

INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL

**ICAITI
APROVECHAMIENTO
ENERGETICO
DE BIOGAS
INFORME TECNICO**

PROYECTO DE LEÑA Y FUENTES ALTERNAS DE ENERGIA

ICAITI – ROCAP – AID

1980 - 1987

V7

INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION
Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL
- ICAITI -

APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE BIOGAS
Informe Técnico Final

Proyecto Leña y Fuentes Alternas de Energía
ICAITI-ROCAP No. 596-0089

1988



PRESENTACION

EL INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL (ICAITI) es un organismo regional de carácter tecnológico, creado por los cinco Gobiernos de Centroamérica, con la asistencia de las Naciones Unidas, para servir al desarrollo y a la integración económica centroamericana. El ICAITI persigue, entre otros, los siguientes objetivos fundamentales:

Realizar investigaciones tecnológicas para la utilización apropiada de materias primas regionales; desarrollar procesos de fabricación; elaborar nuevos productos y adoptar tecnologías mejoradas.

Desde su fundación en la ciudad de Guatemala, en enero de 1956, el ICAITI funciona como una entidad autónoma, de carácter internacional, no lucrativa, dedicada de lleno a impulsar el fomento del sector industrial de Centroamérica y, por ende, el incremento de su nivel productivo.

Durante los años de 1980 a 1987, el ICAITI llevó a cabo el Proyecto Leña y Fuentes Alternas de Energía, con apoyo financiero de la Oficina Regional para Programas Centroamericanos (ROCAP) de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (AID). Los resultados del Proyecto están resumidos en una serie de informes como éste (ver Anexo A-2). El ICAITI espera que el contenido de esta serie de informes sea útil a los interesados en el uso de las técnicas mejoradas para aprovechar las fuentes renovables de energía.

El ICAITI cuenta con un equipo de técnicos en los siguientes campos: energía, desarrollo de pequeñas industrias y desarrollo industrial en general. Ofrece servicios de información, con acceso a redes computadorizadas internacionales. Puede, asimismo, brindar, tanto a empresas como a instituciones o personas individuales: asistencia técnica, capacitación, evaluación; asesoramiento técnico en producción, normas y control de calidad; estudios de factibilidad, pruebas y análisis, investigación aplicada y otros servicios relacionados con las necesidades de la industria centroamericana.

Más información puede obtenerse directamente en:

ICAITI
Ave. Reforma 4-47
Zona 10
Guatemala, Guatemala

Apartado Postal 1552
Telex: 5312-ICAITI-GU
Cable: ICAITI
Teléfonos: 3106-31/35

I N D I C E

RESUMEN	
1.	ANTECEDENTES 3
2.	INTRODUCCION 5
3.	EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS 6
4.	EL CALENTAMIENTO DE AGUA 9
5.	REFRIGERACION 14
	5.1. Refrigeración de cuartos
	5.2. Enfriadores a base de agua
6.	ILUMINACION 21
	6.1 Lámpara testigo
	6.2 Lámparas instaladas con biogás
7.	ADAPTACION DE MOTORES A BIOGAS 26
	7.1. Adaptación de motores diesel
	7.2. Adaptación de motores de gasolina
8.	RESUMEN DE RESULTADOS 37
	8.1. Quemadores
	8.2. Lámparas
	8.3 Refrigeración
	8.4 Motores
	8.5 General
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 41
10.	ANEXOS (detalle en página siguiente) 42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Biodigestor semicontinuo de desplazamiento horizontal	8
Figura 2	Montaje de equipo para pruebas con calentadores	12
Figura 3	Enfriador de leche. Primer prototipo	16
Figura 4	Enfriador de leche. Segundo prototipo	18
Figura 5	Unidad de refrigeración a base de biogás	19
Figura 6	Quemador para unidad de refrigeración	20
Figura 7	Montaje de equipo para pruebas con lámparas	23
Figura 8	Montaje de equipo para pruebas Motor Diesel	29
Figura 9	Pruebas con motor Diesel Freno de Prony	30
Figura 10	Montaje de equipo para pruebas motor gasolina	34
Figura 11	Pruebas con motor de gasolina	35

ANEXOS

ANEXO A-1 Seguridad e Higiene en la utilización de biogás

ANEXO A-2 Lista de informes técnicos y otras publicaciones del ICAITI correspondientes al Proyecto Leña y Fuentes Alternas de Energía.

LISTA DE CUADROS

- Cuadro 1 Características y resultados de la utilización de biogás en el calentamiento de agua para desplumado de aves
- Cuadro 2 Características y resultados del uso de biogás y propano en el calentamiento de agua para pasteurizar leche.
- Cuadro 3 Características y resultados obtenidos en las unidades experimentales de enfriamiento de leche, utilizando biogás.
- Cuadro 4 Características y resultados de las pruebas de iluminación con lámparas a base de biogás.
- Cuadro 5 Resultados de la prueba de utilización de biogás en un motor diesel con una mezcla 50%-50%.
- Cuadro 6 Resultados de la utilización de biogás en un motor de gasolina
- Cuadro 7 Resultados de la efectividad del biogás en las aplicaciones ensayadas

RESUMEN

Se ensayaron varias formas de aprovechar el biogás: calentamiento de agua para escaldado de gallinas, calentamiento de agua para pasteurización de leche, refrigeración de cuartos, enfriamiento de leche en áreas rurales, iluminación, motores diesel y motores de gasolina. En todos los casos, exceptuando el enfriamiento de leche a pequeña escala, las aplicaciones fueron efectivas en diferentes grados. En general, la adaptación de los equipos era sencilla y fue realizada dentro de niveles aceptables de costo y dificultad. Todas las aplicaciones siguieron lo especificado en el manual D 106 del ICAITI, Aplicaciones de Biogás.

El biogás sustituyó con éxito a leña, keroseno, propano, diesel y gasolina, en los diferentes ensayos. En las condiciones económicas actuales y según los ensayos descritos, el biogás resultó más eficiente como sustituto de la gasolina en motores de combustión interna, con un ahorro resultante de \$CA 0.195 por cada metro cúbico (m³) de biogás utilizado. El ahorro imputable al biogás como sustituto del diesel en motores de combustión interna fue \$CA 0.115/m³; en refrigeración de cuartos y calentamiento de agua para pasteurización sustituyendo a gas propano el ahorro conseguido fue de \$CA 0.074/m³ aproximadamente; en escaldado de gallinas, como sustituto de leña, fue de \$CA 0.056/m³ de biogás; y en lámparas, como sustituto de propano, fue \$CA 0.032/m³.

Aunque técnicamente el biogás podría sustituir a casi cualquier combustible, son pocas las aplicaciones reales que dan buenos retornos económicos como resultado de invertir en un sistema de biodigestión solamente para fines de obtener energía. Es importante analizar otras opciones en forma exhaustiva antes de tomar la decisión de construir un digestor de biogás y se debe realizar los estudios con apoyo técnico experimentado. En general, las aplicaciones pequeñas de biodigestión para cocción e iluminación doméstica no han representado buenas inversiones económicas. Las aplicaciones más rentables parecen ser a nivel industrial, especialmente cuando se tienen gastos de disposición de desechos orgánicos, y en esos casos, el sistema de biogestión sirve como forma económica de tratamiento de desechos así como una fuente de energía y abono.

Los ensayos realizados sugieren que el biogás debe aprovecharse dentro de los siguientes lineamientos: a) buscar la sustitución del combustible más costoso (la gasolina, entre los ensayados); b) efectuar aplicaciones directas siempre que sea posible (tratar de no usar biogás para mover un motor que produzca corriente para accionar un

refrigerador, por ejemplo; mejor aplicar el biogás directamente a refrigeración); c) tratar de que las modificaciones hechas a los equipos no impidan usarlos de nuevo con combustibles convencionales en caso que sea necesario; d) tratar de diseñar sistemas de uso sencillos conforme al régimen de producción de gas.

1. ANTECEDENTES

La población de América Central depende en gran medida de los recursos forestales para satisfacer sus necesidades energéticas; en el año 1984 la biomasa, principalmente la leña, constituyó la fuente del 65% de la energía total consumida en el istmo. Mientras tanto, según se estimó, la cubierta vegetal del bosque denso había quedado reducida al equivalente del 34% del territorio total, debido a la continua destrucción a que ha estado sometida; esta destrucción es tal que, de continuar al mismo ritmo, la hará desaparecer totalmente hacia principios del siglo entrante.

Un 90% de la leña es empleada para cocinar. El 10% restante, se emplea para la producción artesanal y tradicional de artículos como pan, ladrillos y tejas, cal, cerámica, sal, panela, y algunos procesos de secado. Muchas de estas actividades artesanales suelen estar concentradas en zonas geográficas reducidas (por causa de la disponibilidad de materia prima, mercados, etc.) y por su fuerte demanda de leña, son causa de una deforestación localizada.

El 68% de la población total de la región, más de 12 millones de personas, depende de la leña para cocinar y de no tomarse medidas drásticas oportunas, se prevé que este gran sector de la población se verá afectado por una aguda escasez de la única fuente energética de que dispone. En la actualidad, las consecuencias de esta escasez pueden apreciarse en el surgimiento de zonas críticas, en las que una familia debe gastar más de la tercera parte de sus ingresos para adquirir la leña que necesita para cocinar.

Ante esta problemática, en septiembre de 1979, el ICAITI y la Oficina Regional para Programas Centroamericanos (ROCAP) de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (AID), celebraron un convenio para la ejecución del proyecto denominado "Leña y Fuentes Alternas de Energía".

Los objetivos generales que se fijaron para el Proyecto fueron: a) experimentar con árboles de crecimiento rápido y diseminar patrones para su producción (a cargo del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE); y b) desarrollar, demostrar y diseminar tecnologías que permitieran hacer un uso más racional de la leña y aprovechar nuevas fuentes económicas de energía, tales como

la energía solar y el biogás (a cargo del ICAITI). Se establecieron como prioritarias las necesidades de las zonas rurales y de las pequeñas industrias.

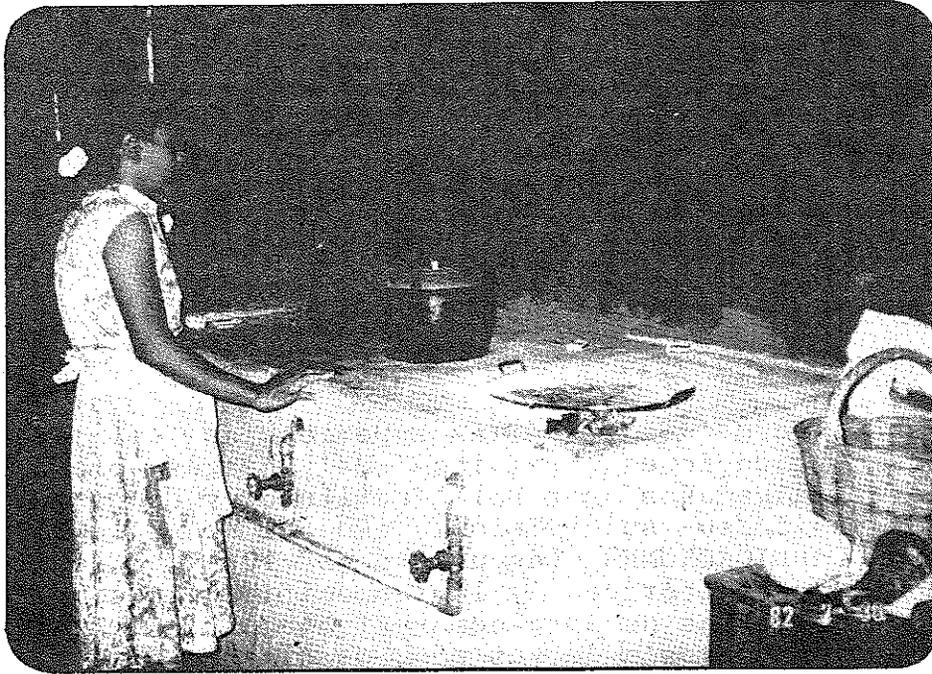
El proyecto a cargo del ICAITI duró ocho años. En este periodo, se han probado más de cien aplicaciones de tecnologías, de las cuales se llevaron a etapa de demostración unas cincuenta. En una evaluación final, se concluyó que el Proyecto ha logrado un gran impacto traducido en el ahorro de 200 000 metros cúbicos de leña, como resultado de la adopción de tecnologías eficientes para el uso de la leña y de tecnologías que la reemplazan por energía solar; también se dió impulso a 400 pequeñas industrias, con la generación de empleos a más de 1500 personas. Alrededor de 13 000 familias se beneficiaron directamente del Proyecto, y fueron innumerables los beneficiados indirectos.

Hay que señalar que el desarrollo de una tecnología responde a factores dinámicos y, por lo tanto, está en continua evolución. Tiene que adaptarse a las necesidades de los usuarios y estas necesidades pueden variar con el tiempo y los inevitables cambios en las condiciones sociales y económicas de las poblaciones. Por lo tanto, no existe una "tecnología apropiada" en sí; lo que se trata de identificar es la mejor solución a un problema, aprovechando los recursos disponibles y dentro del contexto socio-económico del momento.

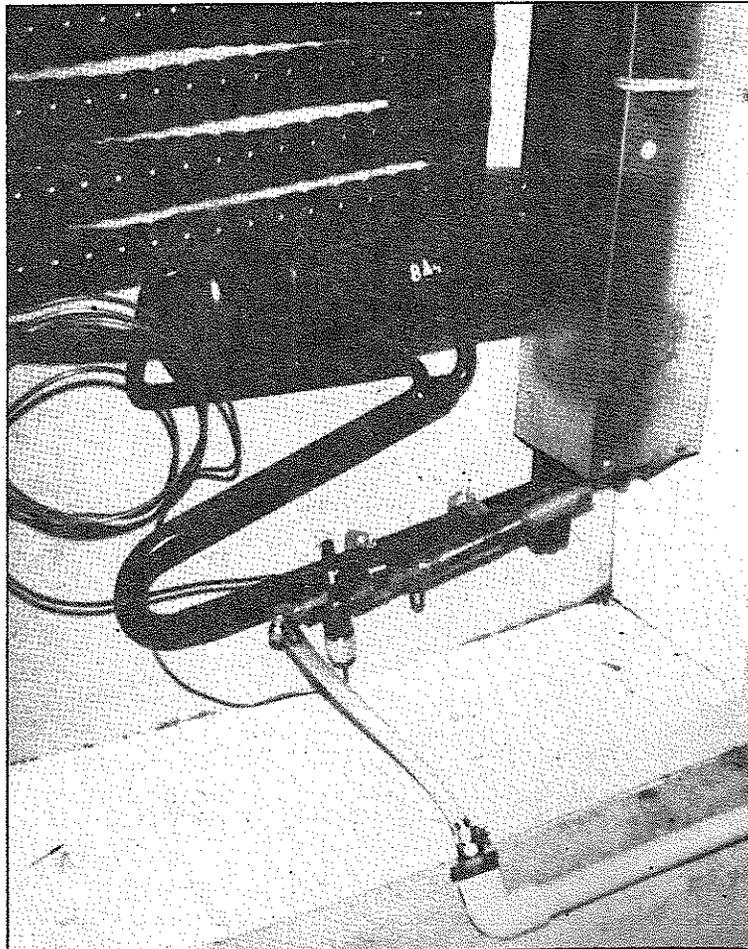
2. INTRODUCCION

Este informe describe las experiencias del ICAITI en diversas aplicaciones prácticas del biogás producido en digestores diseñados por el Instituto y construidos y operados bajo su supervisión. En el manual BIOGAS Y BIOABONO: APLICACIONES (documento D 106 del ICAITI) se dieron las bases teóricas y las especificaciones para cada una de estas formas de aprovechar el biogás. El ICAITI puso en práctica la mayoría de sus propios diseños.

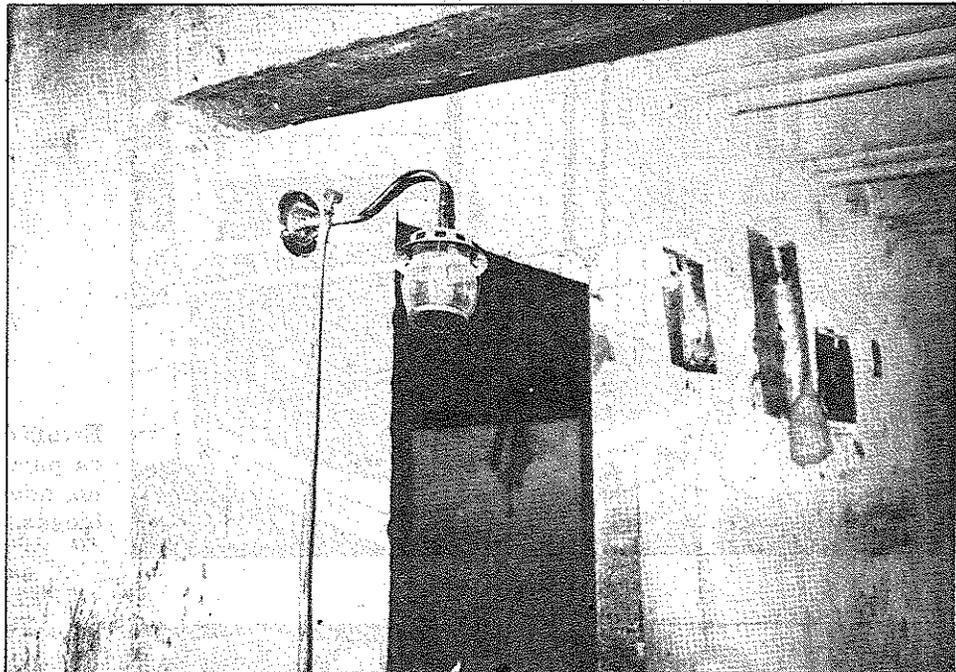
No se pretendió que la experimentación fuera exhaustiva. Se probaron los diseños y algunas de sus variantes según las necesidades que se presentaron, sin agotar todas las posibilidades. Se espera que los resultados obtenidos sean útiles en sí mismos o como punto de partida para futuras investigaciones.



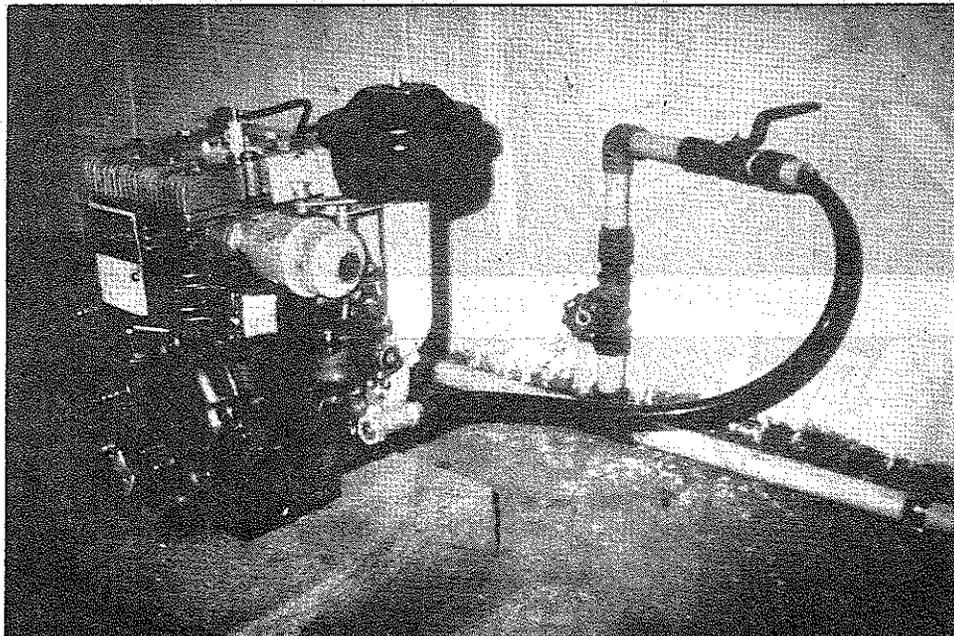
Estufa operada con biogás.



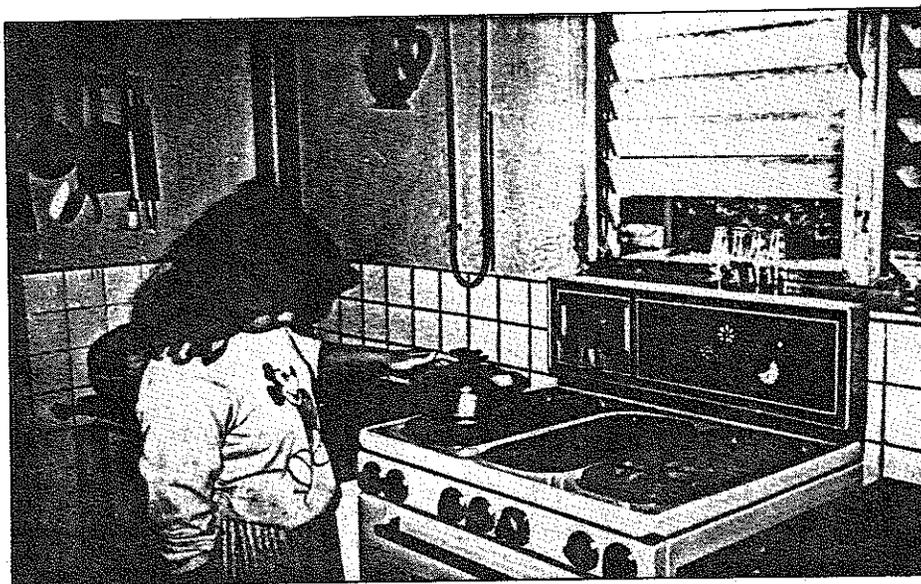
Suministro de biogás a unidad refrigeradora



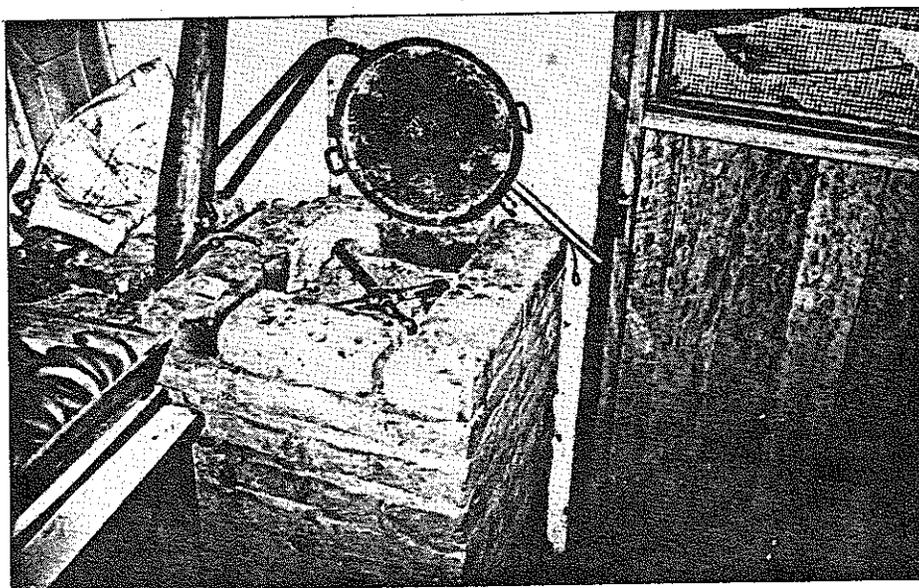
Lámpara alimentada con biogás



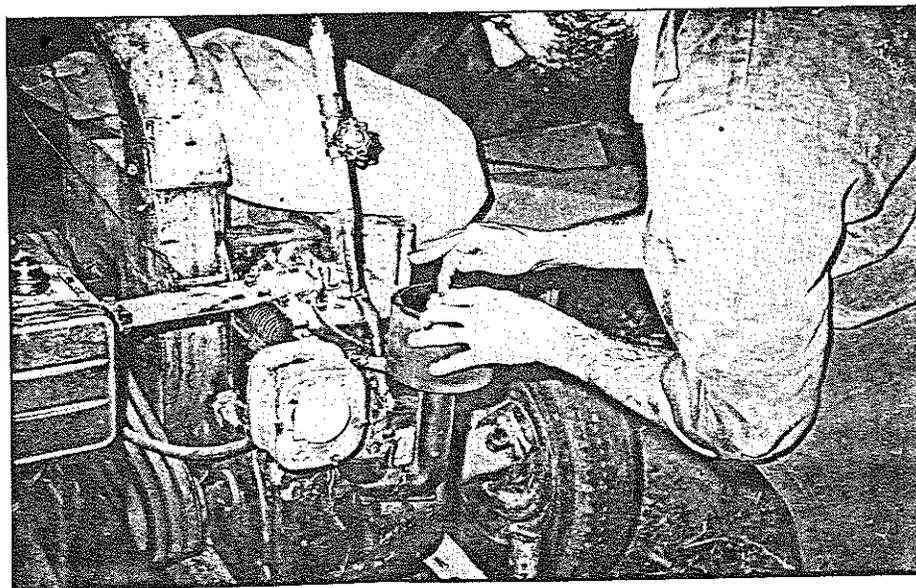
Motor de gasolina adaptado a biogás



Estufa doméstica para propano, adaptada a biogás.



Estufa rural para tortillas construida con quemador en forma de cruz, para biogás.



Un técnico coloca la tubería de alimentación de biogás a un motor adaptado.

3. EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS

El biogás es un combustible de bajo poder calorífico, comparado con los combustibles tradicionales. Sin embargo, construyendo equipo apropiado o adaptando equipo convencional, el biogás puede sustituir al propano, al diesel, a la gasolina y al keroseno con diferentes grados de éxito. Como lo demuestra el presente informe, ni la construcción ni la adaptación de los equipos utilizados requiere de técnicas complicadas o costosas.

Se encontró que la literatura relacionada con la aplicación del biogás caía en dos grupos. Una, muy empírica y sin justificaciones técnicas, que reportaba diferentes experiencias de campo. La otra, muy teórica, discutía en general el comportamiento de los gases combustibles.

El trabajo siguió dentro de lo posible la línea teórica y la línea experimental. Se utilizó la tecnología existente para realizar diseños iniciales. Estos fueron evaluados en el campo y mejorados en algunos casos.

El principal criterio no técnico para la selección de las aplicaciones de biogás fue su potencial de uso en las áreas rurales de Centroamérica. El principal criterio técnico fue que se pudiera fabricar o adaptar el equipo a un costo razonable y con una tecnología apropiada al medio centroamericano. Se trató de que los materiales fueran de fácil adquisición en los mercados locales; que los costos de inversión fueran razonables en comparación con las otras opciones disponibles; que la construcción y la operación estuvieran al alcance de las habilidades locales; y, de último, pero no en importancia, que se obtuviera un buen rendimiento del poder calorífico del gas.

Se determinó que cuando el manejo de los diferentes tipos de biodigestor ensayados por el Proyecto fue correcto, lo normal era obtener un gas con un promedio del 60% de metano. Esta composición del gas se tomó como estándar para los diseños y cálculos.

Se estableció que a causa del poder de oxidación resultante del ácido sulfhídrico presente en el biogás era preferible utilizar tubería y accesorios de plástico, como PVC, siempre que el tipo de aplicación lo justificara económicamente y que no estuvieran expuestos al calor o a

los rayos solares. Alternativamente se puede trabajar con tubería y accesorios de hierro galvanizado o hierro negro.

En este informe se presentan los resultados de los ensayos de utilizar biogás en calentamiento de agua para desplumado de gallinas, calentamiento de agua para pasteurización de leche, refrigeración de cuartos, enfriamiento de leche, iluminación, motores diesel y motores de gasolina. Al final de cada sección se presenta un breve análisis del período de recuperación de la inversión hecha en biodigestores, suponiendo que el retorno será solamente por el gas utilizado. No se toman en cuenta los beneficios adicionales: evitar la contaminación ambiental y producir abonos orgánicos estabilizados y de buena calidad.

El biodigestor que se toma como base para todos los análisis, a menos que se indique lo contrario, tiene las siguientes características:

- biodigestor tipo ICAITI convencional, de alimentación semicontinua, cargado con estiercol bovino;
- capacidad del biodigestor: 15 metros cúbicos;
- producción diaria de biogás: 5 metros cúbicos;
- costo del biodigestor: \$CA 700.00;
- producción diaria de bioabono: 500 kg;
- tiempo de retención: 30 días;
- ubicación: nivel del mar (zona cálida, 28°C)

La Figura 1 presenta el biodigestor semicontinuo de desplazamiento horizontal y construcción convencional, diseño de ICAITI.

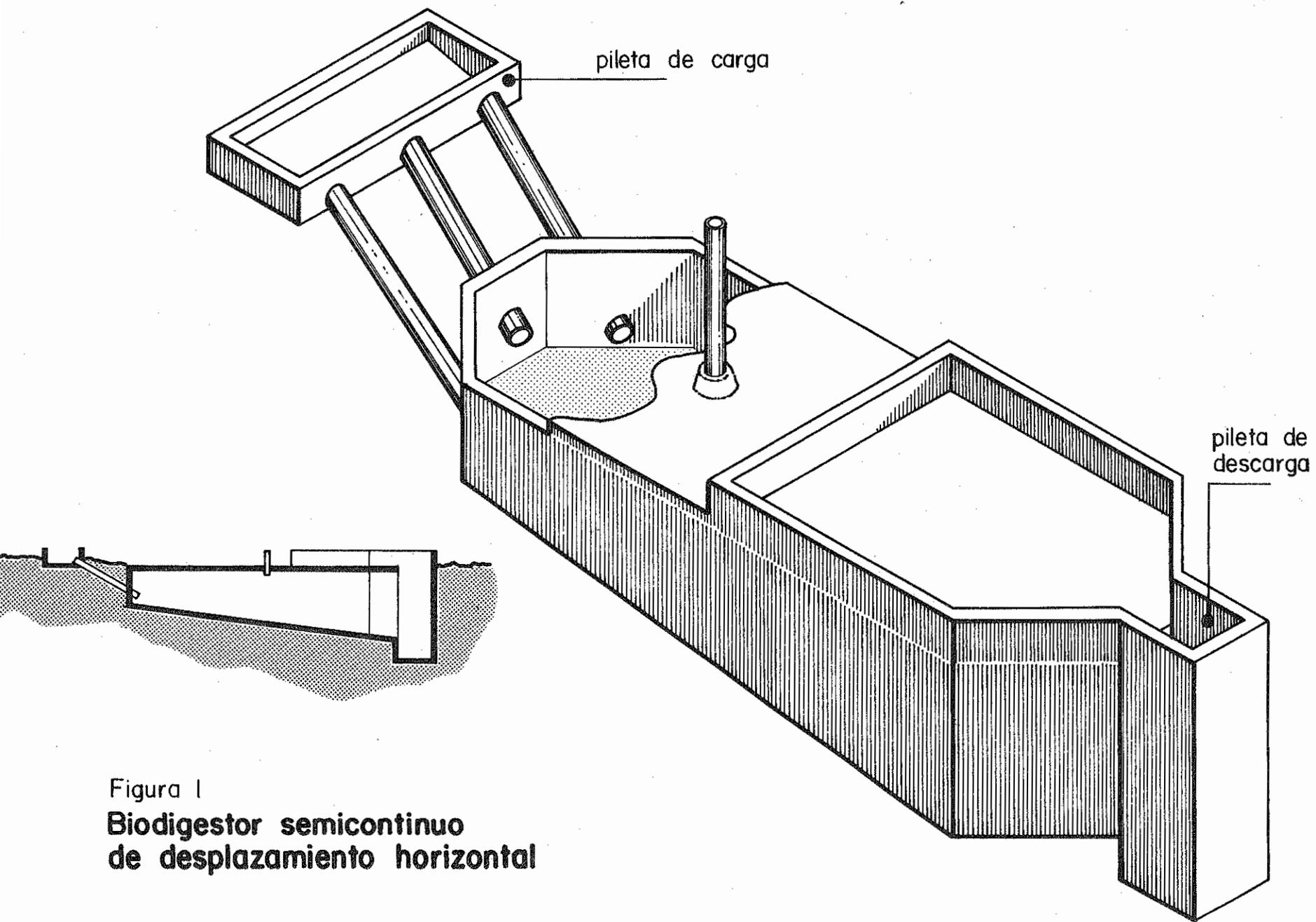


Figura 1
**Biodigestor semicontinuo
de desplazamiento horizontal**

4. CALENTAMIENTO DE AGUA

Muchas empresas con un alto potencial de producción de biogás también tienen requerimientos de agua caliente. Las empresas avícolas pueden utilizar agua caliente para el escaldado de aves; las empresas porcinas, para el escaldado de cerdos. Las lecherías, en el proceso de pasteurización y en la refrigeración.

Diseño, construcción y operación de los quemadores para calentamiento de agua se basan en el manual D106 del ICAITI.

Caso "A": En una granja avícola de Guatemala se aprovechó parte del gas producido en un biodigestor de 75 m³, que producía 25 m³ diarios, para calentar el agua que se utilizaba en el desplumado de gallinas. Los resultados se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1						
<u>CARACTERISTICAS Y RESULTADOS DE LA UTILIZACION DE BIOGAS EN EL CALENTAMIENTO DE AGUA PARA DESPLUMADO DE AVES</u>						
COMBUS- TIBLE	PRESION (cm c.a.*)	DIAMETRO INYECTOR (mm)	TASA DE UTILIZA- CION	Ec (kcal)	Ea (kcal)	n %
LEÑA	---	---	28.3 lb/h	94,462	14,169	15.0
BIOGAS	10.0	4.366	4.43 m ³ /h	23,922	14,169	59.2

* c.a. = columna de agua
 Ec = energía consumida;
 Ea = energía aprovechada;
 n% = $Ea/Ec \times 100$ = eficiencia de utilización calórica.

El biodigestor de 75 m³ puede producir diariamente hasta 25 m³ de biogás. Con los datos del cuadro puede obtenerse el tiempo máximo durante el que se podría calentar agua diariamente: 25 m³ dividido entre 4.43 m³/hora = 5.6 horas, sustituyendo leña en una cantidad igual a 28.3

lb/hora. Aunque la leña tiene un mayor poder calorífico que el biogás, la eficiencia con que ésta se estaba aprovechando era mucho menor.

El costo del biodigestor de 75 m³ es de \$CA 2 800.00; el costo de la estufa y quemador de biogás es de \$CA 32.00; el costo total (de inversión) es de \$CA 2 832.00.

El número de aves escaldadas por hora es de 180 gallinas. Actualmente, se despluman alrededor de 700-800 aves diarias, 5 días de la semana. El encargado de la granja estimó que se utiliza el biogás 4.5 horas diarias en promedio, durante estos días. Asumiendo que se trabaja 220 días/año; y siendo el costo de la leña de \$CA 0.0192/kg, los resultados económicos son:

Ahorro leña/día: 4.5 horas/día x 28.3 lb/hora de leña
= 127 lb = 58 kg

Ahorro leña/año: 220 días x 58 kg = 12,760 kg

Economías/año : \$CA 0.0192/kg x 12 760 kg/año
= \$CA 245.00/año

Periodo simple de recuperación = 2832/245 = 11.6 años

El encargado de esta granja avícola, en una entrevista al final del Proyecto, dijo "en mi opinión personal, el sistema de biogás vale la pena". Indicó que el sistema había funcionado bien hasta el momento, produciendo el gas requerido para hervir el agua para el proceso de desplume. Agregó que otro beneficio importante del sistema era la reducción de moscas y el control ambiental.

El biogás usado solo es una opción técnicamente viable para avícolas que tengan como mínimo de 22 500 a 26 250 aves y que desplumen 1 000 aves por día, como máximo. De otra manera, sería necesario complementar al biogás con otra fuente de energía, como la leña. Se estimó el nivel de autosuficiencia energética con biogás, en 22 - 26 aves en pie por cada ave que se desplume.

Caso "B": También se probó el uso de biogás en la pasteurización de leche. En marzo de 1986, se adaptó a biogás un calentador que originalmente funcionaba con propano, en la Escuela Agrícola San José Obrero, en Choluteca, Honduras. La temperatura del agua previamente precalentada en colectores solares subía de 70°C a 87°C al pasar por este calentador.

El agua pasaba por el calentador a una tasa de 2 galones por minuto, con una presión de 20 psi; el biogás fluía a una tasa de 2.07 m³/h con una presión de 10 cm de columna de agua.

La adaptación del quemador fue realizada siguiendo las especificaciones de los anexos A.2 y A.3 de la publicación D 106 del ICAITI. Se hicieron las conversiones mecánicas en

los talleres del ICAITI. Se efectuaron pruebas preliminares en las instalaciones de biogás que tiene el Instituto en la Escuela Técnica de Agricultura (ITA) en Bárcenas, Villa Nueva, Guatemala y se instaló y afinó el equipo en el sitio de utilización, la Escuela Agrícola El Porvenir, en Choluteca, Honduras.

El Cuadro 2 presenta los resultados de utilizar biogás y gas propano en el calentamiento de agua para pasteurización.

<u>Cuadro 2</u>						
<u>CARACTERISTICAS Y RESULTADOS DEL USO DE BIOGAS Y PROPANO EN EL CALENTAMIENTO DE AGUA PARA PASTEURIZAR LECHE</u>						
COMBUS- TIBLE	PRESION (cm c.a.*)	DIAMETRO INYECTOR (mm)	TASA DE UTILIZA- CION	Ec (kcal)	Ea (kcal)	n %
PROPANO	33.0	0.037	0.48 m3/h	10,282	7,711	75
BIOGAS	10.0	1.25	2.07 m3/h	11,007	7,711	70
* c.a. = columna de agua Ec = energía consumida; Ea = energía aprovechada; n% = $Ea/Ec \times 100$ = eficiencia de utilización calórica						

El sistema fue diseñado con dos digestores de 30 m3 cada uno, asumiendo que, con 60 vacas estabuladas se produciría suficiente estiércol como para obtener hasta 24 m3/día de biogás; este volumen usado en el calentador y complementado con un sistema solar de calentamiento de agua, resultaba suficiente para pasteurizar 750 litros de leche al día. La rentabilidad de la operación depende de los precios relativos de la leche cruda y de los paquetes de producción que puedan elaborarse a partir de ella (leche pasteurizada-crema; leche/crema/quesos/semidescremados; leche-mantequilla-yogurt; etc.).

La Figura 2 muestra un esquema del diseño original para el montaje de equipo para pruebas con calentadores de agua.

La modificación principal que se hizo al calentador de agua para su conversión a biogás fue el agrandamiento del diámetro del inyector, con el fin de lograr que pasara mayor cantidad de biogás y así obtener una energía equivalente a la que proporciona el propano. La eficiencia global de aprovechamiento de energía resultó un poco menor con el biogás.

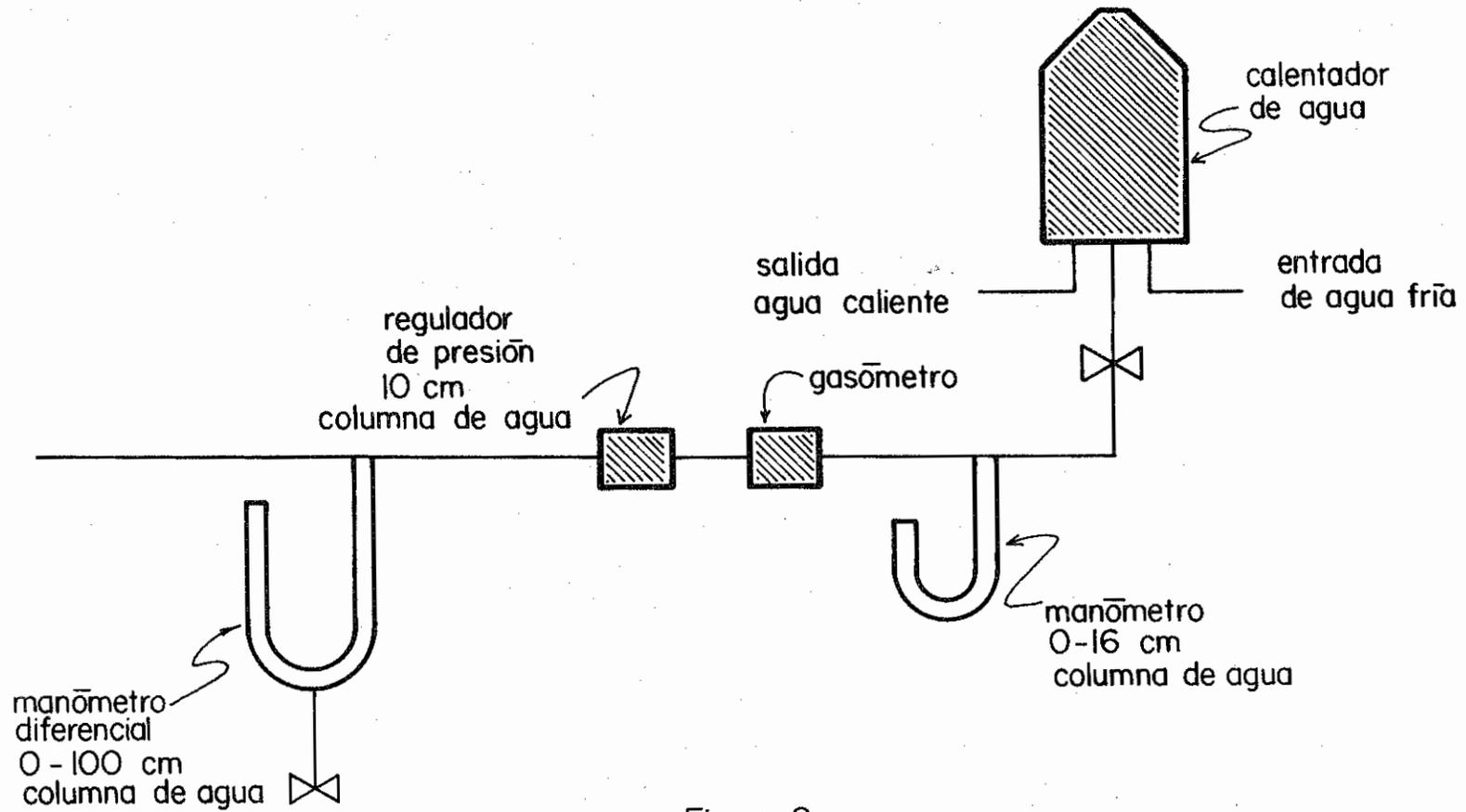


Figura 2

**Montaje de equipo para pruebas
con calentadores**

El Cuadro 2 muestra que 2.07 m³ de biogás sustituyen a 0.48 m³ de propano (equivalentes a 1.88 lb de propano líquido), o sea 1 m³ de biogás sustituye 0.91 lb de propano. En Guatemala, el costo del combustible es de \$CA 0.081 por libra de propano; entonces, resulta que el biogás representa un valor de sustitución, en esta aplicación, de \$CA 0.074/m³ (\$CA 0.08/lb x 0.91 lb/m³).

El costo de la modificación de propano a biogás es mínimo, ya que consiste nada más en el agrandamiento del inyector.

La inversión para dos digestores de 30 m³ cada uno, y sus accesorios fue aproximadamente de \$CA 3 000.00. Asumiendo que se utiliza todo el gas producido (24 m³/día) durante 300 días/año, para un total de 7 200 m³ biogás/año, en sustitución de gas propano, se obtendría un ahorro anual de \$CA 532.80 (7 200 x 0.074); el período simple de recuperación de la inversión sería 5.6 años, en teoría.

En la actualidad, una parte del biogás reemplazará a keroseno, con un valor mucho menor de sustitución. La granja donde se realizó este ensayo todavía no había entrado en producción normal al preparar este informe; por lo tanto, no existen datos reales de costos y resultados a los niveles de producción del diseño.

5. REFRIGERACION

Se ensayaron dos aplicaciones, una en cuartos refrigerados y, la otra, en enfriadores para leche. En el primer caso los resultados fueron satisfactorios; en el segundo, se despejaron algunas dudas y se identificaron diseños más promisorios.

5.1 Refrigeración de cuartos

Se diseñaron y construyeron dos cuartos que mantendrían temperaturas de 10° y 15°C en zonas con temperatura ambiente promedio de 31.5°C. El primero se iba a utilizar para almacenar leche pasteurizada y cuenta con cuatro unidades de refrigeración por absorción marca Norcold, modelo 8010 EG 3, con una capacidad de 1,550 Btu/hora. El segundo se utiliza para la maduración de quesos y cuenta con tres unidades del mismo modelo.

Para la adaptación de estas unidades se siguieron las especificaciones contenidas en el manual de aplicaciones D 106 del ICAITI y las dadas por el fabricante.

Los cuartos fueron instalados en la procesadora de leche de una escuela agrícola localizada en Choluteca, Honduras.

Las 7 unidades consumen 18 m³ de biogás por día, 2.6 m³ por unidad. Ello representa el 90% de la producción de dos digestores de 30 m³ de capacidad cada uno, funcionando a una presión de 10 cm de columna de agua.

Se estimó que estos cuartos fríos alcanzarían su temperatura de diseño en doce horas. Este período tan largo hace recomendable que una vez encendidas, las unidades permanezcan así por el mayor tiempo posible.

Por problemas ajenos a la institución, no fue posible evaluar la eficiencia de estos cuartos fríos.

Se estimó la inversión total necesaria para los biodigestores en \$CA 3 000.00. El ahorro proviene del valor del propano que se deja de consumir.

La potencia que debe suministrar el proceso de combustión a la unidad de refrigeración es de 350 W. Considerando que los gases de escape arrastran consigo casi

la mitad de la energía liberada en la combustión, se requiere un suministro bruto de 700 W, que equivale a 108 litros/hora de biogás ó 26.4 litros/hora de propano; (0.103 lb de propano por hora).

Si se consideran las siete unidades trabajando todo el día, durante 360 días al año el consumo de propano, sería: 6229.4 lb(*); a un costo de \$CA 0.08/lb, el valor total del ahorro anual potencial (con sustitución completa de propano por biogás) es de \$CA 498.35. Tal como se calculó en el ensayo anterior, en teoría, si todo el biogás que el sistema debe producir se aprovecha en sustitución de gas propano, la inversión en los biodigestores se recupera en cinco años con siete meses.

5.2 Enfriadores a base de agua

El objetivo era desarrollar enfriadores de leche que operaran con biogás, para su utilización en áreas rurales desprovistas de electricidad. Se ensayaron dos prototipos basados en el principio de enfriar agua y sumergir en ella los botes de leche. Se encontró que el tiempo de enfriamiento y recuperación de temperatura del agua era demasiado largo para propósitos prácticos y se identificaron nuevas opciones para ensayos futuros.

El primer prototipo consiste en un depósito hermético termoaislado para 1 m³ de agua, formado con lámina galvanizada, con una unidad de enfriamiento marca Norcold modelo 8010 EG 3 cuyo evaporador, adosado a una de las paredes del depósito, absorbe el calor del agua y de los recipientes de leche inmersos en ella. La temperatura del agua baja a 4 °C. El depósito tiene una abertura con tapadera aislada, por la que pueden introducirse hasta 4 tambos de 60 litros de leche cada uno.

Esta unidad empleó 4 días para bajar la temperatura de los bidones de leche de 20 a 4 °C.

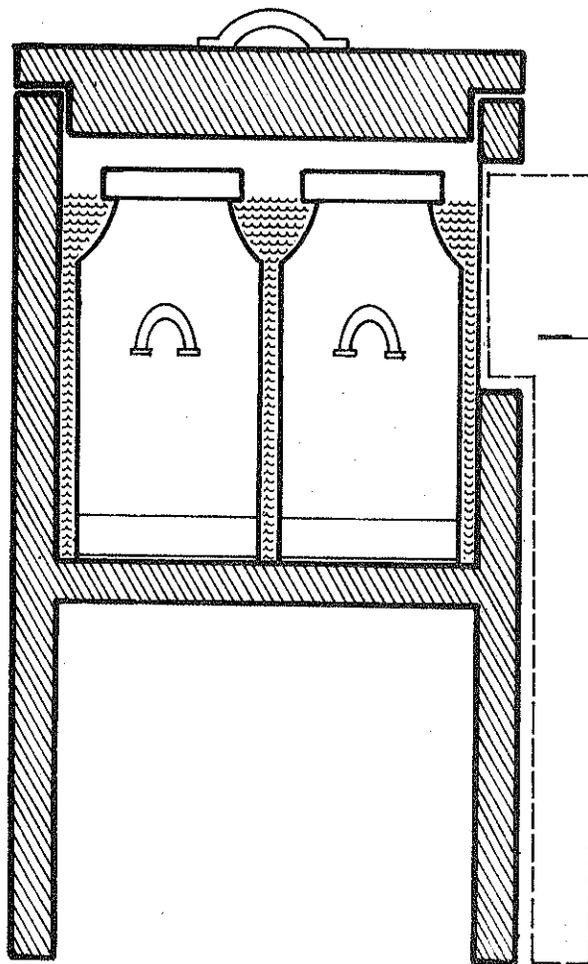
Las Figuras 3 y 5 muestran este prototipo.

El segundo prototipo incorporaba varias mejoras. Se redujo el tamaño del depósito de agua a 0.8 m³; se duplicó el aislamiento ("duropor" de 6 pulgadas de grueso); se mejoró la transferencia de calor por medio de una cajuela que rodeaba el depósito por los cuatro costados y que contenía líquido refrigerante que entraba en contacto con el evaporador; se redujo la altura de la unidad para facilitar la introducción de los tambos; se disminuyó la capacidad a 4 tambos de 50 litros.

La unidad empleó tres días en enfriar leche de 20 a 4°C. Esto todavía era demasiado para propósitos prácticos.

* 7(24)(360)(0.103) = 6229.4 lb.

CORTE



espacio para colocar
sistema de refrigeración
(ver figura 5)

Figura 3
**Enfriador de leche.
Primer prototipo**

Las Figuras 4 y 5, muestran este prototipo.

Los dos prototipos fueron fabricados en los talleres de ICAITI y ensayados en el Instituto Técnico de Agricultura (ITA), aprovechando el biogás de un digester de 70 m³ de capacidad, con una producción promedio de 20 m³/día. El digester utiliza el estiércol de 120 cabezas de ganado vacuno estabulado.

El Cuadro 3 presenta un resumen de los resultados obtenidos en las pruebas.

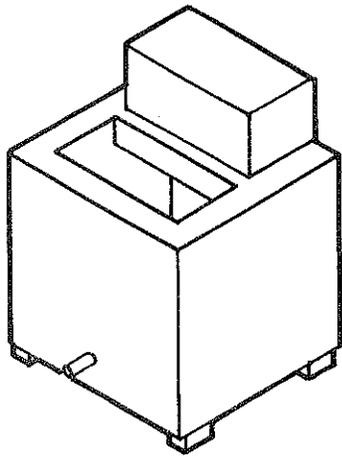
<u>Cuadro 3</u>									
<u>CARACTERISTICAS Y RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS UNIDADES EXPERIMENTALES DE ENFRIAMIENTO DE LECHE UTILIZANDO BIOGAS</u>									
UNI- DAD	FLUJO (m ³ /h)	PRESION (cm c.a.)	VOL. H ₂ O (m ³)	To °C	T1 °C	TIEMPO (días)	Ec kcal	Ea kcal	n %
1	0.0175	10	1	20	4	4	37,392	8,020	20
2	0.0175	10	0.8	20	4	3	28,044	6,416	23

Los sistemas son demasiado lentos para ser efectivos en la práctica. Además, el tiempo de recuperación de las unidades es demasiado largo, de dos y de un día y medio, respectivamente.

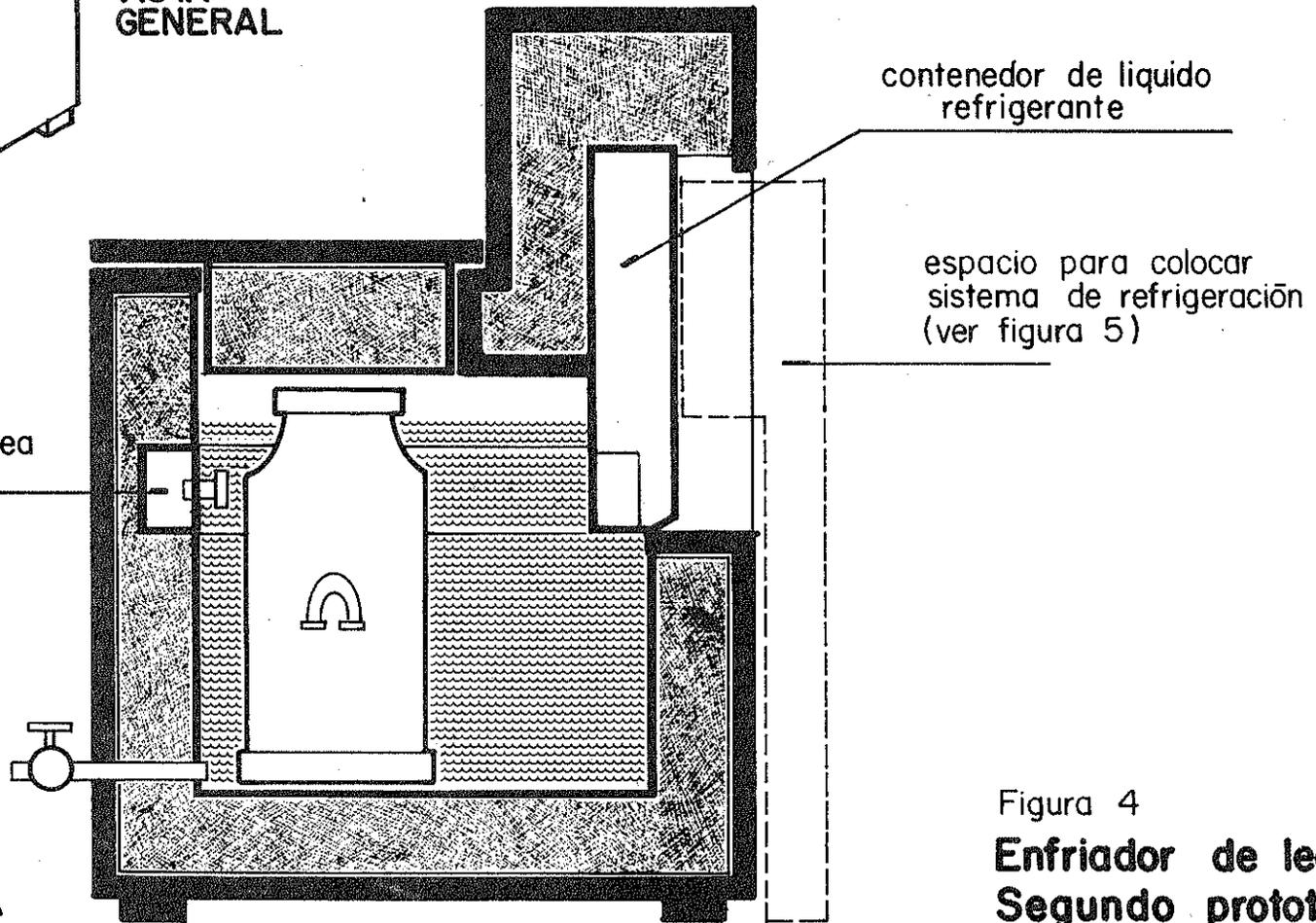
Después de evaluar globalmente los resultados de estos dos experimentos, el equipo del Proyecto concluyó que debieron haberse considerado otras opciones. Una de ellas es una cortina enfriadora común, que funcione con un generador movido por biogás. Se descarta la posibilidad de usar estos sistemas como un medio de transferencia de calor en el enfriamiento de leche cuando se usa biogás como fuente de energía directa.

Cabe también la posibilidad de usar este equipo en otras aplicaciones, como el preenfriamiento y conservación de verduras y frutas y la refrigeración doméstica. Otra posibilidad es adaptar equipo comercial para su funcionamiento con biogás, sustituyendo el motor eléctrico por uno de gasolina, pero persistirían problemas con el arranque automático de la unidad.

La Figura 6 muestra un esquema típico de un quemador para refrigerador que se ha adaptado al biogás.



VISTA
GENERAL



contenedor de liquido
refrigerante

espacio para colocar
sistema de refrigeración
(ver figura 5)

cajuela que rodea
al deposito

CORTE EN
LINEA MEDIA

Figura 4

**Enfriador de leche.
Segundo prototipo**

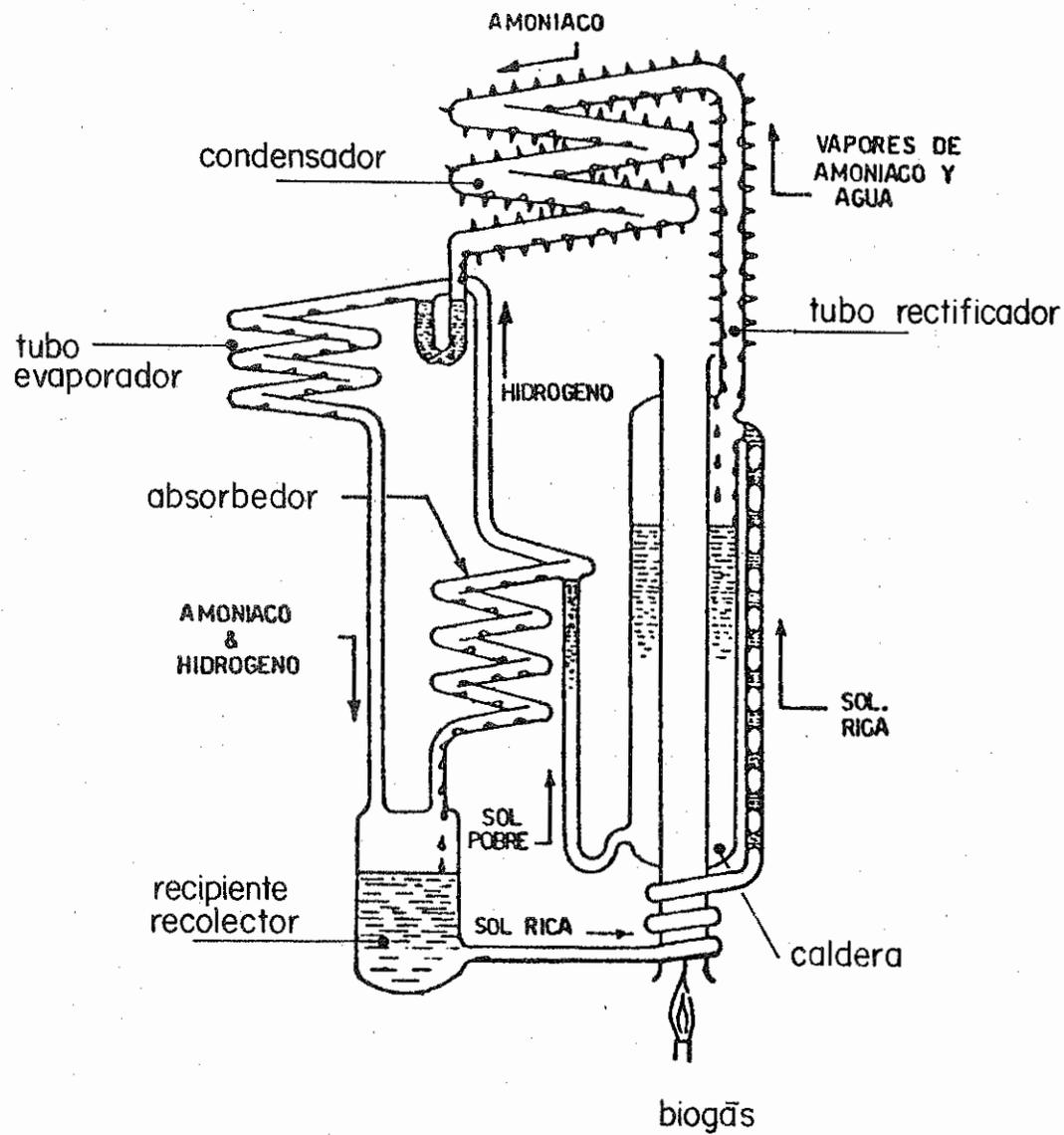


Figura 5
**Unidad de refrigeración
 a base de biogás**

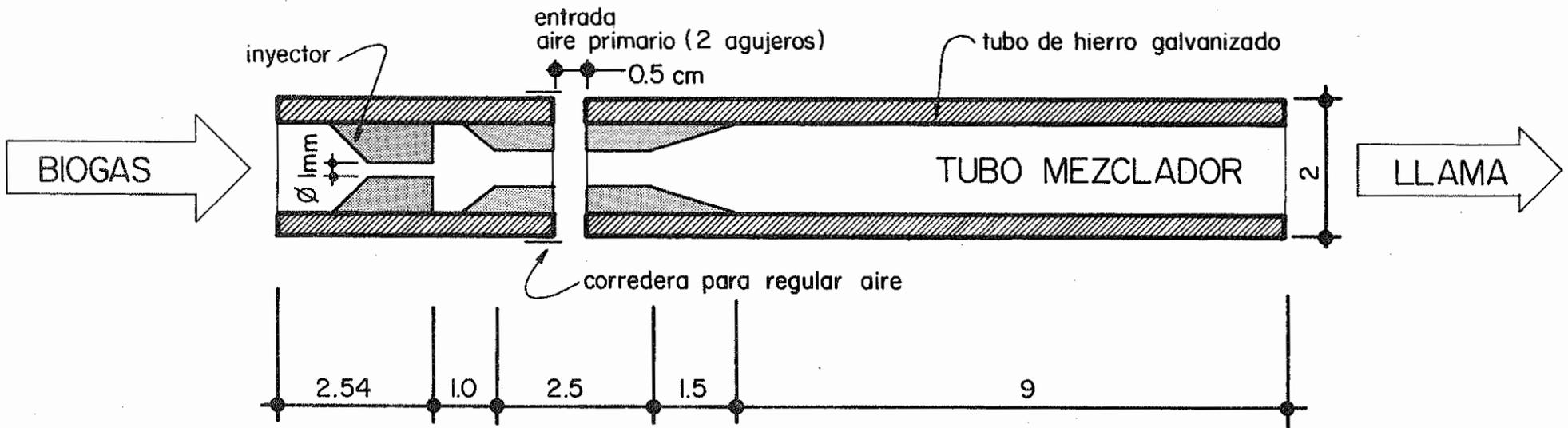


Figura 6
QUEMADOR PARA UNIDAD DE REFRIGERACION

6. ILUMINACION

Se ensayaron 3 lámparas. Dos eran marca Coleman de 300 Watts y la otra fue fabricada por el ICAITI. De las dos Coleman, una se operó con biogás y la otra con propano, para que sirviera de testigo.

Las principales modificaciones realizadas a la lámpara Coleman que funcionó con biogás se hicieron en el agujero del inyector (de 0.45 mm se amplió a 1.00 mm), la admisión de aire primario (se cerró a 25 mm²) y la presión (se estableció en 10 cm. de columna de agua).

Para la lámpara construida por ICAITI, se usaron las especificaciones presentadas en el manual D 106.

La experimentación consistió en determinar el consumo energético y la eficiencia luminica de las tres lámparas. La evaluación comparativa se llevó a cabo en las instalaciones de pruebas del ICAITI en el Instituto Técnico de Agricultura (ITA), en Bárcenas, Villa Nueva, Guatemala.

6.1 Lámpara "testigo".

La lámpara operada con propano funcionó con 28 cms. de columna de agua. El flujo de gas se controla con una válvula de aguja; el control de aire para la mezcla aire-gas consiste de un aro que se desliza para abrir o cerrar el orificio de entrada de aire.

Se estableció el consumo energético de esta lámpara y se midió su intensidad luminosa. El consumo energético (Q_c , expresado en kcal/h) es igual al poder calorífico del gas (P_c , expresado en kcal/kg) multiplicado por el consumo de gas (Q , expresado en kg/h). El consumo de gas (Q) se midió con una báscula y un cronómetro y fue de 0.11 kg/h. El poder calorífico del gas propano se tomó como 11,800 kcal/kg, que es lo usual en condiciones normales.

El consumo energético de la lámpara fue de 1 298 kcal/h. El Cuadro 4 muestra los resultados de la prueba.

6.2 Lámparas ensayadas con biogás.

Para probarlas se utilizó gas del digester de 70 m³ instalado en Bárcenas. Se trabajó a una presión de 10 cm.

de columna de agua. Se midió el consumo de gas con un gasómetro Wet Test: 0.12 m³/h para la lámpara Coleman, y 0.13 m³/h para la lámpara construida por el ICAITI. Se estimó el poder calorífico del gas en 5 432 kcal/m³.

El consumo energético de la lámpara Coleman operada con biogás fue de 651.8 kcal/h; el consumo de la lámpara construida por el ICAITI fue de 706.16 kcal/h.

El Cuadro 4 presenta esos resultados, y la Figura 7, un esquema del montaje del equipo para las pruebas.

<u>Cuadro 4</u>						
<u>CARACTERISTICAS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ILUMINACION CON LAMPARAS A BASE DE BIOGAS</u>						
MODELO COMB.	DIAMETRO INYECTOR (mm)	CONSUMO m ³ /h	PRESION cm.	CONSUMO kcal/h	INTENSIDAD LUMINOSA watt <u>1</u> /	LUX
COLEMAN CON PROPANO	0.45	0.026	28	1 298.00	140	1950
COLEMAN CON BIOGAS	1.0	0.12	10	651.8	65	960
LAMPARA ICAITI <u>2</u> / CON BIOGAS	1.0	0.13	10	706.16	75	1025

1/ En equivalente de watt incandescente.

2/ Ver lista de materiales y costo en el manual D 106 del ICAITI.

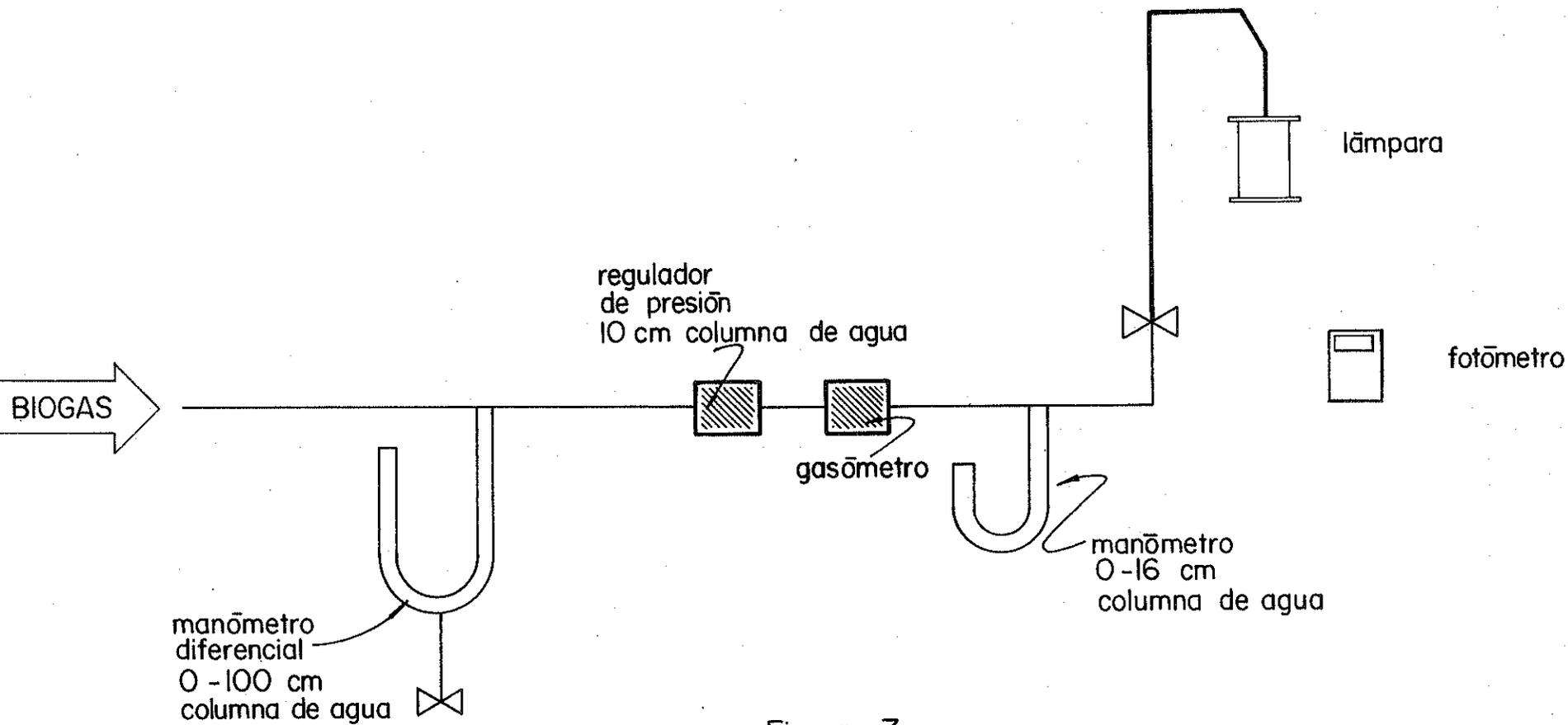


Figura 7
Montaje de equipo para pruebas con lámparas

La Coleman de propano superó a las otras dos, que tenían casi la misma capacidad luminica. La iluminación producida por la lámpara accionada con biogás es dependiente de la presión con que se obtenga el gas.

La calidad de iluminación proveniente de lámparas económicas de biogás es baja en comparación con la de lámparas de gas, propano o eléctricas; la luz de una lámpara de biogás tiende a ser amarilla y de baja potencia. También genera mucho calor, lo que resulta en costos adicionales de cambiar "camisas" en las lámparas.

Para saber si tiene ventajas económicas el uso de biogás para iluminación, es necesario calcular el periodo de recuperación de lo que se invierte en el sistema de producción de biogás.

Un biodigestor de 15 m³ produce cinco metros cúbicos de biogás por día; y en un año produce 1800 metros cúbicos. Según los valores del Cuadro 4, una lámpara ICAITI consume 130 litros de biogás por hora, para producir un nivel de iluminación de 75; para un nivel de 140, semejante al obtenido con una lámpara Coleman alimentada con propano, el consumo de biogás deberá ser el doble, es decir, 260 litros por hora; si la lámpara funciona 4 horas diarias, en un año consume $0.26 \times 4 \times 360 = 374.4$ metros cúbicos.

Entonces, con la producción de biogás del digestor, es posible abastecer a $1800/374.4 = 4.81$ lámparas. Dadas las fluctuaciones imprevistas en la producción de biogás, usaremos un valor de 4 lámparas.

Veremos cuánto se gastaría en propano para obtener el mismo servicio anual con cuatro lámparas Coleman. Según el cuadro 4, el consumo de propano, por lámpara, es de 26 litros/hora (1 atmósfera, 15°C); en esas condiciones, el equivalente de propano líquido a gas, es de 3.7 litros/metro cúbico y el peso unitario del propano es de 0.51 kg/litro(*).

Horas de iluminación por año:

$$H = 360 \times 4 \times 4 = 5760$$

Consumo de propano por año:

$$\begin{aligned} CP &= 5760(0.026) = 150 \text{ metros cúbicos de gas} \\ &= 150(3.7) = 554 \text{ litros de propano líquido} \\ &= 554(0.51) = 283 \text{ kilogramos} = 622 \text{ libras} \end{aligned}$$

* Los Combustibles y su Tecnología, Wilfrid Francis, Bilbao, Ediciones Urmo, 1969
LP Gas Serviceman's Manual-REGO, 4201 West, Peterson Avenue, Chicago, Illinois 60646

Costo del propano, por año:

$$K = 622 \times 0.081 = \$CA 50.38$$

Costo del sistema de producción de biogás:

$$\begin{aligned} CB &= \text{Costo digestor} + \text{costo 4 lámparas ICAITI} \\ &= \$CA 700.00 + 4(\$CA 20.00) = \$CA 780.00 \end{aligned}$$

Período de recuperación:

$$R = 780/50.38 = 15.5 \text{ años}$$

Si se compara el biogás con otras alternativas de iluminación, como candelas o keroseno, el retorno es todavía peor ya que estas fuentes son mucho más baratas.

En conclusión, obviamente no es recomendable invertir en un sistema de biogás solamente para iluminación. Generalmente el biogás es mejor aprovechado para obtener calor que para iluminación.

7. ADAPTACION DE MOTORES A BIOGAS

El biogás puede utilizarse en motores de combustión interna de 4 tiempos; los motores de 2 tiempos no se pueden adaptar a biogás porque necesitan que el combustible vaya ya mezclado con el aceite que lubrica las partes móviles del interior del motor.

El biogás puede aprovecharse mejor en los motores diesel. Por tener un poder antidetonante entre 110 y 115, es apto para mezclarse con el aire de admisión y soporta las altas compresiones de los motores diesel sin riesgos de autoignición, con lo que se le extrae así el máximo poder calorífico.

En motores de gasolina, por su relación de compresión más baja, no se le puede extraer al biogás su máximo poder calorífico; puede modificarse el motor para aumentarle la relación de compresión, pero ello causaría problemas al intentar utilizar el mismo motor, con gasolina.

7.1 Adaptación de motores diesel

En los motores diesel es relativamente fácil sustituir al diesel parcialmente por biogás, pero es más difícil hacerlo totalmente. Para llegar a un 85% de sustitución de diesel por biogás es necesario comprar inyectores más resistentes a las altas temperaturas y efectuar cambios en el gobernador de la bomba de inyección; estos cambios impiden que después pueda usarse el motor solamente con diesel. Con modificaciones más sencillas, que sí permiten al motor funcionar solamente con diesel, puede alcanzarse un grado de sustitución del 50%.

La adaptación más sencilla consiste en introducir el biogás directamente en el múltiple de admisión. El gobernador automáticamente reduce el paso de diesel a los inyectores y regresa el exceso al depósito de combustible. Cuando por cualquier razón falla el suministro de gas, automáticamente el motor provee el diesel que hace falta para que el motor siga operando.

Para encender un motor diesel adaptado a biogás, primero se arranca el motor con diesel y se deja funcionar por tres minutos o hasta que alcance su temperatura normal de funcionamiento. Luego se abre manualmente la válvula de

suministro de biogás, con lo que se nota un ligero incremento en la potencia. Se sigue abriendo la válvula y cuando el motor empieza a fallar, se cierra la válvula 5° ó 1/8" y se puede hacer una marca o poner un tope para futuras ocasiones.

Con esta sencilla adaptación se ha notado una reducción en el consumo de combustible del 50%, un incremento en la potencia entre 10 y 20%, baja formación de carbón en los anillos y en la cámara de combustión, y aceite más limpio por un tiempo más largo.

ADAPTACION DE MOTORES A BIOGAS

Para evaluar el comportamiento de un motor de cuatro tiempos movido por una mezcla de diesel y biogás se efectuaron pruebas comparativas. Las pruebas fueron realizadas en la finca El Zapotillo, en Teculután, Zacapa, Guatemala, entre agosto y septiembre de 1985. Se utilizó gas de un digestor de 15 m³, y un motor diesel de 11hp que se usa normalmente para mover un molino de martillo que muele zacate para el ganado.

A continuación se dan algunas especificaciones y datos básicos de los ensayos:

- | | |
|--------------------|--|
| a) Marca del motor | YANMAR |
| b) Tipo | N5 B 11/11R |
| c) Potencia | 11 hp |
| d) Revoluciones | 2,400 |
| e) Arranque | Manual |
| f) Combustible | Diesel de 45 octanos y 7.2 lb/gal. PCI = 10,000 kcal/kg. |

Se midió el consumo de combustible y la eficiencia a diferentes niveles de carga. Se determinó la potencia en relación al consumo de diesel solo, y mezclado con biogás. La eficiencia del motor, en porcentajes, es igual a la potencia en el eje (Pp, expresada en kW) dividida entre la potencia calorífica (Pc, también en kW), todo multiplicado por 100. La potencia en el eje fue medida directamente y la potencia calorífica está dada por la fórmula $Q_c = Q_g \times P_c$ (kcal/h). La potencia calorífica viene dada por el producto del consumo del gas y el poder calorífico del gas.

A continuación se listan las variables medidas y el equipo utilizado.

- | DATO | EQUIPO UTILIZADO |
|-----------------------------------|---|
| a) Consumo de diesel | Bureta graduada y cronómetro |
| b) Consumo de biogás | Gasómetro y cronómetro |
| c) Presiones | Manómetros diferenciales |
| d) Velocidad del motor | Tacómetro |
| e) Torque | Freno Prony |
| f) Temperatura ambiente | Termómetro de bulbo |
| g) Temperatura de gases de escape | Termocuplas tipo "K", Mod. 8110-10, Cola Palmer |

Las pruebas se realizaron con una mezcla del 50% diesel-50% biogás; el testigo fue el motor operado solamente con diesel. La carga utilizada para efectuar la prueba fue proporcionada por un freno Prony y una báscula adaptados al motor después de separarlo del molino de martillo. Se varió la potencia de 0 a 25, 50 y 85%.

Se arrancó el motor en frío y se esperó cinco minutos para que alcanzara la temperatura normal. Los resultados, más satisfactorios cuando se hicieron las pruebas de la mezcla diesel-biogás después de las pruebas de diesel solo, se presentan en el cuadro 5. Las figuras 8 y 9 muestran esquemas del montaje de equipo para las pruebas en el motor diesel y con el freno de Prony.

<u>Cuadro 5</u>						
<u>RESULTADOS DE LA PRUEBA DE UTILIZACION DE BIOGAS</u>						
<u>EN UN MOTOR DIESEL CON UNA MEZCLA 50%-50%</u>						
<u>CARGA (%)</u>	<u>DIESEL</u>			<u>50% DIESEL, 50% BIOGAS</u>		
	<u>25</u>	<u>50</u>	<u>85</u>	<u>25</u>	<u>50</u>	<u>85</u>
<u>CONSUMO</u>						
<u>COMBUSTIBLE</u>						
<u>(kW total)</u>	13.12	16.19	32.11	8.96	14.40	27.96
<u>EFICIENCIA</u>	20.96	25.35	29.12	22.89	28.51	33.44

El ahorro en el consumo de combustible total (diesel + biogás) fue mayor al nivel de carga más bajo. Al 25% de carga, el motor operado con la mezcla de diesel y biogás consumió un 31.7% menos combustible. El ahorro fue del 11.1% para una carga del 50% y del 12.9% para una carga del 85%.

La eficiencia fue mayor a los niveles de carga más altos. Al 85%, el incremento en la eficiencia del motor operado con la mezcla fue del 14.8%. Este incremento fue del 12.5% y del 9.2% para cargas del 50 y 25%, respectivamente.

Al combinar estos valores, se obtiene que el motor con la mezcla aumentó el rendimiento del combustible utilizado en un 34.6% al 25% de carga, en un 12.5% al 50% de carga y en un 16.7% al 85%. En términos de ahorro de diesel a 85% de carga, el biogás reemplazó el 57% del diesel consumido en la prueba testigo.

El costo de la adaptación de un motor diesel a biogás es de \$CA 16.00. El costo de un biodigestor de 15 m³ que produzca 5 m³/día es de \$CA 700.00. El costo de un sistema de almacenamiento de gas se estima en \$CA 100.00. La inversión total para el sistema de biogás es de \$CA 816.00.

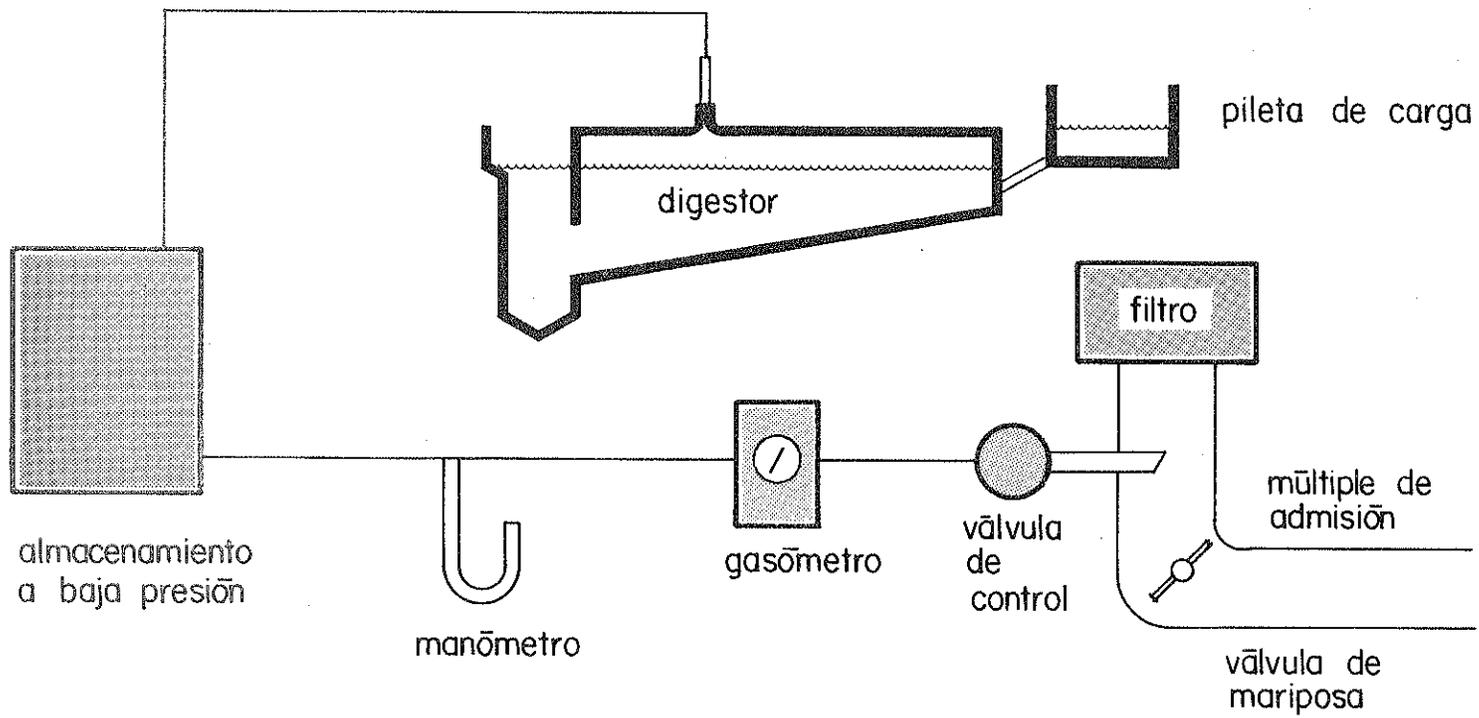


Figura 8
**Montaje de equipo para pruebas
 Motor Diesel**

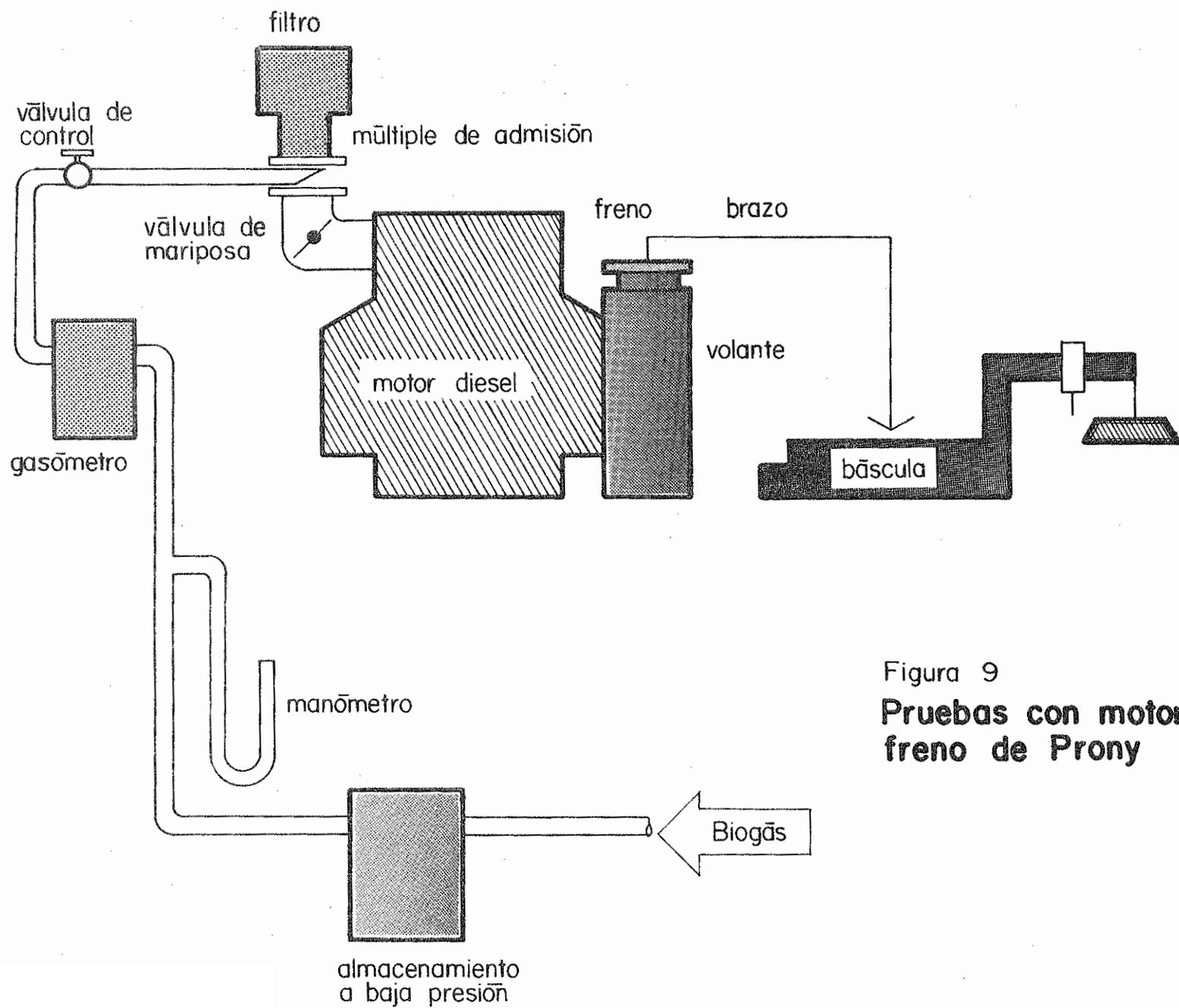


Figura 9
 Pruebas con motor Diesel
 freno de Prony

Tomando como base la carga al motor del 85%, se tiene un consumo de combustible de 32.11 kW, lo que equivale a 0.95 galones de diesel por hora (29,000 kcal/galón de diesel). Cuando el motor opera 50% diesel, 50% biogás, se consumen 0.41 galones de diesel por hora y 2.21 m³ de biogás. Asumiendo que el 100% del biogás que se obtiene del digestor (5 m³/día) fuera aprovechado para sustituir al diesel en la forma descrita, se puede calcular, el período de retorno de la inversión:

- horas por año de funcionamiento de un motor con la producción del biodigestor y una mezcla del 50% diesel, 50% biogás ($1800 \text{ m}^3 / 2.21 \text{ m}^3/\text{hr}$) = 814.5 horas
- ahorro de diesel (0.95 - 0.41 galones) = 0.54 galón/h
- ahorro anual de diesel = 440 galones
- costo del diesel = \$CA 0.468/gal
- ahorro anual (máx.) = \$CA 205.92
- período de recuperación de la inversión (teórico) = 4 años.

7.2 Adaptación de motores de gasolina

En los motores de gasolina es más difícil obtener del biogás todo su potencial calorífico, pero es posible sustituir a la gasolina en un 100%. Al efectuar la adaptación de un motor de gasolina a biogás sin hacerle trabajos mecánicos para cambiar su relación de compresión, puede utilizarse nuevamente con gasolina. La adaptación solamente consiste en mezclar, mediante un dispositivo especial, el biogás con aire antes de introducirlo a los cilindros; la mezcla se puede introducir en el filtro, entre el filtro y el carburador o en el carburador mismo, si éste lo permite.

Para aprovechar al máximo el poder energético del biogás en un motor de gasolina, hay que hacerle modificaciones permanentes, con el fin de aumentar su relación de compresión.

La relación de compresión de un motor está asociada con el índice de octano del combustible que se utiliza. En los motores de gasolina la relación de compresión está entre 6 y 9 y el índice de octano entre 87 (para la gasolina corriente) y 91 (para la superior). En los motores diesel, la relación de compresión está entre 15 y 19.

El índice de octano de un combustible es su capacidad máxima de soportar presión sin autoencenderse cuando es adecuadamente mezclado con aire.

El inconveniente de las modificaciones permanentes para aumentar la relación de compresión, es que, al utilizar nuevamente con gasolina un motor modificado existirá el riesgo de que se autoencienda.

Existen varias formas de arrancar un motor de gasolina adaptado a biogás. Una es inyectar 2-3 cc de gasolina al carburador y arrancar el motor por unos segundos; en el momento en que el motor esté por detenerse, se abre la válvula de biogás lentamente (hay que evitar que succione demasiado y se detenga por mezcla demasiado rica). En este caso la inyección se hace con un pequeño depósito exterior, colocado entre el filtro de gasolina y el carburador.

Otra manera es agregar un poco de gasolina en la cuba del carburador, cerrar la válvula de suministro de gasolina, arrancar el motor, operarlo hasta que se termine la gasolina e introducir el biogás al motor lentamente a través de la válvula de suministro. En este caso sólo hace falta abrir una válvula para permitir que se llene el depósito del carburador.

Para evaluar el comportamiento de un motor de gasolina adaptado a biogás se realizaron pruebas comparativas. Las pruebas fueron realizadas en la Escuela Técnica de Agricultura (ITA), Bárcenas, Villa Nueva, Guatemala. Se utilizó gas de un digestor industrial almacenado a baja presión en bolsas ahuladas de 10 m³ de capacidad en un motor generador de electricidad de 3 hp.

A continuación se presentan algunas especificaciones y datos técnicos de los ensayos.

	MOTOR	GENERADOR
a) Marca	Briggs & Stratton	Homelite
b) Tipo	4 tiempos, enfriado por aire, Mod. 80212	E 1350 C.A., Monofásico
c) Potencia	3 hp	1.7 kVA; 1.35 kW
d) Relación de compresión	6:1	---
d) Revoluciones de servicio	3,600	3,600
e) Sistema de encendido	Magneto	---
f) Arranque	Manual	---
g) Combustible	Gasolina regular (87 octanos)	---
h) Voltaje	---	120 voltios
i) Frecuencia	---	60 Hz.
j) Factor/potencia	---	0.8

Se adaptó este equipo para su utilización con biogás, aprovechando la succión del motor y la baja presión de la bolsa de almacenamiento, entre 1 y 3 cm de columna de agua.

Se midió el consumo de combustible y la eficiencia del motor a diferentes niveles de carga. Los niveles de carga

fueron del 35 %, 55% y 92.6% cuando el motor operó con gasolina corriente y de 31%, 50% y 63% cuando operó con biogás. La carga utilizada fueron 13 bombillas de 100 vatios cada una, montadas en un tablero de madera; con ellas se aproximaban cargas del 25, 50, 75 y 100%. A continuación se enumera el equipo utilizado, y las variables medidas.

VARIABLE	EQUIPO UTILIZADO
a) Gasto de combustible	Bureta graduada y cronómetro
b) Gasto de biogás	Gasómetro Wet Test y cronómetro
c) Presiones	Manómetros diferenciales
d) Velocidad del motor	Tacómetro TIF modelo 700
e) Potencia monofásica	Voltímetro TIF modelo 1000 y amperímetro
f) Temperatura ambiente	Termómetro de bulbo de Hg
g) Temperatura de gases de escape	Termómetro con termocuplas tipo K, modelo 8110-10.

Las figuras 10 y 11 muestran el montaje del equipo y del sistema de pruebas.

Para las pruebas se usó biogás en un 100%. Se hicieron al motor las modificaciones necesarias para que funcionara bien en presencia del bióxido de carbono que contiene el biogás. El testigo fue el motor accionado por gasolina.

Se arrancó el motor en frío y se esperó cinco minutos a que alcanzara su temperatura normal de funcionamiento. Se determinó la relación entre la potencia instantánea producida por el generador al cual el motor estaba adaptado y el combustible consumido por el motor. Se midió así la eficiencia global del equipo a distintas cargas.

En este caso, la eficiencia global es igual a la potencia monofásica producida (medida en kW) dividida por la potencia consumida de combustible (kW), multiplicado todo por 100. La potencia consumida de combustible es igual al flujo de combustible (en m³/s) multiplicado por el poder calorífico corregido del combustible (en kcal/m³) multiplicado por 4.184×10^3 , expresada en kW/kcal.

Esto da la eficiencia global del sistema y lo que interesa es la eficiencia del motor. Puesto que la eficiencia global de dos o más equipos es igual al producto de las eficiencias individuales y la eficiencia de generadores de corriente alterna de baja capacidad está entre 0.8 y 0.85, al conocer la eficiencia global se estimó la eficiencia del motor como la eficiencia global dividida entre 0.8.

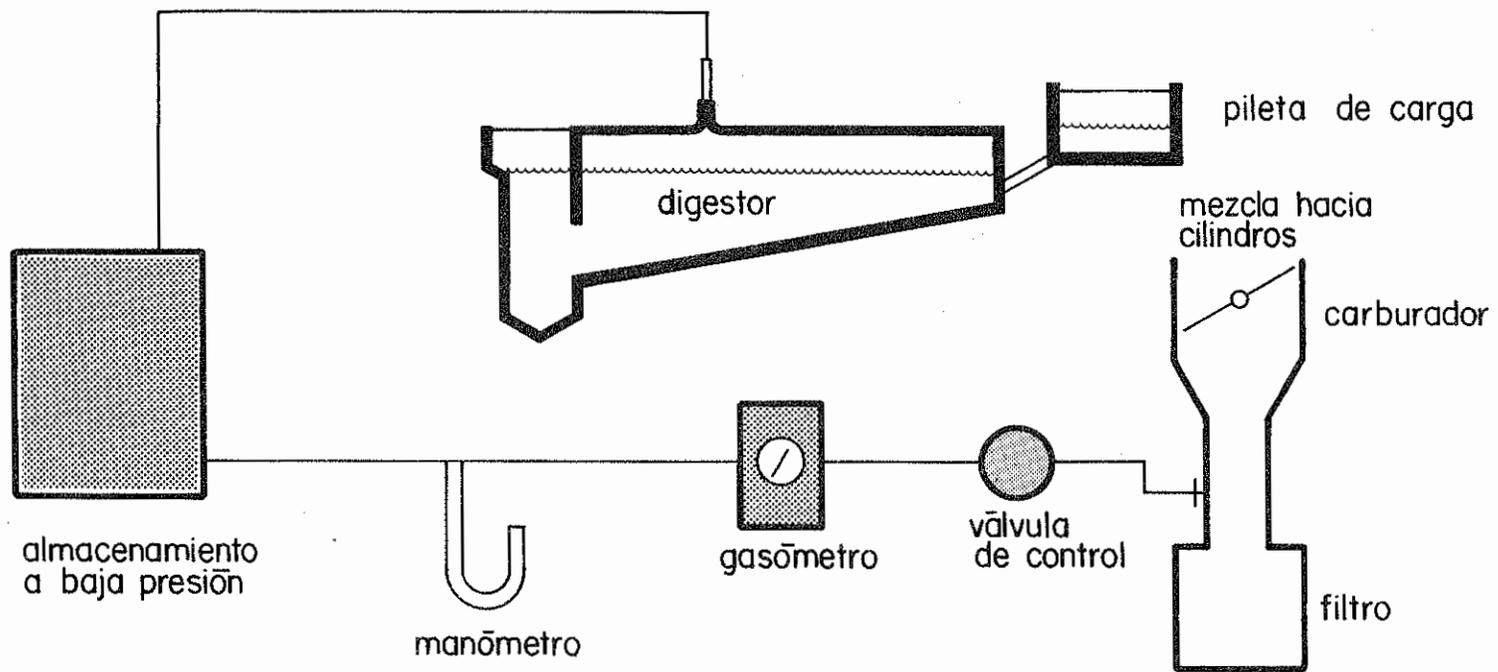


Figura 10
**Montaje de equipo para pruebas
 Motor Gasolina**

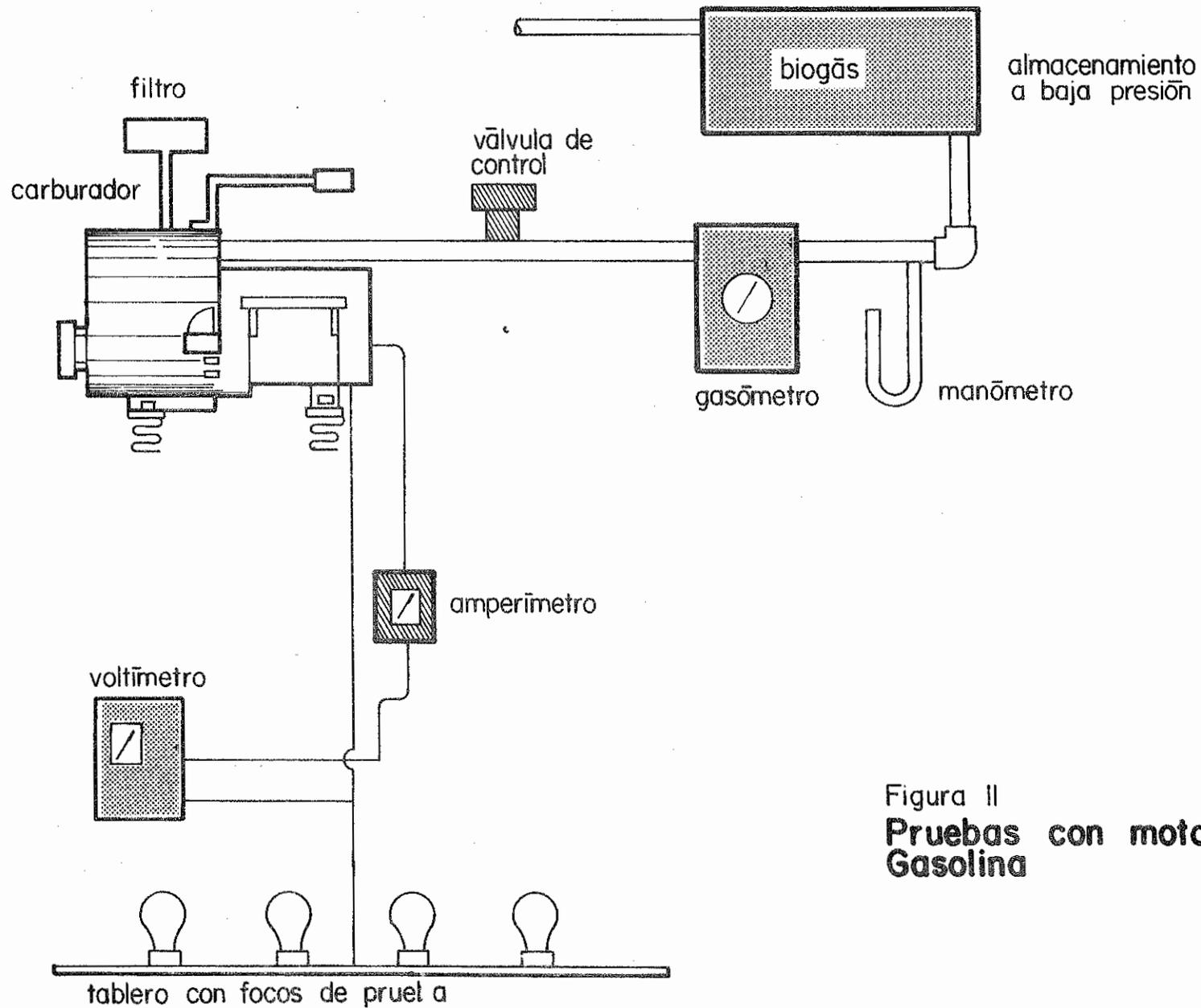


Figura II
Pruebas con motor de Gasolina

El cuadro siguiente muestra los resultados obtenidos.

<u>Cuadro 6</u>						
<u>RESULTADOS DE LA UTILIZACION DE BIOGAS EN UN MOTOR DE GASOLINA</u>						
	<u>GASOLINA CORRIENTE</u>			<u>BIOGAS</u>		
CARGA (%)	35	55	93	31	50	63
CONSUMO COMBUSTIBLE (kW)	9.7	6.5	8.4	7.5	6.6	6.3
EFICIENCIA	6.1	13.4	17.5	6.6	12.1	15.9
(generador de 1350 W, monofásico, y motor de 3 hp)						

Para hacer la evaluación económica se toma como base una carga del 63% para el motor operado con biogás y del 55% operado con gasolina. Esta carga equivale a 8 focos de 100 watt.

Operando con gasolina, el consumo de combustible sería de 6.51 kW, equivalente a 0.175 galones de gasolina por hora; operando con biogás el consumo sería de 1.04 m³/hora. De nuevo, asumiendo que 100% del biogás que el sistema produce (5m³/día = 1800 m³/año), está aprovechado para sustituir a la gasolina en las condiciones descritas, se puede calcular el periodo simple de recuperación de la manera que sigue:

	<u>\$CA</u>
- inversión total (biodigestor \$CA 700.00 más adaptación de \$CA 20.00, más almacenamiento de \$CA 100.00)	= 820.00
- horas anuales que podría funcionar el motor con el gas producido (1 800/1.04 m ³ /hora)	= 1,730.8 horas
- ahorro anual de gasolina (0.175 x 1,730.8 horas)	= 302.9 gal
- costo de la gasolina	= \$CA 1.16/gal
- ahorro anual	= \$CA 351.34
- periodo teórico de recuperación de la inversión	= 2.3 años.

8. RESUMEN DE RESULTADOS

Hasta el momento, el uso más común del biogás es la cocción doméstica de alimentos. Esto es un resultado de la promoción hecha por diversas organizaciones para fomentar el uso de digestores pequeños para aplicaciones rurales. Como el uso de biogás en cocinas domésticas es bastante sencillo en términos técnicos, no se ha incluido el tema dentro del presente informe. Para mayor información al respecto, ver el Manual D-106 del ICAITI.

En términos económicos, se ha hecho un análisis de los digestores pequeños en los informes finales sobre digestores de bajo costo y los de construcción convencional. En ellos se explica por qué, en general y en las condiciones del área rural, no es recomendable en términos económicos invertir en digestores para pequeñas aplicaciones domésticas. Inclusive, los costos de operación pueden exceder a los beneficios económicos anuales en ciertas condiciones, dando pérdidas netas cada año. Este fenómeno ha resultado en casos reales a pesar de que es posible hacer cálculos teóricos que muestran que los mismos sistemas podrían recuperar su inversión en cinco años.

Dos puntos importantes con respecto al uso doméstico de biogás en pequeñas aplicaciones son: 1) en las condiciones prevalecientes en el campo, no es una inversión recomendable; y 2) no se debe basar las decisiones en los cálculos teóricos de los beneficios y costos de los sistemas.

Como regla base, se debe analizar con cuidado cada caso específico, preferiblemente aprovechando el apoyo de personal experimentado en la materia.

En teoría, se han calculado periodos de retorno de 2.3 años cuando el biogás sustituye gasolina en motores-generadores; 4 años con motores de diesel; 5-6 años con motores y quemadores de propano; y 13-14 años con lámparas de propano.

Sin embargo, los cálculos teóricos presentados incluyen suposiciones que no siempre reflejan la realidad en el campo. Por ejemplo, en el caso de la granja avícola, el cálculo teórico produjo un periodo de retorno de 5.6 años, cuando un cálculo basado en el uso real del biogás indica que el periodo de retorno sería de más de 11 años. Eso, a

pesar de que se tiene un sistema modelo funcionando, sin problemas, que se usa casi todos los días para un proceso industrial. Por lo tanto, insistimos que es recomendable usar los cálculos teóricos sólo para lo que son, y no esperar resultados iguales en las condiciones de uso en el campo.

En cuanto a los diferentes casos descritos, se puede concluir lo siguiente.

8.1 Quemadores

Se verificó que es factible la adaptación a biogás sin afectar la eficiencia o el funcionamiento de los equipos adaptados y, además, que las especificaciones e instrucciones sobre estos aspectos, presentadas en el manual D 106 del ICAITI, son totalmente aplicables.

8.2 Lámparas

Se verificó la intercambiabilidad de los gases propano (LPG) y biogás en los mezcladores de las lámparas. La intensidad luminosa es dos veces mayor en las lámparas operadas con propano en comparación con biogás. Sin embargo, la intensidad máxima alcanzada con la lámpara operada con biogás, 75 watt, permite iluminar adecuadamente una habitación del área rural.

Las lámparas del diseño ICAITI para biogás mostraron ser un poco más eficientes que las de tipo Coleman adaptadas y son mucho más baratas. En ambos casos, la luminosidad es mayor a mayores presiones de gas. No se recomienda su utilización a presiones menores de 6 cm de columna de agua, porque la luminosidad disminuye y tiende a formarse llama.

8.3 Refrigeración

Se lograron resultados satisfactorios en la aplicación a cuartos fríos para industria mediana, lo cual no ocurrió con las unidades pequeñas de refrigeración de leche para áreas rurales.

Aunque el sistema rural de refrigeración de leche no funcionó, esto no significa necesariamente que el biogás no pueda ser empleado en diseños mejorados en el futuro. Se estima que se deben considerar: sistemas refrigerantes de mayor capacidad y la utilización de sistemas comerciales, sustituyendo los motores eléctricos por los de gasolina o bien con electricidad proveniente de generadores adaptados a biogás. Sistemas de refrigeración por absorción para uso doméstico funcionan casi con la misma eficiencia mediante biogás que cuando operan con combustibles como propano y keroseno.

8.4 Motores

Se adaptaron motores de diesel y de gasolina a biogás con bastante éxito y sin alterar el funcionamiento del motor cuando el biogás faltase. En motores diesel se logró incrementar la eficiencia del sistema total entre 11 y 35%, y una sustitución de diesel de hasta 57%. En gasolina se logró una sustitución total con poca variación en la eficiencia del motor y una disminución en su potencia máxima del 30%.

Los motores diesel, al funcionar con mezcla de biogás en un 50%, aumentaron su eficiencia entre un 9 y un 14%. Este incremento se manifiesta como una mayor aceleración del motor.

Cuando se adapten motores muy antiguos será necesario revisar el gobernador centrífugo de la bomba de inyección. Si esto no funciona se hará necesario regular la bomba de inyección.

8.5 General

En general, el biogás puede ser utilizado en casi cualquier sistema que utilice leña o combustibles derivados del petróleo, siempre y cuando se realicen las adaptaciones necesarias. Su efectividad como combustible depende de la aplicación específica. Según los ensayos descritos aquí, la aplicación más rentable es en motores de gasolina, en la cual el retorno imputable a cada metro cúbico de biogás es de \$CA 0.195. Le sigue la aplicación en motores diesel, donde el valor imputado al biogás es de \$CA 0.114/m³ (58% del valor en la aplicación a motores de gasolina). Luego viene la refrigeración de cuartos, con \$CA 0.074/m³ (38% del valor en motores de gasolina), calentamiento de agua para pasteurización de leche, \$CA 0.074/m³ e iluminación utilizando lámparas desarrolladas por el ICAITI, con un valor imputado de \$CA 0.032.

El Cuadro 7 presenta un resumen de la efectividad del biogás en las diferentes aplicaciones.

Cuadro 7

RESULTADOS DE LA EFECTIVIDAD DEL BIOGAS
EN LAS APLICACIONES ENSAYADAS

	AHORRO RESULTANTE POR m ³ DE BIOGAS \$CA	PERIODO DE RETORNO TEORICO EN AÑOS
1. Motores de gasolina	0.195	2.3 años
2. Motores diesel	0.115	4.0 años
3. Refrigeración en cuartos fríos y calentamiento de agua en pasteurización de leche, sustituyendo al propano	0.074	5.6 años*
4. Escaldado de gallinas, sustituyendo leña	0.056	5.6 años
5. Iluminación con lámparas ICAITI, sustituyendo al propano	0.032	13.5 años

* En la página 10 de este informe se ha calculado el periodo de recuperación de 11.6 años, con base en valores reales.

Para este cuadro, se ha calculado el periodo de recuperación con datos teóricos, como se indica más adelante. Esto se hizo para que todos los valores del cuadro pudieran compararse, ya que fueron calculados en esa misma forma; también se ha hecho así, para que se ponga de manifiesto que un cálculo teórico puede ser muy diferente a un valor práctico.

El cálculo teórico se hizo así: el total de biogás producido por el digestor en un día, puede sustituir a $28.3 \times 5.6 = 158$ libras (72 kg) de leña, según el último párrafo de la página 9.

El costo de esa leña, por año, es igual a \$CA 505 ($72 \times 365 \times 0.0192$); y esto da un periodo de recuperación de 5.6 años ($2832/505$).

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Técnicamente, el biogás podría sustituir a casi cualquier combustible.
2. Son pocas las aplicaciones reales que ofrecen buenos retornos económicos como resultado de invertir en sistemas pequeños de biodigestión.
3. Antes de invertir en un sistema de biodigestión se debe hacer un análisis exhaustivo de todas las otras opciones disponibles, considerando el sistema de producción global. Esto se debe realizar con asesoría de personal experimentado en este campo.
4. En general, las aplicaciones pequeñas de biodigestión para cocción e iluminación doméstica, no han representado buenas inversiones en términos económicos.
5. Las aplicaciones más rentables parecen ser las industriales, especialmente donde se gasta en la disposición de materiales orgánicos; el sistema de biodigestión sirve como una forma de tratamiento de desechos, que produce además el biogás.
6. Es recomendable diseñar el sistema en la forma más sencilla posible y que requiera un mínimo de mantenimiento. La sustitución de otros combustibles por biogás y viceversa debe ser fácil, permitiendo cambios rápidos entre combustibles cuando sea necesario (por ejemplo, cuando no hay suficiente gas para terminar algún proceso).
7. Como el biogás es relativamente difícil de almacenar en grandes cantidades, y su producción en el digestor es prácticamente constante, en muchos casos es preferible buscar usos para el biogás que se ajustan a este régimen de producción (una demanda continua al ritmo del flujo de producción de gas, en vez de demandas que son altas y ocasionales).

ANEXOS

ANEXO A-1 Seguridad e higiene en la utilización de Biogás

1. SEGURIDAD E HIGIENE EN LA UTILIZACIÓN DE BIOGAS

1.1 Mezclas explosivas

El metano es el gas combustible que en mayor porcentaje contiene el biogás. Los límites de inflamabilidad del metano van del 5% al 15% en proporción de volumen con el aire; estos niveles se modifican a causa del relativamente alto nivel de bióxido de carbono que tiene el biogás, quedando los límites de inflamabilidad entre 9% y 22% en proporción de volumen con el aire. Estos niveles nos indican que en un espacio cerrado donde exista una mezcla de este tipo, es de alto riesgo producir una chispa, ya que produciría una explosión.

1.2 Sensación de intoxicación

Cuando hay fugas de biogás en cuartos cerrados también pueden darse problemas de intoxicación, ya que su densidad y composición cambian las condiciones adecuadas para el confort humano; la densidad promedio del aire es de 1.293 g/l, la densidad del biogás es de 1.09 g/L, promedio, con un porcentaje entre 30 y 40% de bióxido de carbono; algunas veces este porcentaje puede subir hasta un 45% lo que hace que aumenten los riesgos de intoxicación, ya que el biogás aumenta su densidad y sobrepasa la del aire, lo que hace que el contenido de oxígeno del aire baje a un 17% y en casos extremos a un 12.5%, y esto puede causar sensaciones sofocantes.

Por lo anterior es necesario tomar algunas medidas de seguridad, como las que se describen a continuación.

1.3 Ventilación

Para todos los lugares donde se trabaje, utilice o almacene biogás, es necesario tener entradas y salidas de corrientes de aire, para evitar que se den mezclas explosivas o peligro de riesgos por intoxicación.

1.4 Evitar que se mezcle aire y biogás en tuberías y almacenamientos

Principalmente cuando se trabaja con almacenamientos a presiones relativamente altas, hay que tener especial cuidado, ya que en estos casos pueden ocurrir explosiones espontáneas.

1.5 No dejar al alcance de niños las válvulas y fósforos

Una gran cantidad de accidentes que causan quemaduras graves y hasta la muerte son provocados por personas que dejan al alcance de los niños las válvulas y fósforos.

1.6 Detección de fugas:

Existe un método muy sencillo para la detección de fugas de gas, el cual consiste en hacer una mezcla de agua y jabón para producir espuma, la cual se aplica en los lugares donde hay probables fugas; el resultado que se obtiene es formación de burbujas donde hay fuga de gas; siempre que se detecte una fuga es necesario corregirla de inmediato.

1.7 Agentes odorizantes:

Algunos gases comerciales utilizan odorizantes mezclados en partes de 1 por 1000, para que sea posible detectar fugas por el olor. Tal es el caso del gas propano que utiliza un gas llamado mercaptano, en la concentración anterior, para poder detectarlo en el caso de que se den fugas, principalmente en espacios cerrados.

El biogás cuando no se pasa por filtros que absorben el ácido sulfhídrico (H_2S), tiene un olor característico a huevo podrido, mediante el cual es fácil detectar fugas principalmente en espacios cerrados; en los casos donde se le quita este olor característico por pasarlo por filtros se recomienda agregarle un gas odorizante.

1.8 Evitar formación de mezclas de alto contenido de llama con puntos amarillos.

Cuando se trabaje en la adaptación de quemadores, hay que tratar de que el orificio de paso de gas se taladre con el diámetro correcto, ya que si se hace más grande puede provocar mal mezclado del gas y, por ende, mala combustión del mismo, dando como resultado gases contaminantes.

ANEXO A-2 Lista de informes técnicos y otras publicaciones del ICAITI correspondientes al Proyecto Leña y Fuentes Alternas de Energía.

1) PUBLICACIONES EN EL PERIODO 1980-1987

	Titulo	Año	Precio (US\$)
-	Leña y Fuentes Alternas de Energía: Estudios sobre leyes y políticas en América Central	1983	3.00
-	Manual de construcción y operación. Planta de biogás	1983	2.00
-	Manual de construcción y operación. Planta económica de biogás	1983	2.00
-	Biogás: información general	1983	2.00
-	Informe técnico de biogás. (Ensayos de sustrato)	1984	2.00
-	Aplicaciones de biogás y bioabono	1985	2.00
-	Digestor para biogás. Construcción Convencional (Hoja de datos técnicos)	1984	0.50
-	Digestor para biogás. Construcción de bajo costo (Hoja de datos técnicos)	1985	0.50
-	Estufas domésticas: Pruebas de Eficiencia energética	1984	3.00
-	Estudio sobre la introducción y adopción de estufas de leña en cinco comunidades de Guatemala	1983	3.00*
-	Manual de construcción y operación Estufa Chulah	1983	2.00*
-	Manual de construcción y operación Estufa Lorena	1983	2.00
-	Estufa de cerámica. Manual de construcción y operación	1985	2.00

* Publicación agotada; disponible solamente en fotocopia.

Publicaciones en el periodo 1980-1987 (Cont).

	Título	Año	Precio (US\$)
-	Manual para estufas de uso colectivo. Construcción y operación	1984	2.00
-	Producción de panela, con bagazo de caña	1987	2.00
-	Informe del desarrollo de una estufa de cerámica	1985	2.00
-	Colector solar plano. Manual para la fabricación	1986	2.00
-	Aplicaciones de energía solar	1983	3.00
-	Secado solar de granos.	1985	3.00
-	Secadores solares Carpa y Wengert Construcción-uso-mantenimiento	1985	2.00
-	Secado de madera	1986	2.00
-	Conservación de productos marinos	1985	2.00

2. INFORMES FINALES, DISPONIBLES A PARTIR DE 1988

Titulo	Precio (US\$)
- Aprovechamiento energético de biogás	3.00
- Digestor para biogás, construcción convencional	3.00
- Digestor para biogás, construcción de bajo costo	3.00
- Aprovechamiento de efluentes de biodigestores	2.00
- Horno de leña para cal	1.00
- Horno de leña para producción de sal	1.00
- Estufas domésticas mejoradas: cerámica prefabricada	3.00
- Estufas industriales de leña	3.00
- Estufas domésticas mejoradas: Lorena y similares	3.00
- Hornilla para panela	2.00
- Hornos de leña para pan	3.00
- Horno para ladrillos	3.00
- Hornos para carbón vegetal	3.00
- Gasificador de biomasa	1.00
- Uso de energía solar y biogás para pasteurizar leche	3.00
- Pequeño secador para piña (Solar-combustión)	2.00

Publicaciones disponibles en 1988 (Cont)

Titulo	Precio (US\$)
- Secador para cacao y granos. Solar-combustión	2.00
- Secado de madera aserrada. solar-combustión	4.00
- Calentador solar para agua	3.00
- Salinas solares	3.00
- Secamiento solar de pescado	3.00
- Curado solar de cebolla	3.00
- Secado solar de leña y bagazo de caña	1.00
- Secadores solares para fruta	3.00