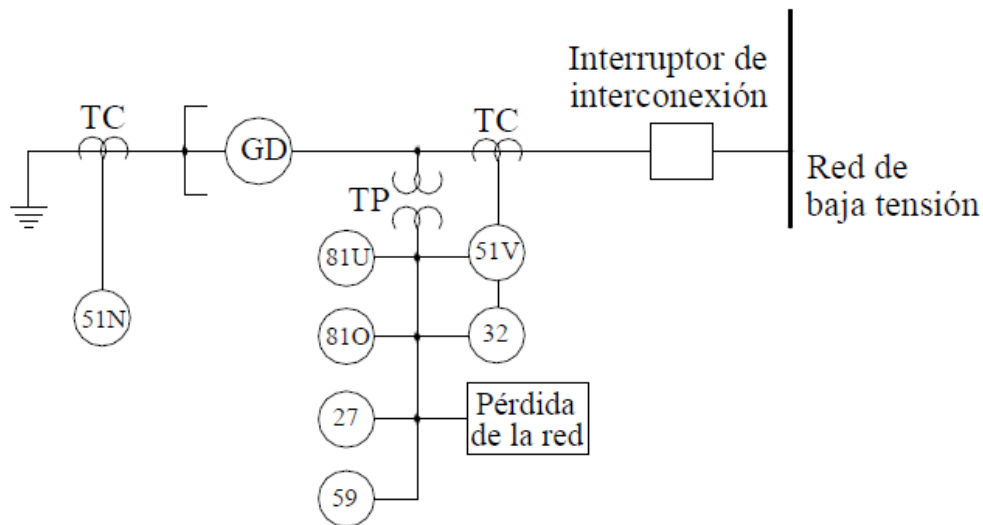


Figura 5.8 Protecciones generador pequeño operando en paralelo con la red de distribución en forma directa.

5.4.2.2 Esquema de protección de una fuente de GD mediana (hasta 12.5 MVA).

Se recomiendan los mismos dispositivos que para un generador pequeño Tabla 5.2, pero sumando: un relevador 87 para detectar fallas de fase y de tierra en el devanado del generador. Los generadores síncronos requieren además un relevador 40 para detectar la pérdida de excitación (Fig. 5.9).

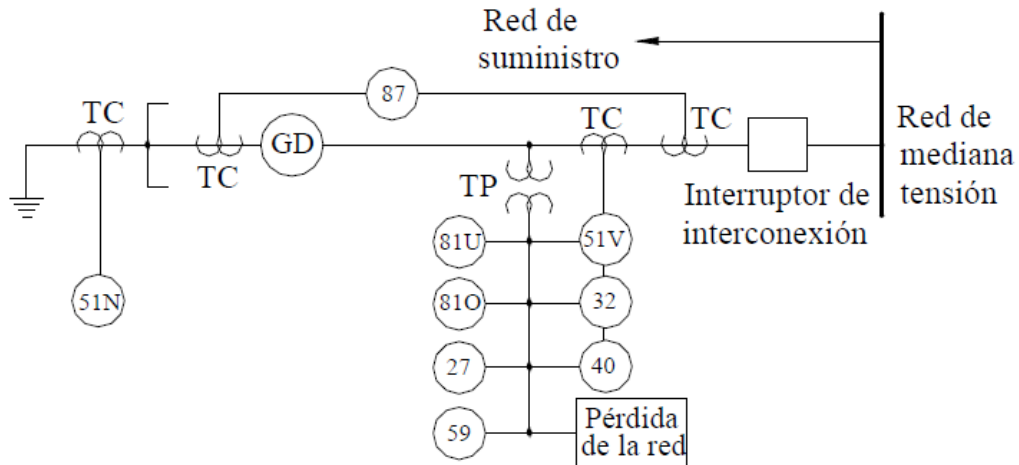


Figura 5.9 Protecciones de un generador operando en paralelo con la red de media tensión en forma directa.

5.4.2.3 Esquema de protección de una fuente de GD (hasta 50 MVA).

Se recomiendan los mismos dispositivos que para una fuente mediana, pero con la suma de: Relevador de sobrecorriente de secuencia negativa de fase (46) para detectar fallas de fase a fase y para el desbalance de carga. De nuevo los generadores síncronos requieren de un relevador (40) y protección para el rotor (64) para detectar fallas a tierra del devanado de campo del generador. Figura 5.11.

Los relevadores digitales de multifunción cuentan con diversas características que los hacen ideales para la protección de éste tipo de interconexiones [27].

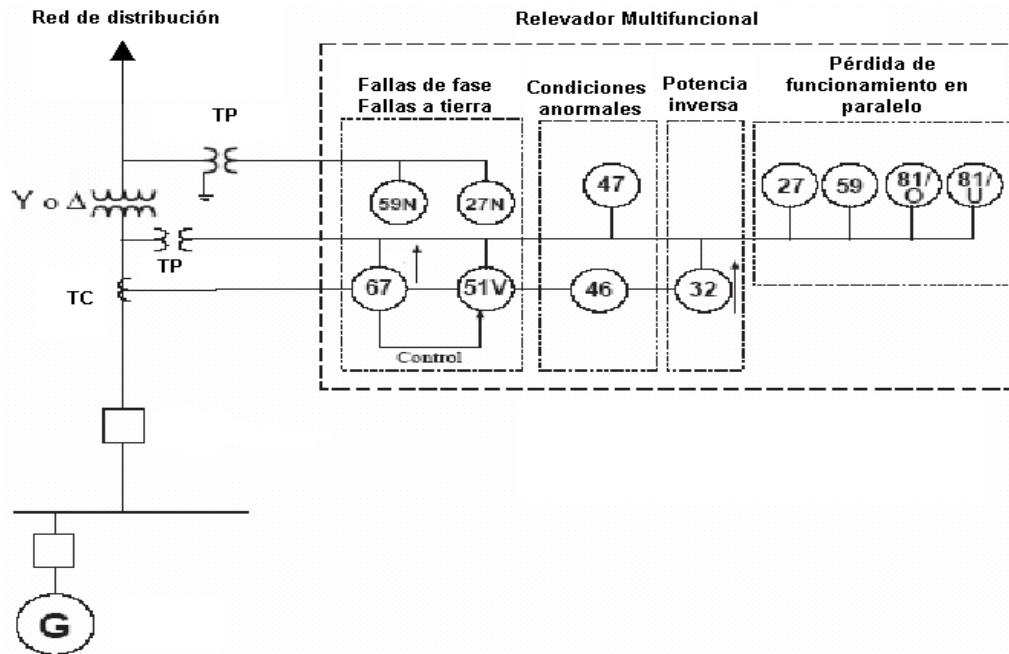


Figura 5.10 Ejemplo de funcionamiento de un relevador digital de multifunción [27].

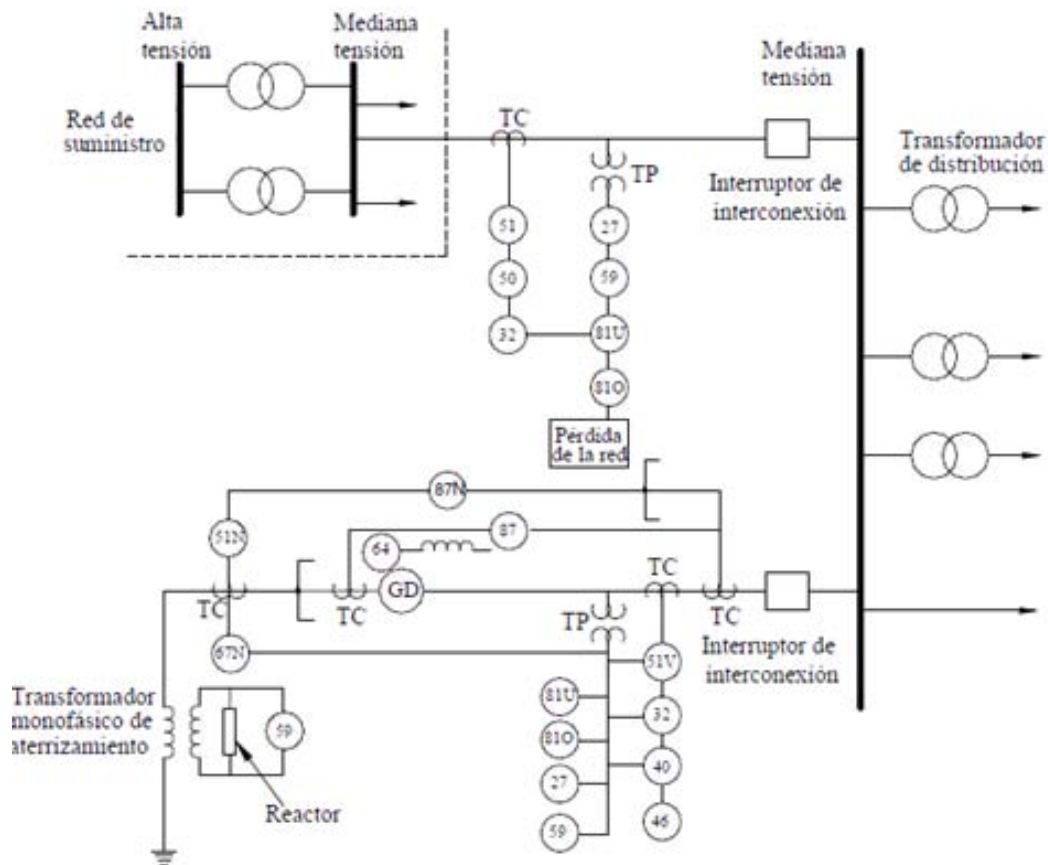


Figura 5.11 Protecciones de un generador alimentando carga industrial y operando en paralelo con la red de media tensión [26].

5.5 Ventajas de la generación distribuida en la granja.

- La GD deja de lado la necesidad de uso de redes de transmisión para hacer llegar energía a una granja en una zona aislada, lo que deja a un lado la inversión y pérdidas de energía relacionadas a estas.
- Participación de pequeñas y medianas empresas locales en negocios de generación de energía, ya que por lo regular la generación en escala convencional está limitada a empresas extranjeras multinacionales.
- Incremento en la confiabilidad y garantía en la calidad de energía.
- Reducción del número de interrupciones del servicio.
- Menor costo de la energía.
- Generación de energía y uso integral de energías renovables, como recurso propio de la granja.
- Facilidad y versatilidad de adaptación a las condiciones del sitio.
- Disminución de emisiones de GEI.
- Alto impacto en la seguridad e higiene industrial.

5.6 Aspectos legales.

En México, en 1992 se abrieron a la inversión privada las actividades de cogeneración, autoabastecimiento, pequeña producción, producción independiente y exportación e importación de energía eléctrica, la GD como tal no se cita explícitamente en la Constitución Política de México, ni en sus leyes y reglamentos. Sin embargo, en las dos últimas se encuentran los instrumentos propios de regulación para las fuentes renovables de generación de energía eléctrica, que pueden ser aplicables a la modalidad llamada GD [29].

5.7 Aspectos económicos.

5.7.1 Financiamiento

La SAGARPA, a través del FIRCO apoya la promoción y difusión de la energía renovable, a través del “Programa del Fondo de Riesgo Compartido para el Fomento a Agronegocios (FOMAGRO)”. Dentro de los tipos de apoyo canalizados a través de este programa se consideran los relacionados con aportaciones directas y aportaciones para constituir garantías líquidas:

1) Aportaciones Directas

Destinadas a financiar parcialmente las inversiones nuevas para la formulación de planes de agronegocios, de estudios y gastos preoperativos; asistencia técnica y capacitación agroindustrial, así como los necesarios para su equipamiento e infraestructura; éste último se refiere a: la adquisición y construcción de instalaciones fijas; a la adquisición y prueba de maquinaria y equipos que, para su funcionamiento intervenga algún tipo de energía renovable; necesarios para la producción de los bienes objeto del agronegocio, y que permitan iniciar o mejorar el funcionamiento de los mismos y contribuyan a su consolidación al tiempo que mejoran el medio ambiente [30].

2) Aportaciones para constituir fuentes alternas de pago.

Este tipo de apoyo consiste en el otorgamiento de recursos, para complementar la constitución de fuentes alternas de pago que posibiliten la contratación de créditos para facilitar la incorporación de las empresas al crédito bancario [30].

5.8 Perfiles de generación de energía eléctrica.

Antes de iniciar un proyecto, es necesario establecer la factibilidad para conocer la viabilidad y a partir de eso diseñar e implementar un sistema de generación distribuida.

Los tipos de factibilidades básicamente son [31]:

- Factibilidad técnica: si existe o está al alcance la tecnología necesaria para el sistema.
- Factibilidad operacional: si el sistema puede funcionar en la organización.
- Factibilidad económica: relación beneficio costo.

Partiendo de la Tabla 3.4, supondremos un rango de producción de biogás al día. Para calcular su potencial sabemos que para el biogás con 67% de CH₄ se tienen 6.5 kWh/m³ de energía. Se plantea un escenario para una granja de 1000 cerdos.

Biogás al día (m ³) (1000 cerdos)		Energía disponible diaria (kWh)	Potencial de generación por FGD							
			Turbina de gas η=25-40%		Microturbina η=20-30%		Motor Otto η=30-45%		Celdas de H ₂ η=30-50%	
			kWh		kWh		kWh		kWh	
Min.	165	1073	268	429	215	322	322	483	322	536
Medio	232,5	1511	378	605	302	453	453	680	453	756
Máx.	300	1950	488	780	390	585	585	878	585	975

Tabla 5.3 Potencial de generación de energía con distintas FGD.

Dentro del estudio técnico es necesario conocer la variación de kWh requeridos por la granja. Pensando en una demanda de 800 kWh al día, distribuidos de la siguiente forma:

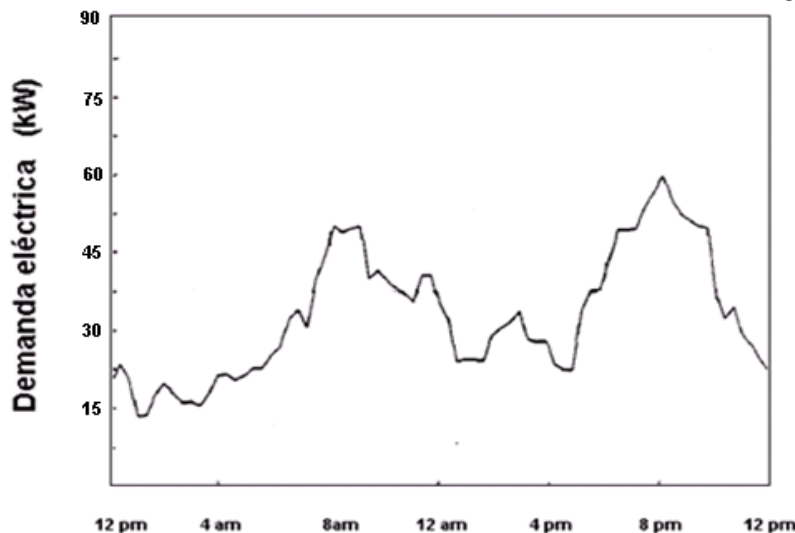


Figura 5.12 Variación de carga en una granja (1000 cerdos).

En la granja la iluminación, refrigeración, calefacción y ventilación, deben estar conectadas de forma permanente. Pensando en que los animales en las granjas requieren de cierta temperatura para su comodidad y crecimiento, la temperatura ambiente debe estar bien controlada, y se debe considerar que la demanda de energía para los aparatos que sostienen las dos últimas cambia con las condiciones ambientales y la época del año. El aumento súbito en la carga es debido al bombeo de agua y las mezcladoras y molinos para el alimento de los animales, ya que cada animal requiere de 5 a 15 litros de agua al día y en promedio 3 kg de alimento balanceado diariamente.

Pensando en el uso de las 4 fuentes de generación distribuida: turbina de gas, microturbina, motor Otto y celdas de hidrógeno de alta temperatura, con producciones de electricidad de 780 kWh, 585 kWh, 878 kWh y 975 kWh al día, respectivamente; cuya producción de energía se puede aprovechar durante distintos periodos de tiempo, se pueden adaptar distintos perfiles de generación para la demanda de electricidad de la granja.

Se observa en los perfiles que la potencia generada puede ser superior o inferior al consumo de la granja, por lo tanto cubrirá total o parcialmente la demanda en caso de trabajar en isla por problemas en la red de distribución.

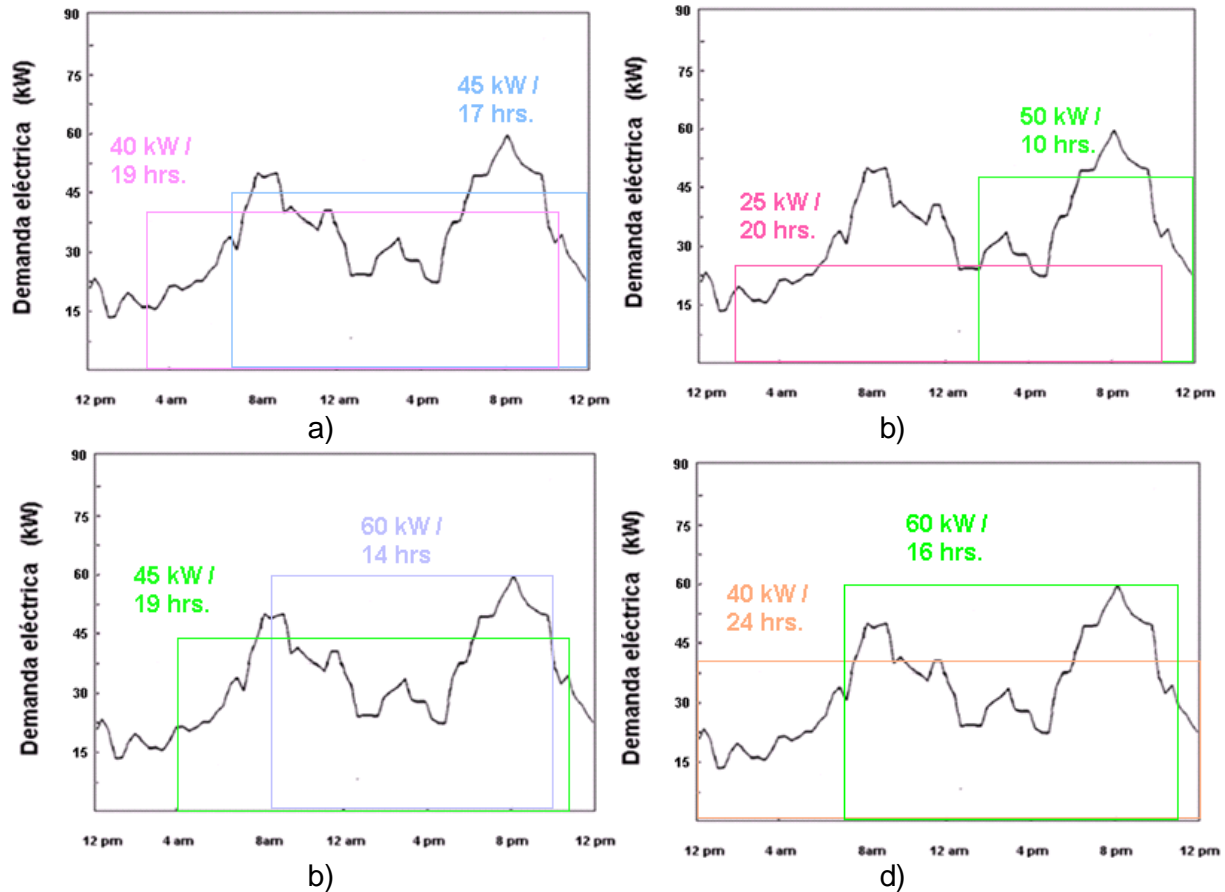


Figura 5.13 Perfiles de producción de electricidad para a) turbina de gas, b) microturbina, c) motor Otto y d) celda de hidrógeno

Otra forma de aprovechar la energía del biogás es disminuyendo la carga conectada a la red de distribución, acoplando algunos equipos de la granja directamente a el módulo de generación, por lo que se podrá optar por módulos pequeños y económicos que solo se enciendan en ciertas horas del día. El biogás excedente podrá quemarse para la contabilización de Certificados de Reducción de Emisiones, lo que puede ser muy redituable por que la inversión necesaria para quemar el biogás es muy baja.

Bajo éste nuevo esquema se debe cubrir un máximo de 170 kWh, pero lo cual se puede utilizar una microturbina o un motor Otto. Se podría elegir un módulo de 35 kW para encender el equipo aislado.

	Microturbina		Motor Otto	
	$\eta=20\%$	$\eta=30\%$	$\eta=30\%$	$\eta=45\%$
Energía requerida (kWh)	850	567	567	378
Biogás al día (m³)	130	87	87	58

Tabla 5.4 Energía requerida para suprimir los picos de carga

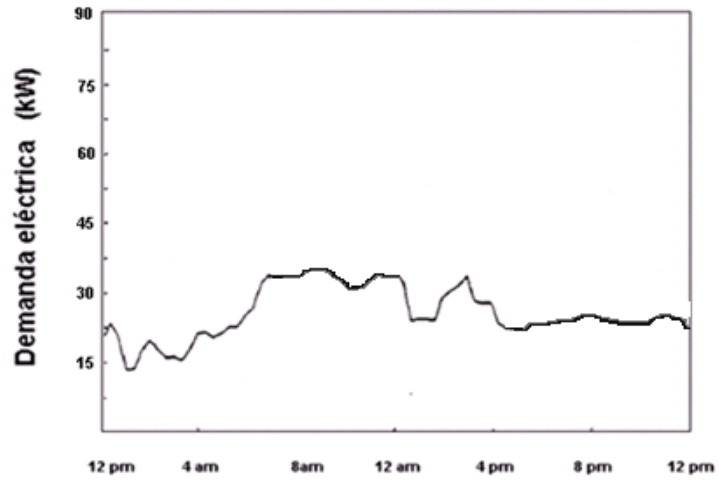


Figura 5.14 Variación de carga en una granja si se desconectan bombas de agua y mezcladoras de alimento (1000 cerdos).

6 Conclusiones y recomendaciones.

La producción de un combustible renovable por medio del tratamiento de los desechos animales en una granja de cerdos, además de reducir la contaminación que éstos producen, mejora las condiciones de trabajo en la instalación y la calidad de vida de los animales, es además; una forma de aprovechar al máximo los recursos propios de la granja. Si éste combustible renovable se utiliza para la generación de energía eléctrica se aprovecha el avance tecnológico en ésta materia, y se consiguen beneficios económicos.

En las granjas donde la producción de biomasa sea pequeña es mejor la elección de digestores más económicos de sencilla instalación y fácil manejo, por que aunque este tipo de instalaciones no proporcionan altos niveles de energía, cumplen con los objetivos de proporcionar energía, sanidad y fertilizantes orgánicos a los productores .Si se cuenta con una instalación de mayor tamaño que proporcione una cantidad grande de biogás se puede pensar en el uso de digestores más especializados, cuya inversión inicial es más alta, y cuyo manejo y mantenimiento son más complejos, pero que proporcionan una mayor cantidad de energía. Debido a que el material del que se extrae el biogás se obtiene y utiliza en la misma granja requiere un transporte mínimo de la zona de producción a la zona de transformación por lo que se suprimen las emisiones asociadas al transporte. La etapa de acondicionamiento para el biogás es primordial para no reducir la vida útil del sistema de generación, la elección del filtro para la remoción del H_2S debe ser precisa, por lo dañino que este compuesto resulta.

Conociendo la temperatura a la que se inicia el proceso de biodegradación, en el caso de requerir almacenar desechos sin que estos se fermenten, se deben mantener a bajas temperaturas por debajo de los $15^{\circ}C$ para así evitar la producción de biogás. Aunque si lo que se desea es aumentar la producción del biogás se puede utilizar el calor de los gases que las turbinas de baja potencia, microturbinas o celdas de baja temperatura desechan.

Se recomienda que la planta que se alimentará del biogás esté lo mas cerca posible del digestor, aunque esto implique tener una mayor lejanía con la carga, pues aunque colocar largos conductores puede provocar caídas de tensión, una caída en la presión en una tubería de conducción del biogás implicaría la adición de dispositivos extra que requerirían un suministro de energía extra para elevar la presión para la alimentación de la planta de generación.

Los sistemas de generación distribuida pretenden cubrir pequeñas cargas de energía de manera directa, por lo que su tamaño las hace candidatas idóneas para su activación por medio de combustibles renovables.

Por ejemplo en el caso de una turbina de gas al tener acceso a un combustible barato puede cubrir la carga por largos periodos de tiempo. Lo mismo ocurre con el motor Otto que tiene la gran ventaja de utilizar 100% de biogás como combustible, a diferencia de un motor Diesel que requiere de la compra adicional de un hidrocarburo para su uso. Éstas 3 tecnologías son muy confiables por el tiempo de experiencia que se tiene trabajando con ellas.

Se recomienda el uso de celdas de combustible de alta temperatura por 3 razones:

- a. El reformado es interno, por lo que pueden alimentarse directamente de biogás.
- b. Son altamente tolerantes al CO y CO₂, por lo que la etapa de filtrado puede concentrarse en la eliminación de H₂S exclusivamente.
- c. El calor residual puede ser usado para cogeneración.

Para cualquier FGD la viabilidad de la implementación de la cogeneración se da cuando existe una demanda de calor de cierta magnitud y características dentro de la propia granja, siendo también relevantes otros factores tales como la solución tecnológica adoptada, los costos de capital que involucra y las tarifas de energía eléctrica.

Se debe hacer un estudio para conocer la demanda específica de la granja, para poder elegir la tecnología más conveniente, esto conociendo el potencial de generación que se tiene para la granja en específico. Uno de los aspectos más importantes que se tiene que cubrir es la calidad de la energía, pues todos los equipos eléctricos sufren algún daño si no trabajan bajo las condiciones que el fabricante especifica para cada dispositivo.

Un aspecto favorable en este tipo de proyectos radica en que si bien mientras más grande sea la instalación más electricidad demande, con el aumento de cerdos se tiene un aumento en la cantidad de combustible, por lo que, la producción de electricidad también se amplía, y teniendo grandes volúmenes de biogás es posible alimentar de forma continua una planta para cubrir algún perfil de la demanda de energía.

Se puede producir por un lado una potencia media que pueda cubrir por un largo periodo de tiempo, cierta demanda energética, o por el otro lado iniciar una alta producción de potencia en un periodo de tiempo que aunque sea más corto cubra la demanda máxima de la granja. O bien si se pretende suprimir los picos de demanda se puede optar por otro esquema de generación, que solo se utilice para alimentar periodos cortos de demanda, por ejemplo para accionar una mezcladora de alimentos.

Para el primer caso, si se compra una planta más pequeña el costo es menor comparada con una de mayor potencia, otro ahorro económico en este escenario se reflejaría en la disminución del monto de facturación de kWh consumidos de la red de la compañía suministradora. Para el segundo escenario si se cubre la demanda durante la carga pico se obtienen beneficios económicos por evitar la facturación durante los periodos más costosos de la energía eléctrica.

En ambos casos se pueden obtener beneficios económicos por la venta de energía durante los periodos donde la potencia producida sea mayor a la demanda, pero para esto es necesaria una interconexión que permita el flujo de energía en ambas direcciones.

Por lo tanto los ingresos económicos adicionales a los dueños de la granja proviene de:

- a) La venta de fertilizante, que resulta como subproducto en la producción del biogás.
- b) Los ahorros en energía eléctrica por cubrir cargas en la propia granja.
- c) La venta de energía eléctrica a la compañía suministradora.

Se deben buscar además apoyos fiscales con instituciones públicas, pues existen distintos programas orientados a incrementar la productividad, rentabilidad y competitividad de los productores, con un enfoque de respeto por el medio ambiente, un ejemplo el FIRCO, que ayuda en el financiamiento para que la inversión de la instalación sea más pequeña.

Dependiendo de la capacidad de la GD, el tipo y tamaño de generador, el tipo de conexión y el punto de interconexión con la red y la configuración del transformador de interconexión se debe hacer la selección de esquemas y dispositivos de protección.

La falta de conocimiento de las tecnologías de generación distribuida impide la implementación y el crecimiento de estos sistemas. En este sentido como ingenieros mexicanos podemos contribuir al movimiento global que aboga por el cuidado del medio ambiente mediante tecnología sustentable, con más proyectos energéticos descentralizados y más pequeños, para dejar los combustibles fósiles en la tierra; además de asesorar sobre las últimas tecnologías de generación de energía a los organismos encargados de legislar y a las instituciones encargadas de desarrollar proyectos energéticos, en busca de desarrollar tecnología verde siempre con un enfoque hacia la mejora en la calidad de vida de las personas que menos acceso tienen a las tecnologías convencionales de producción de energía.

Lista de figuras y tablas

- Figura 1.1** Principales estados productores de cerdo. Fuente: INIFAP.
- Figura 2.2** Planta de biogás en Shenhen.
- Figura 2.3** Planta biogás de Punjab.
- Figura 2.4** Planta de biogás de Kanoria Chem, Ankleshwar.
- Figura 2.5** Digestores tubulares. Bolivia.
- Figura 2.6** Digestores de polietileno en una granja en Bolivia.
- Figura 2.7** Planta de biogás con base en tratamiento de aguas residuales, Valencia.
- Figura 2.8** Planta de biogás con base en tratamiento de aguas residuales, Sevilla.
- Figura 2.9** Granja Geerlings Hillside, Michigan..
- Figura 2.11** Generador de planta de biogás, Torreón.
- Figura 2.12** Sistema de captación de residuos vacunos. Torreón
- Figura 2.13** Granja Delicias, Chihuahua.
- Figura 2.14** Construcción del digestor Granja Delicias, Chihuahua.
- Figura 2.15** Generador Granja Delicias, Chihuahua
- Figura 2.16** Planta de biogás en relleno sanitario en Monterrey
- Figura 2.17** Transformadores en la planta Benlesa.
- Figura 3.1** Digestor tipo chino.
- Figura 3.2** Digestor polietileno.
- Figura 3.3** a) Digestor hindú.
b) Digestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.
- Figura 3.4** Composición del biogás. Fuente: FIDE.
- Figura 3.5** Etapas de la digestión anaerobia.
- Figura 3.6** Cantidad total de gas producido por kilogramo de materia, para diferentes temperaturas.
- Figura 3.7** Producción de metano generado por la fermentación de estiércol de cerdo.
- Figura 3.8** Esquemas generales de una planta de producción y aprovechamiento de biogás.
- Figura 3.9** Planta de biogás en Alemania, procesadora de estiércol de cerdo.
- Figura 3.10** Planta de biogás en Dinamarca
- Figura 3.11** Membrana instalada para almacenar biogás
- Figura 3.12** Quemadores de biogás excedente
- Figura 3.13** Aplicación de fertilizante directamente al suelo
- Figura 3.14** Retención de H₂S en dos tipos de sustrato y tres longitudes de filtro
- Figura 4.1** Modelo del funcionamiento de una planta con turbina de gas.
- Figura 4.2** Cámara de combustión
- Figura 4.3** a) Diagrama P-v
b) Diagrama T-s
- Figura 4.4** Planta con turbina de gas en ciclo cerrado.
- Figura 4.5** Planta de generación con microturbina de gas.
- Figura 4.6** Funcionamiento básico motor Otto.
- Figura 4.7** a) Diagrama P-v ciclo Otto.
b) Diagrama T-s ciclo Otto.
- Figura 4.8** a) Diagramas P-v ciclo Diesel.
b) Diagrama T-s ciclo Diesel.
- Figura 4.9** Modificación para motor Diesel.
- Figura 4.10** Principio de funcionamiento de una celda de hidrógeno.
- Figura 4.11** Principio de funcionamiento celdas AFC
- Figura 4.12** Principio de funcionamiento celdas PAFC
- Figura 4.13** Principio de funcionamiento celdas MCFC
- Figura 4.14** Principio de funcionamiento celdas SOFC
- Figura 4.15** Principio de funcionamiento celdas PEMFC
- Figura 4.16** Potencias y eficiencias por tipo de planta
- Figura 4.17** a) Motor Otto.
b) Microturbina.
c) MCFC.
d) Turbina de gas.
- Figura 5.1** Tipos de generadores.
a) Generador de inducción o asíncrono.
b) Generador Síncrono.

Figura 5.2	Protección típica en la interconexión
Figura 5.3	Ubicación de la protección de la interconexión de la fuente de GD a través de un transformador
Figura 5.4	Protecciones de un pequeño generador conectado en estrella sólidamente aterrizado conectado a una red aislada de baja tensión.
Figura 5.5	Protecciones de un pequeño generador conectado en delta conectado a una red aislada de baja tensión.
Figura 5.6	Protecciones de un generador mediano conectado a una red aislada de media tensión.
Figura 5.7	Protecciones de un generador de gran capacidad conectado a una red aislada de media tensión.
Figura 5.8	Protecciones generador pequeño operando en paralelo con la red de distribución en forma directa.
Figura 5.9	Protecciones de un generador operando en paralelo con la red de media tensión en forma directa.
Figura 5.10	Ejemplo de funcionamiento de un relevador digital de multifunción
Figura 5.11	Protecciones de un generador alimentando carga industrial y operando en paralelo con la red de media tensión.
Figura 5.12	Variación de carga en una granja (1000 cerdos)
Figura 5.13	Perfiles de producción de electricidad para a) turbina de gas, b) microturbina, c) motor Otto y d) celda de hidrógeno
Figura 5.14	Variación de carga en una granja si se desconectan bombas de agua y mezcladoras de alimento (1000 cerdos).
Figura B.1	Motor Stirling
Tabla 2.10.	Ubicación de proyectos de manejo de residuos porcinos acreditados por el COMEGEI
Tabla 3.1	Comparación entre digestores
Tabla 3.2	Composición del biogás. Fuente: FIDE
Tabla 3.3	Cantidad de estiércol y metano por especie animal.
Tabla 3.4	Promedio de producción de biogás al día para un cerdo.
Tabla 3.5	Rango temperaturas para cada bacteria.
Tabla 3.6	Potencial energético Biogás. Fuente: FIRCO
Tabla 3.7	Resultados al utilizar filtros para capturar el CO, el CO ₂ y el H ₂ S en el biogás.
Tabla 4.1	Características de distintos tipo de celdas de combustible
Tabla 4.2	Tolerancia de los distintos tipos de pilas de combustible a diferentes compuestos
Tabla 4.3	Características generales turbinas de gas.
Tabla 4.4	Características generales microturbinas.
Tabla 4.5	Características generales MCI.
Tabla 4.6	Características generales Celdas de hidrógeno.
Tabla 5.1	Dispositivos de protección para un generador mediano conectado a una red aislada de media tensión
Tabla 5.2	Dispositivos de protección para un generador pequeño operando en paralelo con la red
Tabla 5.3	Potencial de generación de energía con distintas FGD.
Tabla 5.4	Energía requerida para suprimir los picos de carga
Tabla A1.	Parámetros según el ancho del rollo
Tabla A2.	Sección eficaz según el ancho del rollo
Tabla A3.	Longitud del digestor según el ancho del rollo

Bibliografía y referencias.

1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Consultado el 18 de Noviembre 2009.
2. Global Bioenergy Partnership (GBEP) Consultado el 18 de Noviembre 2009.
3. Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero (COMEGEI). Consultado el 05 de enero 2011
4. Casas Prieto Miguel Ángel, et al. (2009), "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*, número 24, México.
5. Al Seadi Teodorita, et al, (2008), "Biogas Handbook", Dinamarca.
6. FIDE, (2008), "Taller sobre Captura y Aprovechamiento de Metano Proveniente de Residuos Agropecuarios", México.
7. Martí Herrero Jaime (2008), "Digestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación". Bolivia.
8. Deublein Dieter, Steinhauser Angelika, (2008), "Biogas from Waste and Renewable Resources. An introduction", Alemania.
9. Aliaga Orellana Lizeth Limbania (2006), "Evaluación de producción de biogás utilizando desechos porcícolas de Zamorano", Honduras
10. Dennis A. Burke P.E., (2001), "Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook", E.E.U.U.
11. Hilbert Jorge A. "Manual para la producción de biogás", Instituto de Ingeniería Rural, Costa Rica.
12. SAGARPA, Fichas tecnológicas por sistema producto. Porcinos: Generación de biogás como componente de valor agregado en el uso de excretas porcinas.
13. Sogari, Noemi, (2003), "Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos", Argentina.
14. Coto J. E., et al, (2007), "Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de EARTH", Costa Rica.
15. Huertas J. I., et al. (2008), "Desulfurización del biogás utilizado en motores de combustión interna para la generación de energía eléctrica", México.
16. Acosta M., et al. (2009), "Capacidad de filtración y retención del sulfuro de hidrógeno (H₂S) del biogás, en dos diferentes sustratos orgánicos (EM-compost y lombricompost)", Costa Rica.
17. Laughton M. A., Warne D. J., (2003), "Electrical Engineer's Reference Book", Inglaterra.
18. Walsh James L., et al, (1988), "Handbook on biogas utilization", U. S. Department of Energy, E.E.U.U.
19. Bedoya Caro Iván Dario, et al. (2007), "Efecto del grado de carga y la cantidad del combustible piloto en el comportamiento mecánico ambiental de un motor dual diesel- biogás para generación de electricidad", Colombia.
20. Aguilar Oscar. (2008) "¿Qué es Cogeneración? Segunda Parte ", México.
21. Rasgado Casique José P.(2004), "Metodología de selección, ajuste y análisis de protecciones de protecciones de sistemas de generación distribuida", Tesis de Maestría, México.
22. Gómez J.C., Vaschetti. J., Coyos C. V.(2009), "Generación Distribuida: Tipo De Conexión Del Transformador de Interconexión", Argentina
23. Mozina Charles J., "Interconnect Protection of Dispersed Generators", Beckwith Electric Co., Inc., E.E.U.U.

24. Jenkins Nick, et al, (2000), "Embedded Generation", The Institution of Engineering and Technology, Inglaterra.
25. Norma IEEE C37.12 1987.
26. ANSI/IEEE Standar. 242-2001.
27. Francesena Bacallao Emilio, Bravo de las Casas. Marta (2009) "Consideraciones sobre la protección en la interconexión de la generación distribuida al sistema eléctrico de potencia", Cuba.
28. Francesena Bacallao Emilio, et al, (2010), "Esquemas de protección en plantas de generación distribuida", Cuba.
29. Flores García Rubén F., (2010), "Propuestas de las Reglas de Interconexión, Despacho y las Contraprestaciones para las Centrales Eléctricas con Fuentes de Energía Renovable y Cogeneración Eficiente", México.
30. FIRCO, (2007), "El aprovechamiento de biogás en la generación de energía, dentro del sector agropecuario", México.
31. Gómez Martínez Miguel Ángel,(2008),"Análisis Técnico-Económico de factibilidad energética por medio de biomasa."Universidad de Guanajuato, México.
32. Biomass Users Network, BUN-CA, (2002), "Manuales sobre energía renovable: Biomasa" ,1 ed., Costa Rica.
33. Capella Castro Miguel, Vásquez Santos David, (2000), "Alternativas para incrementar la eficiencia y capacidad de las turbinas de gas", Universidad del Norte, Colombia.
34. Espinel D., Giraldo E. (2005), "Evaluación económica del uso de las celdas de combustible para generar energía utilizando biogás proveniente de un relleno sanitario", Universidad de los Andes, Colombia.
35. Huertas J. I., et al. (2008), "Desulfurización del biogás utilizado en motores de combustión interna para la generación de energía eléctrica", México.
36. Monreal Carlos M., (2008) "La utilización de los residuos agrícolas y otros desechos para la producción de bioenergía, biocombustibles y bioproductos", Center Agriculture and Agri-Food, Canada.
37. ONU, (1998) "Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático".
38. SAGARPA, (2007), "La energía renovable en el sector agropecuario", *Claridades agropecuarias, Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria*, México.
39. Trogisch Steven. (2009), "Utilización de biogás en pilas de combustible", PROTECMA energía y medio ambiente, Asturias.
40. Ullah Khan Ershad, (2007) "Biogas for distributed power generation and safe drinking water with Stirling engine".
41. PICC Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático- 1996. INE http://cambio_climatico.ine.gob.mx/secprivcc/secprivcc/html. Consultado el 18 de Noviembre 2009
42. <http://www.multitekingenieros.com/microcogeneracion>. Consultado el 7 de abril de 2010
43. http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/mercadobonoscarbono.html. Consultado el 18 mayo 2010
44. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) Consultado el 20 de mayo de 2010
45. <http://www.nzdl.org/cgi-bin/library.cgi> Consultado el 23 Mayo 2010
46. <http://www.cnea.gov.ar/xxi/energe/b7/artic1.asp> Consultado el 01 junio 2010

Anexo A Digestores de polietileno.

ANEXO A Digestores de Polietileno Tubular⁵

Antes de instalar un digestor es necesario conocer la cantidad de estiércol diario al que se tiene acceso, y a partir de éste dato calcular la cantidad de biogás al día que se puede producir. Una vez conocido esto se puede dimensionar el digestor, si bien los datos específicos para cada granja se deben actualizar mediante estudios concretos en el sitio, esta guía ejemplifica un método de diseño.

Para este tipo de digestores se usara una bolsa de polietileno tubular que se amarra por sus extremos a tuberías de conducción, de forma que la instalación sea hermética. Una de las tuberías servirá como entrada de la mezcla de estiércol con agua; todos los días hay que cargar el digestor con una carga de estiércol mezclada 1:4 con agua. A esto se le llama mezcla de carga diaria (estiércol más agua). Se agrega una válvula de seguridad. También se añade un almacén de biogás, y una tubería para la salida del fertilizante. Al ser flexible el polietileno es necesario construir un lugar que lo albergue, ya sea una zanja para aprovechar la inercia térmica del suelo, o dos paredes paralelas de adobe laterales. Al ser el digestor de polietileno tubular se formará una campana de biogás que almacenara el gas en la parte superior.

Suponiendo una granja pequeña de 100 cerdos, por la tabla 5.3 sabemos que la producción diaria de biogás alcanza los 16.5 m³. El volumen total del digestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa.

El volumen total es la suma del volumen gaseoso y el volumen líquido.

$$V_T = V_G + V_L$$

Y por lo tanto el volumen líquido es tres cuartas partes del total:

$$V_L = V_T \times 0.75$$

Y el volumen gaseoso:

$$V_T = V_G / 0.25$$

Para nuestra granja: $V_T = 16.5 / 0.25 = 66 \text{ m}^3$. Se dividirá en 3 digestores con un volumen de 22 m³.

Dimensionamiento de digestor tubular

Conociendo el volumen total de un digestor se deberá determinar las dimensiones del mismo. Las dimensiones primeras a determinar son la longitud y radio del digestor tubular.

Ancho de rollo y radio de la manga

Se puede comprar el polietileno tubular en rollos de 50 metros, con un ancho de rollo que varía normalmente entre 1, 1.25, 1.50, 1.75 y 2 metros. Este ancho de rollo equivale a la mitad de la circunferencia total del plástico y determina el diámetro y radio de nuestro digestor. Según el ancho de los rollos más comunes en el mercado encontramos:

⁵ Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación. Martí Herrero Jaime. Bolivia 2008

Ancho de rollo (m)	Perímetro de la circunferencia (m)	Radio(m)	Diámetro (m)
1	2	0.32	0.64
1.25	2.5	0.40	0.80
1.50	3	0.48	0.96
1.75	3.5	0.56	1.12
2	4	0.64	1.28

Tabla A1. Parámetros según el ancho del rollo

Volumen de una manga, sección eficaz y longitud.

El volumen total de esta manga (plástico amarrado por ambos extremos) equivale al volumen de un cilindro (en m³) que se calcula:

$$V_{\text{cilindro}} = (\pi \times r^2) \times L$$

$$\text{Sección eficaz} = \pi \times r^2$$

Donde: $\pi = 3.1416$,

$r =$ radio del tubo [m]

$L =$ longitud del digestor [m]

Ancho de rollo (m)	Sección eficaz (m ²) ($\pi \times r^2$)
1	0.32
1.25	0.50
1.50	0.72
1.75	0.97
2	1.27

Tabla A2. Sección eficaz según el ancho del rollo

Conociendo el volumen total del digestor y las secciones eficaces de los plásticos disponibles (según su ancho de rollo), es fácil determinar la longitud necesaria. Si el volumen del digestor es $V_{\text{cilindro}} = (\pi \times r^2) \times L$, y conocemos todos los parámetros excepto la longitud, despejando de la anterior fórmula se obtiene:

$$L = \frac{V_{\text{cilindro}}}{(\pi \times r^2)} = \frac{V_t}{S_e}$$

Para nuestra granja $L = 22 / (1.27) = 17$ m

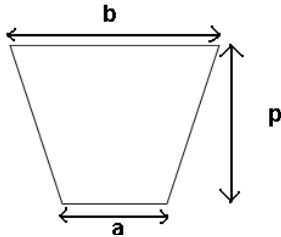
De esta manera se genera un cuadro en el que se ponen los resultados de la longitud para cada ancho de rollo.

Ancho de rollo (m)	Sección eficaz ($\pi \times r^2$) (m ²)	Longitud del Digestor (m)
1	0.32	$V_t / 0.32$
1.25	0.50	$V_t / 0.50$
1.50	0.72	$V_t / 0.72$
1.75	0.97	$V_t / 0.97$
2	1.27	$V_t / 1.27$

Tabla A3. Longitud del digestor según el ancho del rollo

Dimensiones de la zona de resguardo del digestor.

Si se opta por una zanja ésta queda determinada por la longitud del digestor y el ancho de rollo empleado en la construcción del digestor la misma. De forma general se pueden emplear las siguientes dimensiones para la zanja:



Dimensiones de la zanja					
AR (m)	2	1.75	1.5	1.25	1
a (m)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
b (m)	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
p (m)	1	0.9	0.8	0.7	0.6

Si se construye una zanja sin considerar el ancho empleado puede suceder que la cúpula de biogás sea demasiado pequeña o incluso grande. En caso de que la cúpula ocupe más de un 25% del volumen, se estará restando volumen a la fase líquida y por tanto reduciendo el tiempo de retención.

Anexo B Motor Stirling.

El motor Stirling está clasificado como motor de combustión externa, convierte el calor en trabajo, a través de un ciclo termodinámico regenerativo, con compresión y expansión cíclicas del fluido de trabajo, usualmente entre helio o hidrogeno; operando dicho fluido entre dos temperaturas, una máxima alta, y una máxima fría. Su eficiencia eléctrica es de 24% a 28%.

En el motor Stirling un gas está confinado en una cámara cerrada. El gas se desplaza de un extremo a otro de la cámara, cuando está en un extremo, una fuente de calor externa lo calienta; esto hace que se expanda y así se produce la fuerza del motor. Una vez que alcanza su máxima expansión, el gas se traslada al otro extremo de la cámara, donde se enfría, lo que provoca que se comprima. Después se lleva nuevamente al extremo caliente para iniciar un nuevo ciclo

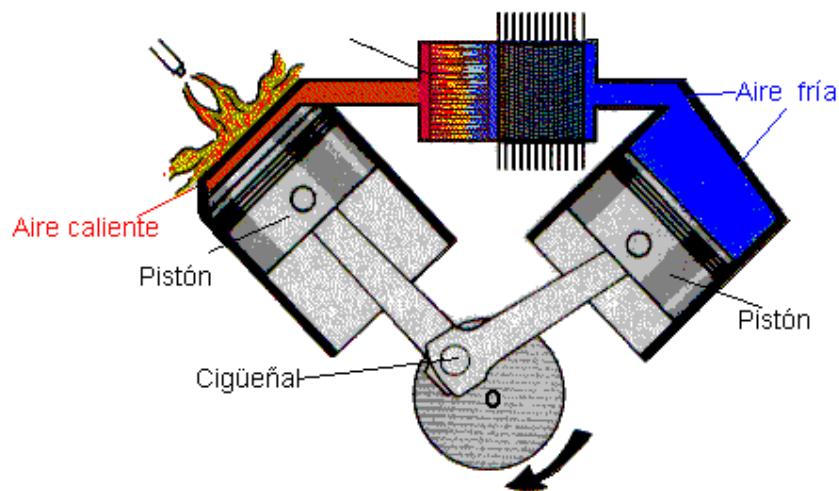


Figura B.1 Motor Stirling

Generalmente encontrados en pequeños tamaños de 1 a 25kW. El motor Stirling es el único capaz de aproximarse, al menos teóricamente, al rendimiento máximo teórico conocido como rendimiento de Carnot.

Aunque no es una tecnología muy usada, es interesante por su alto rendimiento térmico, se puede quemar el biogás para que sea la fuente de calor que éste motor necesita para trabajar, en unidades pequeñas donde la producción del biogás sea poca pero constante, y los requerimientos de energía eléctrica puedan cubrirse con unidades de pequeña capacidad.