

01149



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE
FACULTAD DE INGENIERÍA

"ANÁLISIS DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE
ENERGÍA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES DE
ENERGÍA PARA UNA GRANJA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

P R E S E N T A :

ELISA BLANCA VIÑAS REYES



DIRECTOR: ING. AUGUSTO SÁNCHEZ CIFIENTES

MEXICO, D.F.

ENERO 2005

m340418



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Autorizo a la Dirección de Bibliotecas de la UNAM a difundir en su página web el contenido de esta publicación.
NOMBRE: Liñas Reyes, Elisa Blanca

FECHA: 27 de enero de 2005

FIRMA: 

AGRADECIMIENTOS

◆ A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

POR BRINDARME LA OPORTUNIDAD DE HACER UNA CARRERA PROFESIONAL Y AHORA UNA MAESTRÍA, POR CREER EN MI Y DARME LAS ARMAS PARA DESARROLLARME PROFESIONALMENTE Y ASÍ MEJORAR LA CALIDAD DE VIDA MÍA, DE MI FAMILIA Y LA DE MI PAÍS.

◆ AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

POR HABERME OTORGADO UNA BECA CREDITO DURANTE LOS DOS AÑOS DE MAESTRÍA. GRACIAS POR APOYAR A LOS ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS Y POR DARNOS LA OPORTUNIDAD DE SUPERARNOS CONTRIBUYENDO A SI, A CONSTRUIR UN MEJOR FUTURO PARA NUESTRO PAÍS.

◆ A LA FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA DE LA UNAM, EN ESPECIAL AL DORTOR JAVIER VALENCIA MÉNDEZ DIRECTOR TÉCNICO DEL CEPIPSA.

POR LAS FACILIDADES QUE NOS BRINDO PARA OBTENER INFORMACIÓN DEL CENTRO Y ELABORAR PARTE DE ESTA TESIS.

AGRADECIMIENTOS

- ◆ A MIS PADRES Y EN ESPECIAL A MI MADRE QUE SIEMPRE HA DADO TODO.
- ◆ A MIS PADRINOS NOE Y SOCO POR BRINDARME SUS CONSEJOS, POR SU TIEMPO PARA ESCUCHARME Y TRATAR DE ENTENDERME.
- ◆ A MI HERMANO POR QUE SIEMPRE ME HA APOYADO Y POR SU COMPENSIÓN
- ◆ A MIS AMIGOS
 - © JENNIFER POR BRINDARME SU AMISTAD, POR SU APOYO Y POR CREER EN MÍ.

Y

- © RODOLFO: POR SU AMISTAD, POR COMPARTIR CONMIGO SUS CONOCIMIENTOS Y SU APOYO.

SIN LA AYUDA DE AMBOS, NO LO HUBIERA LOGRADO

- ◆ A MIS PROFESORES POR COMPARTIR SU EXPERIENCIA Y CONOCIMIENTOS CON NOSOTROS.
- ◆ Y A TODOS LOS QUE DE UNA U OTRA FORMA CONTRIBUYERON A QUE YO ALCANZARA MI META.

RESUMEN

Este trabajo de tesis propone el empleo de fuentes de energía renovables como la biomasa o la solar disponibles en el sitio a través de un sistema de generación el cual sea técnica y económicamente factible. El fin de emplear estas fuentes, es el de generar y abastecer de energía eléctrica y térmica al centro de investigación en producción y salud animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM para lo cual, se proponen dos alternativas. La primera alternativa es utilizar energía de la biomasa concentrada en los residuos ganaderos es decir, en el estiércol y recuperar por digestión anaerobia biogás el cual puede ser quemado en turbinas de gas o en motores de combustión interna y generar energía eléctrica y térmica por cogeneración. La otra alternativa es, emplear un sistema fotovoltaico que convierte directamente la luz del sol en electricidad. Así, al realizar un análisis técnico-económico a estas dos propuestas de autoabastecimiento, se opta por el sistema que sea desde el punto de vista técnico y económicamente más atractivo para cumplir nuestro objetivo.

El dimensionamiento de la capacidad de estos sistemas se hace tomando en cuenta la demanda promedio de energía de la granja estimada en 17.80kWe para el año 2003.

Para elegir y dimensionar el sistema de generación de biogás (digestor, tanque de mezcla, etc.), se consideraron diversos aspectos como la forma en que se recolecta y almacena el estiércol de los establos y la cantidad que se produce diariamente de este. En base a estos datos y a referencias bibliográficas se opto por un digestor del tipo flujo pistón de unos 212m³ de capacidad con una cubierta flexible para almacenar el biogás recuperado el cual, se calculo en unos 367m³ de gas seco por día.

Para el sistema de generación que emplearía biogás, se realizo un análisis comparativo entre quemar el biogás en una microturbina de gas o un motor de combustión interna para generar energía eléctrica y adicionalmente obtener energía térmica al aprovechar los gases calientes de combustión en un recuperador de calor y producir vapor saturado. Este vapor se emplea para calentar al digestor y el agua de la cocina y de los baños en la granja.

Así, la propuesta de autoabastecimiento se convierte en un esquema de cogeneración al generar secuencialmente energía eléctrica y térmica a partir de una sola fuente de energía primaria (biogás).

Con ello, la eficiencia global del sistema se ve considerablemente incrementada. La eficiencia proporcionada por sistema con turbina de gas es de alrededor de 25% y del 36% para el sistema con motor de combustión interna.

Con lo que se refiere al sistema fotovoltaico, se optó por un sistema autónomo (no conectado a la red de suministro) el cual incluye baterías, controladores de carga, inversores para convertir electricidad de corriente continua a corriente alterna. Aquí, se calculó el número de paneles fotovoltaicos requeridos en base al consumo promedio diario de la granja (204kWh/d) y el número de baterías que se requieren únicamente para asegurar el funcionamiento de refrigeradores y congeladores durante la noche y los días nublados.

A su vez, se realiza un análisis económico a las alternativas de generación arriba mencionadas considerando parámetros económicos como el valor presente neto, la tasa interna de retorno, el periodo de recuperación de la inversión y la relación beneficio costo además de hace la evaluación de los costos y la de los beneficios que se obtendrán de una u otra alternativa. Los beneficios aquí, están representados por los ingresos por capacidad y energía eléctrica y en facturación de combustible empleado para generar vapor en el recuperador en caso de no aprovechar los gases de combustión.

En base a los resultados obtenidos en la evaluación económica, se descarto la alternativa de abastecer a la granja empleando tecnología fotovoltaica ya que ésta, no es rentable frente a la alternativa con biogás. Adicionalmente, se presenta una aplicación de análisis termoeconómico a los dos sistemas con biogás con la finalidad de conocer la cantidad real de exergía que ha sido necesaria para producir cada uno de los flujos internos y productos finales del sistema, sus costos exergéticos y exergoeconómicos así, la información obtenida de éste análisis puede utilizarse en el diseño de los sistemas térmicos y reducir las fuentes de ineficiencia de estos.

ABREVIATURAS

A	Amperes
AER	Ambiente estado de referencia
AR	Ambiente de referencia
B/C	Relación costo-beneficio
BOS	Balance del sistema fotovoltaico
BT	Balance total de la planta
Btu	Unidad técnica Británica
C/N	Relación carbono-nitrógeno
C/P	Relación carbono-fósforo
ca	Corriente alterna
cc	Corriente continúa
c-dlls.	Centavos de dólar
COD	Demanda química de oxígeno
d	día
DA	Digestión anaerobia
ft	pies
FV	Fotovoltaico
g/l	Gramo por litro
h	hora
HRT	Tiempo de retención hidráulica
in	pulgadas
Kcal	kilocalorías
kg	kilogramos
kJ	kilojoules
km	kilómetro
kW	kilowatt
kWe	kilowatt eléctricos
kWh	kilowatt-hora
kWt	kilowatt térmicos
lb	libras
LHV	Poder calorífico inferior
LyFC	Luz y Fuerza del Centro
m	metros
m ²	metros cuadrados
m ³	metro cúbico
MCI	Motor de combustión interna
mg/l	miligramo por litro
MJ	Mega-jule
mm	milímetros
MMBtu	Millones de Btu's.
MO	Materia orgánica
MTG	Microturbina de gas
mV	Mili-volts
Nm ³	Metros cúbicos normalizados

ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
PRI	Periodo de recuperación de la inversión.
PT	Planta total
s	segundo
SCMCI	Sistema de cogeneración con motor de Combustión interna
SCTG	Sistema de cogeneración con turbina de gas
SF	Sistema fotovoltaico
SSF	Sistema solar fotovoltaico
TG	Turbina de gas
TIR	Tasa interna de recuperación.
ton.	Toneladas
TS	Sólidos totales
US\$	Dólares americanos
V	Volts
VPN	Valor presente neto
VS	Sólidos volátiles
W	Watt

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ABREVIATURAS.....	v
ÍNDICE.....	vii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: ENERGÍA SOLAR Y DE LA BIOMASA.....	4
1.1 Introducción.....	5
1.2 Energía de la Biomasa.....	6
1.2.1 Residuos ganaderos.....	7
1.2.2 Métodos de conversión de la biomasa en energía.....	7
1.3 Digestión Anaerobia.....	9
1.3.1 Tipos de residuos para la digestión anaerobia.....	9
1.3.2 Fases del proceso de la digestión anaerobia.....	10
1.3.3 Parámetros de operación de la digestión anaerobia.....	12
1.4 Digestores Anaerobios Empleados en la Recuperación de Metano en Granjas.....	18
1.4.1 Digestores de mezcla total.....	19
1.4.2 Digestores del tipo flujo pistón o tapón (plug-flow).....	20
1.4.3 Laguna anaerobia.....	21
1.5 El Biogás en la Generación de Energía Eléctrica.....	22
1.6 Energía Solar.....	23
1.6.1 El efecto fotoeléctrico.....	24
1.6.2 Aplicaciones de la tecnología solar fotovoltaica.....	30
1.7 Conclusión.....	31
CAPÍTULO 2: OPCIONES DE AUTOGENERACIÓN EN UNA GRANJA CON BIOMASA O ENERGÍA SOLAR: DIMENSIONAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS.....	32
2.1 Introducción.....	33
2.2 Información de la Granja.....	34
2.3 Dimensionamiento de los Sistemas de Generación Eléctrica.....	36
2.3.1 Sistemas de generación con biogás.....	36
2.3.2 Sistema de generación con paneles solares.....	50
2.4 Análisis Comparativo de los Resultados.....	54
2.5 Conclusión.....	54
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS.....	55
3.1 Introducción.....	56
3.2 Evaluación Económica de las Alternativas Propuestas.....	57
3.3 Resultados de la Evaluación Económica.....	59
3.4 Análisis de los Resultados.....	61
3.5 Conclusión.....	62

ÍNDICE

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS EXERGOECONÓMICO	63
4.1 Introducción.....	64
4.2 Análisis Energético.....	64
4.3 Descripción del Proceso.....	66
4.4 Metodología de Aplicación.....	66
4.4.1 Definición de la estructura lógica de la planta.....	66
4.4.2 Cálculo de la exergía de todos los flujos.....	73
4.4.3 Aplicación de las reglas de asignación de costes.....	74
4.4.4 Cálculo de los costos energéticos.....	76
4.4.5 Cálculo de los costos exergoeconómicos.....	77
4.5 Análisis de Resultados.....	78
CONCLUSIÓN	79
GLOSARIO	83
BIBLIOGRAFÍA	84

ANEXO I: Cálculos de la estimación del biogás recuperado y otros.

ANEXO II: Cálculos de la evaluación económica de las alternativas

ANEXO III: Cálculos de la evaluación termoeconómica de los sistemas con biogás

INTRODUCCIÓN

Desde los principios de la historia de la humanidad, el hombre se ha ido acostumbrando a sustituir las formas de energía por otras nuevas. En tiempos remotos se empleaba la energía solar para calentar agua; leña para cocción de alimentos, iluminación y calefacción de hogares; el viento para mover los navíos y en los molinos para moler granos de modo que estos, satisfacían sus necesidades energéticas más básicas. Sin embargo, estas dieron paso al consumo indiscriminado e irracional de combustibles fósiles como el petróleo y sus derivados; al carbón, y más recientemente al gas natural. No obstante aún en nuestros días existen poblaciones en muchos lugares del mundo que no reciben los servicios de una red eléctrica y a menudo tienen que depender de hidrocarburos como el keroseno y el diésel. Con frecuencia los hidrocarburos son importados lo que deja a las economías vulnerables a las fluctuaciones mundiales de precios del petróleo y a las interrupciones de suministro. Las crisis petroleras que han afectaron al mundo y que se manifestaron entre otras muchas variantes en las enormes fluctuaciones en los precios internacionales del petróleo, hicieron evidente la dependencia de algunos países consumidores de este puesto que es un energético localizado además, de que también se evidenció que estos son recursos finitos que tarde que temprano se agotarán. Además, sus procesos de extracción, conversión a energía útil y su uso final, tienen impactos ambientales negativos que pueden llegar a ser irreversibles.

Por ello la investigación y desarrollo en diversos países, se han enfocado en la búsqueda de fuentes alternas de energía no sólo para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles sino también, se busca que estos energéticos alternos sean benignos con respecto al medio ambiente. Así, se reconsidero el mejor aprovechamiento de la energía solar y sus diversas manifestaciones secundarias tales como la energía eólica, hidráulica, las diversas formas de biomasa y la geotérmica es decir, en las llamadas fuentes renovables. La tecnología para utilizar estas fuentes alternas ha venido evolucionando rápidamente y se han convertido en una opción real al proveer a la población servicios básicos y amenidades tales como: luz, agua, comunicaciones y electricidad para usos productivos de una forma benigna para el medio ambiente. En el caso de nuestro país además de contar con importantes reservas probadas de hidrocarburos también, posee abundantes recursos de energía limpia y renovable por lo que debemos aprovechar la ventaja de estas riquezas.

INTRODUCCIÓN

Esto no solo ahorraría nuestros energéticos fósiles sino que además tendría efectos positivos para nuestro ya bastante deteriorado medio ambiente.

En este trabajo de tesis, se propone la utilización de fuentes renovables como la biomasa y la energía solar disponibles en el lugar para abastecer de energía eléctrica y térmica a una granja ganadera de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM. Para lo cual se propone utilizar un sistema técnica y económicamente factible que satisfaga las necesidades energéticas de la granja al emplear energía de la biomasa o energía solar.

Los capítulos presentados en este trabajo tienen el propósito de satisfacer éste planteamiento u objetivo de emplear ya sea una u otra opción de energía para satisfacer las necesidades energéticas de ésta granja por ello, se hace una comparación entre estas dos tecnologías y determinar cuál es más atractiva para alcanzar nuestro objetivo.

Así, el primer capítulo hace una introducción al tema de las fuentes renovables de energía que aquí nos ocupan; la biomasa y la energía solar para una aplicación en específico: generación de energía eléctrica. Primero, se hace una introducción a la energía de la biomasa concentrada en los residuos ganaderos como el estiércol en donde la digestión anaerobia tiene un enorme potencial para recuperar el biogás generado a partir de la biodegradación del estiércol. Este gas se quemara en una turbina de gas (TG) o en un motor de combustión interna (MCI). La segunda parte de este capítulo, hace referencia a la energía solar enfocándose en específico en la tecnología solar fotovoltaica a través de la cual, se genera directamente energía eléctrica de la luz del sol por medio del efecto fotoeléctrico.

En el segundo capítulo, se proponen y diseñan los sistemas de generación tanto con biogás como con energía solar. Estos sistemas se dimensionan en base a la demanda promedio de energía eléctrica de la granja la que se estimo en 17.80kWe. También, para el sistema recuperador de biogás, en base a información recabada en la granja sobre el número de ganado y especie que se tiene, el tratamiento de los residuos, se elige el tipo de digestor, se dimensiona el tanque digestor y se establecen sus condiciones de operación para que así, de acuerdo con la cantidad de estiércol producido y según las condiciones de operación del digestor, estimar la cantidad de biogás que será recuperado por digestión anaerobia.

INTRODUCCIÓN

Para el sistema de generación que emplea biogás como combustible, se proponen emplear dos equipos diferentes para quemarlo ya sea en una TG o en un MCI. Así, se dimensionan ambos equipos, se evalúa la eficiencia de cogeneración del cada sistema. Aquí, nos referimos a la eficiencia de cogeneración debido a que el proyecto de autoabastecimiento energético para la granja, se convierte en un proyecto de cogeneración al obtener tanto energía eléctrica como energía térmica a partir del empleo de un solo combustible primario que en este caso, es el biogás. La segunda parte del capítulo, presenta el dimensionamiento del sistema generador con tecnología solar fotovoltaica. Para esta alternativa, se eligió un sistema fotovoltaico autónomo de configuración "*cargas de cc y ca con baterías, controlador de carga, e inversor*" además, se determina el número de paneles solares requeridos, el número de baterías necesarias para almacenar la energía necesaria para activar a los consumidores por la noche o durante los días nublados y finalmente la eficiencia de este sistema, es comparada con la de los otros dos sistemas arriba mencionados.

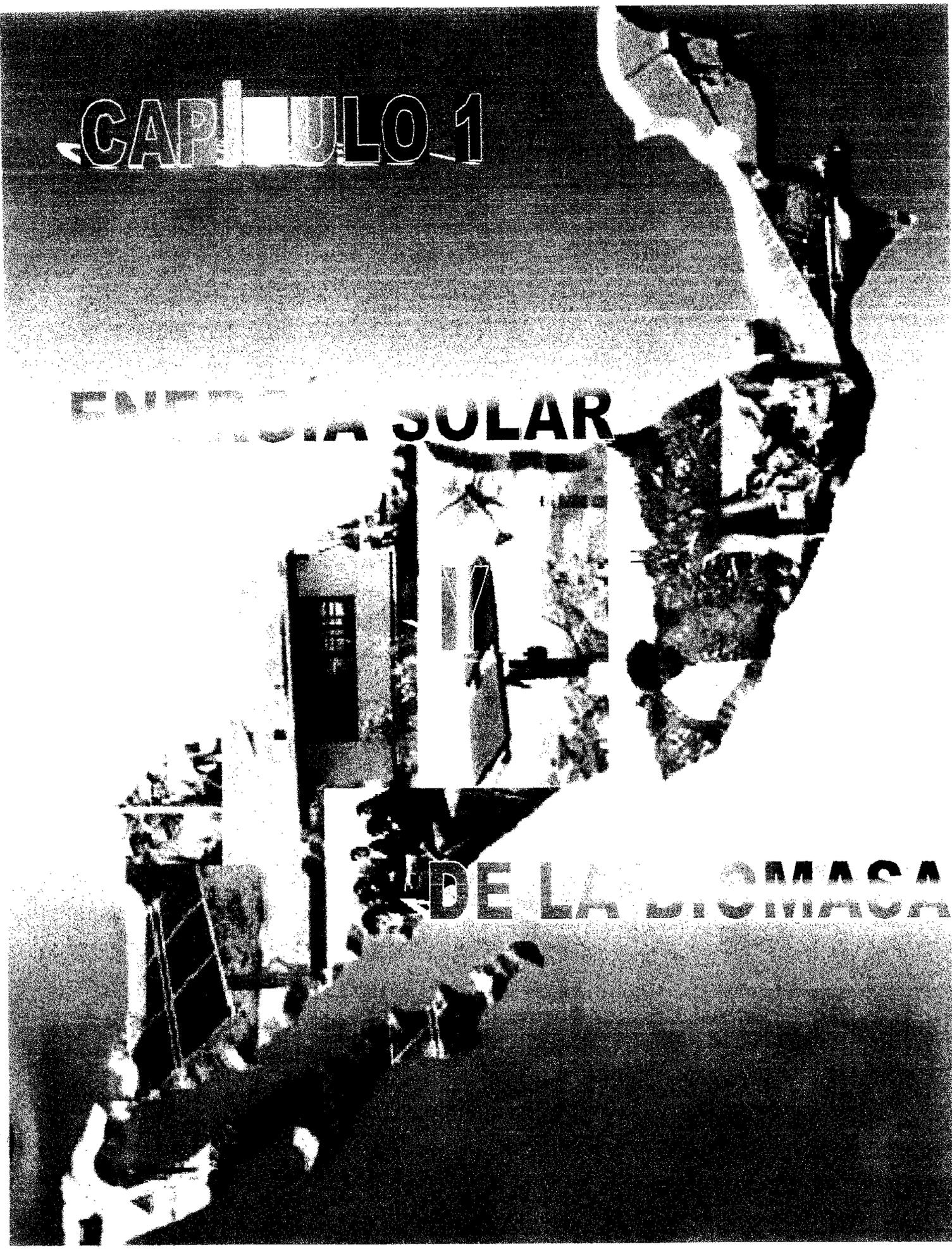
El tercer capítulo, presenta los resultados de la evaluación económica de los tres sistemas de generación. Aquí, se hace el cálculo de la inversión total, se estiman los beneficios proporcionados por cada alternativa y se evalúan algunos parámetros económicos más importantes como la tasa interna de retorno, el valor presente neto, la relación costo-beneficio con el fin de conocer la alternativa más rentable.

El cuarto capítulo, es una aplicación del análisis termoeconómico. Este análisis, sólo se hace para las alternativas que emplean biogás puesto que, el sistema fotovoltaico en el análisis económico, se descarta como alternativa de generación debido a que este no es rentable y por lo tanto no satisface el objetivo perseguido por esta tesis. Aquí se presentan valores de la cantidad real de exergía que ha sido necesaria para producir los flujos internos del sistema de generación y de los productos. También, dicho análisis, nos proporciona el costo exergético de cada flujo y productos del sistema de tal forma, que ahora la función a minimizar será el costo económico de los productos finales.

CAPÍTULO 1

ENERGÍA SOLAR

DE LA DICHOSA



1.1 Introducción.

Desde el momento en que los primeros hombres aprendieron a utilizar el fuego, el uso de la energía ha estado en el centro del progreso de la humanidad. La revolución industrial fue impulsada por el carbón. Ahora, el petróleo es parte vital de la economía moderna.

La quema de hidrocarburos es y ha sido nuestra principal fuente de energía. Los recursos forestales como madera, residuos de árboles y pastos; residuos agrícolas; estiércol, entre otros, todavía son importantes combustibles en muchas partes del mundo, pero el siglo XX fue un siglo de combustibles fósiles, -carbón, gas natural, pero sobretodo, petróleo. Más aunque constantemente se descubren nuevas reservas, estas fuentes de energía inevitablemente terminarán por agotarse. Sin embargo, el verdadero límite para el uso de combustibles fósiles no es el suministro, sino el efecto que sus emisiones ejercen sobre el aire que respiramos y sobre la atmósfera.

Afortunadamente existen alternativas de energía limpia y renovable. La energía eólica, geotérmica y solar, la biomasa, y la hidroenergía fácilmente podrían satisfacer nuestras necesidades actuales y futuras de energía, combinadas con tecnologías modernas para el uso sostenible de los combustibles obtenidos por ejemplo de la biomasa. La tecnología para utilizar esta abundante energía ha venido evolucionando rápidamente. Fridleifsdottir (1) menciona que la situación actual indica que en la segunda mitad del siglo XXI, los renovables contribuirán 20-50% de los suministros de energía, tal vez hasta un 80% para fin de siglo. No obstante, el progreso es lento. Las tecnologías de combustible fósil todavía son la alternativa más barata, y por cierto las que se encuentran a más fácil alcance. Sin embargo, cabe poca duda de que éste será el siglo de la energía renovable.

En México somos afortunados en poseer abundantes recursos de energía limpia y renovable en nuestros grandes ríos, campos geotérmicos, radiación solar recursos forestales, agrícolas y ganaderos. El aprovechar estas riquezas significa una estrategia de conservación de nuestros recursos fósiles y del medio ambiente.

Este capítulo, hace referencia al aprovechamiento de dos fuentes renovables de energía la biomasa y la solar para generar energía eléctrica. La primera parte se refiere a la energía de la biomasa concentrada en los residuos ganaderos (estiércol). Aquí, la digestión anaerobia tiene un enorme potencial para recuperar el biogás generado a partir de la biodegradación de estos residuos el cual puede ser empleado en la producción de energía. La segunda parte de este capítulo hace referencia a la energía solar, enfocándonos en específico en la tecnología solar fotovoltaica que a través de la cual, se genera directamente energía eléctrica de la luz del sol por medio del efecto fotoeléctrico.

1.2 Energía de la Biomasa

La energía que circula por los ecosistemas y permite vivir a los seres vivos procede en última instancia del sol por ello, la biomasa es la energía solar convertida por la vegetación en materia orgánica. Esa energía la podemos recuperar por combustión directa o transformando la materia orgánica en otros combustibles. La biomasa incluye cualquier derivado de materia orgánica disponible sobre una base renovable como: árboles, pasto, cosechas agrícolas y sus residuos e inclusive los granos, residuos de plantas acuáticas, de animales y hasta los residuos urbanos.

La biomasa puede ser dividida en dos categorías: la biomasa tradicional y la biomasa moderna. La biomasa tradicional se compone principalmente de leña, carbón vegetal, paja, residuos de plantas y animales, mientras que a la biomasa moderna la constituyen los residuos de madera de procesos industriales, bagazo, cosechas energéticas y desechos urbanos los cuales pueden emplearse a escala comercial como combustibles sólidos, líquidos o gaseosos o en la generación de energía donde sustituyen o complementan a las fuentes convencionales de energía.

Los residuos urbanos, industriales y agrarios que se producen diariamente en grandes cantidades tanto en las ciudades como en las zonas rurales, pueden constituir un enorme potencial para la producción de energía. Sin embargo, y teniendo en cuenta que nuestro interés aquí se centra en los residuos orgánicos ganaderos, solo haremos mención de estos.

1.2.1. Residuos ganaderos.

Tradicionalmente, los residuos producidos por el ganado constituían la única fuente fertilizante de los suelos agrícolas. Con la aparición de los fertilizantes, lamentablemente los estiércoles dejan de utilizarse en gran número de explotaciones, pues empieza a haber una separación entre agricultura y ganadería. Actualmente, en aquellas explotaciones intensivas que no disponen de terrenos suficientes, se tiende a recoger las deyecciones en diferentes tipos de depósitos y mediante tratamientos diversos, eliminarlas o llevarlas a lugares en que puedan tener alguna utilidad. Aquí, es donde puede contemplarse la inclusión de la tecnología energética, que podría atender a las necesidades locales de la granja o explotación ganadera.

La digestión anaerobia tiene potencial en el sector ganadero en cuanto a la reducción de la contaminación y de los patógenos, el control de los olores y la producción de energía. Al tratarse de residuos de alto contenido en humedad, no es conveniente para su tratamiento utilizar procesos termoquímicos por su bajísimo rendimiento para este caso. Sin embargo, la tecnología de la digestión anaerobia, proceso de tipo bioquímico que se discutirá más adelante, presenta grandes ventajas para su aplicación a este tipo de biomasa.

1.2.2 Métodos de Conversión de la Biomasa en Energía

Se tienen básicamente dos procesos para la conversión de la biomasa en energía útil que son los métodos termoquímicos y biológicos.

En gran parte es el contenido en agua de las materias primas el que determina la elección del proceso para su conversión energética así, se utilizan los procesos pirolíticos para las sustancias más secas, y la vía húmeda (procesos biológicos) para las restantes. En este último caso encontramos a los pretratamientos hidrolíticos, las hidrólisis químicas y enzimáticas; las fermentaciones metánica y alcohólica (2).

a) Métodos termoquímicos.

Estos métodos se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están bien adaptados al caso de la biomasa seca, y en particular, a los de la paja y de la madera. Estos métodos básicamente son:

- **La combustión**, es oxidación de la biomasa por el oxígeno del aire, libera simplemente agua y gas carbónico, y puede servir para la calefacción doméstica y para la producción de calor industrial.
- **La pirólisis**, es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500°C. Se utiliza desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal y también conlleva a la liberación de un gas pobre, mezcla de monóxido y dióxido de carbono, de hidrógeno y de hidrocarburos ligeros. Este gas, de bajo poder calorífico, puede servir para accionar motores diesel, producir electricidad o para mover vehículos. Una variante de la pirólisis, llamada pirólisis flash, llevada a 1000°C en menos de un segundo, tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa (2). De todas formas, la gasificación total puede obtenerse mediante una oxidación parcial de los productos no gaseosos de la pirólisis. El gas pobre producido puede utilizarse directamente como se indicó anteriormente, o bien servir de base para la síntesis de metanol, que podría sustituir a las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburol).

b) Métodos biológicos.

- **La fermentación alcohólica** es una técnica empleada desde tiempos muy antiguos con los azúcares, que puede utilizarse también con la celulosa y el almidón, a condición de realizar una hidrólisis previa (en medio ácido) de estas dos sustancias. Pero la destilación, que permite obtener alcohol etílico prácticamente anhidro, es una operación muy costosa en energía. En estas condiciones la transformación de la biomasa en etanol y después la utilización de este alcohol en motores de explosión, tienen un balance energético global dudoso. A pesar de esta reserva, ciertos países (Brasil, EAU.) tienen importantes proyectos de producción de etanol a partir de biomasa con un objetivo energético (propulsión de vehículos; cuando el alcohol es puro o mezclado con gasolina, el carburante recibe el nombre de gasohol).

- **La fermentación metánica**, es la digestión anaerobia (DA) de la biomasa por bacterias. Es idónea para la transformación de la biomasa húmeda (más del 75% de humedad relativa). En los fermentadores, o digestiones, la celulosa es esencialmente la sustancia que se degrada en un gas, que contiene alrededor de 60% de metano y 40% de gas carbónico. El problema principal consiste en la necesidad de calentar el equipo, para mantenerlo en la temperatura óptima de 30-35°C. No obstante, el empleo de digestores es un camino prometedor hacia la autonomía energética de las explotaciones agrícolas por recuperación de las deyecciones y camas del ganado. Además, es una técnica de gran interés para los países en vías de desarrollo. Así, millones de digestores ya son utilizados por familias campesinas chinas (2). A continuación se hace una introducción a la digestión anaerobia que es la técnica de interés en este trabajo.

1.3 Digestión Anaerobia.

Entre las tecnologías de conversión de la biomasa a baja temperatura es la producción de metano la que despierta un gran interés. Uno de los métodos para obtener metano a partir de residuos es la fermentación metánica la cual, es la digestión anaerobia de la biomasa por bacterias. Esta digestión anaerobia, es la degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno lo que conduce a la producción de un gas compuesto principalmente de metano y de gas carbónico comúnmente llamado biogás.

1.3.1 Tipos de Residuos para la Digestión Anaerobia

Los sustratos disponibles para la DA son esencialmente biomasa primaria como residuos o desperdicios agrícolas, marinos o forestales y biomasa secundaria como excrementos de ganado, residuos urbanos o industriales, especialmente de las industrias agroalimentarias de los cuales, debe tomarse en cuenta su contenido en sólidos y su composición química.

a) **Contenido en sólidos:** La clasificación más práctica de los residuos con propósito de DA es en residuos de fuerza baja, media y alta, y residuos sólidos. Para subdividir arbitrariamente en base a la materia seca o al contenido en sólidos totales (TS), estas categorías corresponden aproximadamente a 0.2-1%, 1-5% y 20-40% de TS, respectivamente. Cuando se decide cual de los varios diseños de digestores es apropiado, es

también necesario conocer si el residuo es totalmente soluble o contiene materia particulada. No toda la materia seca en un residuo es realmente biodegradable por lo que, para distinguir el contenido orgánico se utilizan dos métodos: la determinación de sólidos volátiles (VS) y la determinación de la demanda química de oxígeno (COD). Para desperdicios celulósicos el contenido orgánico puede no dar una estimación válida de la digestibilidad, ya que la lignina es orgánica pero no es degradable anaeróbicamente hasta un grado medible.

b) Composición química : Los residuos deberán constituir un medio adecuado para la población del digester y si no están presentes, deberán añadirse nutrientes como fosfato, trazas de elementos y una fuente de nitrógeno; es deseable una relación de carbono a nitrógeno por debajo de 40:1. Los residuos deben tener, como en el caso de muchos estiércoles animales, una buena capacidad tamponante, alrededor de la neutralidad, atribuible al fosfato, los iones amonio, carbonato y bicarbonato, ácidos grasos volátiles y otros ácidos orgánicos y aminas. En este caso no es necesario el control del pH durante la digestión.

1.3.2 Fases del Proceso de Digestión Anaerobia.

La fermentación bacteriana en la DA, pone en juego diversas poblaciones de microorganismos. Los sustratos utilizados por estas bacterias y los productos que ellas fabrican permiten distinguir varias fases en la biosíntesis del metano: hidrólisis del sustrato, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (3). A continuación, se describen brevemente las fases de la digestión anaerobia.

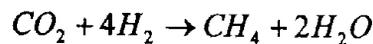
a) La hidrólisis del sustrato: Las grandes y complejas moléculas del sustrato (lípidos, glúcidos, proteínas,..) son despolimerizadas y transformadas en moléculas más sencillas por acción de bacterias hidrolíticas. La hidrólisis se conoce como una etapa limitante, dado que algunos residuos orgánicos (desechos lignocelulósicos) son muy resistentes a la acción bacteriana.

Es posible que la acción combinada de enzimas y de bacterias permita optimizar esta importante fase de la fermentación metánica.

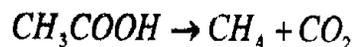
b) **La acidogénesis:** Una parte de los monómeros producidos por la hidrólisis del sustrato es transformada en ácidos grasos (ácido acético, propiónico, butírico,...), alcoholes (metanol, etanol,...), gas carbónico e hidrógeno. Esta fase pone en juego una población compleja de bacterias, en su mayoría anaerobias estrictas (bacteroides *Ruminicola clostridium*, *Bifido bacterium*, etc.), aislables en cultivos puros.

c) **La acetogénesis:** Esta etapa es primordial en el proceso dado que transforma a los productos de la acidogénesis en precursores del metano (ácido acético, ácido formico, hidrógeno y gas carbónico). Estas reacciones permiten evitar una acumulación de ácidos grasos volátiles, diferentes al acético, los cuales, a concentraciones muy elevadas se convierten en inhibidores de la metanogénesis.

d) **Metanogénesis:** Las bacterias metanógenas son organismos anaerobios estrictos (*Methanobacterium thermoautrophicum*, *Methanosarcina barkeri*,...). Estas bacterias realizan la síntesis del metano especialmente a partir de hidrógeno y de gas carbónico:

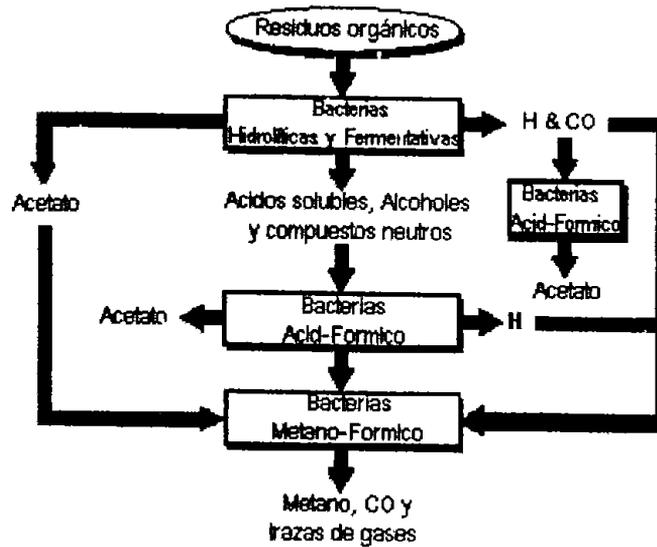


y a partir de ácido acético:



Estos cuatro grandes grupos de bacterias (hidrolíticas, acidógenas, acetanógenas y metanógenas), están siempre asociados en los fermentadores metánicos. En la figura 1 se presentan las etapas del proceso de digestión anaerobia.

Figura 1.1: El proceso de la digestión anaerobia



La variedad de microorganismos que intervienen, sus actividades a la vez complementarias e inhibitoras unas de otras y la diversidad de los constituyentes del sustrato, hacen bastante más difícil la conducta óptima de la fermentación metánica además, de otros parámetros internos o externos, que deben ser tomados en cuenta en el desarrollo del proceso de digestión como la temperatura de operación del digestor, el pH del medio, el potencial rédox, entre otros que a continuación se mencionan.

1.3.3 Parámetros de Operación de la Digestión Anaerobia.

a) **La temperatura.** Habitualmente se admite que la digestión anaerobia no se puede efectuar sino a temperaturas superiores a 10° C e inferiores a 65°C. Dentro de estos límites, la producción de metano tiene dos puntos óptimos, uno en zona mesófila entre 20-25°C a 40-45°C, el otro en zona termófila entre 50-55°C a 60-65°C. El mantenimiento del digestor a una temperatura constante es una de las condiciones para el buen funcionamiento de la fermentación (3).

Cada uno de estos rangos de temperatura implica diferentes especies de bacterias. La producción de gas cae rápidamente en el límite de estos rangos y los efectos de un corto período (generalmente accidental) de aumento de temperatura desde el rango mesófilo al termófilo puede necesitar muchas semanas para ser superado.

Un periodo similar se requiere para que una población termófila se adapte a las condiciones mesófila. Los digestores termófilos pueden ser menos estables, responder adversamente al enfriamiento accidental y ser más susceptibles a la inhibición por amonio. Sin embargo, la destrucción de los patógenos y los parásitos animales es mayor en el rango termófilo.

En la tabla 1.1 se resumen las ventajas y los inconvenientes del proceso de fermentación metánica en la zona mesófila o en la termófila.

TABLA 1.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE UNA FERMENTACIÓN METÁNICA EN ZONA MESOFÍLA O TERMOFÍLA. [según M. del C. Hidalgo (4)]

	Vía mesófila	Vía termófila
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Menos vapor de agua en el gas Menos CO₂ en el gas - Mayor cantidad de especies microbianas metanógenas - Balance energético más favorable - Posibilidad de utilización de las calorías a bajo nivel 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor reactividad: menor tiempo de retención - Disminución de los volúmenes de lodo que se forman - Destrucción de organismos patógenos - Un mantenimiento más fácil de las condiciones anaerobias
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor tiempo de retención de los lodos - Mayor formación de lodos - Menor destrucción de organismos patógenos 	<ul style="list-style-type: none"> - Los digestores que operan en esta zona responden adversamente al enfriamiento accidental - Mayor susceptibilidad a la inhibición por amoniaco.

b) El pH en las diferentes fases de la digestión fluctúa entre 6.5, y 8.0. Si por alguna razón indeterminada, en marcha estabilizada, el pH cae por debajo de 6.5, se produce con frecuencia una inhibición significativa de la metanogénesis a causa de una acumulación de ácidos orgánicos. Como las bacterias de la fermentación no son sensibles a una caída débil del pH continúan produciendo ácidos, lo que hace descender al pH hasta 4.5 y acelera el proceso de inhibición de la metanogénesis. Por el contrario, si el pH se hace demasiado alcalino se induce una formación de hidrógeno y de sulfuro de hidrógeno y se desprende amoniaco.

El equilibrio del pH depende especialmente de la concentración de iones bicarbonato que se encuentran a su vez en equilibrio con el gas carbónico disuelto. Las concentraciones de 2.5 a 5 g/l de bicarbonato aseguran un buen efecto tampón. Si por accidente la metanogénesis se inhibe, la acumulación de ácidos grasos volátiles arrastra una disminución de los bicarbonatos disueltos y una liberación del gas carbónico. Sin embargo, mucho antes que la variación del pH sea sensible, se observa la caída de la alcalinidad debida a los bicarbonatos. Ciertos autores (5) recomiendan la medida de este parámetro a fin de controlar la marcha de los digestores y evitar notablemente las sobrecargas. El umbral de alarma parece situarse en los alrededores de 1.5 g/l de bicarbonato. Más allá, se observa una caída significativa del pH y una inhibición de la metanogénesis.

La naturaleza y composición de los residuos fermentados influye en el pH del medio de fermentación. Así, cuanto mayor sea la relación C/N, más bajo es el pH de funcionamiento. El fuerte poder tampón de numerosos residuos basta generalmente para mantener el pH en las zonas favorables; en algunos casos se puede regular mediante cal o ácido nítrico. Se ha observado que el equilibrio del pH es con frecuencia más precario en funcionamiento termófilo que en funcionamiento mesófilo.

c) **Potencial rédox:** En un cultivo puro las bacterias metanogénas exigen bajos potenciales rédox: -300mV a -330mV. En el seno de un digestor a plena actividad se miden en ocasiones potenciales rédox netamente más elevados, -50mV, incluso 0mV; se explica el mantenimiento de esta actividad por la heterogeneidad del medio de fermentación. En efecto se tiene una fase líquida en la cual se mide el potenciales rédox y agregados en cuyo seno debe prevalecer condiciones de anaerobiosis más estrictas. Si, como han mostrado diferentes experiencias, la metanogénesis es la etapa limitante, conviene favorecer la multiplicación y la activación de este grupo bacteriano asegurándole un potenciales rédox favorable en todo punto del reactor. Para ello se limita al mínimo el aporte de sustancias oxidantes como los nitratos, los nitritos y por supuesto, el oxígeno. Para obtener bajos potenciales rédox basta con evitar toda entrada de oxígeno en los digestores; por una parte se mantiene una ligera sobrepresión interna y, por otra, se puede situar un reactor de desoxigenación de los sustratos.

d) Los nutrientes y los inhibidores: Habitualmente se admite como óptima una relación C/N de 35 y C/P de 150. El nitrógeno existe por lo general en cantidad suficiente en la mayor parte de los sustratos metanizables. Bajo la forma de nitrato, si las cifras son superiores a 150 mg/lt., el nitrógeno puede convertirse en inhibidor de la metanogénesis porque su poder oxidante podrá afectar elevando el potencial rédox. Los sulfatos son inhibidores para cifras superiores a 100 ó 200 mg/lt.

Su presencia induce el desprendimiento de hidrógeno y de sulfuro de hidrógeno; son bien conocidos los efectos corrosivos de este último. Sin embargo si son en cantidades bajas, estos desprendimientos de H₂ y de H₂S puede tener un efecto benéfico, por un lado abaten el potencial rédox y por otra precipitando los iones metálicos tóxicos en forma de sulfuros (Cu, Zn, Ni, Hg...).

e) Agitación: La agitación favorece la transferencia térmica, iónica y metabólica. En particular facilita la desgasificación de los lodos acelerando la coalescencia de las burbujas producidas en la superficie del precipitado (agregados de materia orgánica y de microorganismos). Una buena homogeneización es fácil a nivel piloto, pero en cambio es más difícil y oneroso a nivel de fermentación industrial.

f) Tiempos de retención y velocidad de carga: El tiempo de permanencia de los residuos en el digester depende principalmente del procedimiento adoptado: discontinuo o continuo. La fermentación metánica de estiércol especialmente si esta mezclado con paja se verifica frecuentemente en discontinuo. La duración del ciclo a 35 °C es de cinco a seis semanas, intervalo de tiempo que permite recuperar el 80% de metano. Este ciclo puede acortarse realizando una prefermentación aerobia, inoculando un pie de cuba o trabajando en zona termófila.

Los procesos en continuo permiten reducir considerablemente los tiempos de permanencia, definiéndose el tiempo de retención como la inversa de la tasa de dilución (la tasa de dilución es igual a la relación entre el flujo volumétrico de entrada y salida del digester y el volumen del cultivo, se expresa en unidades de t⁻¹). La carga de los lodos introducidos debe calcularse de modo que no se produzca una acumulación de ácido en el reactor.

Los tiempos de retención se determinan experimentalmente y los valores obtenidos dependen del tipo de fermentador, de la biodegradabilidad de los sustratos, de la temperatura de funcionamiento y de los objetivos propuestos (productividad máxima de metano o conversión completa de carbono orgánico y estabilización de los lodos digeridos).

El tiempo de retención, en zona de temperatura mesófila, no puede ser inferior de siete a diez días. Por ejemplo, para un lecho de estiércol de bovino conteniendo un 10% de materia seca, los parámetros establecidos, aconsejan un tiempo de retención de 20 días.

Sobre esta base se puede comprobar que los procesos en continuo multiplican por dos las velocidades de fermentación metánica.

- Tiempo de retención hidráulica (HRT), es decir, la longitud de tiempo que el líquido añadido permanece en el digestor viene dado por la expresión

$$HRT = \frac{\text{Volumen del digestor}}{\text{Volumen diario de residuo alimentado}} \quad (1.1)$$

El tiempo de retención (RTs) de los sólidos será más largo que el del líquido, si las partículas son conservadas en el digestor, por ejemplo en un diseño de tipo de flujo pistón. Los residuos simples pueden pasar a través de los digestores, con retención de los microorganismos, mientras que residuos complejos como estiércol de animales son digeridos a RTs de 10 días o más.

- Velocidad de carga, o velocidad a la que los sólidos se añaden al digestor es función tanto del volumen añadido diariamente como del contenido en sólidos del material que se suministra. La velocidad de carga se expresa como peso de materia orgánica (generalmente kg de VS o COD) por m³ de digestor por día, y la máxima velocidad de carga que puede ser aplicada al digestor es una función del diseño del digestor y tipo de residuo. Para un digestor de granja operando sobre estiércol animal a 35°C una buena operación sería aproximadamente 4 kg VS m⁻³ día⁻¹.

g) Empleo de gérmenes: La instalación espontánea de microflora metanógena en residuos vegetales o urbanos en anaerobiosis exige un periodo de varias semanas a 35°C. Estos tiempos latentes excesivamente largos son debidos a las tasas de crecimiento muy lentos de bacterias metanogénas en comparación con la de las bacterias de fermentación productoras de gas carbónico, hidrógeno y acetatos.

Para reducir la fase no gasógena en un ciclo de fermentación en discontinuo se puede introducir en los residuos a tratar (lechos de estiércol, efluentes diversos,..) gérmenes formados por pies de cuba, es decir, lodos digeridos procedentes de reactores en actividad (4). Para facilitar la implantación de esta flora metanógena se ha considerado la pasteurización de las materias primas, pero esto representa un coste energético tan elevado que la solución no es viable más que en un contexto industrial particular. No obstante, los resultados obtenidos con gérmenes seleccionados no son espectaculares.

h) Rendimiento en gas: Este importante parámetro es una medida del grado de extensión de la digestión de la materia orgánica, como lo es el volumen de gas generado por unidad de peso de materia orgánica añadida al digestor. Las unidades son normalmente m^3 de gas kg^{-1} .

Si se añadieran sustratos orgánicos puros y se degradaran completamente a $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$, entonces podría calcularse el rendimiento siguiente de gas por kilogramo de sustancia añadida (3):

Almidón /celulosa /glucosa	$0.8 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
Ácidos grasos (basados en estearato)	$1.5 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$
Proteína (basada en $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$)	$0.9 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Rendimientos de gas tan altos como estos, rara vez son alcanzados en la práctica, ya que generalmente la conversión de la materia a gas es incompleta. Es difícil citar valores de rendimiento de gas por separado ya que como se discutió, el rendimiento de gas varía con la composición de los residuos, el tiempo de retención y la concentración de inhibidores, entre otros. Sin embargo, para un residuo de composición fija, el rendimiento de gas por peso de materia orgánica destruida debería ser constante.

En la tabla 1.2 se presentan producciones específicas de metano de diferentes tipos de desechos de acuerdo con resultados de instalaciones existentes. Observe que los más altos rendimientos en cuanto a producción de gas metano por unidad de peso de materia seca se obtienen del ganado porcino seguidos por los bovinos además, los tiempos de permanencia con respecto a los desechos de demás tipos de ganado son mínimos.

TABLA 1.2 PRODUCCIÓN ESPECÍFICA DE METANO DE DIFERENTES TIPOS DE DESECHOS
(según los resultados de instalaciones existentes)

Material	Producción de Gas por Unidad de Materia Seca (m ³ /kg)	Metano (%)	Tiempo de Permanencia (días)
Deyecciones de bovinos	0.33	-	-
Estiércol de ganado	0.23-0.50	-	-
Estiércol de bovinos	0.86	58	10
Estiércol de pollos	0.31	60	30
Estiércol de aves	0.56	69	9
Desechos de cerdos	1.02	68	20
Estiércol de ovinos	0.37-0.61	64	20
Hojas forrajeras	0.5	-	29
Hojas de remolacha	0.5	-	14

1.4 Digestores Anaerobios Empleados en la Recuperación de Metano en Granjas

Los digestores pueden ser diseñados con tecnología poco sofisticada para uso rural o con tecnología más sofisticada en aplicaciones industriales. El digestor puede ser operado en forma discontinua o continua; en la mayor parte de las circunstancias se prefiere el proceso continuo, ya que los residuos son generalmente producidos diariamente y existe una demanda continua de gas (3).

a) **Digestores discontinuos.** Se aplican principalmente al tratamiento de desechos altamente perecibles (estiércol con 20 a 25 % de materia seca). El sustrato se introduce en el digestor recubierto de aguas negras. Después de la fermentación (alrededor de 40 días) se extrae de la cuba. Para tener una producción constante de gas, la instalación se compone generalmente de varias cubas (lo óptimo son 3). Para una permanencia en el digestor de seis semanas, se necesita de 2-2.5m³ de capacidad en las cubas si la carga es de 100 kg de materias oxidables por m³. La producción de gas de estiércol varía de 300-500 m³ /TMS.

Aunque unos objetan esta tecnología por lo molesta que es, ha evolucionado considerablemente permitiendo una mecanización casi completa de las operaciones. Se conduce en forma muy sencilla y es interesante para el tratamiento de estiércol pajoso y de materiales húmedos. No obstante, la aplicación de esta tecnología esta limitada a las pequeñas instalaciones por ejemplo una ganadería de 25 vacas lecheras (4).

b) Digestores continuos. El sustrato se introduce una o varias veces por día en forma continua, teniendo como limite la capacidad del digestor. Este procedimiento se emplea para toda clase de desechos fluidos o fluidificados que contengan como máximo 10% de materia seca, lo que supone una excesiva dilución en los casos de desechos con alto contenido de materia seca y una preparación indispensable del sustrato sólido por trituración mecánica en partículas finas (en el caso de la paja). Este método en continuo está adaptado del todo a los efluentes. Aunque el funcionamiento sea totalmente automático (circulación del sustrato por medio de bombas) esta técnica demanda una vigilancia sostenida y un tecnicismo alto porque su operación es delicada.

Se tienen tres diseños convencionales de digestores que son usados en granjas. El diseño estándar de estos digestores han sido adoptados y hasta ahora reconocidos por la *USDA's Natural Resource Conservation Service (NRCS)*. Los costos difieren en el diseño, las condiciones climáticas y en la concentración de sólidos en el estiércol que estos pueden digerir. Estos tres digestores son: digestores anaerobios de mezcla total, digestores de flujo pistón también llamados "plug-flow" y las lagunas anaeróbicas que a continuación se describirán (6). Sin embargo, existen otros tipos de digestores anaerobios que pueden tener el potencial técnico y económico para procesar este tipo de biomasa.

1.4.1 Digestores de Mezcla Total

Estos digestores perfectamente mezclados, de alimentación continua pueden manejar estiércol con una concentración de TS de 3-10%. El reactor es largo, vertical y circular; fabricado de cemento o acero. El estiércol es recolectado en una fosa de mezclado ya sea por gravedad o por bombeo. Si es necesario, la concentración de TS es diluida y el estiércol puede ser precalentado antes de que este sea introducido al reactor del digestor. El mezclado sirve para: (1) Distribuir el suministro que entra y producir un sustrato



Figura 1.2 Moderna granja con digester de mezcla total

homogéneo, (2) Impedir la acumulación de sólidos no digeridos e incrustaciones (3) Distribuir el calor aplicado, y (4) Impedir la acumulación de películas y espumas. En aplicaciones prácticas en granjas, los sólidos depositados, la formación de espuma y la remoción de arenilla frecuentemente representan los principales problemas. El mezclado y el calentamiento mejoran la eficiencia del digester. Estos digestores pueden operar en un rango de temperatura termófila o mesófila, con HRT de 10-20 días.

1.4.2 Digestores del Tipo Flujo Pistón o Tapón (*plug-flow*)



Figura 1.3 Digester de flujo pistón

El diseño básico de este digester es un largo foso enterrado y esta constituido por una cubierta expandible de *Hypalin* o de otro material como butilo. El estiércol se recolecta diariamente y la materia sólida tiende a moverse a través del digester secuencialmente. A medida que el estiércol progresa a través del digester, este se descompone y produce metano el cual, es almacenado en la cubierta expandible. Para

proteger la cubierta y mantener optimas temperaturas de operación, algunos digestores de este tipo son encerrados en sencillos invernaderos o aislados con cubiertas de fibra de vidrio. Estos digestores usualmente operan en un rango de temperatura mesófila, con HRT de 20 a 30 días. Otro componente esencial de estos digestores es un "foso de mezcla", el cual permite que la concentración de TS del estiércol, sea ajustado a un rango de un 11%-13% de TS por dilución con agua.

Estos digestores, son sencillos de construir, la ausencia de mezclado puede dar lugar a problemas de formación de películas, particularmente cuando esta implicado un tanque digester de gran superficie.

Sin embargo, la sedimentación de sólidos, se puede evitar mediante un sistema de agitación transversal a la dirección del flujo reintroduciendo el biogás a presión en la base del digestor por ejemplo. La tecnología de digestores de mezcla total y los de flujo pistón con respecto a su uso, no son adecuados en granjas donde se emplean grandes cantidades de agua para remover el estiércol de los establos, debido a que este lavado diluye sustancialmente el estiércol a concentraciones de TS menores a un 3%. No obstante el método tradicional empleado para tratar y almacenar estos desechos bastante diluidos es un sistema llamado laguna anaerobia el cual se describe a continuación.

1.4.3 Laguna Anaerobia

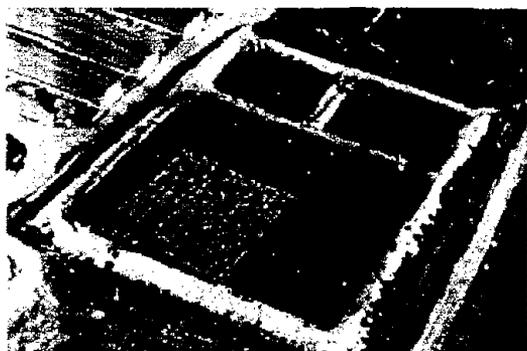


Figura 1.4 Digestor de laguna anaerobia en la Royal Farm. Se encuentra cubierta parcialmente (solo una de las tres células).

Un sistema de laguna anaerobia opera, con HRT que exceden los 60 días y puede producir cantidades significativas de metano. Estas al igual que los digestores de flujo pistón poseen una cubierta flotante impermeable para recolectar el biogás a través de un largo tubo perforado colocado bajo la cubierta con forme éste escapa de la superficie y es empujado por un ventilador hacia el tubo colector.

A diferencia del digestor de flujo pistón, ésta cubierta puede ser colocada sobre toda la laguna o solo en la parte donde se produce más cantidad de metano La División de Energía del Estado de Carolina del Norte en los Estados Unidos, construyó el primer digestor de “laguna anaerobia cubierta” a gran escala.

Este tipo de digestor tiene un potencial de aplicación en granjas donde se emplea el lavado con abundante agua de los establos además, de tener los menores costos de operación, mantenimiento y de inversión comparado con los otros dos tipos de digestores. Sin embargo, una cuestión claves es que éste digestor es dependiente de la temperatura ambiente y de las condiciones de las estaciones del año por lo tanto, la producción de biogás varia de forma considerable por ejemplo, en el verano la producción de metano es

mayor que en invierno; lo cual causa problemas para satisfacer la demanda de biogás según el uso final que se le de por lo que los digestores convencionales son más aconsejables. Una segunda desventaja es que las lagunas anaeróbicas pueden tomar de 1 a 2 años en estabilizarse.

1.5. El Biogás para Generación de Electricidad

El biogás que es la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias, tiene como principales componentes el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2). Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se presenta en la tabla 1.3.

El metano, principal componente del biogás, es el gas que le confiere las características combustibles al mismo. El valor energético del biogás por lo tanto, estará determinado por la concentración de metano - alrededor de $20 - 25 \text{ MJ/m}^3$ ó 5500 kcal/m^3 , comparado con $33 - 38 \text{ MJ/m}^3$ para el gas natural (7).

TABLA 1.3. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS [según Werner (7)]

Metano, CH_4	40 - 70% volumen
Dióxido de carbono, CO_2	30 - 60
Sulfuro de hidrógeno, H_2S	0 - 3
Hidrógeno, H_2	0 - 1

A pequeña y mediana escala, el biogás ha sido utilizado en la mayor parte de los casos para cocinar por combustión directa en estufas. No obstante, también puede ser utilizado para iluminación, calefacción y como reemplazo de la gasolina o diesel en motores de combustión interna (M.C.I), Turbinas a gas (TG) y celdas de combustible (8). Con respecto a los M.C.I algunos fabricantes han utilizado el mismo diseño del motor básico para funcionamiento con gas natural y diesel. Simplemente hubo que añadir pequeñas modificaciones. Estas se limitan principalmente al ajuste del turbocompresor, regulación de la ignición y del control del gas. Por ello hoy día es común quemar biogás en M.C.I a partir de los cuales se puede producir energía eléctrica utilizando un generador.

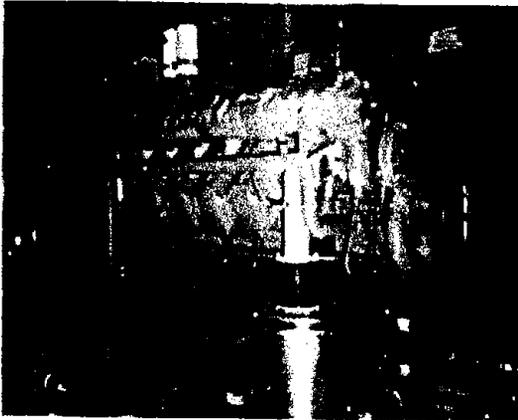


Figura 1.5 Motor de combustión interna a biogás

Experiencias prácticas que se tienen con M.C.I con capacidades menores a los 200kW los cuales alcanzan eficiencias de conversión eléctrica menores al 25% y un 38% en promedio para maquinas de rangos de entre 600 y 1000 kW. Sin embargo, hay un potencial adicional que es el de recuperar calor del sistema de enfriamiento y de sistema de escape de la maquina respectivamente para producir agua caliente y vapor y al combinar estas energías (térmicas y eléctricas), la eficiencia global de conversión proporcionada puede llegar al 80%.

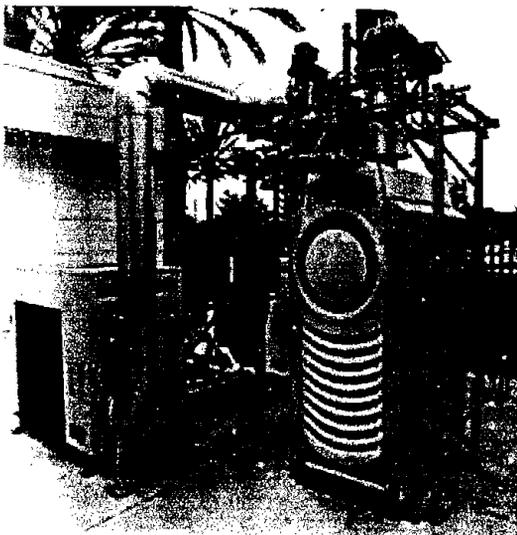


Figura 1.6 Microturbina de gas quemando biogás

Otra aplicación prometedora para generación de energía eléctrica con biogás es el empleo de TG tanto para sistemas a gran escala como son los ciclos combinados hasta pequeñas y modernas plantas con microturbinas de gas (200kW y menores) pero su eficiencia eléctrica es baja, alrededor de 16-18%. No obstante, el empleo de una turbina de gas permite recuperar una mayor cantidad de calor para generar vapor útil a los procesos industriales o para calefacción de edificios, refrigeración por absorción o para mantener la temperatura de operación de los digestores. Con ello la eficiencia del ciclo puede incrementarse hasta un 70%.

1.6 Energía Solar

El flujo total de energía de luz solar interceptada por la tierra es de 170,000 terawatts o cerca de 2.5×10^6 millones bdpe. El promedio anual de radiación solar disponible en la superficie de la tierra varía en cerca de 1000 kWh/m^2 al año en el norte de Europa a más de 2000 kWh/m^2 en las zonas desérticas (9).

Esta energía solar, se manifiesta de diversas formas y su aplicación ha sido fundamental para el desarrollo de la humanidad. Los modos de conversión de la radiación solar se clasifican arbitrariamente en tres categorías: conversión térmica, fotovoltaica y bioenergética; convendría añadir las conversiones mixtas, como por ejemplo, las que se utilizan en la producción simultánea de electricidad y de calor con ayuda de fopilas refrigeradas por un fluido. Sin embargo, solo nos abocaremos a la conversión fotovoltaica de la energía solar.

1.6.1 El Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico fue observado por primera vez por el físico francés Edmund Bequerel en 1839, quien descubrió que ciertos materiales exhiben una propiedad llamada actualmente efecto fotoeléctrico, en los cuales se absorben fotones de luz y se liberan electrones. Cuando estos electrones libre son capturados, resulta una corriente eléctrica que puede ser usado como electricidad es decir, que producen pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando se exponen a la luz. En 1905, Albert Einstein describió la naturaleza de la luz y el efecto fotoeléctrico sobre el cual se basa la tecnología solar fotovoltaica.

Existen dos tipos de efectos fotoeléctricos que hay que señalar. El *efecto fotoeléctrico externo* y el *interno*. En el caso del *efecto foto eléctrico externo*, se emiten electrones libres desde una superficie mediante la absorción de fotones energéticos. En el caso del *efecto fotoeléctrico interno* ciertos portadores de carga se ven liberados dentro del seno de un material mediante la absorción de fotones energéticos.

El efecto externo se observa principalmente con metales dentro de un recinto en el que se ha hecho el vacío. La opacidad de los metales y de algunos compuestos a los fotones en la zona visible y ultravioleta es elevada, de modo que el fotón es absorbido muy cerca de la superficie. Si la energía de los fotones está por encima de la función de trabajo de la superficie del absorbente, se expulsa el electrón con energía suficiente para liberarse de la superficie. La aceleración de estos electrones liberados mediante una tensión externa entre el absorbente y un ánodo crea una fotocorriente.

El rendimiento del efecto externo es generalmente menos del 50% puesto que siempre se producen algunas absorciones a una profundidad suficiente dentro del material tal que el electrón no puede escapar. No se puede hacer ninguna celda solar mediante el empleo de este tipo de efecto puesto que no está presente ningún campo autogenerado para producir el flujo de corriente (10).

El efecto interno se observa principalmente en los semiconductores. La opacidad de estos materiales es menor que la de los metales de modo que, el efecto principal se produce a una profundidad en donde muy pocos electrones pueden escapar de la superficie. El proceso consiste en que la absorción de un fotón energético crea un par, un electrón y un hueco. Cuando el fotón tiene una energía mayor que el intervalo vacío de banda del material, los portadores de cargas están libres para moverse en la banda de conducción durante un tiempo breve, después del cual pueden recombinarse. El tiempo medio entre la creación y la recombinación de un par se denomina el *periodo de vida* y la distancia recorrida en este tiempo es la *longitud de difusión*.

La condición para construir una celda solar utilizando un efecto fotoeléctrico interno es que debe estar presente un campo eléctrico autogenerador. Este campo se crea mediante la formación de lo que se denomina una unión entre materiales semiconductores de tipo distinto. Esta unión puede conseguirse utilizando materiales diferentes o un material en el que se han utilizado distintos átomos de impureza o de "dopado". La unión hace que los electrones se desplacen en un sentido y los huecos en sentido opuesto. Si se une un conductor a los lados opuestos de la unión, se observa la presencia de una corriente.

No se necesita ser ingeniero para instalar, manejar y mantener con éxito un sistema solar fotovoltaico. Sin embargo, un conocimiento básico de cómo funciona la energía solar fotovoltaica, amplía la habilidad para evaluar si ésta, es una alternativa apropiada para suministrar la energía que se necesita.

d) Las celdas solares:

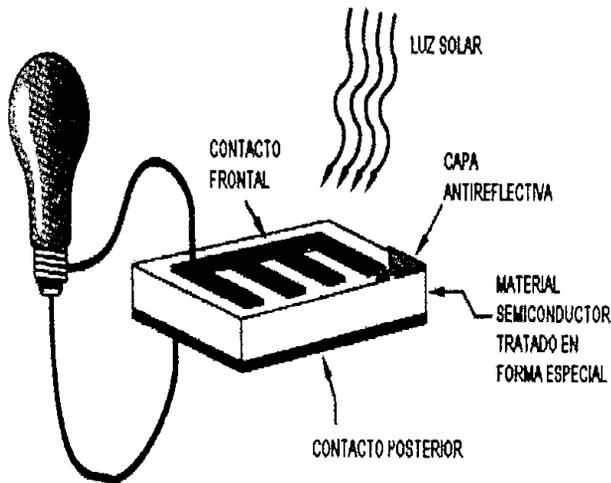


Figura 1.7 Celda fotovoltaica básica

La figura 1.7 ilustra el funcionamiento de una célula fotovoltaica básica también, llamada celda solar. Las celdas solares son construidas de los mismos materiales semiconductores usualmente silicio. Para construir las celdas solares, se utilizan láminas delgadas de material semiconductor, las cuales son tratadas especialmente para formar un campo eléctrico positivo en un lado y negativo en el otro.

Cuando la energía de la luz incide sobre la celda solar, los electrones se separan de los átomos en el material semiconductor. Si los conductores electrónicos de que consta la celda se conectan del lado positivo al lado negativo formando un circuito eléctrico, los electrones pueden ser capturados en forma de corriente eléctrica (electricidad). Esta electricidad puede entonces usarse para hacer funcionar una carga tal como un foco o una bomba. Una celda solar típica de silicio de cuatro pulgadas de diámetro, produce cerca de 1.5W de electricidad bajo la brillante luz solar de medio día.

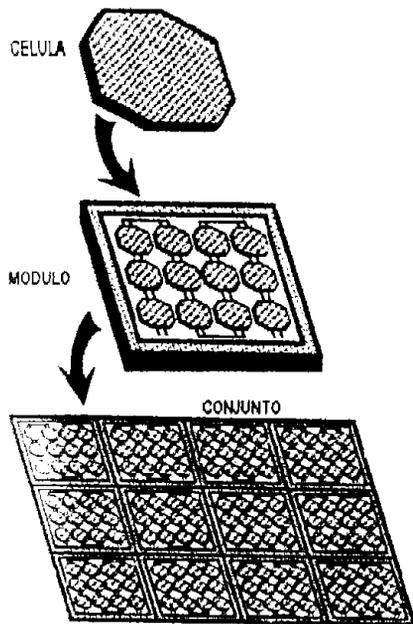


Figura 1.8 Módulo fotovoltaico

b) Módulos y conjuntos fotovoltaicos.

Un módulo fotovoltaico consiste en un número de celdas solares interconectadas eléctricamente y montadas en una estructura de soporte o armazón. Los módulos son diseñados para suministrar electricidad de un cierto voltaje (comúnmente 12 voltios); la corriente producida depende directamente de cuánta luz incide sobre el módulo. La estructura del módulo protege las celdas solares de los efectos del medio ambiente. Los módulos solares fotovoltaico han demostrado ser muy duraderos y confiables.

Aunque un módulo es a menudo suficiente para satisfacer muchas necesidades de energía eléctrica, dos o más módulos pueden ser interconectados para formar un conjunto. En general, mientras más grande sea el área de un módulo o de un conjunto más electricidad producirá. Los módulos fotovoltaicos y los conjuntos producen electricidad de corriente continua (cc) y pueden ser conectados en ambas combinaciones eléctricas tanto en serie como en paralelo para producir cualquier combinación de voltaje y de corriente.

c) Los sistemas solares fotovoltaicos

Un conjunto fotovoltaico por sí mismo no bombeará agua ni producirá luz en la noche. Un sistema solar fotovoltaico (SSF) completo consiste del módulo o conjunto, más un número de otros componentes colectivamente conocidos como el balance de sistema (BOS por sus siglas en inglés). Estos componentes varían de acuerdo con el tipo de servicios que usted desea suministrar y cuándo los necesita (día o noche).

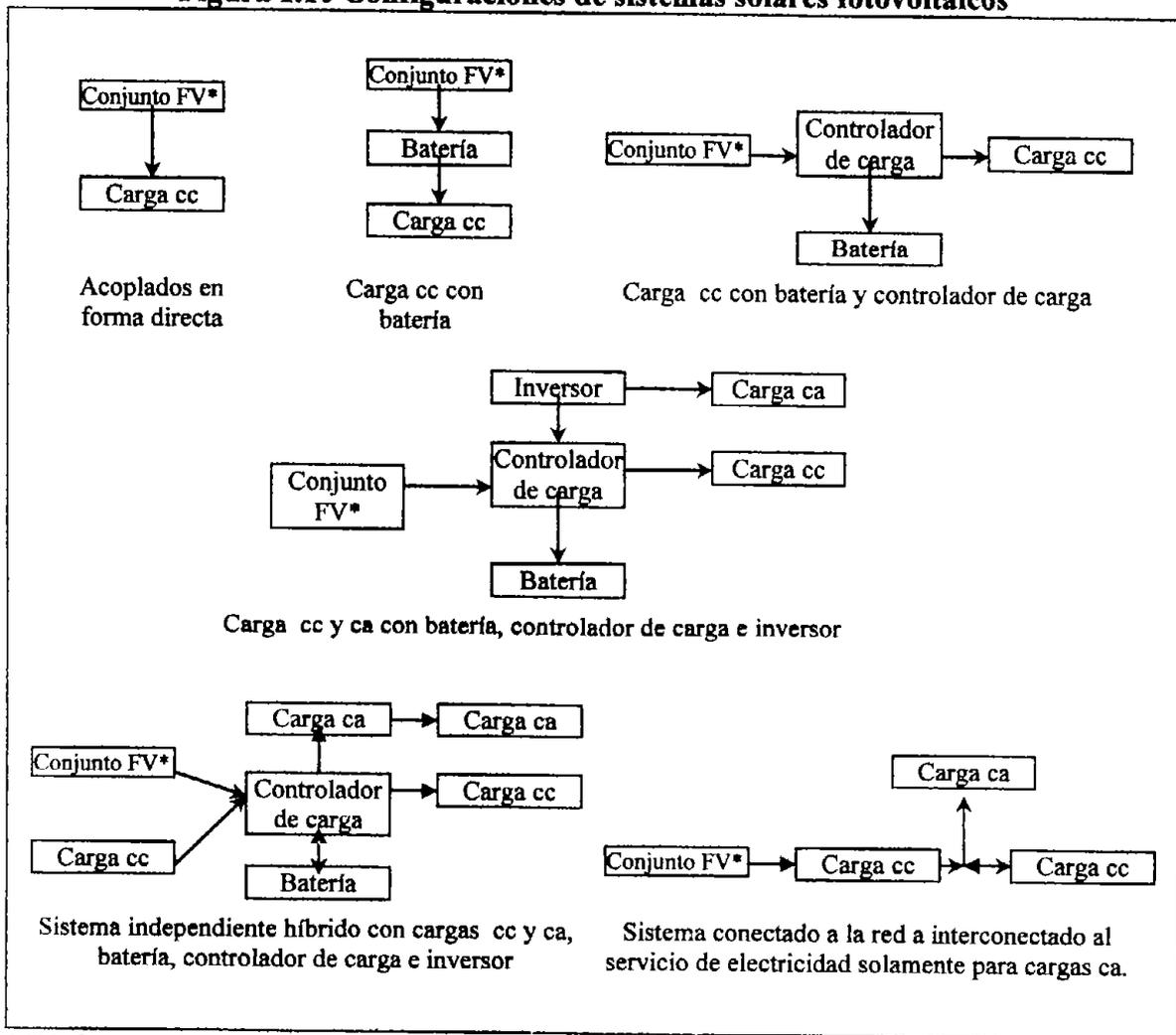
Es obvio que cuando la luz solar no está disponible, los módulos fotovoltaicos no pueden generar electricidad. Por lo tanto, se necesita un sistema de almacenaje de energía para que los sistemas funcionen durante la noche.

La gran mayoría de las instalaciones de sistemas fotovoltaicos son sistemas autónomos (en oposición a los sistemas conectados a redes de suministro) que funcionan independientemente o como sistemas híbridos. Los sistemas híbridos y los autónomos pueden incluir o no baterías. Los sistemas con baterías pueden requerir controladores de carga e interruptores de bajo voltaje para proteger las baterías de carga excesiva o de la descarga. No todas las cargas pueden usar la cc que producen los SSF's. Los inversores se agregan a estos sistemas para convertir electricidad de cc a corriente alterna (ca). Finalmente interruptores y cajas de control, herraduras de instalación y fusibles también están incluidos en el BOS.

Los SSF independientes, producen energía independientemente de otras fuentes de energía. La figura 1.10 ilustra cuatro configuraciones de sistemas en orden de complejidad. Todos estos sistemas pueden operar sin baterías, como por ejemplo un SF de bombeo de agua directo.

Sin embargo, la mayoría de proyectos tales como iluminación requieren baterías para almacenar energía, de controladores de carga para la protección de éstas e inversores como ya se menciono anteriormente. Estos sistemas independientes abarcan la mayoría de las instalaciones fotovoltaicas en regiones remotas del mundo, porque son a menudo la mejor alternativa y de costo más eficiente para proyectos aislados de las redes de electricidad, que necesitan energía confiable y de bajo mantenimiento (11).

Figura 1.10 Configuraciones de sistemas solares fotovoltaicos



*FV: fotovoltaico

d) Funcionamiento general de los sistemas fotovoltaicos

Se capta y transforma los rayos del sol (fotones) con los paneles solares a energía eléctrica continua, que se acumula en el banco de baterías o acumuladores. Con el inversor se transforma la corriente continua de 12 o 24 V en ca de 110 V, la cual se distribuye a través de la red de cables a la(s) casa(s), donde están conectados los consumidores como: lámparas fluorescentes, radiograbadoras, televisores, licuadoras, ventiladores, refrigeradores, bomba de agua, etc...

Hay consumidores como lámparas especiales, radiograbadoras o televisores blanco y negro que trabajan directamente con bajo voltaje. Estos equipos pueden ser conectados directamente a la batería. Un panel con una potencia de 55W produce 12V con 4A pico. Esto es equivalente a la potencia de un foco normal.

Como se acumula la energía recibida durante el día en acumuladores o baterías, se puede conectar los consumidores (por ejemplo lámparas) por el tiempo necesario. Este tiempo es limitado y depende de la cantidad de paneles fotovoltaicos instalados (que funcionan como generadores), de la cantidad de baterías (que funcionan como acumuladores) y de la cantidad de lámparas conectadas (que funcionan como consumidores).

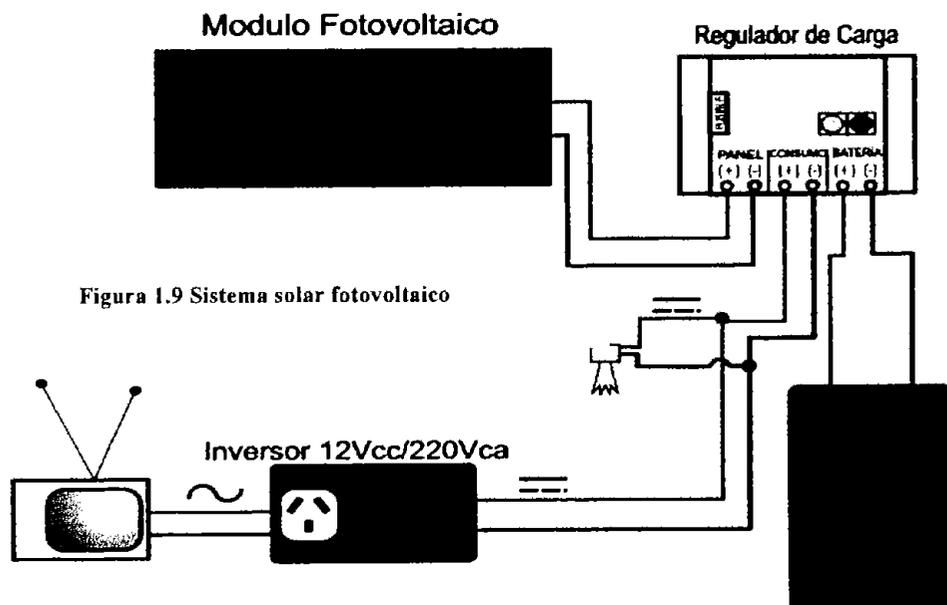


Figura 1.9 Sistema solar fotovoltaico

Los paneles producen energía cuando hay sol o luz, aunque llegan a su máxima potencia cuando hay pleno sol (suficientemente fuerte para producir sombras claras). Se estiman de 6-8 horas de sol máxima por día para las regiones ecuatoriales pero hay que considerar una traslación del sol entonces, llega menos energía solar a la superficie del panel por el ángulo entre el panel y el sol además, de que si hay nubes oscuras o lluvia (12).

1.6.2 Aplicaciones de la Tecnología Solar Fotovoltaica.

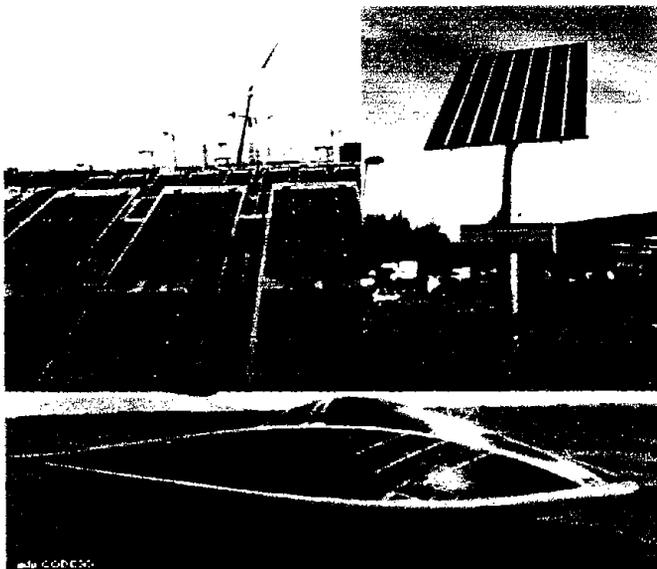


Figura 1.11 Aplicación de la tecnología solar fotovoltaica

Los sistemas solares fotovoltaicos son especialmente aptos para usos en regiones rurales que permanecen aisladas de las redes de suministro de energía eléctrica existentes. El uso de estos sistemas en dichas áreas rurales también puede ayudar a detener las migraciones a los centros urbanos ya sobrepoblados. En muchos casos la falta de servicios básicos y las escasas oportunidades económicas en el campo, impulsan a los campesinos a trasladarse a las ciudades en busca

de una mejor calidad de vida. La tecnología solar fotovoltaica puede ser usada para suministrar servicios diarios a los hogares y comunidades, incluyendo bombeo de agua, iluminación, servicios de salud, comunicaciones, refrigeración y aún pueden suministrar energía eléctrica para muchos usos productivos como iluminación para pequeñas tiendas rurales. Cuando estos elementos están disponibles en la comunidad, la necesidad de trasladarse hacia la ciudad disminuye.

La promoción de los sistemas solares fotovoltaicos por el gobierno mexicano se deriva parcialmente de la necesidad de mejorar los servicios básicos y las oportunidades económicas en las zonas rurales a fin de reducir la migración a las grandes ciudades. Sin embargo, hay que reconocer que otros casos demuestran lo contrario.

En áreas de las islas del Pacífico, por ejemplo, la llegada de la electricidad por este medio ha impulsado a algunos miembros de la familia a emigrar a la ciudad en busca de trabajo para obtener el dinero que les permita comprar estos nuevos servicios eléctricos y aparatos electrodomésticos.

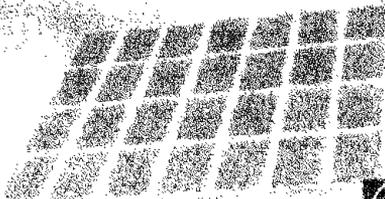
1.7 Conclusión

De acuerdo con lo expuesto en este capítulo podemos observar que hoy en día las fuentes de energía limpia y renovable se han estado usando como alternativa a la quema de hidrocarburos cuyas emisiones ejercen efectos negativos sobre el medio ambiente.

Así, estas fuentes alternas de energía ha demostrado ser más benignas con respecto al medio ambiente además, de que ésta tecnología también puede ser el medio más barato de suministrar servicios básicos de energía a las áreas que se encuentran alejadas de las redes de suministro eléctrico.

Por ello se plantea la posibilidad de aprovechar estos recursos localizados que son la energía de la biomasa y la solar. El siguiente capítulo, expone y evalúa la posibilidad de implantar un sistema que sea técnicamente factible de generación de energía que emplee alguna de estas dos fuentes de alternas tratadas en este capítulo.

Por tanto, para aprovechar la energía de la biomasa se recurrirá a la técnica de la fermentación metánica descrita ya aquí. Está técnica es la más apropiada para tratar residuos ganaderos (estiércol) que son los que se pretende utilizar. Estos residuos son los que se generan en una pequeña granja de la UNAM la cual, fue seleccionada por el tipo de ganado que allí se tiene. La información de la granja se presenta en el siguiente capítulo. También, se propone satisfacer los requerimientos energéticos de dicha granja empleando tecnología solar fotovoltaica.



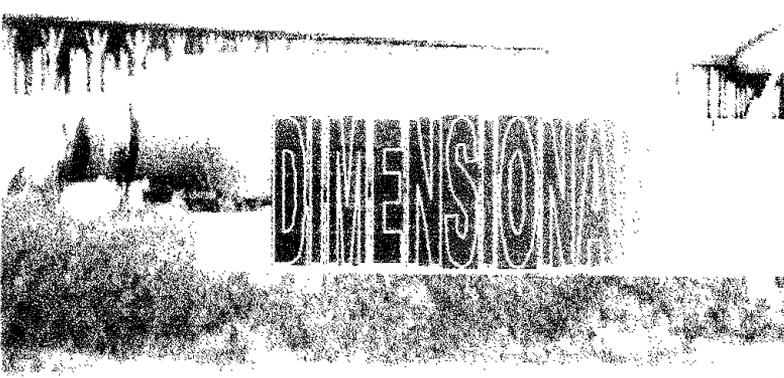
CAPÍTULO 2

OPCIONES DE APLICACIÓN EN UNA GRANJA



EMPLEANDO

ENERGÍA SOLAR



DIMENSIONAL

COMPARACIÓN

Gas and Electricity Since
October 1997

DE LAS ALTERNATIVAS

RCM Digesters
rcmdigesters.com

550 Cows

2.1 Introducción

Como el objetivo de esta tesis, es proponer un sistema de generación eléctrica que sea técnica y económicamente factible el cual, satisfaga los requerimientos energéticos de una granja al emplear biomasa o energía solar, para alcanzar dicho objetivo uno de los pasos a realizar es dimensionar, diseñar y comparar la eficiencia operativa de los sistemas de generación.

Uno de los sistemas de generación que se proponen es, uno que emplee biogás como combustible. Este biogás se pretende recuperarlo por digestión anaerobia de estiércol para lo cual, se estima la cantidad diaria de estiércol producido y por lo tanto la cantidad de biogás seco que puede recuperarse. También, se elige el tipo de digestor apropiado, se dimensiona y establecen sus condiciones de operación en base a la información proporcionada por el capítulo anterior sobre digestores anaerobios y en base a la información proporcionada por los directivos de la granja.

Adicionalmente, para este sistema de generación con biogás se plantea la posibilidad de quemar el gas recuperado en una turbina de gas o en un motor de combustión interna para determinar que ciclo presenta la mayor eficiencia. La capacidad de los equipos –turbina de gas y motor de combustión interna- se elige de acuerdo con la información proporcionada de la demanda eléctrica promedio registrada por el centro en el año 2003 la cual, se estimo en alrededor de 17.80kWe.

En ambos sistemas, se opto por aprovechar los gases producto de combustión de los equipos para generar vapor en un recuperador de calor y éste, utilizarlo para calentar al digestor y agua para los servicios de la granja. Por lo que este proyecto de autoabastecimiento eléctrico de la granja se transformo en un proyecto de cogeneración al obtener de manera secuencial energía eléctrica y térmica útil al proceso de calentamiento de agua de la granja a partir del empleo de una fuente primaria de energía (biogás). Esto hace que la eficiencia del ciclo se incremente.

En la segunda parte de este capítulo, se evalúa la otra alternativa que implica cubrir la demanda eléctrica de la granja empleando tecnología solar fotovoltaica.

Se propone un sistema fotovoltaico autónomo y en base al consumo promedio diario de energía eléctrica y a la las horas efectivas disponibles de luz del sol, se determina el número de paneles necesarios, las baterías requeridas para almacenar y respaldar el consumo de energía de refrigeradores y congeladores con las que cuenta la granja esto, durante la noche y los días nublados. También, se determina el número los otros componentes que integran el sistema solar fotovoltaico como inversores y controladores de carga.

Al final, se hace un análisis de resultados donde se comparan las eficiencias de generación proporcionadas por cada sistema y finalmente se concluye al proponer el sistema más eficiente desde el punto de vista técnico convendría implantar en la granja.

2.2 Información de la Granja.

En base a las visitas realizadas al centro de enseñanza, se obtuvo la siguiente información proporcionada por el Dr. Javier Valencia Méndez director técnico del lugar.

El CEPIPSA cuenta con una superficie total de $33,755\text{m}^2$, se encuentra en la Av. Cruz Blanca No. 486, en San Miguel Topilejo, Delegación Tlalpan, México 14500, D. F. Ubicado en el Km. 28.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, a 19° latitud norte y 99° longitud Oeste a una altura de 2760m sobre el nivel del mar, el clima de la región es semifrío, semi-húmedo con lluvias en verano y con precipitación pluvial de 800 a 1200mm anuales y una temperatura promedio de 19°C (13). La irradiación global media en esta zona se estima en $4.9\text{ kWh/m}^2\text{-día}$ y se estiman cerca de cuatro horas efectivas de sol [según Conae (14)].

El rebaño de ganado con el que se cuenta el que se mantiene prácticamente constante, esta conformado por cerca de 140 ovinos, 170 caprinos y 48 bovinos. Sus pesos promedio se calcularon en 45, 50 y 450kg respectivamente. La recolección del estiércol generado por el ganado que se encuentra en establos, se realiza mediante palas y carretillas así, el estiércol pajoso de las vacas, se almacena en la parte trasera de la granja al aire libre y separado del estiércol de borregos y cabras ya que este último, se proporciona a los agricultores de la zona por ser considerados un mejor abono para sus tierras.

Estos residuos presentan gran cantidad de sólidos puesto que al recolectarlos no se diluyen lo cual nos da una idea de que tipo de digestor puede ser empleado para tratar el estiércol. El digestor se selecciona y opera de acuerdo a las condiciones que se presentan en las granjas por ejemplo, se toma en cuenta el tipo y cantidad de animales, las condiciones ambientales del sitio, la forma de recolección de los desechos, su contenido en sólidos y humedad, el espacio disponible, entre otros factores.

Por parte del Programa de "Proyectos de Ahorro de Energía" de la Facultad de Ingeniería se proporciono, los datos de la demanda, consumo y costo de facturación eléctrica mensual de la granja (tabla 2.1) y a partir de estos, se estimaron los promedios mensuales por cada concepto para el año base que en este caso fue el año 2003.

La tabla 2.1 presenta los datos registrados de factor de potencia, la demanda de de energía eléctrica mensual y el valor promedio de esta demanda la cual se calculo en 17.80kWe. También presentan los datos de consumo mensual y el promedio el cual se estima en 6225 kWh así, también se cuenta con la información relacionada con el costo de facturación correspondiente al consumo cuyo promedio mensual es de \$8126, lo cual equivale a aproximadamente US\$712.80 (tipo de cambio: \$11.40 por dólar).

TABLA 2.1 CONSUMO, DEMANDA Y FACTURACIÓN ELÉCTRICA DEL CEIPISA
(según Programa de Proyectos de Ahorro de Energía, UNAM,2003)

MES	FACTOR DE POTENCIA	DEMANDA BASE DE FACTURACIÓN (kWe)	CONSUMO REGISTRADO (kWh)	IMPORTE CORRESPONDIENTE AL CONSUMO (\$)
ENE	0.866	17	10140	7125
FEB	0.892	20	4980	7678
MAR	0.855	20	4800	7794
ABRI	0.852	17	4680	7148
MAY	0.855	20	5700	9755
JUN	0.848	17	10740	7348
JUL	0.855	20	5340	8888
AGO	0.827	17	5340	8372
SEP	0.828	17	5880	8730
OCT	0.882	15	6000	7980
NOV	0.877	17	6180	8266
DIC	0.876	17	4920	8430
PROM	0.859	17.80	6225	8126.20

2.3. Dimensionamiento de los Sistemas de Generación Eléctrica

Primeramente se dimensionan los sistemas de generación con biogás y posteriormente el sistema de generación con paneles solares.

2.3.1 Sistema de Generación de Biogás.

Se determina la cantidad de estiércol (deyecciones) que se obtendrán diariamente. Este dato está basado en el denominado peso vivo, es decir, en el tipo y peso de los animales que integran el ganado, al que se aplica el coeficiente de rendimiento de estiércol, que resulta ser aproximadamente de 8% de estiércol por kilogramo de peso vivo. La tabla 2.2 presenta las características del estiércol para algunas especies de ganado donde podemos apreciar como estos residuos, presentan un alto contenido de humedad.

TABLA 2.2 CARACTERÍSTICAS DEL ESTIÉRCOL
[según Factores que afectan las características del estiércol(15)]

Peso del Animal	(kg)	Ganado lechero					Ganado de carne				Borregos
		68	113.40	226.80	453.60	635.03	226.80	340.20	453.60	567	
Producción diaria	kg/día	5.44	9.07	18.60	37.20	52.16	13.60	20.41	27.21	34.02	3.63
	m ³ /día	5.4e-3	9.06e-3	1.9e-2	3.7e-2	5.2e-2	0.014	0.021	0.028	0.035	3.4e-3
Contenido de agua	(%)	87.3	87.3	87.3	87.3	87.3	88.4	88.4	89.4	90.4	75
Densidad	kg/m ³	993	993	993	993	993	961	961	961	961	1041.1

Adicionalmente, se evalúa la cantidad de sólidos totales y los kilogramos de materia orgánica (MO) seca al día, presentes en las deyecciones del ganado y se calcula la cantidad de biogás a recuperar en metros cúbicos de biogás seco al día utilizando los datos proporcionados por la tabla* 1.2 del capítulo anterior. La tabla 2.3 resume los resultados obtenidos de estos cálculos.

TABLA 2.3 PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS SECO.

Ganado	Peso promedio (kg)	Deyec. (kg/día)	Deyec. (m ³ /día)	Sólidos totales	No. Animales	kg MO Seca / día	kg MO Humeda/ día	m ³ Biogas/ kg de MO*	m ³ de Biogas seco/ día
Borregos	50	4	0.0038	1	140	140	560	0.61	85.4
Cabras	45	3.6	0.0554	0.9	170	153	612	0.61	93.33
Vacas	450	36	0.0363	4.57	48	219.46	1728	0.86	188.73
TOTAL	545	43.6	0.0955	6.47	358	512.46	2900	2.08	367.46

Posteriormente, de acuerdo con los datos proporcionados en el capítulo anterior sobre las condiciones de operación de los digestores y con los datos recabados en la granja de la a cerca de la forma en la que actualmente se trata y recolecta el estiércol, se determina el tipo optimo de digestor, establecen sus condiciones de operación y sus dimensiones.

1. Se identifica el tipo de residuos para la digestión anaerobia el cual es el estiércol de ganado bovino, ovino y caprino con un 20-40% de TS. Los cuales, se diluyen con agua en un tanque de mezcla hasta tener un 11-13 % de TS. Este proceso permite que la arena o tierra y piedras se sedimenten.

2. Se considera que el digestor más adecuado es el de tipo flujo pistón, con agitación por recirculación de gas a presión durante 5 horas al día. La mezcla estiércol-agua del digestor, se calienta con vapor saturado el que se hace pasar a través de un intercambiador de calor en forma de serpentín que se encuentra sumergido en esta mezcla. El vapor es generado en un recuperador de calor, al aprovechar la energía de los gases producto de la combustión del sistema de generación eléctrica. Se optó por es te tipo de digestor debido a que es el comúnmente empleado en granjas que no usan el lavado a presión o mucha agua para remover el estiércol de los establos además, de que estos son fáciles de construir.

3. Las condiciones de operación comunes en éste tipo de digestores son:

- *Tiempo de retención:* 15 días.
- *Velocidad de carga.* 4 kg/m³ día.
- *Temperatura de operación:* 35°C (Zona Mesófila)

Así, bajo estas condiciones de operación, el biogás recuperado tendrá un poder calorífico medio de 21,980.7 kJ/m³ que corresponde, a una concentración del 65% de metano obtenido por digestión [según resultados presentados por la *Haubenschild Farms* (6)].

4. Dimensionamiento del digestor.

El volumen del digestor se estimo a partir de la ecuación 1.1 del primer capítulo y el cálculo se presenta en el punto 4 del anexo1.

- *Características del digestor:*

Volumen: 212 m³.

Dimensiones:

Longitud (L): 10 m

Ancho (A): 5m

Profundidad: 4.2m (por debajo del nivel de piso terminado)

El material de las paredes del digestor se propone sean de hormigón armado de aproximadamente 30.5cm de espesor, aisladas con espuma de poliuretano y la cubierta flexible de éste también, es poliuretano con un espesor de 2.5cm. (El espesor de las paredes del digestor se estableció de acuerdo con las recomendaciones hechas por La Agencia de Control para la Contaminación de Minnesota, (6).

Una vez que se ha determinado la cantidad de biogás recuperado y la energía proporcionada por este, se procede a evaluar el sistema de generación eléctrico y térmico que satisfaga la demanda eléctrica por parte de la granja y la demanda térmica por parte del digestor, además también se contempla la posibilidad de proporcionar agua caliente para la cocina y los baños de la granja.

Para este sistema con biogás, se propone emplear o una microturbinas de gas (MTG), o un motor de combustión interna (MCI). A estos sistemas, los llamaremos sistema de cogeneración con turbina de gas (SCTG) y sistema de cogeneración con motor de combustión interna (SCMCI). Se denominan sistemas de cogeneración debido a que se obtendrá simultáneamente energía eléctrica y térmica a partir de una fuente primaria de energía al aprovechar el calor de los gases de combustión para obtener vapor en un recuperador de calor y calentar agua para los baños y cocina de la granja.

En base a la demanda promedio mensual de la granja (17.80kWe) se seleccionó el equipo motor comercial para los sistemas (SCTG y SCMCI) considerando también, que el rendimiento de éstos equipos es afectado por la altura, temperatura y humedad relativa del sitio por lo que se hace la corrección por estos factores.

Para las turbinas de gas, la potencia viene definida por la norma ISO para las siguientes condiciones:

- Temperatura del aire, 15°C.
- Altitud, nivel del mar.
- Humedad relativa. 60%
- Las potencias de funcionamiento máximo continuo deben corregirse para las condiciones en el emplazamiento de la turbina como siguen:
 1. Altitud sobre el nivel del mar, disminuir un 1.2% por cada 100 metros.

Para los motores de combustión interna, las potencias vienen definidas por la norma ISO 3046/I para las siguientes condiciones:

- Temperatura del aire, del agua de refrigeración, 25°C.
- Altitud, nivel del mar.
- Las potencias de funcionamiento máximo continuo deben corregirse para las condiciones en el emplazamiento del motor como sigue:
 1. Altitud sobre el nivel del mar, disminuir un 8% por cada 1000 metros.
 2. Temperatura del aire o agua de refrigeración, disminuir un 3% por cada 10°C por encima de la temperatura de referencia.

Los equipos que se eligieron por ser uno de los más comerciales que se encontraron en el mercado y que además cumplieran con la condición de operar con biogás. La tabla 2.4 resume las características de la MTG y MCI que se eligieron. Las potencias vienen definidas por la norma ISO (referencia 16 y 17).

TABLA 2.4 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA MOTOR

	MTG	MCI
Marca	CAPSTONE TURBINE	OLYMPIAN (Caterpillar)
Modelo	C30	GEFG25-1
Operación	Ciclo Brayton regenerativo	Ciclo Diesel.
Tipo de Combustible	Gas de digestor (Biogás)	Biogás
Potencia neta, kWe	30 (+0/-1)	28.1(al 100% de carga)
Heat Rate, kJ (Btu)/kWh	13,800 (13,100)	6805.41 (6450.30)
Flujo de combustible kJ(Btu)/ h	457,000 (433,000)	
Temp. gases de salida, °C (F)	275 (530)	337.20 (369)
Flujo de gases de salida kg (lb)/s	0.31 (0.68)	0.0387 (0.0853)
Eficiencia (LHV)	26% (\pm 2)	
Eficiencia del generador (%)	97	89.7 (al 100% de carga)
Energía total de salida kJ(Btu)/h	327,000 (310,000)	
Aspiración		Natural
Relación de compresión		9.37

Fuente: www.energiadistribuida.com y www.CAT-ElectricPower.com (16 y17)

1. Sistema de Cogeneración con Turbina de Gas

Para obtener los datos de las propiedades termodinámicas del ciclo Brayton regenerativo bajo el cual trabaja la MTG, primero se determinaron las propiedades termodinámicas del ciclo Brayton de aire estándar a condiciones ISO y posteriormente a condiciones sitio para facilitar el calculo de algunos puntos del ciclo que no se proporcionaban por el proveedor del equipo y que se son necesarios para cálculos posteriores (18). La hoja de cálculo titulada "Turbina de Gas" (página 41) presenta las tablas 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 donde se resumen los valores de dichas propiedades.

Para determinar las condiciones de operación de la MTG a condiciones sitio, primero se determinaron estas a condiciones ISO empleando el subprograma Brayton Cycle del programa de computadora "Engineering software for energy analysis" el cual fue desarrollado por la *Thermal Analysis Company* y proporcionado por el Ingeniero Eduardo Buendía Domínguez catedrático de la UNAM.

MICROTURBINA DE GAS

Figura 2.1 Ciclo Braytonde Aire Estándar

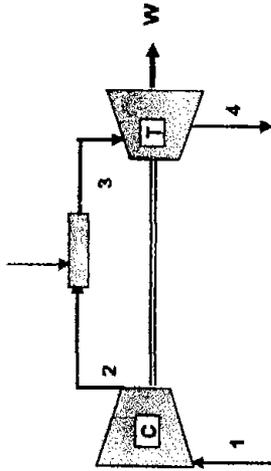


TABLA 2.5

Estado	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)
1	1.013	15	288.28
2	9.12	305.71	585
3	9.12	708.9	1025.77
4	1.013	325.04	605.76

$P = 30.063$ KW
 $\dot{W} = 22.279$ kg/s
 $Q = 134.97$ kJ/s

Figura 2.2 Ciclo Brayton Regenerativo

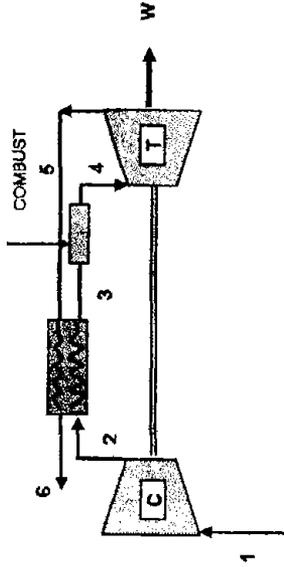


TABLA 2.6

Estado	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)	Pt
1	1.013	15	288.3	1.23
2i	9.12	542.7	15.562	
2	12.86	369.2	651.84	
3	12.86	417.533	703.4	
4	12.86	751.062	1073.70	126.72
5i	1.013	302.630	581.74	9.98
5	1.013	307.356	586.7	
6	1.013	276.667	554.66	

CONDICIONES SITIO

TABLA 2.7

Estado	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)
1	0.67	19	292.31
2	6.01	315	594.62
3	6.01	708.89	1025.77
4	0.67	326.65	606.92

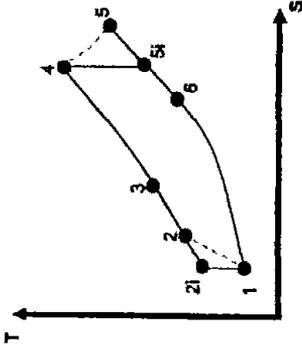
TABLA 2.8

Estado	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)
1	0.67	19	292.31
2	87.14	377.68	660.84
3	132.21	426.01	712.5
4	132.21	751.06	1073.70
5	0.67	309.21	588.62
6	0.67	259.63	536.98

RESULTADOS FINALES

$\eta_{turb} = 0.20$ kg/s
 $C_{comb} = 85.89$ kJ/s
 $V_{comb} = 0.004$ m³/s
 $P = 18.18$ KW

Diagrama 2.1: T-S Ciclo regenerativo



BALANCE DE Energía EN EL RECUPERADOR

$T(^{\circ}C) = 325.28$
 $T(^{\circ}C) = 276.667$ h (kJ/kg) = 806.22
 h (kJ/kg) = 554.66 m (kg/s) = 0.308
 $T(^{\circ}C) = 369.2$ $T(^{\circ}C) = 417.53333$
 h (kJ/kg) = 651.84 h (kJ/kg) = 703.4
 m (kg/s) = 0.308 P (bar) = 12.86

$T(^{\circ}C) = 276.32$ $T(^{\circ}C) = 309.21111$
 h (kJ/kg) = 470.74 h (kJ/kg) = 588.62
 m (lb/s) = 0.200
 $T(^{\circ}C) = 377.67778$ $T(^{\circ}C) = 426.01111$
 h (kJ/kg) = 594.62 h (kJ/kg) = 712.5
 m (kg/s) = 0.200

Dentro de este programa se presenta un menú de subprogramas que permiten simular el comportamientos de diferentes equipos como intercambiadores de tubos y coraza, sistemas de condensación, torres de enfriamiento, recuperadores de calor, turbinas de vapor, turbinas de gas entre otros a partir de introducir ciertos datos según el submenú. El programa emplea el sistema ingles de unidades y sugiere algunos valores comunes de presión, temperatura, relaciones de compresión, etc. Las tablas 2.9 presentan los datos de entrada al subprograma *Brayton Cycle* tanto en condiciones ISO como en condiciones sitio.

Se observa como el mismo programa sugiere valores típicos que son, los que se encuentran entre paréntesis en el lado izquierdo de la tabla 2.9 esto, con la finalidad de que si por alguna razón no contamos con alguno de ellos. Aquí, no adjuntamos los valores de cada parámetro en el sistema internacional de medidas como en otras tablas debido a que tantos paréntesis confundirían al lector por lo que solo se presentan en el sistema Inglés de unidades.

TABLA 2.9 DATOS DE ENTRADA –TURBINA DE GAS CICLO REGENERATIVO

NO.	DATO	ISO	SITIO
1	Relación de compresión del compresor (14.8?)	12.7	12.7
2	Temperatura de entrada del aire a la turbina, F (1200?)	1383	1383
3	Eficiencia del compresor,% (85?)	85	85
4	Eficiencia a condiciones ISO de la turbina % (88?)	88	88
5	Eficiencia mecánica % (98?)	98	98
6	Eficiencia de combustión, % (99?)	99	99
7	Eficiencia del generador % (97?)	97	97
8	Perdidas por presión a la entrada en, inH ₂ O (4?)	4	4
9	Perdidas por presión a la salida en, inH ₂ O (8?)	8	8
10	Perdidas por presión en la cámara, % (2?)	2	2
11	Altitud sobre el nivel del mar, ft (0?)	0	9055.1
12	Temperatura del medio ambiente, F(59?)	59	66.2
13	Flujo masico de aire ISO, lb/s	0.68	0.68
14	Humedad relativa, % (60?)	60	60

La tabla 2.10 resume los resultados obtenidos a condiciones ISO y sitio tanto en el sistema de unidades internacional e ingles. Observamos como las condiciones del sitio reducen considerablemente el rendimiento del equipo generador en este caso de la microturbina en cerca de un 62% al reducir el trabajo neto disponible de 30kWe en condiciones ISO hasta

18.20kWe operando esta a condiciones de sitio también, la eficiencia del ciclo se ve afectada adversamente. Sin embargo, se observa que la cantidad de energía suministrada (flujo de combustible) se reduce en cerca de 170,000kJ/h.

TABLA 2.10 RESULTADOS –TURBINA DE GAS CICLO REGENERATIVO

NO.	DATO	ISO	SITIO
1	Presión de descarga del compresor, bars (PSIA)	12.86 (186.56)	8.48 (122.96)
2	Temperatura de descarga del compresor, C (F)	369.2 (696.56)	377.68 (711.82)
3	Trabajo requerido compresor, KW	112.70	74.30
4	Trabajo generado por la turbina, KW	144.28	93.40
5	Trabajo neto disponible, KW	30.015	18.20
6	Temperatura de gases de salida de la turbina, C (F)	307.36 (585.24)	309.17 (588.50)
7	Flujo de combustible, LHV kJ(MMBTU)/HR	465680 (4414E-5)	296286.2 (28084E-5)
8	Heat Rate LHV, kJ (BTU)/KW-HR	15514.6 (14705)	16216.2 (15444)
9	Eficiencia del ciclo, %	23.21	22.10
10	Corrección del flujo de aire, kg (lb)/s	0.308 (67954E-5)	0.2004 (44177E-5)
11	Presión atmosférica., bars (PSIA)	1.011 (14.67)	0.67 (9.70)

Para cubrir solo la demanda eléctrica promedio de la granja se realizo otro cálculo en el programa, variando la temperatura de entrada del aire a la turbina de 751°C (1383.90°F) a 747°C (1377°F) aproximadamente. Los resultados más relevantes obtenidos son:

- Potencia: 17.834 kWe
- Heat Rate :16,435.7 kJ (15,578 Btu)/ kWh
- Flujo de combustible: 293,074.6 kJ (0.2778Btu)/h
- Temperatura de los gases de salida: 306.83C (584.30 F)
- Flujo de gases de salida: 0.2004 kg (0.4418 lb)/s

Los gases de combustión de la MTG son aprovechados en un recuperador de calor para generar vapor. Este vapor, se hace pasar por un intercambiador en forma de serpentín que se encuentra en el interior del digestor para mantener su temperatura de operación. Para calcular el flujo de vapor y su temperatura se emplea el subprograma *Heat Recovery Steam Generator* del mismo programa antes mencionado, con una configuración para el recuperador de: Sobrecalentador-Evaporador, sin postcombustión y asumiendo que la composición de los gases es la misma que la del aire. Los datos más relevantes de éste cálculo, se muestran en la tabla 2.11.

TABLA 2.11 DATOS DEL RECUPERADOR DE CALOR PARA EL SCTG

DATOS	
Temperatura del vapor, Unfaired, C (F)	150 (302)
Presión del vapor a la salida, bar (psia)	3.00 (43.51)
Presión del vapor en el domo, bar (psia)	3.60 (52.21)
Boiler Pinch Unfrd, C (F) (30?)	-1.10 (30)
Temperatura del agua a la entrada, C (F)	90 (194)
Blowdown, % (5?)	5
Temperatura de entrada de los gases, C (F)	259.63 (499.30)
Flujo de gases, kg(1000lb)/h	721.40 (1.59)
Perdidas por radiación y convección,%(2?)	2
Flujo de estrangulamiento en el by-pass LKG,%(1?)	1
Máximo vapor requerido, kg(1000lb)/h	453.6 (1)
Temperatura ambiente, C (F) (60?)	19 (66.2)

El flujo de vapor (31.21 kg/h) que se genera en el recuperador tiene una temperatura de 150°C y esta a condiciones de saturación. Al hacerlo pasar por el serpentín transfiere calor por cerca de 18.45 kWt y la energía del vapor condensado a la salida del serpentín se emplea para calentar agua para los baños y la cocina. Por lo que el calor trasferido por el condensado al agua baños y cocina es de 2.60 kWt (vea los puntos 5, 6 y 7 de los cálculos del anexo 1).

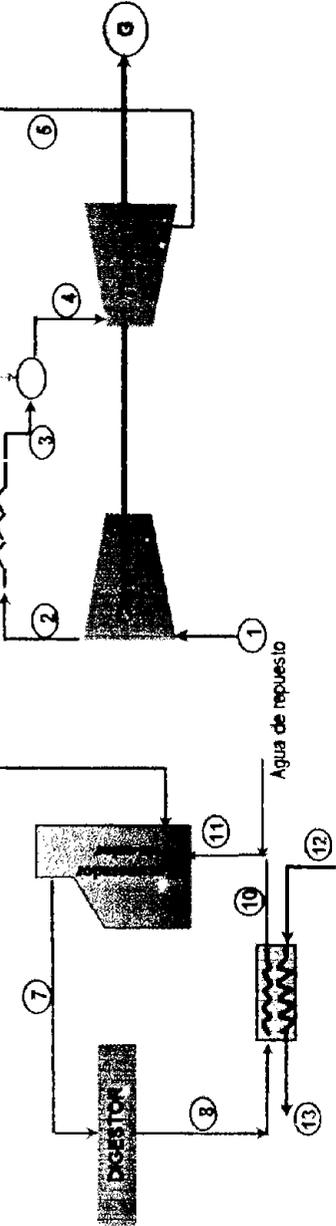
Finalmente se evalúan la eficiencia térmica, eléctrica y de cogeneración del SCTG las cuales son de 25.85%, 21.90% y 47.75% respectivamente. Ver figura 2.3 y la tabla 2.12 donde se resumen las propiedades termodinámicas del SCTG y ver el punto 5 de los cálculos presentados en anexo 1, el cual se refiere al calculo del calor cedido al digestor por el vapor en este sistema.

Cave mencionar que con la energía generada por este sistema, no se cubre la demanda eléctrica total que se estima según el balance de energía en 20.80kWe. Dicha demanda, es la suma de la demanda promedio de la granja (17.80kWe) y la de los equipos adicionales del sistema de generación (1 bomba y un recuperador de calor) la cual se estimo en 3kWe. Es decir que la energía obtenida en este sistema no cubre 2.60kWe. Este faltante de energía puede cubrirse comprando energía a la red eléctrica local.

SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA EN TURBINA DE GAS

Una Turbina de gas ciclo cerrado
 Marca: CAPSTONE
 Modelo: C-30 Biogas
 Capacidad kW (ISO): 30
 Capacidad kW (Sitio): 18.2
 Eficiencia Genet: 97%
 Combustible: Biogás

Figura 2.3



P (KW)= 17.83
 Q_{sum} (KW)= 81.42
 η_{TERM} (%) = 25.85
 η_{ELEC} (%) = 21.90
 η_{COOC} (%) = 25.09

TABLA 2.12

CORRIENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	ARE	DEB-COMPRES	SAL-VALEN	MEZCLA	GASES-T	VAPORES	VAPORES	CONDEN-DO	BIOGAS	CONDENADO	AGUA-ALI	AGUA-FR	AGUA-COLE
m (kg/h)	721.38	721.38	721.38	721.38	721.38	721.38	31.21	31.21	15.91	31.21	31.21	3.8	3.8
T (C)	19	377.68	426.01	747.22	306.83	259.63	150.00	150.00		79.44	90	19	100
P (bares)	0.668	8.48	8.48	8.48	0.668	0.668	3.00	2.62		2.62	3.00	0.67	1.00
h (kJ/kg)	292.3	660.84	712.5	1073.70	588.61	536.96	2760.43	632.15		332.68	377.12	79.77	2676.18
E.T (KW)							18.45			2.60			
PCM (kJ/kg)									18418.55				
Q _{sum} (kJ/h)									283127.32				

RECUPERADOR DE CALOR

*** RESULTA A CONDICIONES DE SITIO ***
 PARA CUBRIR SOLO LOS 17.83KW
 1 CMFR DISCH PRESS, PSIA 122.96
 2 NET WORK AVAILABLE, KW 17.83
 3 TURB EXHAUST TEMP, F 584.3
 4 FUEL USED, LHV MM-BTU/HR, 278E-01
 5 LHV HT RATE, BTU/KW-HR 15578
 6 CYCLE EFFICIENCY, % 21908
 7 CORR AIR FLOW, LB/SEC 4.42E-01
 8 ATMOS PRESSURE, PSIA 9.69

Datos del combustible

Combustible: Biogas
 PCM = 5250 kcal/m³
 ρ comb = 1.1934 kg/m³

2. Sistema de Cogeneración con Motor de Combustión Interna

Para el diseño del SCMCI (figura 2.4), una vez seleccionado el motor comercial en base a los datos proporcionados por el proveedor del equipo, se simuló su comportamiento a través del ciclo Diesel de aire estándar al 100% de carga del motor y a condiciones ISO.

Posteriormente se determinaron las propiedades termodinámicas del ciclo y la potencia que este, proporciona a condiciones sitio a la misma carga (haciendo las respectivas correcciones por altitud y temperatura). Utilizando estos datos a condiciones ISO y después a condiciones sitio se determinó la potencia del motor al 90% de carga para ajustarnos a los requerimientos promedio de energía eléctrica de la granja (17.83kWe).

Los cálculos efectuados para obtener los valores de las propiedades termodinámicas de este ciclo se presentan en las tablas 2.13 y 2.14 de la hoja de cálculo titulada "Motor de Combustión Interna" de la página 48. Los gases de escape del MCI se introducen en el recuperador de calor de igual configuración que el del sistema anterior y se obtiene vapor cuyo flujo y temperatura se calculan empleando el mismo programa (THERMAL).

El calor cedido al digestor por el vapor en este sistema es de acuerdo con la ecuación 2.1 de 17.80kWt (vea el punto 8a. del anexo 1).

$$q = UA\Delta T_{lm} = m_v h_{fg} \quad (2.1)$$

El tiempo requerido para calentar el digestor en éste sistema es mayor al del anterior sistema ya que el flujo del vapor que se genera es menor aquí.

La ecuación 2.2 (puntos 5c y 8c del anexo 1) calcula el tiempo requerido para alcanzar la temperatura final en el digestor a partir de la relación entre su temperatura inicial (T_{s1}) y final (T_{s2}), del coeficiente global de transferencia de calor (U), del área del digestor (A_1), de la masa contenida en el digestor (B) y de la capacidad calorífica de los lodos digeridos (C_s).

La energía térmica para calentar el agua para baños y cocina se obtiene al aprovechar el calor del sistema de refrigeración del motor (ver punto 11 de la memoria de cálculo en el anexo 1).

$$\theta = \frac{BC_S}{UA_1} \ln \left(\frac{T_V - T_{S1}}{T_V - T_{S2}} \right) \quad (2.2)$$

La configuración total del sistema y las propiedades termodinámicas de los flujos que lo integran se resumen en la tabla 2.15. La eficiencia térmica, eléctrica y de cogeneración para éste sistema son: 36.40, 34 y 70.40% respectivamente

MOTOR DE COMBUSTION INTERNA

CICLO DIESEL DE AIRE ESTANDAR

Condiciones ISO al 100% de carga

$P = 28.1$ kW
 $P_1 = 1.013$ bars
 $T_1 = 25$ C
 $r = 9.37$
 $r_c = 2$

TABLA 2.13

Estado	P (bars)	T (C)	h (kJ/kg)	u (kJ/kg-K)	Vr	K
1	1.013	25	298.33	212.75	631.08	1.4
2	22.58	435.81	722.819	67.35		
3		1144.77	1536.94	8.57		
4	2.9	337.22		635.25	40.15	

$\eta_T = 94.66$ %

$W_{dcb} = 391.52$ kJ/kg
 $Q_{s,u} = 413.594$ kJ/kg
 $m = 13.93$ kg/h

Condiciones de Sitio al 100% de carga

$h = 2760$ m sobre el nivel del mar
 $P = 21.90$ kW
 $P_1 = 0.67$ bars
 $T_1 = 19$ C
 $r = 9.37$

TABLA 2.14

Estado	P (bars)	T (C)	h (kJ/kg)	u (kJ/kg-K)	Vr	K
1	0.67	19	292.31	208.45	663.97	1.4
2	14.92		709.05	70.86		
3			1506	9.08		
4	1.91	337.22	860.83	621.07	42.54	

$\eta_T = 94.66$ %

$W_{dcb} = 384.34$ kJ/kg
 $Q_{s,u} = 406.01$ kJ/kg
 $m = 0.05697$ kg/s
 $m = 205.09$ kg/h

Condiciones ISO al 90% de carga

$P = 25.32$ kW
 $P_1 = 1.013$ bars
 $T_1 = 25$ C
 $r = 9.37$
 $r_c = 2$

η_T	%
94.66	
W_{dcb}	391.52 kJ/kg
$Q_{s,u}$	413.594 kJ/kg
m	13.93 kg/h
m	213

Condiciones de Sitio al 90% de carga

$P = 17.83$ kW
 $P_1 = 0.67$ bars
 $T_1 = 19$ C
 $r = 9.37$

$\eta_T = 94.66$ %
 $W_{dcb} = 384.34$ kJ/kg
 $Q_{s,u} = 406.01$ kJ/kg
 $m = 0.05$ kg/s
 $m = 167$ kg/h

Diagrama 2.2: P-v Ciclo Diesel

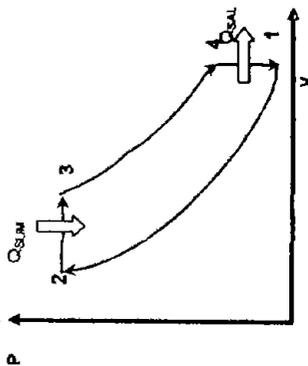
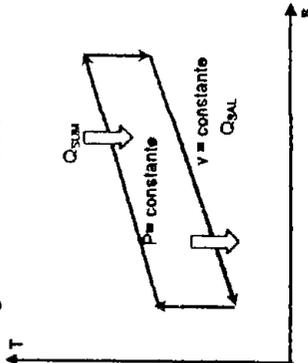
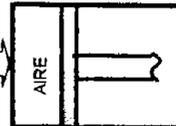


Diagrama 2.3: T-s Ciclo Diesel



COMBUSTIBLE



SISTEMA DE RECUPERACION CON MOTOR

Un Motor de Combustión Interna
 Fabricante: OLYMPIAN (Caterpillar)
 Modelo: GEF325-1
 Capacidad kW (ISO): 28.1 al 100% de carga
 Capacidad kW (Sitio al 100%): 21.90
 Efic. Generador: 89.7%
 Combustible: Biogas

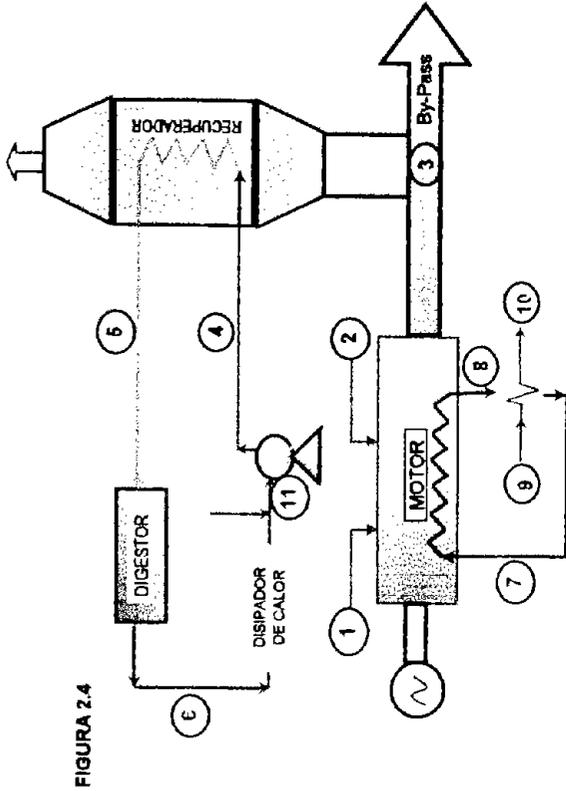


FIGURA 2.4

P (kW) =	17.83
Q _{sum} (kW) =	53.12
η _{term} (%) =	15.16
η _{elec} (%) =	33.56
η _{cooc} (%) =	36.68

TABLA 2.13

CORRIENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m (kg/h)		10.38	141.17	10.83	10.83	10.83	39.5	39.5	3.6	3.6	10.83
T (C)		35	337.22	90	150	150	40	76	19	99.63	89.53
P (bares)		0.87	1.40	3	3	2.94			1	1	3
h (kJ/kg)		709.05	860.83	561.43	2760.43	632.15	187.45	318.13	79.77	1734.12	374.96
E.T (kW)						6.40				1.65	
PCM (kJ/kg)		18418.55									
Q _{sum} (kJ/h) =		191232.09									

MCI GASPOWER: VALMET

*** RESULTS A CONDICIONES DE SITIO ***

- 1. NET WORK AVAILABLE, KW 17.83
- 2. MCI EXHAUST TEMP, C 337.22
- 3. FUEL USED, L/HV KJ HR. 191232.09
- 4. MCV HT RATE, KJ KW-HR 10726
- 5. CYCLE TERMICA EFFICIENCY, % 84.7
- 10. AIR FLOW, KG SEC 0.04
- 11. ATMOS. PRESSURE, PSIA 9.6924
- 12. COOLANT FLOW RATE, L/h 40.2

*** RESULTS, UNFIRED MODE ***

- 1. STEAM FLOW 1000LB HR 2.39E-02
- 2. STEAM TEMP, F 302
- 3. WATER TEMP, F 194

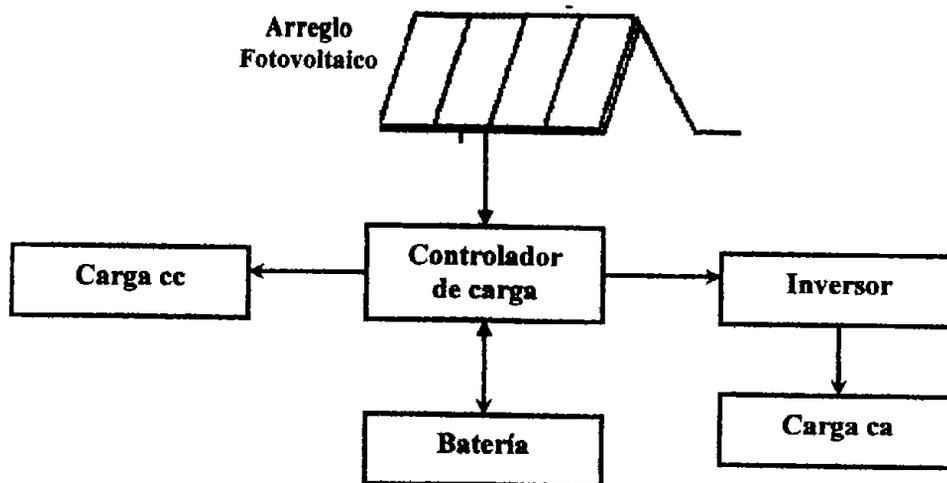
RECUPERADOR DE CALOR

2.3.2 Sistema de Generación con Paneles Solares.

En este apartado se efectúan los cálculos necesarios para determinar si los SSF son una fuente de energía adecuada para nuestro proyecto. La industria fotovoltaica ha simplificado el proceso de selección para los compradores proporcionando una gran variedad de sistemas prediseñados y prefabricados. Sin embargo, muchos SF deben ser fabricados de acuerdo a las especificaciones particulares del lugar y de su uso. El diseño del proceso requiere la consideración de varios factores, incluyendo las características del lugar de la instalación, cuando y cuanta energía se necesita, el tipo de energía necesaria (ca y/o cc), entre otros factores no menos importantes.

Así, una vez reunida la información del clima de la zona donde se encuentra el CEPIPSA, de la disponibilidad de horas de luz solar (4 h/d), de estimar el consumo promedio diario de energía eléctrica de la granja (cerca de 204.70kWh/día) y el tipo de energía requerida (ya sea del tipo ca y/o cc) puesto que el centro cuenta con lámparas ahorradoras, computadoras, refrigeradores, congeladores y bombas. Se optó por un sistema autónomo de configuración "cargas cc y ca con batería, controlador de carga, e inverso" (figura 2.5).

Figura 2.5 Sistema solar fotovoltaico



Hay una gran diversidad de paneles solares fabricados con diferentes materiales de células y calidades. La vida útil de las mejores marcas esta entre 25 y 30 años.

Para elegir el tipo de panel solar se revisaron las especificaciones de algunas marcas y modelos más comerciales distribuidos por BP-Solar, CODESO y Siemens Solar Industries principalmente y finalmente se eligió un panel solar comercial de BP-Solar debido a que proporciona una mayor potencia (160W) y eficiencia de conversión (17%) comparada con la de las otras marcas que son de 110W de potencia nominal y tienen entre 13-15% de eficiencia de conversión. Las características de este panel solar se presentan a continuación [según BP-Solar (19)].

Características del panel

- Módulo fotovoltaico policristalino
- Versión BP 3160S
- Proporciona energía de cc o con un inversor, para ca.
- Con 72 células de alta eficiencia en serie, carga baterías de 24 V (o múltiplos de 24 V) de una manera eficaz en prácticamente cualquier clima
- Potencia de salida durante 25 años.

Características Eléctricas

- Potencia máxima: 160W
- Potencia mínima garantizada 150W

Características Mecánicas

- Peso: 15kg (33.1 lb)
 - Dimensiones: 1580mm (62.2in) x 783mm (30.8in) x 19mm (0.75in)
- Las tolerancias globales son $\pm 3\text{mm}$ (1/8in)

Por tanto de acuerdo con el consumo diario (204kWh/día), se requieren instalar aproximadamente 320 paneles solares y como los módulos fotovoltaicos están compuestos comúnmente por 10 paneles conectados en serie o en paralelo se conformarían cerca de 32 módulos (vea la tabla 2.17).

Los días de almacenaje requeridos dependen de las necesidades del proyecto en este caso de la granja. Por ejemplo, las consecuencias de no poder prender la luz no son tan severas como las de perder potencia en un refrigerador o congelador. Los proyectos menos críticos pueden utilizar almacenaje de tres a cuatro días, mientras que los más críticos (los que pueden tener un impacto en la salud y seguridad pública) pueden necesitar más. Así, nuestro proyecto se sitúa en los menos críticos.

Como la granja cuenta con dos refrigeradores y siete congeladores sólo, se calcula el número de baterías que se requieren para asegurar su funcionamiento durante los días nublados y para la noche. De acuerdo con la potencia de estos equipos y su tiempo de operación, se estima la cantidad diaria de energía que éstos consumen. Aquí una pequeña explicación de como se calcula la potencia de los refrigeradores y congeladores. La potencia de los primeros es de 1/4 hp y 1/2 hp de los segundos, pero éstos se prenden y apagan en un ritmo (dependiendo del uso, de las temperaturas adentro y afuera, del aislamiento, etc.) 15 minutos prendidos y 45 minutos apagados, que equivale a un consumo promedio de 47 y 93 W respectivamente.

El consumo diario es de aproximadamente 7095 Wh/d (tabla 2.18). Por lo tanto, para reserva de 3 días se requieren cerca de 24 baterías estacionarias de 12V y de 100Ah. El cálculo del número de baterías requeridas se presenta en la tabla 2.19.

Se tienen consumidores de baja tensión como ventiladores, bomba de agua, cargador de baterías, lámparas ahorradoras entre otros quipos que pueden conectarse directamente al sistema de 12 o 48 V de cc pero, en esta caso también se requerirá un inversor de corriente para transformar la cc en ca y poder conectar los equipos normales de 110 V como, refrigeradores, congeladores y computadoras. Por lo que se recomienda adquirir 2 inversores de corriente.

También, se realizan los cálculos para determinar el área que requiere el arreglo fotovoltaico en base a las dimensiones proporcionadas por el proveedor y el número de paneles calculados. El área se estima en cerca de 40m² por lo tanto, el sistema cabe perfectamente en el sitio.

SISTEMA FOTOVOLTAICO

1. CONSUMO PROMEDIO MENSUAL DE ENERGIA (KWh)

TABLA 2.16

Mes	Consumo (KWh)
Enero	327.10
Febrero	177.86
Marzo	154.84
Abril	158.00
Mayo	183.87
Junio	358.00
Julio	172.28
Agosto	172.28
Septiembre	198.00
Octubre	193.55
Noviembre	208.00
Diciembre	158.71
Total	2450.44

La energía promedio consumida por día es:

E = 204.7 kWh/día
E = 204703.1 Wh/día

2. CALCULO DEL NUMERO DE PANELES SOLARES

TABLA 2.17 PANELES SOLARES REQUERIDOS

1. El consumo diario promedio es de	204703.149 Wh/día
2. Panel de 110 W produce con 4 horas sol/día	440 Wh/día
3. Para la generación de energía se requieren	465 paneles
4. Módulos fotovoltaicos	47

- Se toman para esta zona 4 horas efectivas de sol
- Los Módulos fotovoltaicos están compuestos por 10 paneles conectados en serie o en paralelo

3. AREA REQUERIDA PARA LA INSTALACIÓN DE LOS PANELES

Dimensiones por panel

L = 0.158 m
a = 0.783 m

Area requerida por panel

A = 0.124 m²

Area total requerida

A_T = 57.56 m²

TABLA 2.18 ENERGIA CONSUMIDA POR REFRIGERADORES Y CONGELADORES

Cantidad	Equipo	Potenc. W C	P. Subtot W D = Ax C	h/d uso E	Energ. Wh F = D x E
2	Refrigerador	47.5	95	6	570
7	Congelador	93.2	652.5	10	6525
Total Wh/día					7095

TABLAS 2.19 BATERIAS REQUERIDAS

5. Hay que almacenar (sistema de 12 V) la cantidad de	591.24	Ah
6. Se necesita baterías estacionarias 12 V 100 Ah la cantidad (sin reserva o respaldo)	6	baterías
7. Se necesita baterías estacionarias 12 V 100 Ah la cantidad (con una reserva o respaldo de 3 día):	24	baterías

- Se divide la energía requerida 204703 Wh/día por la tensión del sistema 12 V = 17058.6 Ah capacidad de baterías
- Se divide la capacidad requerida 170.59 Ah por la capacidad de una batería 100 Ah = 22.42 baterías
- Se multiplica la cantidad de baterías con el factor 4 para 3 día de reserva = 341.17 baterías

2.4. Análisis Comparativo de los Resultados

TABLA 2.20: CUADRO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN

SISTEMAS	EFICIENCIA ELÉCTRICA (%)	EFICIENCIA TÉRMICA (%)	EFICIENCIA GLOBAL (%)
SCTG	21.90	25.85	25.09
SCMCI	33.95	15.16	36.70
SSF	17	-	17

De la tabla 2.20, se observa que el sistema de generación a biogás con motor de combustión interna es la alternativa de generación que presenta la mayor eficiencia de entre los tres casos evaluados y que el sistema solar fotovoltaico es la alternativa más ineficiente. Esto puede explicarse por las bajas eficiencias que se tienen actualmente en la conversión de la luz solar en electricidad por parte de las celdas solares además, con este tipo de sistemas solares no se obtiene energía térmica como sucede con el caso de los sistemas con biogás.

2.5. Conclusión

Del análisis de resultados, podemos concluir que el sistema de cogeneración con motor de combustión interna, es el sistema más atractivo desde el punto de vista de eficiencia operativa sin embargo, no solo es la factibilidad técnica la que determina el emplear una u otra tecnología si no que, existen otros factores muy importantes como el económico que debe ser considerado en cualquier proyecto, por ello en el siguiente capítulo se realiza la evaluación económica de estos esquemas de suministro energético. El fin de este análisis es el de determinar el "mejor" esquema que desde el punto de vista técnico-económico pudiera implementarse en la granja.

CAP

ULO 3

EVAL

CIÓN

ECO

MICA

D

S

ALTE

ATIVAS

3.1 Introducción

Una vez que hemos evaluado técnicamente nuestras alternativas de generación, el siguiente paso es utilizar algún procedimiento general que nos ayude a seleccionar la mejor de ellas.

Existen diferentes métodos de análisis de las alternativas, de entre los cuales podemos distinguir: los empíricos y los cuantitativos. La diferencia entre estos métodos estriba en que en estos últimos, se utilizan técnicas numéricas que nos ayudan a visualizar mejor las diferencias entre las alternativas. Además, al usar procedimientos lógicos, basados en cálculos matemáticos nos ayudan a tomar mejores decisiones.

Los procedimientos para seguir y controlar las propuestas de inversión seleccionadas, aseguran el logro de las metas fijadas y permiten mejorar el proceso de planeación eliminando aquellas estrategias que nos conducirán hacia un objetivo no planeado.

Mediante procedimientos de seguimiento y control del proyecto seleccionado, es posible comparar la inversión actual, los ingresos netos obtenidos, y el rendimiento real obtenido, con las estimaciones de inversión, ingresos netos y rendimiento esperado del proyecto.

Por lo anterior, este capítulo está dedicado a realizar una evaluación económica las alternativas de generación presentadas en el capítulo anterior con el fin de determinar la mejor alternativa que favorezca a nuestro objetivo de autoabastecimiento energético.

3.2 Evaluación Económica de las Alternativas Propuestas

El análisis económico que debe realizarse a fin de estudiar las diferentes alternativas que se llegasen a plantear debe contar con un flujo de efectivo o flujo de caja de las mismas, donde debe considerarse los siguientes parámetros económicos como son: Valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), período de recuperación de la inversión (PRI) y relación beneficio/ costo (B/C).

Así mismo, dentro del análisis económico de las alternativas a considerar, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Inversión inicial
- Costo de operación y mantenimiento de la nueva planta

a) Bases generales para la evaluación económica.

Se deberá contar con las bases listadas a continuación, a fin de determinar la factibilidad económica de implantar alguno de los proyectos planteados.

1. Evaluación de costos

- *Vida económica del proyecto.*
 - *Valor del capital.*
 - *Tiempo de operación de la planta.*
 - *Costos de inversión*
- *Costos de insumos.*
 - Agua Cruda $\$/m^3$
 - Agua Desmineralizada $\$/m^3$
 - Costo de combustible.
 - Costo de la energía eléctrica.

2. Evaluación de beneficios

Aquí, los beneficios están representados por el ahorro que se tiene por facturación en energía eléctrica y por el ahorro en consumo de gas para generar vapor en el recuperador.

Para la evaluación de los beneficios se consideran los siguientes parámetros.

- *Saldo total o flujo de caja*: Este parámetro se considera después del inicio de operación y es el resultado del total de beneficios menos el total de costos. El total de costos comprende la inversión total después del periodo de construcción, el costo del biogás generado (combustible), el costo de la energía eléctrica de respaldo y los costos de mantenimiento. Así mismo, se deberá disponer de la siguiente información:

1. Período de amortización (años)
2. Precio de los combustibles (\$/l, \$/MMBTU, etc...)
3. Tasa de descuento (%)

Por otro lado, se debe también contar las cotizaciones de los equipos como turbinas de gas, motores de combustión interna, generadores de vapor, bombas, paneles fotovoltaicos, baterías, inversores, los costos de instalación y mantenimiento entre otros para estimar la inversión total del proyecto.

Para estimar los costos de inversión del sistema generador de biogás, se emplearon los datos proporcionados por un proyecto llamado "*Haubenschild Farms Project*" realizado en Minnesota Estados Unidos en 1999 (20). Este sistema de generación de biogás consta de un digestor anaerobio del tipo "*plug flow*" diseñado para procesar el estiércol de 1000 vacas así, teniendo a éste sistema de referencia se hizo la escalación para ajustar los costos a nuestro sistema que procesa el estiércol de 81 vacas. Se determinó el número de 81 vacas al establecer la relación de pesos de borregos y cabras entre vacas.

El costo de los equipos de generación (la turbina y el del motor), se obtuvieron de cotizaciones de proveedores (7y18). Otros costos como el del recuperador de calor, compresores de gas y equipo eléctrico del sistema de generación, se estimaron como porcentajes del costo del equipo principal que en este caso son la turbina y el motor al igual que los costos varios que se presentan en la hoja de calculo titulada "Evaluación Económica para los Sistemas con Biogás" (vea anexo 2).

Para el sistema fotovoltaico, los costos que se consideran es el de los paneles solares, las baterías, los inversores de corriente y el de los reguladores. En este sistema, los costos de instalación y de mantenimiento son cero ya que la instalación de los módulos la podemos realizar nosotros mismos y el personal de la granja puede encargarse del mantenimiento del SF.

3.3 Resultados de la Evaluación Económica

A continuación se presentan los resultados de la evaluación económica de los tres sistemas de generación propuestos en el capítulo anterior. Las cantidades están en dólares constantes del 2004 y el tipo de cambio que se usa es 11.40 pesos por cada dólar.

Para la evaluación de costos se propone una vida económica del proyecto de 25 años y un tiempo de operación del sistema de generación de 8,322 horas al año y los costos de inversión así como el de los insumos se presentan en la tabla 3.1.

TABLA 3.1 EVALUACIÓN DE COSTOS

	SCTG	SCMCI	SF
Inversión total, US\$	56,476	55,006	866,917
Costos de inversión			
Costos de insumos :			
Tarifa eléctrica de respaldo, US\$/kWh	0.091	0.091	0.091
Gas Natural, US\$/MMBTU	4	4	4
Agua cruda, US\$/m ³	0.017	0.017	0.017
Agua desmineralizada, US\$/m ³	0.105	0.105	0.105

2. Evaluación de beneficios

Los beneficios obtenidos por los sistemas de generación que emplean biogás ofrecen ambos, casi los mismos ahorros en facturación eléctrica. También, con ambos se tienen iguales ahorros en pagos de gas natural suponiendo que este, fuese el energético empleado en los recuperadores en vez de aprovechar los gases de combustión para generar vapor. Recordemos que el vapor saturado que se genera se usa para calentar el digestor y obtener agua caliente. Además, el costo de la energía eléctrica generada por cogeneración en ambos sistemas, es significativamente menor comparado con la tarifa eléctrica normal que se paga la cual es de 0.081US\$/kWh promedio para esta zona a diciembre del 2003. Vea la tabla 3.2 de resultados.

Para determinar el precio real de la electricidad y del vapor para los sistemas de cogeneración, se calculó primero el precio de la energía eléctrica y del vapor por combustible en donde, se atribuye todo el costo del combustible a la electricidad y cero al vapor y viceversa.

Posteriormente se calcula el costo real de la energía eléctrica y del vapor al adicionar el porcentaje que representan en costo de combustible cada uno de estos. Aproximadamente 60% para la electricidad y 75% para el vapor así, según la tabla 3.2, el precio de la electricidad para el sistema con turbina de gas es cerca del doble del precio de la energía eléctrica obtenida por motor de combustión interna y lo mismo se observa con respecto al precio del vapor. (También, vea hoja de cálculo de la evaluación económica para sistemas con biogás, tablas 3.10 y 3.11 y para el sistema fotovoltaico, tabla 3.12).

TABLA 3.2 EVALUACIÓN DE BENEFICIOS

	SCTG	SCMCI	SIST. FV
Ingresos por capacidad eléctrica(US\$/año)	9,096	9,408	
Ingresos por energía eléctrica(US\$/año)	1,627	1,324.30	-
Ingresos por vapor (US\$/año)	0.40	0.21	-
Valor presente del total de beneficios (US\$/año)	95,596	84,177	-
Precio electricidad por cogeneración (cdlls/kWh)	0.70	0.70	-
Precio vapor por cogeneración (US\$/kg)	0.83	0.45	-

El SF no proporciona beneficio alguno ya que la inversión los supera e inclusive el costo de la energía eléctrica de respaldo, es superior al ahorro que se tiene por facturación eléctrica. Esto puede observarse en la hoja de cálculo de la página 56 que presenta la evaluación económica para este sistema.

3. Indicadores económicos

La evaluación económica de las diferentes alternativas, generaron los resultados que presenta la tabla 3.3. La tasa de recuperación mínima atractiva (TREMA) que se emplea en la evaluación es del 12%. Vea también las hojas de cálculo "Evaluación económica para sistemas con biogás y sistema fotovoltaico" en el anexo 2.

TABLA 3.3 INDICADORES ECONÓMICOS

	SCTG	SC MCI	SIST. FV
Valor presente neto (US\$)	11,462	7,341.60	-206.40
Tasa interna de retorno (%)	14.40	13.60	-1.30
Índice de utilidad	0.14	0.10	-0.70
Relación beneficio/costo (%)	1.17	1.10	0.26
Periodo de recuperación (años)	16	18	152

3.4 Análisis de los Resultados

De los resultados obtenidos de la evaluación económica de las diferentes alternativas aquí presentadas se observa, que el sistema con los mejores indicadores económicos es la alternativa de quemar biogás en una turbina de gas, al presentar una TIR y una relación B/C ligeramente superior al compararla con los valores del sistema con motor de combustión interna.

Además, en cuanto al periodo de recuperación se refiere, la inversión se recuperaría tentativamente dos años antes si se implementará este sistema. También, la TIR obtenida para los sistemas con biogás, es ligeramente mayor a la TREMA propuesta. En cuanto a los beneficios de implementar alguno de los sistemas con biogás se proporcionaría a la granja energía eléctrica y térmica a un costo considerablemente bajo comparado con el que se paga actualmente a la red local de suministro el cual, es de 8.0¢-doll/kWh. El precio que se oferta de la energía eléctrica para ambos sistemas con biogás es de 0.70¢-doll/kWh.

Aquí, también se observa que el pretender cubrir el consumo eléctrico de la granja empleando la tecnología solar fotovoltaica, es desde el punto de vista económico –inviabilidad– puesto que al requerirse una gran cantidad de paneles solares y baterías para almacenamiento y respaldo, el costo de la inversión supera considerablemente a las otras dos tecnologías a pesar de que el costo del combustible para el sistema fotovoltaico es gratis y que los costos de operación y mantenimiento no son significativos comparados con las otras alternativas.

3.5. Conclusión

Del análisis de los resultados de esta evaluación podemos concluir que el sistema de cogeneración con turbina de gas resulta más rentable comparado con los otros dos sistemas. Por ello se propone implantar este sistema de autoabastecimiento en la granja el cual garantiza el suministro de energía eléctrica y térmica en forma continua y eficiente. Brindando costos de energía térmica y eléctrica por debajo de los que actualmente se tienen en el mercado, optimizando en el medio y largo plazo los costos de producción, operación y mantenimiento.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS

TERMINAL DINÓMICO

PARA LOS SISTEMAS

COLOGÍAS

4.1 Introducción

Este capítulo se enfoca en el análisis exergético y termoeconómico de los esquemas de generación descritos en los capítulos anteriores.

Puesto que es evidente la importancia del desarrollo de sistemas térmicos que hagan un uso eficiente de los recursos energéticos tanto renovables como de los no renovables y puesto que el análisis exergético emplea los principios de conservación de la masa y energía junto con el segundo principio de la termodinámica resulta un método especialmente adecuado para conseguir un uso de los recursos energéticos de la forma más eficiente, ya que permite determinar la localización, tipo y magnitud real de las pérdidas. La información obtenida de este análisis puede utilizarse en el diseño de estos sistemas térmicos y reducir las fuentes de ineficiencia en estos.

Sin embargo la evaluación final de cualquier proceso debe realizarse en términos monetarios por lo que se introduce y emplea un concepto fundamental en el análisis termoeconómico de los procesos industriales que es el del costo exergético el cual, nos informa de la cantidad real de exergía que ha sido necesaria para producir los flujos internos y productos de un sistema de tal forma, que ahora la función a minimizar será el costo económico de los productos finales.

4.2 Análisis Exergético

La energía se conserva en todo dispositivo o proceso. No se destruye, sin embargo, la idea de conservación de energía por si sola es inadecuada para aclarar algunos aspectos relevantes de la utilización de los recursos energéticos puesto que, el segundo principio de la termodinámica impone ciertas limitaciones a los procesos de transformación energética, reflejados en la pérdida de la utilidad de la energía a causa de la naturaleza irreversible de los procesos. No obstante, esta nos permite cuantificar la mayor o menor irreversibilidad y eficiencia de los procesos a través de la función exergía.

La exergía según Reidestad [vea dentro de (21)], se define como la propiedad de un sistema que cuantifica el máximo trabajo que puede obtenerse cuando, interactuando únicamente con el ambiente, pasa de su estado termodinámico inicial al estado muerto.

La condición de trabajo máximo implica que el proceso realizado para llevar al sistema hasta su estado muerto sea reversible, y por tanto se tiene una definición alternativa de la exergía de los sistemas como sigue:

La exergía de un sistema es el mínimo trabajo técnico necesario para constituirlo a partir del ambiente de referencia.

El ambiente de referencia (AR) para el cálculo de la exergía de un sistema termodinámico estará constituido según Kestin [vea dentro de (21)], por la unión de tres grandes reservorios: un reservorio de energía (foco de calor a T_0), un reservorio de volumen y un reservorio de masa que contiene m especies químicas. El estado intensivo para este ambiente de referencia vendrá fijado por:

- La temperatura ambiente, T_0 , para el reservorio de energía.
- La presión atmosférica, P_0 , para el reservorio de volumen.
- K potenciales químicos, $\mu_{k,00}$, para el reservorio de masa.

La definición del AR incluye la condición de que sus variables extensivas conjugadas, U_{00} , V_{00} , y $\mu_{k,00}$, sean tan grandes, que los reservorios permanezcan en una situación de equilibrio interno durante su interacción con los dispositivos.

Para realizar el análisis exergético de los sistemas de generación propuestos en los capítulos anteriores el AR está definido por las condiciones del lugar en donde se encuentra la granja de la UNAM, los cuales son:

- La temperatura ambiente, $T_0 = 19^\circ\text{C}$, para el reservorio de energía.
- La presión atmosférica, $P_0 = 0.67 \text{ atm}$, para el reservorio de volumen.

No obstante, la evaluación final de cualquier proceso debe realizarse en términos monetarios incorporando el costo de los flujos internos y productos.

4.3. Descripción del Proceso

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo del SCTG. El estiércol recolectado de los establos se diluye con agua en el tanque de mezcla y posteriormente, este se bombea hacia el digestor cuya temperatura se mantiene a 35°C al hacer pasar vapor saturado a 3 bar por un serpentín que se encuentra sumergido en la mezcla de estiércol dentro del digestor. La energía del vapor condensado a la salida del serpentín, es aprovechado para calentar el agua de los baños y cocina de la granja.

Del biogás seco obtenido por digestión, una parte es recirculado al digestor y el resto se emplea como combustible en la MTG (la cual opera en ciclo regenerativo) para producir electricidad. La energía contenida en los gases producto de combustión a la salida de la turbina, son utilizados en un recuperador de calor para generar el vapor saturado que pasa a través del serpentín.

La figura 4.2 representa el diagrama de flujo del SCMCI el cual es semejante al primer sistema con la diferencia de que se cambia la MTG por un MCI. La energía de los gases producto de la combustión del MCI también se emplean para producir vapor saturado en el recuperador. El agua para baños y cocina se calienta al aprovechar el calor del sistema de refrigeración del motor.

4.4. Metodología de Aplicación

En el punto anterior se ha descrito ya los sistemas de cogeneración que se analizarán a continuación.

4.4.1 Definición de la estructura lógica de la planta.

1. Las figuras 4.1 y 4.2 muestran el diagrama de flujo desagregado de los respectivos sistemas de generación en subsistemas o equipos.

2. Matriz de incidencia A asociada. Las Tablas 4.1 y 4.2 representan la matriz de incidencia para cada uno de los sistemas. Esta matriz condensa los equipos principales y los flujos de materia o energía. Así

$$A = [i,j] \text{ donde } i = \text{equipos}$$
$$j = \text{flujos}$$

El valor que se le asigna a los flujos depende de si entra, sale o no conecta con los equipos. Por lo tanto el valor será de

- 1: cuando el flujo j entra en el equipo i
- 1: cuando el flujo j sale del equipo i
- 0: cuando el flujo j no conecta con el equipo i

Así, la matriz de incidencia para cada sistema es:

- Para el SCTG es de $A = [13 \times 30]$ y
- Para el SCMCI la matriz es de $A = [11 \times 30]$.

Cada matriz al final presenta el balance de la planta (PT), del ambiente estado de referencia (AER) y el balance total de la planta y el sistema (BT).

3. Definición Recurso-Producto-Perdidas (R-P-L) que se tiene de cada equipo en función de sus características y del papel que desempeña en el proceso productivo global (Tablas 4.3 y 4.4).
4. Matrices de Recurso, Producto y Perdidas para los sistemas (Tablas 4.3a y 4.4a).

Figura 4.1 Diagrama de Flujo del Sistema de Cogeneración con Turbina de Gas

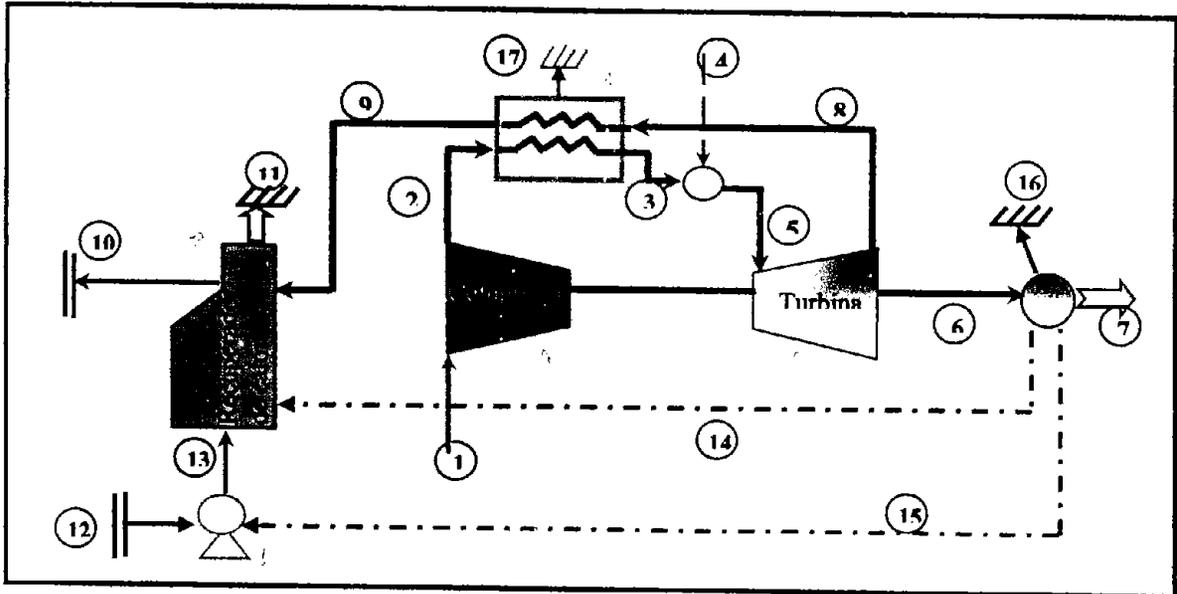


Figura 4.2 Diagrama de Flujo del Sistema de Cogeneración con Motor de Combustión Interna

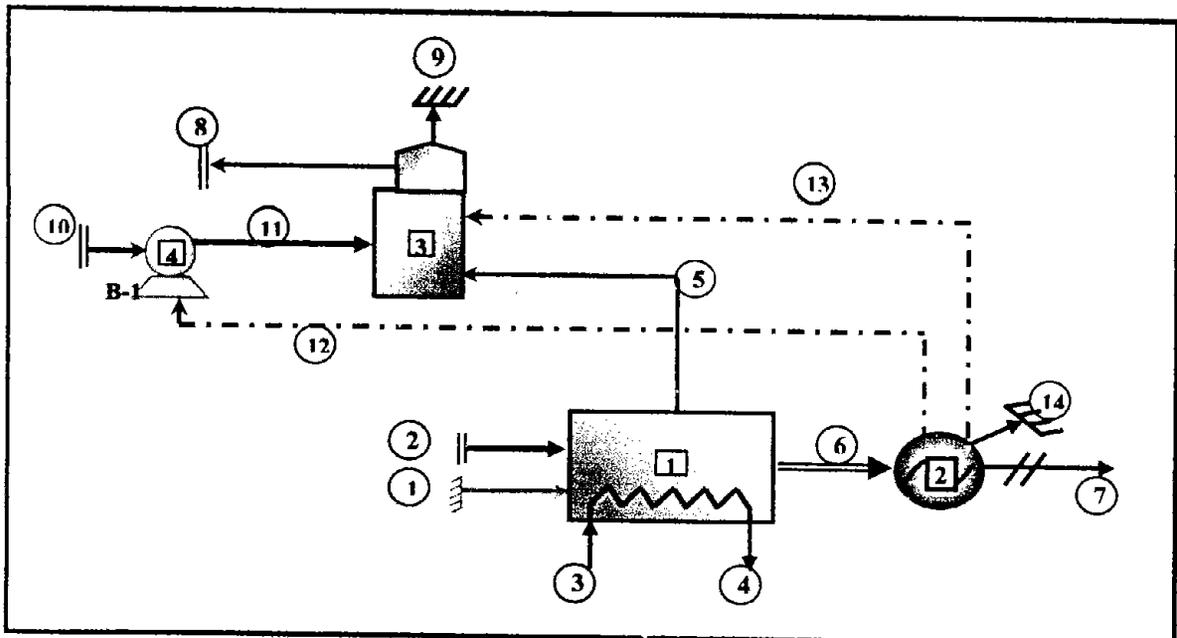


TABLA 4.1 MATRIZ DE INCIDENCIA DEL SISTEMA DE COGENERACION - TURBINA DE GAS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1. Bomba de alimen.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	1	0	0
2. Compresor	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3. Regenerador	0	1	-1	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
4. Camara de comb.	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5. Turbina de gas	0	0	0	0	1	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6. Alternador	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0
7. Recuperador	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	1	1	0	0	-1
Planta Total (PT)	1	0	0	1	0	0	-1	0	0	-1	-1	1	0	0	0	-1	-1
Ambiente Referen (AR)	-1	0	0	-1	0	0	1	0	0	1	1	-1	0	0	0	1	1
Balance Total (BT)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLA 4.2 MATRIZ DE INCIDENCIA PARA EL SISTEMA COGENERACION CON MOTOR DE COMBUSTION INTERNA

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. Motor de combustión I.	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
2. Alternador	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	-1	-1	-1
3. Recuperador	0	0	0	0	1	0	0	-1	-1	0	1	0	1	0
4. Bomba de alimen.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0
Planta Total (PT)	1	1	1	-1	0	0	-1	-1	-1	1	0	0	0	-1
Ambien. De referencia (AR)	-1	-1	-1	1	0	0	1	1	1	-1	0	0	0	1
Balance Total (BT)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLA 4.3 DEFINICIÓN R-P-L PARA EL SISTEMA CON TURBINA DE GAS

	RECURSO (R)					PRODUCTO (P)				PERDIDAS (L)
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	I
Equipos 1				15				13		
2	1					2				
3	(8-9)					(3-2)				
4	3	4								
5	(5-8)							6		
6				6			7	14	15	16
7	(9-11)		(10-13)							11

TABLA 4.4 DEFINICIÓN R-P-L PARA EL SISTEMA CON MCI

	RECURSO (R)					PRODUCTO (P)				PERDIDAS (L)
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	I
Equipos 1	1	2	3						6	
2				6			7	12	13	14
3	(5-9)							(8-11)		9
4										

Falla de origen
Falta la página
71

TABLA 4.5. PROPIEDADES DE LOS FLUJOS DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN CON TURBINA DE GAS

No.	FLUJO	PROPIEDADES TERMODINÁMICAS										COSTOS EXERGETICOS		COSTOS EXERGOECONÓMICOS	
		P bares	T °C	T °K	m kg/s	h kJ/kg	s kJ/kg-K	E kW	B kW	B* kW	II* \$/s	c \$/MJ			
1	Aire atmosférico	0.67	19	292	0.2004	292.30	-	6.34	0.001	0.001	1	0.00	0		
2	Aire comprimido	8.48	377.68	651	0.2004	660.84	-	85.50	31.17	0.001	0	0.00	0		
3	Aire comp. Precaalentado	8.48	426.01	699	0.2004	712.50	-	97.65	38.86	0.002	0	0.00	0		
4	Biocombustible	0.68	19	292	0.0044	-	-	81.42	82.25	82.25	1	0.11	1		
5	Gases de combustión	8.48	747.22	1020	0.2004	1073.70	-	179.08	100.12	82.25	1	0.11	1		
6	Potencia bruta	-	-	-	-	-	-	19.10	19.10	64.95	3	0.08	4		
7	Potencia para la granja	-	-	-	-	-	-	17.83	17.83	55.92	3	0.07	4		
8	Gases de salida de TG	0.67	306.83	579.98	0.2004	588.61	-	160.37	21.06	17.30	1	0.02	1		
9	Gases salida del precalent.	0.67	259.63	532.78	0.2004	536.98	-	138.46	15.18	17.30	1	0.02	1		
10	Vapor	3.00	150.00	423	0.0087	2760.43	7.08	23.24	6.03	27.24	5	0.04	6		
11	Gases a la atmósfera	0.67	180	453.15	0.2004	433.86	-	120.29	7.10	0	0	0.00	0		
12	Condensado	2.62	79.44	353	0.0087	332.68	1.07	2.19	0.20	0.90	5	0.00	6		
13	Agua de alimentación	3.00	90	363	0.0087	377.12	1.19	2.58	0.27	2.11	8	0.00	10		
14	Alimentac. Recuperador	-	-	-	-	-	-	2.50	2.50	7.83	3	0.01	4		
15	Alimentación bomba	-	-	-	-	-	-	0.39	0.39	1.21	3	0.00	4		
16	Perdidas en alternador	-	-	-	-	-	-	0.90	0.00	0	0	0.00	0		
17	Perdidas precalentador	-	-	-	-	-	-	9.75	0.00	0	0	0.00	0		

*Dólares

TABLA 4.6. PROPIEDADES DE LOS FLUJOS DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN CON MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

No.	FLUJO	PROPIEDADES TERMODINÁMICAS										COSTOS EXERGETICOS		COSTOS EXERGOECONÓMICOS	
		P bares	T °C	T K	m kg/s	h kJ/kg	s kJ/kg-K	E kW	B kW	B* kW	II* \$/s	c \$/MJ			
1	Aire atmosférico	0.67	19	292	0.0392	709.05	-	1.24	0	0	1	0.00	0.0		
2	Biocombustible	-	19	292	0.0029	-	-	53.12	53.66	53.66	1	0.07	1.3		
3	Agua de refrigeración	-	40	313	0.01098	167.45	0.57	0.96	0.032	0.00	0	0.00	0.0		
4	Agua salida	-	76	349	0.01098	318.13	1.027	2.62	0.226	0.00	0	0.00	0.0		
5	Gases de combustión	1.40	337	610	0.0392	860.83	-	28.63	4.93	4.22	1	0.01	1.1		
6	Potencia bruta	-	-	-	-	-	-	24.15	24.15	49.44	2	0.06	2.7		
7	Potencia para la granja	-	-	-	-	-	-	17.83	17.83	47.44	3	0.06	3.4		
8	Vapor	3	150	423.15	0.0030	2760.43	7.08	8.06	2.09	6.50	3	0.01	4.0		
9	Gases a la atmósfera	1.40	120	393.15	0.0392	449.29	-	22.21	0.547	0.00	0	0.00	0.0		
10	Condensado	-	89.5	362.65	0.0030	374.84	1.19	0.89	0.09	0.29	3	0.00	4.0		
11	Agua de alimentación	3	90	363.15	0.0030	561.43	1.19	1.45	0.57	1.78	3	0.00	4.0		
12	Aliment. Bomba	-	-	-	-	-	-	0.56	0.56	1.49	3	0.00	3.4		
13	Aliment. Recuperador	-	-	-	-	-	-	0.19	0.19	0.51	3	0.00	3.4		
14	Perdidas en el alternador	-	-	-	-	-	-	2.26	0.00	0.00	0	0.00	0.0		

4.4.2 Cálculo de la exergía de todos los flujos

Las tablas 4.5 y 4.6 presentan los valores de las propiedades termodinámicas de los flujos y de la exergía de cada uno de ellos. A continuación se describe la forma en que se calcularon algunos flujos del sistema que se consideran relevantes en éste punto.

1. La exergía del combustible en este caso del biogás se determina a partir del procedimiento para mezclas gaseosas de combustibles partiendo del conocimiento del análisis elemental del combustible y del dato de su poder calorífico.

El cálculo de las propiedades termodinámicas del combustible, compuesto por una mezcla de gases ideales, se realiza de acuerdo con la ley de Gibbs-Dalton a partir de las expresiones siguientes en las que X_i es la fracción molar del componente i de la mezcla (para más detalles ver el calculo de la energía y exergía para el flujo 4 que se presentan en el anexo 3):

$$\hat{h}^0 = \frac{1}{\alpha} \sum_{n=1}^n X_i h_i^0 \quad (4.1)$$

$$\hat{s}^0 = \frac{1}{\alpha} \sum_{n=1}^n X_i [s_i^0 - R \ln x_i] \quad (4.2)$$

La exergía del combustible en base molar vendrá dada por:

$$\hat{b}_0 = \hat{h}_0 - T\hat{s}_0 - g_{00} = \left[\frac{\text{cal}}{\text{molC}} \right] \quad (4.6)$$

3. La energía contenida en los gases de combustión se determinaron a partir de la suma de la energía aportada por el aire después de pasar por el cambiador que se encuentra dentro del sistema de la turbina (recordemos que esta opera en ciclo regenerativo) y la energía aportada por el combustible en forma de calor. Las exergías física y química se determinan a partir de las siguientes ecuaciones.

$$b_f = \int_{T_0}^T Cp \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) dT = \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right] \quad (4.7)$$

$$Cp = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 = \left[\begin{array}{c} \text{kJ} \\ \text{kmol} \end{array} \right] \quad (4.8)$$

$$h_u = RT_0 \left(Y_{N_2} \ln \frac{Y_{N_2}}{x_{N_2,0}} + Y_{O_2} \ln \frac{Y_{O_2}}{x_{O_2,0}} + Y_{H_2O} \ln \frac{Y_{H_2O}}{x_{H_2O}} \right) = \left[\begin{array}{c} \text{kJ} \\ \text{kmol} \end{array} \right] \quad (4.9)$$

4.4.3 Aplicación de las reglas de asignación de costes.

Empleando el procedimiento racional de asignación de costes formulado por Valero (21), basado únicamente en la termodinámica, determinaremos el valor de los costes exergéticos de los flujos, recursos y productos, de nuestro proceso.

Con la aplicación de estas reglas, se obtendrá la matriz de costes \mathbf{A} del sistema y el vector de valoraciones externas \mathbf{Y}^* . El sistema de ecuaciones resultante $\mathbf{A} \times \mathbf{B}^* = \mathbf{Y}^*$ es el siguiente.

- Sistema de ecuaciones para el sistema de cogeneración con micro turbina de gas.

1. Balances de coste exergético :

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B}^* = 0 \quad (\text{Ecuaciones 1 a 7})$$

2. Ecuaciones auxiliares

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B}^* = \omega_j \quad (\text{Ecuaciones de 8 a 17})$$

- Propuesta 2

$$\text{Equipo 3.} \quad \begin{array}{l} B_2^* - B_3^* \\ B_2 - B_3 \end{array} = 0 \quad 8$$

$$\text{Equipo 5.} \quad \begin{array}{l} B_5^* - B_8^* \\ B_5 - B_8 \end{array} = 0 \quad 9$$

- Propuesta 3a.

$$\text{Equipo 6.} \quad \begin{array}{l} B_7^* - B_{14}^* \\ B_7 - B_{14} \end{array} = 0 \quad 10$$

$$\begin{array}{l} B_7^* - B_{15}^* = 0 \\ B_7 - B_{15} \end{array} \quad 11$$

- Propuesta 4

Equipo 3 $B_{17}^* = 0$ 12

Equipo 6 $B_{16}^* = 0$ 13

Equipo 7 $B_{11}^* = 0$ 14

- Propuesta 5

Equipo 2 $B_1^* = B_1$ 15

Equipo 8. $B_4^* = B_4$ 16

$$\begin{array}{l} B_{10}^* - B_{12}^* = 0 \\ B_{10} - B_{12} \end{array} \quad 17$$

- Sistema de ecuaciones complementarias sistema motor de combustión interna.

1. Balances de coste exergético:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B}^* = 0 \quad (\text{Ecuaciones 1 a 4})$$

2. Ecuaciones auxiliares

$$\alpha \times \mathbf{B}^* = \omega_z \quad (\text{Ecuaciones de 5 a 14})$$

- Propuesta 2

Equipo 1. $\begin{array}{l} B_{13}^* - B_{14}^* = 0 \\ B_{13} - B_{14} \end{array}$ 5

Equipo 3. $\begin{array}{l} B_{11}^* - B_8^* = 0 \\ B_{11} - B_8 \end{array}$ 6

$$\begin{array}{l} B_8^* - B_{10}^* = 0 \\ B_8 - B_{10} \end{array} \quad 7$$

- Propuesta 3a.

$$\text{Equipo 2.} \quad \begin{array}{l} B_7^* - B_{12}^* = 0 \\ B_7 - B_{12} \end{array} \quad 8$$

$$\begin{array}{l} B_7^* - B_{13}^* = 0 \\ B_7 - B_{13} \end{array} \quad 9$$

- Propuesta 4

$$\text{Equipo 2} \quad B_{14}^* = 0 \quad 10$$

$$\text{Equipo 3} \quad B_9^* = 0 \quad 11$$

- Propuesta 5

$$\text{Equipo 1.} \quad B_1^* = B_1 \quad 12$$

$$B_2^* = B_2 \quad 13$$

$$B_8^* = B_8 \quad 14$$

4.4.4 Cálculo de los costos exergéticos.

Las tablas 4.5 y 4.6 presentan los costos energéticos de los flujos, de ambos sistemas de generación, los cuales se emplearon para calcular posteriormente los costes exergéticos de los recursos y productos de los equipos, así como los costos energéticos unitarios de todos ellos.

$$\begin{array}{ll} \mathbf{B}^* = \mathbf{A}^{-1} \times \mathbf{Y}^* & k_j^* = \frac{B_j^*}{B_j} \\ \mathbf{F}^* = \mathbf{A}_F \times \mathbf{B}^* & k_{F,i}^* = \frac{B_i^*}{B_i} \\ \mathbf{P}^* = \mathbf{A}_P \times \mathbf{B}^* & k_{P,i}^* = \frac{B_i^*}{B_i} \end{array}$$

4.4.5 Cálculo de los costos exergoeconómicos

En función de la información económica necesaria se determino el vector **Z** de valoración externa (Tabla 4.7 y 4.8), tras lo cual se determinan los costos exergo económicos globales y unitarios de los flujos, recursos y productos (Tabla 4.5 y 4.6).

$$|| = \mathbf{A}^{-1} \times \mathbf{Z}$$

$$||_{F,i} = \mathbf{A}_F \times ||$$

$$c_{F,j} = \frac{\Pi_{F,j}}{F_j}$$

$$||_{P,i} = \mathbf{A}_P \times ||$$

$$c_{P,j} = \frac{\Pi_{P,j}}{P_j}$$

Para determinar los costos del capital para cada uno de los equipos se recurre a los costos proporcionados en el análisis económico (capítulo anterior) y estos se dividen entre el tiempo de vida útil de cada uno de ellos. Por ejemplo el costo del tanque de mezcla sin considerar la bomba de estiércol es de \$1709 y tiene un tiempo de vida útil estimado en 25 años por lo que su costo de capital es de 68\$/año.

Como el costo total de la turbina es de \$21000 y ésta se desagregó para su análisis se asignó un porcentaje a cada uno de los componentes que la constituyen. (Compresor 16%, precalentador 7%, cámara de combustión .9% y turbina 76%) para determinar su costo unitario además, a los equipos como el compresor, la turbina y el recuperador se le adicionó un costo por mantenimiento.

Los primeros 7 y 4 datos de la valoración económica externa (**z**) que corresponde al número de equipos de cada uno de los sistemas, se evalúan en base a los costos del capital y las horas de servicio al año de la planta. Y las demás **z** se calculan en base al los costos unitarios (\$/kJ exergía) de los insumos como el combustible, el aire, el agua desmineralizada y el agua cruda. Se asigna el valor de cero a las demás **z**.

TABLA 4.7 SUPUESTOS ECONÓMICOS PARA EL SCTG.

1. Costo del capital	\$/año	Valoración externa \$/seg
Bomba 2	1.23	$z_1 = 2.28E-06$
Compresor	188.40	$z_2 = 3.06E-06$
Precalentador	72.60	$z_3 = 1.79E-05$
Cámara de combustión	7.66	$z_4 = 7.57E-06$
Turbina	820.94	$z_5 = 4.12E-08$
Alternador	337.00	$z_6 = 3.45E-05$
Recuperador	260.60	$z_7 = 3.06E-06$
		$z_8 = 3.08E-06$
		$z_2, z_{15}, z_{16}, \dots, z_{30} = 0$
2. Costo de operación y mantenimiento	39.59 \$/año	
3. Horas de servicio	8322 h/año	
4. Costo unitario del combustible	1.3E-03 \$/kJ de exergía	
5. Costo unitario del aire	1E-07 \$/kJ de exergía	
6. Costo del agua desmineralizada	3E-06 \$/kJ de exergía	

TABLA 4.8 SUPUESTOS ECONÓMICOS PARA EL SCMCI.

1. Costo del capital	\$/año	2. Valoración externa
Motor de combustión interna	997.50	$z_1 = 3.30E-3$
Alternador	23.24	$z_2 = 7.80E-7$
Recuperador	260.60	$z_3 = 8.70E-6$
Bomba 2	1.23	$z_4 = 8.23E-08$
		$z_5 = 1E-7 * B_1 = 2E-11$
		$z_6 = 1.3E-3 * B_2 = 6.90E-2$
		$z_7 = 3.4E-6 * B_{11} = 1.95E-06$
		$z_{12}, z_{15}, z_{16}, \dots, z_{30} = 0$

4.5 Análisis de Resultados

De los resultados obtenidos de este análisis podemos ver que el costo exergético unitario del vapor saturado producto del recuperador es cerca de 2 unidades mayor en el sistema con turbina de gas que en del sistema con motor. También se observa que los costos exergéticos unitarios de la generación eléctrica en ambos sistemas son iguales. Del análisis de resultados observamos que el sistema de generación que hace un uso más eficiente de los recursos energéticos es el que emplea un motor de combustión interna.

De acuerdo con el objetivo planteado por esta tesis de autoabastecer energéticamente a una pequeña granja empleando biomasa o energía solar a través de un sistema de generación que sea técnica y económicamente factible. Para cumplir con dicho objetivo, se propuso comparar dos sistemas de generación: uno por combustión del biogás recuperado por digestión anaerobia del estiércol y otro empleando paneles fotovoltaicos.

Para el sistema de recuperación de biogás se eligió un digestor del tipo “flujo pistón” con agitación por recirculación de gas cada 5 horas, 15 días de tiempo de retención de los lodos y calentado con vapor que circula a través de un intercambiador en forma de serpentín colocado en su interior. Bajo estas condiciones de operación y en base a la cantidad de estiércol generado se obtienen cerca de 365m^3 de biogás seco por día.

De los datos energéticos de la granja se estimo una demanda promedio de 17.80kW y cerca de 6225 kWh de consumo mensual de energía eléctrica. El costo de facturación promedio mensual del año base (2003) ascendió a \$8,126 (US\$712.80), con una tarifa eléctrica actual de 0.92¢/kWh (0.81US\$/kWh).

Con respecto al sistema de generación con biogás, se planteo la opción de quemar el gas ya sea en una microturbina de gas marca CAPSTON con una potencia en condiciones ISO de 30 kWe o en un motor de combustión interna marca OLYMPIAN de 28 kWe. La potencia neta en sitio es de 18.20 kWe para la microturbina y de 21.90kWe para el motor. La energía de los gases de combustión se usa para generar vapor saturado empleando un recuperador de calor. Este vapor se utiliza para mantener la temperatura del digestor y para calentar agua en la granja. Al transformar estos simples sistemas de generación eléctrica en sistemas de cogeneración, se obtiene una eficiencia de cogeneración del 25% para el sistema con turbina de gas y del 36.70% para el sistema con motor.

Cabe mencionar que la energía generada por el sistema con turbina de gas (18.20kWe), no cubre la demanda eléctrica total del sistema la cual, es de 20.80kWe. Dicha demanda, es la suma de la demanda promedio de la granja (17.80kWe) y la de los equipos adicionales del sistema de generación (una bomba y un recuperador de calor) estimada en 3kWe.

Es decir que la energía obtenida en este sistema no cubre 2.60kWe por tanto, se opta por comprar este faltante a Luz y Fuerza del Centro.

Para el sistema fotovoltaico se eligió un sistema autónomo de configuración "*cargas de corriente directa y continua, con baterías, controlador de carga e inversor*". Según cálculos, el número de paneles requeridos es de 320 paneles del tipo policristalino de 160W de potencia máxima, para abastecer el consumo promedio diario de la granja (204.70kWh/día). Estos paneles conectados en serie o en paralelo conforman cerca de 32 módulos fotovoltaicos conectados en serie. Para almacenar energía eléctrica y garantiza el suministro durante la noche y días nublados de los refrigeradores y congeladores de la granja se requiere de cerca de 24 baterías estacionarias de 12V y 100Ah (para una reserva de tres días).

Con lo que respecta a la evaluación económica para las bases de la evaluación, se propuso una vida económica del proyecto de 25 años, un tiempo de operación del sistema de 8,322 h/a, una TREMA del 12% y un costo de operación y mantenimiento de 0.005US\$/kWh.

Los costos de inversión total para cada uno de los sistemas se estiman en US\$56,476 para el sistema con microturbina, para el sistema con motor en US\$55,006 y para el sistema fotovoltaico en US\$866,917. Podemos observar como los costos de inversión del sistema fotovoltaico superan a los de los otros dos sistemas en poco más de 15 veces.

Los resultados de los indicadores económicos para el sistema con turbina de gas, con motor y para el sistema fotovoltaico se enumeran a continuación: para el VPN se tiene US\$11,462; US\$7,341 y -206,372. Para la TIR en el mismo orden, se tiene 14.40%, 13.60% y -1.27%. Con lo que se refiere al índice de utilidad tenemos 0.14, 0.10 y -0.70 para cada uno. La relación beneficio costo es de 1.20%, 1.10% y 0.26% y finalmente el periodo de recuperación es 16, 18 y 69 años respectivamente.

CONCLUSIÓN

De estos resultados podemos observar que el pretender satisfacer los requerimientos de energía eléctrica de la granja empleando tecnología fotovoltaica es económicamente inviable. Por lo tanto este sistema queda completamente descartado.

De la evaluación de los beneficios considerados estos como los ingresos por capacidad eléctrica ascienden a US\$12,188 anuales para el sistema con turbina de gas y de US\$10,732 para el sistema con motor. Otros beneficios adicionales que se tendrían al implantar alguno de los sistemas con biogás, son los bajos precios de generación de la electricidad comparados con los costos actuales de suministro por red de 0.081US\$/kWh. Para ambos sistemas de generación con biogás, el precio por kWh que se ofrece es de 0.70¢doll.

Adicionalmente en el cuarto capítulo que es una aplicación del análisis termoeconómico, se presentan los valores de la cantidad real de exergía que ha sido necesaria para producir los flujos internos del sistema de generación y de los productos. También, dicho análisis, nos proporciona el costo exergético de cada flujo y productos del sistema de tal forma, que ahora la función a minimizar será el costo económico de los productos finales. Este análisis, sólo se hace para las alternativas que emplean biogás.

Del análisis de los resultados arriba presentados y de acuerdo con el objetivo planteado de abastecer a la granja de energía eléctrica empleando fuentes renovables de energía a través de un sistema de generación técnica y económicamente factible, se recomienda implantar el "Sistema de Cogeneración con Turbina de Gas" puesto que es el proyecto más rentable al presentar indicadores económicos más atractivos comparados con los del sistema de cogeneración con motor de combustión interna.

El uso del biogás para la generación de electricidad da un valor adicional al empleo de biodigestores en las empresas agropecuarias. Aunque los resultados económicos no se pueden generalizar pues cambiarán de acuerdo a las circunstancias de cada lugar, en el presente trabajo la utilización del biogás tanto en turbinas de gas como en motores diesel para generación de electricidad presenta importantes beneficios económicos además de las ventajas anteriormente mencionadas.

La implantación de un sistema con biogás en la granja del CEPIPSA se lograría una disminución del 86% en los costos del kWh al compararse con los costos actuales de la energía suministrada a través del sistema de interconexión, demostrando la factibilidad de integrar la producción de alimentos y energía de una manera sostenible para esta industria.

Otros beneficios adicionales que implica la utilización de biodigestores son que esta ofrece grandes ventajas para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias, pues además de extrae gran parte de la energía contenida en el material, disminuye la carga contaminante de las mismas, sin afectar (o inclusive mejorando) su valor fertilizante y controlando de manera considerable los malos olores.

Algunas sugerencias que se hacen para reducir el costo del sistema de recuperación del biogás, es que esté se sea dimensionado, diseñado y construido por técnicos mexicanos innovando tecnología ya probada o de experiencias que se tienen en este campo como por ejemplo el del proyecto de cogeneración de energía con excremento de ganado bovino lechero en Tizayuca, Hidalgo que actualmente se encuentra en construcción (22). El digestor anaerobio procesará el estiércol de 30,000 vacas recuperando cerca de 36.1 millones de metros cúbicos de biogás al año y quemarlo en 5 motores a biogás de 2.1MW cada uno, 3 motores diesel (con combustóleo) de 18.9MW cada uno y una turbina de vapor de 7.8MW en total 75MW con una inversión de US\$61 millones. También, los lodos digeridos pueden comercializarse con los agricultores de la zona lo cual traería un ingreso extra a las granjas.

Biogás: con este término, se designa a la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por la acción bacteriana en condiciones anaerobias.

Ácidos grasos: ácidos orgánicos con cadenas de carbono largas.

Anaerobio: capaz de vivir sin oxígeno.

Fermentación: descripción de la producción de varios compuestos, como los antibióticos, en birreactores. Se puede también referir a la glucólisis.

Fermentador: recipiente en el que se lleva a cabo las fermentaciones, conocido frecuentemente como bioreactor.

Potencial rédox: el potencial de oxirreducción, traduce la tendencia de una solución (o de un medio de cultivo) a dar o aceptar electrones.

Cogeneración: conjunto de equipos interconectados que permiten generar secuencialmente energía eléctrica o mecánica y energía térmica, útiles a los procesos industriales a partir de una misma fuente de energía primaria.

Balance del sistema (BOS): Elemento de un sistema fotovoltaico que no forma parte del conjunto fotovoltaico.

Controlador de carga: componente de un sistema fotovoltaico que controla el flujo de corriente que entra y sale de la batería para protegerla de la carga excesiva y de la descarga.

Corriente alterna (ca): corriente eléctrica en la cual la dirección del flujo es invertida a intervalos frecuentes; 60 ciclos por segundo es usado en nuestro país.

Corriente continua (cc): corriente eléctrica en la cual el flujo de los electrones circula solamente en una dirección. Este es el tipo de corriente producido por un sistema de energía solar.

Energía renovable: flujos de energía que son virtualmente inagotables.

1. Fridleifsdottir, S. "Rompiendo los atascos", **Nuestro Planeta PNUMA**, 12 (1), 2001, pp6-7.
2. Aguilar, J., "La Conversión Bioenergética de la Radiación Solar y las Biotecnologías", ALHAMBRA, S.A., 1985, España, 407p.
3. Liras, P. "Biotecnología Básica", ECRIBIA, S.A., Zaragoza, España, 1991, 337-357p.
4. Hidalgo M. del C., "Biotecnología", 2da, El Manual moderno, México, 1985, 669p.
5. Morfaux, J. N. y Albagnac, G., "Épuration et Valorisation Énergétique des eaux résiduaires de conserverie de légumes" cuaderno de CENECA, 423,1980, 1-5p
6. Nelson C. y Lamb J. "Haubenschild Farms Anaerobic Digested", The Minnesota Project, August 2002, 35p.
7. Werner U, Stöhr U, Hees N, "Biogas plants in animal husbandry2", Lengericher Handelsdruckerei, Lengerich, Alemania 1989.
8. National Renewable Energy Laboratory, "Methane Recovery from Animal Manures the Current Opportunities Casebook", NREL/SR-580-25145, Washington, DC, September 1998.
9. Shell Briefing Services, "Renewable Energy", **Shell International Petroleum Company Ltd**, No.1, April 1994, pp 1-13.
10. A.B. Meinel y M.P. Meinel, "Aplicaciones a la Energía Solar", Reverté, S.A., 1982, España, 699p.
11. Estados Unidos de América, Departamento de Energía de los Estados Unidos DOE, "Energía Solar Fotovoltaica para Proyectos de Desarrollo", sept. 1994, 45p
12. CODESO, *Energía Solar Fotovoltaica*. Generalidades de la energía solar fotovoltaica [WWW] <<http://www.codeso.com/EnergíaSolar1.html>>Ene. 9,2004.
13. UNAM Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Centros de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Animal, México 2002.
14. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, Conae. Energías Renovables, Fotovoltaica. *Irradiación en la República Mexicana*, [WWW] <<http://www.conae.gob.mx/wb/>>Jun.25,2004

15. Almacenamiento del Estiércol del Ganado. Factores que afectan las características del estiércol. [WWW]
<<http://pasture.ecn.purdue.edu/~epados/farmstead/manure/spanish/src/char.htm>>Jul. 4,2004
16. PECOM Microturbinas.htm. Productos y Servicios, Microturbinas. [WWW]
<<http://www.generaciondistribuida/GenDis/ProdSer/>>Ene. 27, 2004
17. LP & Natural Gas Generating Set, <http://www.CAT-ElectricPower.com>
18. M.J. Moran, H.N. Shapiro, “Fundamentos de Termodinámica Técnica”, Tomo I y II, Reverté S.A., 1995, España, pp 1-429 y 432-943.
19. Módulo Fotovoltaico Policristalino <http://www.bpsolar.com>
20. Coss Bu Raúl, “Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión”, 2da., LIMUSA, México, D.F., 2001, 373p.
21. A. Valero Capilla y M.A Lozano Serrano, “Curso de Termoeconomía”, Vol. 2, Departamento de Ingeniería Mecánica -Área de Máquinas y Motores Térmicos, Centro Politécnico Superior de Ingenieros, Zaragoza España, 1994, 237p.
22. Tratimex, S.A. de C.V., octubre 2002, [WWW]
<<http://www.conae.bob.mx/work/secciones/1756/imagenes/ricardoromero.pdf>>,

ANEXO 1

CÁLCULOS DE LA ESTIMACIÓN DEL BIOGÁS

RECUPERADO Y OTROS

1. CARACTERISTICAS DEL ESTIERCOL

TABLA 3.2

Peso del Animal (lb)	Ganado lechero					Ganado de carne					Borregos	
	1200	1500	1800	2100	2400	500	750	1000	1250	Cow	100	
Producción diaria	lb/día	12	20	41	82	115	30	45	60	75	63	8
	ft ³ /día	0.19	0.32	0.66	1.32	1.85	0.5	0.75	1	1.25	1.05	0.12
Contenido de agua	(%)	87.3	87.3	87.3	87.3	87.3	88.4	88.4	89.4	90.4	91.4	75
	(lb/ft ³)	62	62	62	62	62	60	60	60	60	60	65
Densidad	kg/m ³	993.0508	993.05	993.0508	993.1	993	961.017	961.017	961.017	961.02	961.02	1041.1

Fuente: <http://pasture.ecn.purdue.edu/~epados/farmstead/manure/spanish/src/char.htm>

2.- BIOGAS SECO GENERADO

TABLA 3.3

Ganado	Peso prom (kg)	Deyecciones (kg/día)	DEYEC (m ³ /día)	Solidos totales	No. De Animales	kg de Materia Org. Seca / día	kg de MO Humeda/ día	m ³ de Biogas/ kg de MO ^a	m ³ de Biogas seco/ día
Borregos	50	4	0.0038	1	140	140	560	0.61	85.4
Cabras	45	3.6	0.0554	0.9	170	153	612	0.61	93.33
Vacas	450	36	0.0363	4.57	48	219.46	1728	0.86	166.73
TOTAL	545	43.6	0.0955	6.47	358	512.48	2900	2.08	387.48

^a Vea tabla 2 del capítulo 1

3. PRODUCCION BRUTA MENSUAL DE BIOGAS

MES	PGB ¹ (m ³)	Energía ² (kWh)	Consumo registrado ³ (kWh)	Demanda Base (kW)
Enero	11391.33	69373.18	10140	17
Febrero	10288.94	62659.65	4980	20
Marzo	11391.33	69373.18	4800	20
Abril	11023.86	67135.34	4680	17
Mayo	11391.33	69373.18	5700	20
Junio	11023.86	67135.34	10740	17
Julio	11391.33	69373.18	5340	20
Agosto	11391.33	69373.18	5340	17
Septiembre	11023.86	67135.34	5880	17
Octubre	11391.33	69373.18	6000	15
Noviembre	11023.86	67135.34	6180	17
Diciembre	11391.33	69373.18	4920	17
Prom. Mens	11176.97	68067.77	6225	17.83

¹ PGB: Biogas obtenido de la Planta generadora² Energía mensual obtenida del metano recuperado³ Consumo registrado por la granja en el año 2003⁴ Demanda Base Facturable en el año 2003 por la granja

Producción de biogas seco

m³/día = **387.48**

kg/día = 100.51

kg/s = 0.0051

ρ = 1.1934 kg/m³

Equivalencia eléctrica

1000 Kcal = 1.16 kWh

Tomando como poder calorífico medio del biogas

5250 kcal/m³ (que corresponde, a un 65% de CH₄)

4. DISTRIBUCIÓN DEL BIOGAS RECUPERADO

4a. El Biogas requerido por el ciclo de generación eléctrica es:

	Turbina	MCI	
V _{BIOCOM} =	13.33	8.70	m ³ /h
V _{BIOCOM} =	320.04	208.80	m ³ /día

4b. Biogas recirculado al digestor

V_{BIO-RECIR} = 47.42 156.66 m³/día

4. VOLUMEN DEL DIGESTOR

De la ecuación 1.1 del capítulo 1

$$HRT = \frac{V_D}{V_R}$$

Donde:

HRT = Tiempo de retención hidráulica

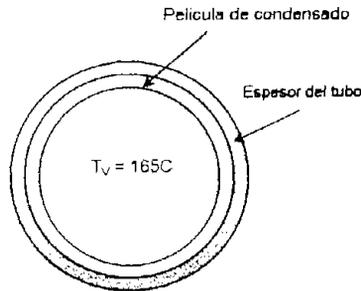
V_D = Volumen del digestorV_R = Volumen diario de residuos

Para un HRT = 15 días
 y un V_R = 11.89 m³/día
 Despejando V_D = 175.40 m³
 V_D = 210.48 m³ (con un 20% adicional)
 V_D = 212 m³ (redondeando)

5. CALOR CEDIDO AL DIGESTOR - SISTEMA CON TURBINA DE GAS

Propiedades Vapor

m_v (kg/s) =	0.01
T_v (K) =	423.15
P (bar) =	3
h_g (kJ/kg) =	2163.23
ρ (kg/m ³) =	3.67
α =	0.33
g (m/s ²) =	9.81



Datos del serpentín

L_T =	75.40 m	247.37 ft
D.N =	1 in	Cedula 40
D.O =	1.32 in	0.0334 m
Wall =	0.13 in	0.00338 m
D.I =	1.05 in	0.02664 m
d_s =	6 m (diámetro del serpentín)	
N_v =	4 (núm. vueltas del serpentín)	
A =	6.31 m ²	

Propiedades del vapor:

m ... T_v



Propiedades del digestor

m ... T_v

Propiedades de la transferencia de calor

Datos de la mezcla

T_{s1} =	20	C =	293.2 K
T_{s2} =	35	C =	308.2 K
C_{pM} =	4.09		kJ/kg K
ρ_s =	1017.076		kg/m ³
m =	2900		kg

5a. Calor transferido por el vapor

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} = m_v \cdot h_{fg}$$

$$q = 18.75 \text{ kW} \quad \text{El calor cedido por el vapor es el ganado por la mezcla}$$

5b. Calculo del Coeficiente global de transferencia de calor

$$U = \frac{q_v}{A \cdot \Delta T_{lm}}$$

$$U = 82.29 \text{ kJ/h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

5c. Calculo del tiempo requerido para alcanzar la T_1 del digestor

De la relación entre temperatura del Digestor y el tiempo dada por

$$\theta = \frac{BC_s}{U \cdot A} \ln \left(\frac{T_v - T_{s1}}{T_v - T_{s2}} \right) = \begin{matrix} 2.80 \text{ h} \\ 168.16 \text{ min} \end{matrix}$$

6. CALCULO DE LA CAIDA DE PRESIÓN EN EL SERPENTIN

6a. Calculo del número de Reynolds

$$Re = \frac{6.31 m_v}{d \mu} = 27593.97$$

$$m = 68.81 \text{ lb/h} \quad \mu = 0.015 \text{ cp}$$

Por tanto el factor de fricción es: $f = 0.028$

6b. Caída de presión

$$\Delta P = 3.36 v - 6 \frac{f L m_v^2 \sqrt{v}}{d^5} = 0.38$$

$$v = 0.27 \text{ m}^3/\text{kg}$$

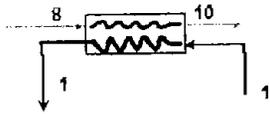
$$v = 4.37 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

Y la presión del condensado a la salida del serpentín es:

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$$P_2 = P_1 - \Delta P = 2.62 \text{ bares}$$

7. ENERGIA REQUERIDA PARA CALENTAR AGUA SISTEMA CON TURBINA DE GAS



Corriente	Descripción	T (°)	P (bar)	h (kJ/kg)	m (kg/s)
8	Condensado proveniente del digestor	150	2.62	632.15	0.009
10	Condensado	79.44	2.62	332.68	0.009
A	Agua fría para baños y cocina	19	1.00	79.77	0.001
B	Agua caliente para baños y cocina	100	1.00	2676.18	0.001

Balace de energía en el calentador

$$m_A h_A + m_B h_B = m_{10} h_{10} + m_8 h_8$$

Despejamos h_B

$$h_{10} = \frac{m_A h_A + m_B (h_8 - h_B)}{m_{10}} = 332.68 \text{ kJ/kg}$$

Con P_{10} y h_{10} obtenmos la T_{10}

8. CALOR CEDIDO AL DIGESTOR - SISTEMA CON MOTOR DE COMBUSTION INTERNA

Propiedades	Vapor	Líquido*
m (kg/s) =	0.003	
T (K) =	423	
P (bar) =	3	
h_D (kJ/kg) =	2163.23	
ρ (kg/m ³) =	1.16	987
v (m ² /s) =		5.37E-07
α =	0.33	
k (W/mK) =		0.65

*Para evaluar la fase líquida

$$T_s = T_u + \alpha(T_{sv} - T_u) = 336.05 \text{ K}$$

8a. Calor transferido por el vapor

$$q = UA \Delta T_{lm} = m_v h_{fg}$$

$$q = 6.51 \text{ kW}$$

El calor cedido por el vapor es el ganado por la mezcla del digestor

8b. Calculo del Coeficiente global de transferencia de calor

$$U = \frac{q}{A \Delta T_{lm}} = 28.55$$

8c. Calculo del tiempo requerido para alcanzar la T_s del digestor

De la relación entre temperatura del Digestor y el tiempo dada por

$$\theta = \frac{BC_v}{UA} \ln \left(\frac{T_v - T_{s1}}{T_v - T_{s2}} \right) = \begin{matrix} 8.08 \text{ h} \\ 484.75 \text{ min} \end{matrix}$$

9. CALCULO DE LA CAIDA DE PRESIÓN EN EL SERPENTIN

9a. Calculo del número de Reynolds

$$Re = \frac{6.31 m_y}{d \mu} = 9572.272$$

$$m = 23.87 \text{ lb/h}$$

$$A, T = 423 \text{ K} \quad \mu = 0.015 \text{ cp}$$

Por tanto el factor de fricción es $f = 0.031$

9b. Caída de presión

$$\Delta P = 3.36e - 6 \frac{f l m^2 V'}{d^5} = 0.16$$

$$V = 0.86 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V = 13.84 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

Y la presión del condensado a la salida del serpentín es :

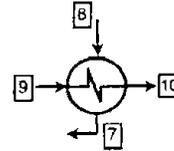
$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$$P_2 = P_1 - \Delta P = 2.84 \text{ bares}$$

10. ENERGIA REQUERIDO PARA CALENTAR AGUA SISTEMA CON MOTOR

TABLA 2.10

Corriente	Descripción	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	m (kg/s)
7	Refrigerante frío	40		167.45	0.011
8	Refrigerante caliente	76		318.13	0.011
9	Agua fría para baños y cocina	19	1.00	79.68	0.001
10	Agua caliente para baños y cocina	99.6	1.00	1734.12	0.001



ANEXO 2

CÁLCULOS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA
DE LAS ALTERNATIVAS

EVALUACIÓN ECONOMICA PARA LOS SISTEMAS CON BIOGÁS

TABLA 3.4 INVERSIÓN PARA EL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE BIOGÁS

COMPONENTES	US\$	US\$
Tanque de mezcla	0	0
Escavación	18800	1522.80
Trabajo de albanilería	11300	915.30
Bomba de estiercol	2300	186.30
Otros (tuberías, instalación)	32400	2624
Subtotal		
Digestor	6500	688.50
Escavación	88700	7184.70
Tanque digestor	19800	1603.80
Sistema de calentamiento	8100	656.10
Cubierta	11300	915.30
Bomba de extracción de sedimentos	40000	3240.00
Ingeniería	176400	14288
Subtotal		
Otros equipos	2100	170.10
Tuberías de gas	1538	769
Intercambiadores	2000	162.00
Bomba de gas/metro	5638	1101.10
Subtotal	214438	18013.80
Inversión solo para el sistema digestor	214.44	222.39
COSTO WACA		

1. Asumiendo 1000 vacas (según Nelson C. (6))
 2. Asumiendo 81 vacas que se encuentran en la granja del CEPISPA
 Todos los valores están en dólares

TABLA 3.5 INVERSIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN

Equipo de generación	SCTG	SCMCI
M.T.G de 30 kW / M.C.I de 30 kW	21000	19950
Recuperadores de calor 2	4420.18	4420.18
Compresores de gas	1901.83	1901.83
Equipo eléctrico	211.93	211.93
Subtotal	27533.94	26483.94
Costos Varios		
Instalación	6,010.84	5,779.84
Detailed Eng.	2,185.76	2,101.76
Admon. Proy. & Const.	1,639.32	1,576.32
Puesta en servicio	1,092.88	1,050.88
Subtotal	10,928.81	10,508.81
INVERSIÓN TOTAL³	56476.65	55006.65

3. Es la suma del costo del sistema de recuperación de biogás y del sistema de generación

TABLA 3.8b. DATOS ENERGETICOS PARA EL SCMI

COGENERACION			
FACTOR DE PLANTA (hs. OPERAC. / hs. AÑO)		0.95	
GENERAC. ELECTRICA CON SCMI		148372.99	kWh/año
GENERACION ELECTRICA DE LYFC PARA EL SCMI		0.00	kWh/año
CONSUMO COMBUSTIBLE PARA EL MOTOR		1644.13	MMBTU/año
CONSUMO ELECTRICIDAD DE RESPALDO		3423169.16	kWh/año
GENERACION VAPOR-SCTG		94.65	90.10 \$/año
TARIFA ELECTRICA INTEGRADA DEL CEPFSA		0.07	\$/kWh
FACTURACION ELECTRICA RESPALDO-SCTG		292680.36	\$/año
COSTO COMBUSTIBLE EN EL SCTG (BIOGAS)		613.29	\$/año
CARGO POR CAPACIDAD		43.37	\$/kW-mes
CARGO POR ENERGIA, INCLUYE O & M		0.01	\$/kWh
CARGO POR VAPOR INTEGRADA CON CAPACIDAD		0.00	\$/ton

TABLA 3.8a. DATOS ENERGETICOS PARA EL SCTG

COGENERACION			
FACTOR DE PLANTA (hs. OPERAC. / hs. AÑO)		0.95	
GENERAC. ELECTRICA CON SCTG		148414.55	kWh/año
GENERACION ELECTRICA DE LYFC PARA SCTG		20918.46	kWh/año
CONSUMO COMBUSTIBLE PARA TG (BIOGAS)		2776.70	MMBTU/año
CONSUMO ELECTRICIDAD DE RESPALDO		3424128	kWh/año
GENERACION VAPOR-SCTG		273.41	259.74 \$/año
TARIFA ELECTRICA INTEGRADA DEL CEPFSA		0.07	\$/kWh
FACTURACION ELECTRICA RESPALDO-SCTG		292762.94	\$/año
COSTO COMBUSTIBLE EN EL SCTG (BIOGAS)		1063.4	\$/año
CARGO POR CAPACIDAD		42.51	\$/kW-mes
CARGO POR ENERGIA, INCLUYE O & M		0.01	\$/kWh
CARGO POR VAPOR INTEGRADA CON CAPACIDAD		0.002	\$/ton

	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61	9096.61
1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21	1,627.21
1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29	1,464.29
0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52	12,188.52
3,128.49	2,793.29	2,494.01	2,226.80	1,988.21	1,775.19	1,564.99	1,415.17	1,263.54	1,128.16	1,007.29	899.37	803.01	716.97	
1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26	1,010.26
259.74	259.74	259.74	259.74	259.74	259.74	259.74	259.74	259.74	259.74	259.74	259.74	259.74	259.74	259.74
891.23	891.23	891.23	891.23	891.23	891.23	891.23	891.23	891.23	891.23	891.23	891.23	891.23	891.23	891.23
2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23	2,161.23
564.73	495.30	442.23	394.85	352.54	314.77	281.05	250.93	224.05	200.04	178.61	159.47	142.39	127.13	
10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28	10,027.28
2,573.75	2,297.99	2,051.78	1,831.95	1,635.67	1,450.42	1,303.94	1,184.24	1,099.50	928.12	828.68	739.69	660.62	589.84	
53,144.30	63,171.58	73,188.87	83,226.15	93,253.43	103,280.72	113,308.00	123,335.28	133,362.56	143,389.85	153,417.13	163,444.41	173,471.70	183,498.98	
-5,070.35	-2,772.98	-720.88	1,111.37	2,747.04	4,207.45	5,511.40	6,875.83	7,715.13	8,643.25	9,471.93	10,211.82	10,872.44	11,462.28	

TABLA 3.10 PRECIOS DE LA ENERGIA ELECTRICA Y VAPOR POR COGENERACION EN EL SCTO		En \$/kg
Combustible:		18418.55
PCS (kJ/kg)=		0.86
n caldera=		0.37
C.comb(\$/MMBTU)=		10.38
mc(kg/h)=		0.38
Precio de la energia electrica por combustible c-doll/kWh		0.62
Precio del vapor por combustible c-doll/kg		60
El porcentaje del costo del combustible que representa la electricidad es :		75
Precio Electricidad (cogeneración) REAL cdoll/kWh=		0.71
El porcentaje del costo del combustible que representa la electricidad es :		75
Precio Vapor (cogeneración) REAL c-doll/kg vapor=		0.71
Variación del precio de la Energía eléctrica y su efecto en el precio del vapor		
Porcentaje adicional al precio de la energía eléctrica		
Precio final de la energía eléctrica c-doll/kWh		0.71

TABLA 3.11 PRECIOS DE LA ENERGIA ELECTRICA Y VAPOR POR COGENERACION EN EL SCTO		En \$/kg
Combustible:		18418.55
PCS (kJ/kg)=		0.86
n caldera=		0.37
C.comb(\$/MMBTU)=		10.38
mc(kg/h)=		0.38
Precio de la energia electrica por combustible c-doll/kWh		0.34
Precio del vapor por combustible c-doll/kg		60
El porcentaje del costo del combustible que representa la electricidad es :		75
Precio Electricidad (cogeneración) REAL cdoll/kWh=		0.71
El porcentaje del costo del combustible que representa la electricidad es :		75
Precio Vapor (cogeneración) REAL c-doll/kg vapor=		0.71
Variación del precio de la Energía eléctrica y su efecto en el precio del vapor		
Porcentaje adicional al precio de la energía eléctrica		
Precio final de la energía eléctrica c-doll/kWh		0.71

EVALUACIÓN ECONOMICA PARA EL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

TABLA 2.12 INVERSIÓN TOTAL2

COMPONENTES	Unidades	COSTO \$	COSTO \$
Panels solares	440	600	264000.00
Baterias	24	100	2384.96
Inversor de corriente	2	85	170.00
Regulador por modulo	10	32	320.00
TOTAL 2			266855

1 Costo unitario, miles de pesos

2 Costo total del sistema

3. El mantenimiento no requiere ser especializado, nosotros mismos podemos efectuarlo

TABLA 2.13 BASES DE EVALUACION 2

VIDA ECONOMICA DEL PROYECTO	25 años
TASA DE DESCUENTO	12 %
PARIDAD DEL PESO	11.40 Mex/USD
FACTOR DE PLANTA	95%
OPERACIÓN	8322 \$/año
COSTO MANTENIMIENTO ³	0 \$/MWh
ESCALACION TARIFA ELECTRICIDAD	0% ANUAL
ESCALACION PRECIO GAS NATURAL	0% ANUAL

TABLA .14 COSTO Y PRECIO DE ENERGETICOS E INSUMOS2

RADIACION SOLAR	\$(KWh/m ²)	0.00
TARIFA ELECTRICA NORMAL	\$/KWh	0.081
TARIFA ELECTRICA RESPALDO	\$/MWh	0.090
GAS NATURAL(47,496 KJ/m ³)	\$/MMBTU	4
DATOS ENERGETICOS		
SIN SISTEMA FOTOVOLTAICO		
CONSUMO ELECTRICO DE CFE (KWh/año)		156225.84
FACTURACION ELECTRICA (\$/año)		12807.425

TAB 2.16 COST. ANUAL DE OPER. Y MTTTO 2

COSTO DE MANTENIMIENTO \$	SIST. FV
	0.00
CARGA NETA GRANJA KW	17.83
CARGA NETA LYFC KW	0.00
CARGA NETA GEN. KW	17.83

TABLA 2.15 DATOS ENERGETICOS 2

COGENERACION	
FACTOR DE PLANTA (hs. OPERAC. /hs. AÑO)	0.95
GENERAC. ELECTRICA CON SF	148381.28 KWh/año
GENERACION ELECTRICA DE LYFC	0.00 KWh/año
CONSUMO ELECTRICO DE RESPALDO	14719.88 KWh/año
TARIFA ELECTRICA INTEGRADA DEL CEPISA	0.07 \$/KWh
FACTURACION ELECTRICA RESPALDO	1324.77 \$/año
COSTO COMBUSTIBLE (Radiación solar)	0.00
CARGO POR CAPACIDAD	50.40 \$/MWh-mes
CARGO POR ENERGIA, INCLUYE O & M	0.00 \$/MWh

ANEXO 3

CÁLCULOS DE LA EVALUACIÓN TERMOECONÓMICA DE
LOS SISTEMAS CON BIOGÁS

CALCULO DE LAS ENERGIA Y EXERGIAS DE LOS FLUJOS-SISTEMA CON TURBINA DE GAS

Condiciones del Ambiente estado de referencia

1, Para el agua

To = 19 C
 To = 292.15 K
 Po = 0.67 atm
 Po = 0.68 bar
 ho = 79.74 (kJ/kg)
 so = 0.28 (kJ/kg K)

2, Para el aire

To = 19.00 C
 To = 292.15 K
 Po = 0.67 atm
 Po = 0.68 bar
 ho = 292.3 (kJ/kg)
 so = 2.60 (kJ/kg K)

Flujo 1 : Aire atmosferico

*Balance de materia

T = 19°C } del diagrama
 HR = 60% } psicrometrico

$$\left\{ \begin{aligned} X &= 8.1 \frac{gdeH_2O}{kgdeaire\ sec\ o} = 0.013 \frac{kmoldeH_2O}{kmoldeaire\ sec\ o} \\ Y_{O_2} &= \frac{Y_{O_2}}{1+X} = 0.207 \\ Y_{H_2O} &= \frac{X}{1+X} = 0.013 \end{aligned} \right.$$

Composición del aire
 N2 = 0.79 kg/s
 O2 = 0.21 bar
 ma = 0.20 kg/kmol
 P = 0.67
 PM_{aire} = 29

*Balance de energia

$\dot{e}_a = Y_{H_2O} * \Delta H_{vap} = 569.60 \text{ kJ/kmol}$

$\dot{E}_{aire} = 6.341 \text{ KW}$

Para el agua
 $\Delta H_{vap} = 2456.5 \text{ kJ/kg @ T=19C y P de sat.}$
 PM_{H2O} = 18 kg/kmol
 $\Delta H_{vap} = 44217 \text{ kJ/kmol}$

Del ambiente estado de referencia

T = 19°C } del diagrama
 HR = 66.2% } psicrometrico

$$\left\{ \begin{aligned} X &= 9 \frac{gdeH_2O}{kgdeaire\ sec\ o} = 0.015 \frac{kmoldeH_2O}{kmoldeaire\ sec\ o} \\ X_{N_2,00} &= \frac{Y_{N_2}}{1+X_0} = 0.779 \\ X_{CO_2,00} &= \frac{Y_{CO_2}}{1+X_0} = 0.0003 \end{aligned} \right.$$

$$X_{O_2,00} = \frac{Y_{O_2}}{1+X_0} = 0.207$$

$$X_{H_2O,00} = \frac{Y_{H_2O}}{1+X_0} = 0.014$$

*Balance de exergia

$b_{aire} = b_o + b_f$

1. Exergia fisica

$$b_f = \int_{T_0}^T c_p \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) dT = 0$$

R = 8.314 KJ/kmol-K

2. Exergia química

$$b_q = RT_0 \left(Y_{N_2} \ln \frac{Y_{N_2}}{X_{N_2,0}} + Y_{O_2} \ln \frac{Y_{O_2}}{X_{O_2,0}} + Y_{H_2O} \ln \frac{Y_{H_2O}}{X_{H_2O}} \right) = 0.18 \text{ kJ/kmol}$$

3. Exergia total del aire

$$b_{\text{aire}} = 0.18 \text{ kJ/kmol}$$

$$B_{\text{aire}} = 0.001 \text{ KW}$$

Flujo 2: Aire comprimido

*Balance de energía

$$e_{\text{aire}} = \int_{T_0}^{T} C_p dT + X_{H_2O} \Delta H_{\text{vap}}$$

$$C_p = a + b * T + c * T^2 + d * T^3 = \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]$$

$$e_a = 12242.58 \text{ kJ/kmol}$$

$$E_a = 86.498 \text{ KW}$$

*Balance de exergia

1. Exergia física

$$b_f = \int_{T_0}^T C_p \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) dT = 4463.22 \text{ kJ/kmol}$$

$$b_i = 31.170 \text{ KW}$$

2. Exergia química

$$b_q = 0.001 \text{ KW}$$

3. Exergia total del aire comprimido

$$B = 31.171 \text{ KW}$$

Flujo 3: Aire precalentado

*Balance de energía

$$A \quad T = 699.16 \text{ K}$$

$$e_a = 13983.12 \text{ kJ/kmol}$$

$$E_a = 97.654 \text{ KW}$$

$$T = 650.83 \text{ K}$$

	x_i	PM	a	b	c	d
N2 =	0.779	28.01	3.1E+01	-1.4E-02	2.68E-05	-1.2E-08
O2 =	0.207	32	2.8E+01	-3.7E-06	1.75E-05	-1.1E-08
H2O =	0.014	18.02	3.2E+01	1.92E-03	0.0000	-3.6E-09
		28.99	3.1E+01	-1.1E-02	2.5E-06	-1.1E-08

*Balance de exergía

1. Exergía física
 $T = 699.161 \text{ K}$
 $b_T = 5564.33 \text{ kJ/kmol}$
 $b_T = 38.869 \text{ kW}$

3. Exergía total del aire precalentado

$B = 38.861 \text{ kW}$

Flujo 4 Combustible: Biogás

- PCM = 5250.00 kcal/m³
 PCM = 18418.55 kJ/kg
 $m_c = 0.0044 \text{ kg/s}$
 $p = 1.1934 \text{ kg/m}^3$

	x	c	h	o	n	s	PM (g/mol)	h^0 (cal/mol)	h^0 (cal/mol)	s^0 (cal/mol K)	$R^* \ln x$	s^0 (cal/mol K)
CH ₄	0.65	0.65	2.6	0	0	0	16.043	-17880	-11622	44.53	-0.03	28.97
CO ₂	0.32	0.32	0	0.64	0	0	44.009	-94052	-30097	51.07	-0.09	16.37
H ₂ S	0.02	0	0.04	0	0	0.02	34.08	-5000	-100.00	49.16	-0.31	0.99
H ₂	0.01	0	0.02	0	0	0	2.016	0	0.00	31.195	-0.36	0.32
							25.21		-43112			48.09

	atómica	f	μ_0	g ₀₀
c	0.97	1	-98546	-95590
h	2.66	2.742	-32766	-87158
o	0.64	0.660	-7777	-4977.3
n	0	0	-6902	0
s	0.02	0.021	-145966	-2919.3
				-190644
				-187724

- $R = 0.079 \text{ cal/mol-K}$
 $fg = 39.73 \text{ mol-C/Nm}^3$
 $b = 133484 \text{ cal/mol-C}$
 $b = 5303.48 \text{ kcal/Nm}^3$
B = 82.26 kW
E = 81.42 kW

$$\hat{h}^0 = \frac{1}{\alpha} \sum_{n=1}^n X_n h_i^0$$

$$\hat{s}^0 = \frac{1}{\alpha} \sum_{n=1}^n X_n [s_i^0 - R \ln x_i]$$

$$\hat{h}_0 = \hat{h}_0 - T \hat{s}_0 - g_{00}$$

Flujo 5: Gases de combustión

*Balance de energía

1. Energía aportada por el aire

- $A \quad T = 699.16 \text{ K}$
 $ea = 13983.12 \text{ kJ/kmol}$
 $Ea = 97.654 \text{ kW}$

2. Energía suministrada por el combustible en forma de calor

$E_c = 81.424 \text{ kW}$

- $A \quad T = 292.15 \text{ K}$
 $ea = 631.98 \text{ kJ/kmol}$
 $Ea = 0.864 \text{ kW}$

3. Energía total de los gases de combustión

$$E_g = 179.078 \text{ KW}$$

* Balance de exergía

1. Exergía física

$$\begin{aligned} T &= 1020.372 \text{ K} \\ b_T &= 14335.61 \text{ kJ/kmol} \\ b_T &= 100.116 \text{ KW} \end{aligned}$$

3. Exergía total de los gases de combustión

$$B = 100.116 \text{ KW}$$

Flujo 8: Gases de salida de la turbina

* Balance de energía

$$\begin{aligned} \text{1. Energía del aire} \\ A \quad T &= 624.28 \text{ K} \\ e_a &= 11303.74 \text{ kJ/kmol} \\ E_a &= 78.94 \text{ KW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{2. Energía del combustible} \\ E_c &= 81.42 \text{ KW} \end{aligned}$$

3. Energía total

$$E_T = 160.37 \text{ KW}$$

* Balance de exergía

$$\begin{aligned} \text{1. Exergía física} \\ T &= 579.98 \text{ K} \\ b_T &= 3014.73 \text{ kJ/kmol} \\ b_T &= 21.054 \text{ KW} \end{aligned}$$

3. Exergía total de los gases de combustión

$$B = 21.056 \text{ KW}$$

Flujo 9: Gases a la salida del precalentador

* Balance de energía

$$\begin{aligned} \text{1. Energía del aire} \\ A \quad T &= 532.78 \text{ K} \\ e_a &= 8166.89 \text{ kJ/kmol} \\ E_a &= 57.036 \text{ KW} \end{aligned}$$

2. Energía total

$$E_T = 138.469 \text{ KW}$$

* Balance de exergía

1. Exergía física

$$\begin{aligned} T &= 532.78 \text{ K} \\ b_T &= 2173.81 \text{ kJ/kmol} \\ b_T &= 15.181 \text{ KW} \end{aligned}$$

3. Exergía total de los gases de combustión

$$B = 15.182 \text{ KW}$$

Flujo 15: Vapor saturado

* Balance de energía

$$E_v = m_v (h_v - h_0)$$

$$E_v = 23.24 \text{ KW}$$

* Balance de exergía

1. Exergía física

$$\begin{aligned} b &= (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \\ &= 695.488 \text{ kJ/kg} \\ B &= 6.030 \text{ KW} \end{aligned}$$

Flujo 17: Condensado del calentador

* Balance de exergía para líquido incompresible

$$\begin{aligned} \text{1. Exergía física} \\ T &= 353 \text{ K} \\ P &= 2.62 \text{ bares} \\ & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} C_p = 4.20 \text{ kJ/kg-K} \end{aligned}$$

$$b = 23.10 \text{ kJ/kg}$$

$$B = 0.20 \text{ KW}$$

Flujo 18: Agua de alimentación

* Balance de exergía

1. Exergía física

$$\begin{aligned} b &= (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \\ &= 31.412 \text{ kJ/kg} \\ B &= 0.272 \text{ KW} \end{aligned}$$

Flujo 11 : Gases a la atmósfera

Condiciones

1. Las pérdidas de presión en el recuperador son despreciables
2. Los gases no pueden ser descargados a la atmósfera por debajo de su temperatura de rocío

* Balance de energía

1. Energía del aire
 $T = 453 \text{ K}$
 $ea = 5565.62 \text{ kJ/kmol}$
 $Ea = 38.868 \text{ KW}$

$T = 453.15 \text{ K}$
 $b_1 = 1017.14 \text{ kJ/kmol}$
 $b_1 = 7.103 \text{ KW}$

2. Energía total

$E_T = 120.283 \text{ KW}$

Exergía total de los gases de combustión

$B = 7.105 \text{ KW}$

SUPUESTOS ECONOMICOS

	\$/año
1. Bomba 2	2.18
2. Compresor	188.42
3. Precalentador	72.56
4. Cam. Comb.	7.67
5. Turbina	820.94
6. Alternador	337
7. Recuperador	250.58

VALORACION EXTERNA

$Z_1 =$	7.285E-08
$Z_2 =$	6.289E-06
$Z_3 =$	2.422E-06
$Z_4 =$	2.558E-07
$Z_5 =$	2.74E-05
$Z_6 =$	1.126E-05
$Z_7 =$	8.698E-06
$Z_8 =$	1E-7 * $B_1 = 0$
$Z_9 =$	1.3E-3 * $B_1 =$
$Z_{12} =$	3E-6 * $B_{12} =$
$Z_{10}, Z_{11}, Z_{13}, \dots, Z_{17} =$	

2. Costo de operación y mantenimiento	39.57	
3. Horas de servicio	8322	\$/año
4. Costo unitario del combustible	1.3E-03	h/año
5. Costo unitario del aire	1.E-07	\$/kJ de exergía
7. Costo del agua desmineralizada =		\$/kJ de exergía
Costo $US\$/m^3 =$	0.105	3.4E-06
$\rho \text{ (kg/m}^3) =$	983.28	\$/kJ de exergía

BALANCE DE MASA

Equi	Entra	Salid	Falta
1	0.0087	0.0087	
2	0.2004	0.2004	
3	-	-	
4*	0.2004	0.2004	
5	0.2004	0.2004	
6	-	-	
7	-	-	2.51

BALANCE DE ENERGIA

Equi	Entra	Salid	Falta
1	2.58	2.58	
2			
3	245.86	245.86	
4	179.07	179.07	
5	179.08	179.47	
6			
7	143.53	143.53	

* solo se considera el flujo de aire ya que el biogas se suministra como calor

CALCULO DE LAS ENERGIA Y EXERGIAS DE LOS FLUJOS

Condiciones del Ambiente estado de referencia

1. Para el agua		2 Para el aire	
To =	292.15	To =	To =
Po =	0.67	To =	292.15 K
ho =	79.74	Po =	0.67 atm
so =	0.28	ho =	292.3 (kJ/kg)
		so =	2.60 (kJ/kg K)

Flujo 1 : Aire atmosferico

* Balance de energia

$$e_n = \dot{Y}_{R2O} * \Delta H_{v,sp} = 569.60 \text{ kJ/kmol}$$

$e_{air} =$	1.241	KW
-------------	-------	----

* Balance de exergía

$b_{air} =$	0.18	kJ/kmol
$B_{air} =$	2.40E-04	KW

Flujo 2: Biocombustible

PCM =	5250.00	kcal/m ³
PCM =	18418.6	kJ/kg
$\rho =$	1.1934	kg/m ³

Flujo 5: Gases producto de la combustion

* Balance de energia

1. Energia aportada por el aire	
A T =	282 K
eg =	631.98 kJ/kmol
Eg =	0.864 KW

2. Energia aportada por el calor en forma de combustible

$E_c =$	27.771	KW
---------	--------	----

3. Energia total de los gases de combustion

$E_g =$	28.635	KW
---------	--------	----

* Balance de exergía

1. Exergía total de los gases	
T =	610.370 K
$b_{fg} =$	3610.194 kJ/kmol
$B_{fg} =$	4.934 KW

Flujo 8: Vapor

* Balance de exergía

1. Exergía física

$$b = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

b =	695.488	kJ/kg
B _f =	2.092	KW

Flujo 9: Gases a la atmósfera

* Balance de energía

1. Energía aportada por el aire

T =	393	K
ea =	3680.81	kJ/kmol
Ea =	6.030	KW

2. Energía aportada por el calor en forma de combustible

E _c =	17.181	KW
------------------	--------	----

3. Energía total de los gases de combustión

E _g =	22.211	KW
------------------	--------	----

* Balance de exergía

T =	393.15	K
b _f =	0.55	kJ/kmol
b _f =	0.546	KW

Exergía total de los gases de combustión

B =	0.547	KW
-----	-------	----

SUPUESTOS ECONOMICOS

1. Costo del capital \$/año

- 1. Motor 997.50
- 2. Alternador 23.23
- 3. Recuperador 260.58
- 4. Bomba 2 2.47

2. Costo de operación y mantenimiento

- 3. Horas de servicio 39.57 \$/año
- 4. Costo unitario del combustible 8322 h/año
- 5. Costo unitario del aire 1.3E-03 \$/kJ de exergía
- 7. Costo del agua desmineralizada = 1.E-07 \$/kJ de exergía

VALORACION EXTERNA

- $Z_1 = 3.33E-05$
- $Z_2 = 7.755E-07$
- $Z_3 = 8.698E-06$
- $Z_4 = 8.232E-08$
- $Z_5 = 1E-7 \cdot B_1 = 2E-11$
- $Z_6 = 1.3E-3 \cdot B_2 = 6.9E-02$
- $Z_9 = 3.4E-6 \cdot B_{11} = 1.95E-06$
- $Z_{12}, Z_{15}, Z_{16}, \dots, Z_{30} = 0$

BALANCE DE MASA

	ENTRADAS	SALIDAS
1	0.0392	0.0392
2	-	-
3	-	-
4	0.0030	0.0030

BALANCE DE ENERGIA

	ENTRADAS	SALIDAS	SOBRA
1	55.32	55.40	
2			
3	30.27	30.27	
4	1.45	1.45	