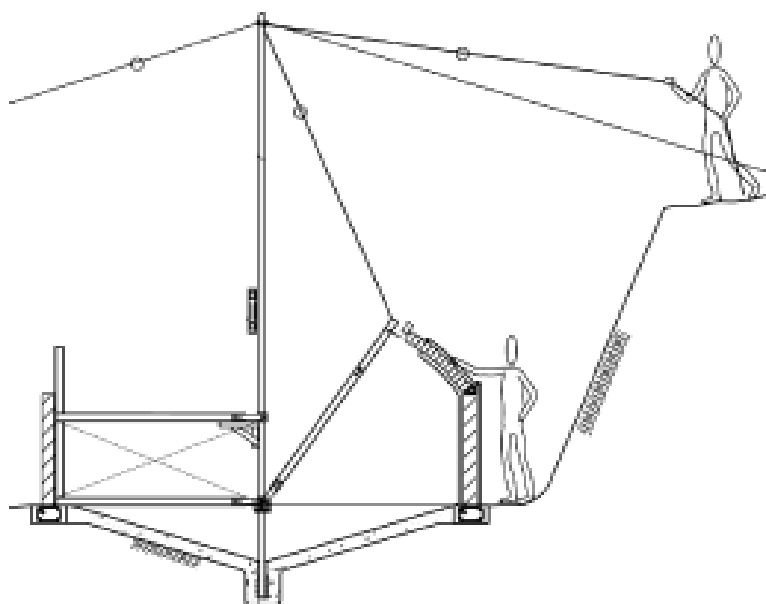


JOSÉ ANTONIO
GUARDADO CHACÓN

Diseño y construcción de plantas de biogás simples



editorial
cubasolar

**Diseño
y construcción
de plantas
de biogás
sencillas**

**JOSÉ ANTONIO
GUARDADO CHACÓN**

Diseño y construcción de plantas de biogás simples



EDICIÓN: Alejandro Montesinos Larrosa
Lourdes Tagle Rodríguez

CORRECCIÓN: Jorge Santamarina Guerra

DISEÑO
Y REALIZACIÓN: Alejandro Montesinos Larrosa

ILUSTRACIONES: Jorge Luis Cortada Ferrera

© José Antonio Guardado Chacón, 2007
© Sobre la presente edición:
Editorial CUBASOLAR, 2007

ISBN 959-7113-33-3

EDITORIAL
CUBASOLAR CALLE 20 NO. 4113, ESQ. A 47, MIRAMAR, PLAYA,
CIUDAD DE LA HABANA, CUBA.
TEL.: (537) 2059949.
E-MAIL: amonte@cubaenergia.cu
[HTTP://www.cubasolar.cu](http://www.cubasolar.cu)

Índice

Introducción	7
Cuidados para construir una planta de biogás sencilla	8
Ubicación de una planta de biogás sencilla	9
Excavación	11
Tipos de plantas	13
Dimensionamiento	20
Ejemplo de dimensionamiento	25
Instalaciones complementarias	27
Tuberías	27
Trampas de agua y pendientes de la tubería	28
Reducción del contenido de sulfuro de hidrógeno	29
Tanque de mezcla-desarenador	29
Consideraciones para el diseño y cálculo estructural de una planta de biogás	32
Placa de fondo	35
Mampostería y mortero	36
Casco esférico o cúpula de mampostería	37
Cuello	38
Detalles constructivos y materiales de construcción	41
Materiales más usados en la obra	42
Herramientas y dispositivos	44
Herramientas	44
Dispositivos	44
Partes principales	46
Losa de cimentación	46
Muro cilíndrico	46
Viga de cerramiento o cierre del muro	47
Cúpula o domo esférico	47
Viga de cierre	47
Cuello	48

Tapas de hormigón	48
Trabajos de terminación y acabado	49
Repellos	49
Estucado e impermeabilización	50
Rellenos y nivelación del terreno	50
Pintura en general	50
Protección y cercado del área	50
Puesta en marcha	51
Explotación	51
Mantenimiento	52
Selección, diseño y ejecución de plantas de biogás del tipo GBV	53
Bibliografía	66

Introducción

Esta obra está concebida para brindar los conocimientos mínimos que deben tenerse en cuenta al seleccionar, dimensionar y construir una planta de biogás sencilla, además de contribuir al desarrollo del arte del biogás en Cuba. Para ello, el autor ha tenido en cuenta las enseñanzas provenientes de los errores más frecuentes que se incurren en el diseño y la construcción de biodigestores, así como las valiosas experiencias de los usuarios y técnicos que a lo largo de los últimos quince años han trabajado e intercambiado sobre el tema mediante talleres, como el realizado en Sancti Spíritus del 27 al 29 de febrero de 2006, dedicado a la actualización y perspectivas de la producción de biogás en Cuba bajo el principio del desarrollo sostenible, con participación extranjera y una representación importante de instituciones, centros y personalidades provenientes de casi todos los territorios del país.

Por «arte del biogás en Cuba» entendemos la acción participativa y creativa de un sector amplio de la población cubana en la instrumentación y generalización de la tecnología del biogás, a partir de características, posibilidades y condiciones específicas.

Cuidados para construir una planta de biogás sencilla

La sencillez de algunas plantas de biogás puede dificultar el entendimiento de que es preciso tener mucho cuidado en todo el proceso de su concepción y construcción, sobre todo cuando no se dispone de los materiales idóneos y se emplea recortería o materiales en desuso. Por tal razón, se necesitan criterios y conocimientos técnicos que permitan valorar su factibilidad y determinar los requisitos mínimos para prolongar la vida útil de la instalación.

Algunas encuestas realizadas indican que el número de personas que se motivan o se hacen eco a favor de la tecnología del biogás es mayor cuando una planta funciona. El número de desmotivados crece entre 30-50 % y en ocasiones se multiplica cuando la planta funciona mal. Generalmente, esto ocurre cuando la selección de la planta no se hace o se decide correctamente, su manejo no se corresponde con las características de los usuarios, los detalles no se cumplen con el rigor necesario y muchas veces están mal dimensionadas o se dimensionan sin fundamentos lógicos. El constructor de una planta de biogás tiene que poder distinguir cuáles son las soluciones realmente utilizables y saber por qué se debe prestar tanto cuidado a la hora de construir una planta de biogás sencilla.

Las condiciones necesarias para tener una planta de biogás son:

- Desearlo, conocer sus bondades y sentir la necesidad de su uso.
- Tener disponibilidad financiera para adquirir los recursos necesarios o poseerlos (total o parcialmente).
- Disponer de materia orgánica, agua y espacio.
- Conocer cuándo un diseño resulta funcional para sus características y posibilidades.

Este manual, sin pretensiones rígidas, puede servir para valorar este último requisito y evaluar la factibilidad de las demás condiciones.

Ubicación de una planta de biogás sencilla

La ubicación de un biodigestor es tan importante como su propia construcción. Una planta mal ubicada será una instalación inútil, a la que no se le sacará provecho. Por el contrario, una buena ubicación desempeña un papel importante para su fácil manejo y operación. Un estudio previo del lugar y una detallada evaluación reportarán ganancias en el futuro.

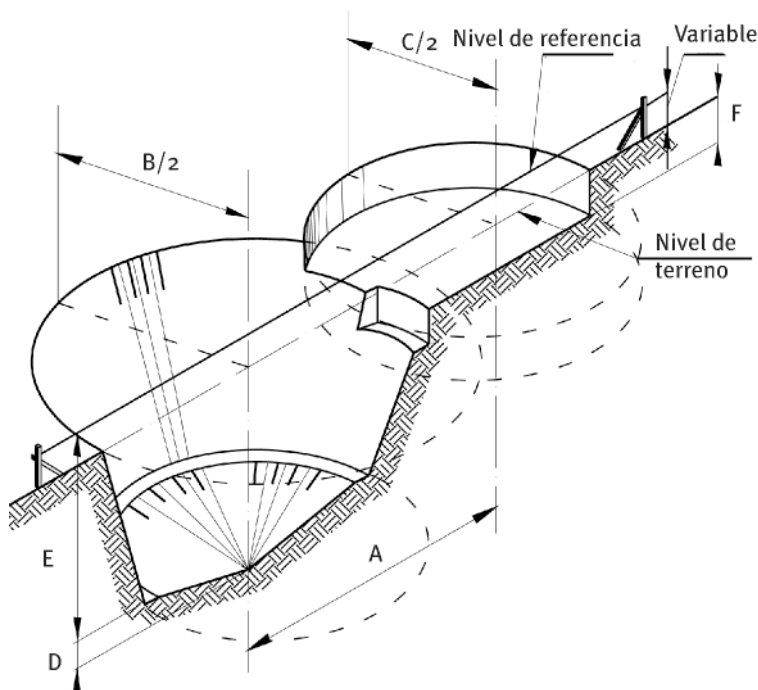
Los principales aspectos que se deben tener en cuenta al ubicar un biodigestor son los siguientes:

- Seleccionar el lugar más cercano posible a la fuente de materia prima.
- Debe tratarse, por todos los medios, de que la topografía del terreno permita el cargado de la planta por gravedad.
- En el lugar debe existir una fuente de agua para realizar la mezcla y mantener la limpieza de la planta.
- La instalación donde se utilizará el biogás debe encontrarse lo más cerca posible de la planta de biogás ($L_{\text{máx}} < 0,95 P_{\text{máx}}$; donde $L_{\text{máx}}$ es la distancia máxima en metros; y $P_{\text{máx}}$, la presión máxima en milímetros de columna de agua).
- La topografía del terreno debe favorecer que la utilización del bioabono líquido se realice por gravedad.
- Se debe evitar el contacto con el manto freático, para prevenir las filtraciones hacia el interior o la contaminación del manto. Como norma, el fondo del biodigestor debe encontrarse a un metro o más del manto freático.

Para lograr un buen trazado de la planta, en el área que se utilizará para su construcción, es imprescindible eliminar todo aquello que sea un estorbo, como escombros, hierbas, plantas, raíces, etcétera.

Cuando el terreno se encuentra limpio, se procede al replanteo del biodigestor y el tanque de compensación. Según el volumen del digestor que previamente se haya seleccionado y utilizando los valo-

res de la tabla de la figura 1, se marcan en el terreno las distancias indicadas en las figuras 1 y 2 empleando para ello estacas, cuerdas y una manguera para correr niveles. La mayor parte de las plantas de biogás construidas en la región central del país responden a las dimensiones típicas principales de las referidas figuras para biodigestores de pequeña y mediana escala del tipo cúpula fija.



DIGESTORES TÍPICOS	DIMENSIONES PRINCIPALES DE LA EXCAVACIÓN (m)					
	A	B	C	D	E	F
12	2,90	1,80	1,70	0,45	3,20	1,32
24	3,10	2,20	1,90	0,60	3,50	1,37
42	3,60	2,60	2,10	2,72	4,00	1,37

Fig. 1. Excavación para biodigestores típicos del tipo Nicarao, desde 12 hasta 42 m³.

Desde que comienza hasta que termina la construcción, todas las medidas verticales se tomarán a partir del nivel de referencia, que se establecerá por encima del nivel del terreno, para su fácil control,

tierra que se extraiga se depositará a más de un metro del borde de la excavación, y el lugar donde se construirá la caja de carga y el desarenador se deberá mantener libre de tierra excavada. Se recomienda, junto con la excavación, abrir también la zanja para la colocación del tubo de carga y el de extracción de lodo. Este último se realizará si el modelo de cúpula fija es del tipo Nicarao o GBV, como se indica más adelante. La excavación debe abrirse a la profundidad exacta para evitar rellenos a la hora de cimentar, por lo que se deberán tomar, cada cierto tiempo, medidas verticales a partir del nivel de referencia.

La excavación debe tener implícita el replanteo de los pasos de la escalera que permite la comunicación entre el digestor y el tanque de compensación, así como la inclinación que finalmente tendrá el fondo (Fig. 2). Es importante asegurarse de que el fondo de la excavación esté siempre un metro como mínimo por encima del nivel freático para evitar su contaminación. Otro aspecto no menos importante es el relacionado con las observaciones del terreno, para definir sus características generales con la correspondiente valoración, que nos permitan hacer las correcciones pertinentes en caso de que el terreno lo exija para garantizar la resistencia e impermeabilización necesarias. Tomando en consideración que la mayoría de estas excavaciones, a pequeña y mediana escalas, se realizan sin previo estudio geológico e hidrogeológico del lugar, es recomendable la presencia del proyectista en el terreno, una vez concluida la excavación y antes de comenzar la fundición del cerramiento y piso del fondo. Estas prácticas son de obligado cumplimiento en la ejecución de las obras bajo los conceptos de la metodología GBV en el contexto de arte del biogás en Cuba, para lograr un adecuado diseño.

Tipos de plantas

En general, las plantas de biogás simples que se conocen pueden ser divididas en tres tipos (ver Fig. 3).

El diseño y dimensionamiento de un biodigestor depende, en lo fundamental, de los factores siguientes:

- a) Tipo y composición del material orgánico que se debe emplear para la biodigestión.
- b) Demanda de biogás y de biofertilizante.
- c) Materiales de construcción que se deben emplear.
- d) Tecnologías constructivas apropiadas.
- e) Facilidad de explotación y mantenimiento.
- f) Posibilidad económica del usuario.

Estos seis factores pueden ser resumidos en dos:

- Factibilidad de la inversión (necesidad y condiciones creadas).
- Características y situación económica del usuario.

Las plantas de tecnología simple, según el régimen de carga o llenado, se clasifican en dos tipos fundamentales: de flujo continuo, mayormente empleadas para la obtención de volúmenes considerables de gas; y las de flujo discontinuo o Batch, para pequeñas producciones de biogás.

La gran ventaja de las primeras es que las bacterias metanogénicas reciben un suministro estable del material orgánico, por lo que producen biogás de manera más uniforme.

Las plantas de tecnología simple más empleadas, y de flujo continuo, pueden agruparse en dos tipos ampliamente desarrollados en la práctica:

- a) Planta de cúpula móvil, en la cual el gasómetro (compuesto generalmente por planchas metálicas) flota sobre el material orgánico en fermentación.
- b) Planta de cúpula fija, en la que el gas se almacena en la parte superior debido al desplazamiento gaseoso.

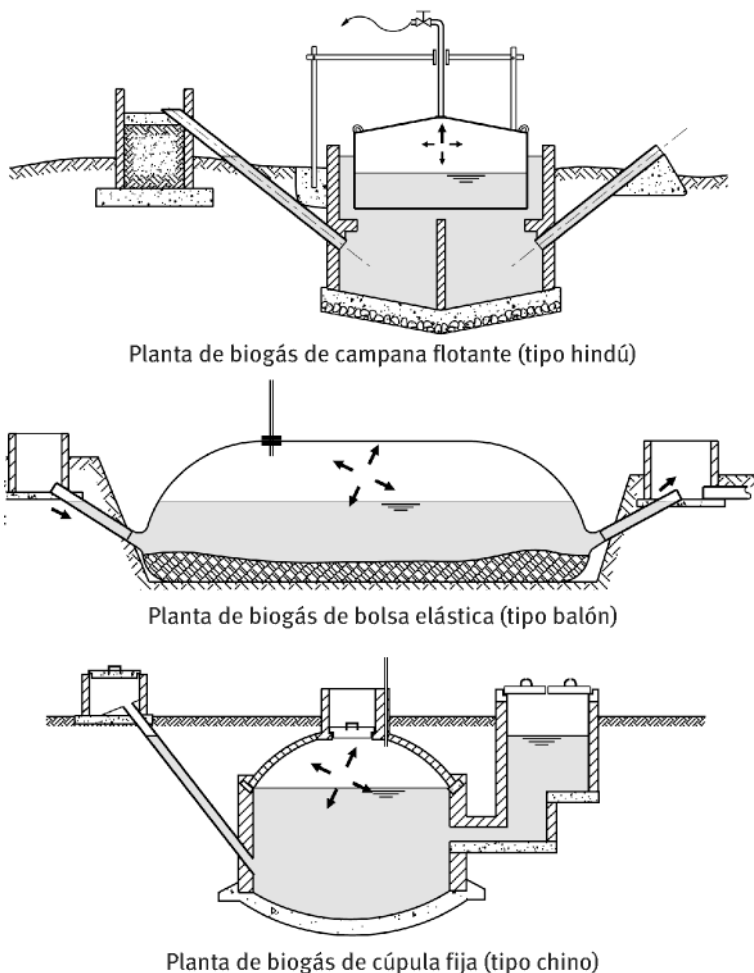


Fig. 3. Clasificación de las plantas de biogás simples más empleadas.

- Su construcción se realiza con paredes de bloques de hormigón y cúpula de ladrillos, y se emplean otros materiales conocidos, como cemento, arena, piedra y acero constructivo, que aseguran una alta resistencia y durabilidad de la obra.
- No presentan partes móviles propensas al desgaste, así como tampoco partes metálicas que faciliten la corrosión.
- Su tiempo de vida útil se extiende a más de veinte años.

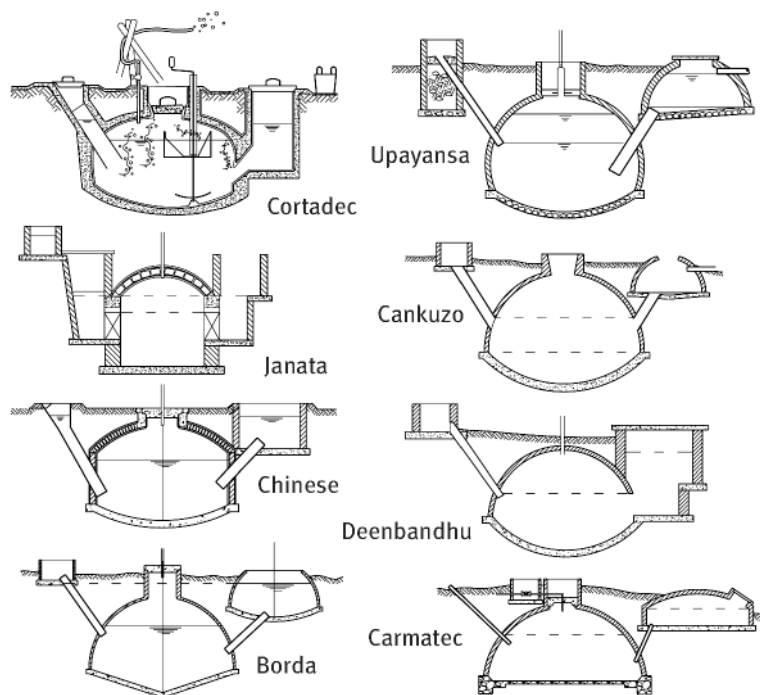
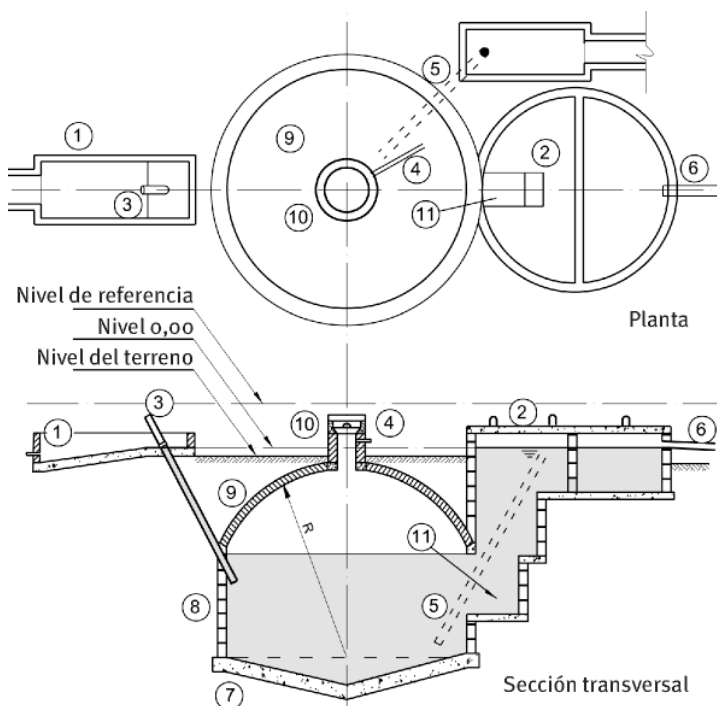


Fig. 4. Diseños de biodigestores de cúpula fija empleados en diferentes regiones del mundo.

La evolución de los biodigestores de cúpula fija (Fig. 4.), que ha tenido su expresión más acabada en el modelo Nicarao (ver Fig. 5), ha permitido introducir otras ventajas:

- Posibilidad de hacer extracciones del lodo digerido, sistemáticamente, sin alterar su funcionamiento, lo que permite un mejor aprovechamiento del lodo y extiende los plazos de mantenimiento.
- Mejor aprovechamiento de la excavación.
- Mejor acceso al biodigestor, tanto durante la obra como para futuros trabajos de revisión.
- Simplificación del método de construcción, lo que permite disminuir el tiempo de ejecución (de 10 a 15 días).

Su desventaja principal radica en la necesidad de personal calificado para su construcción, y de una inspección periódica y monitoreo por parte de técnicos especializados.

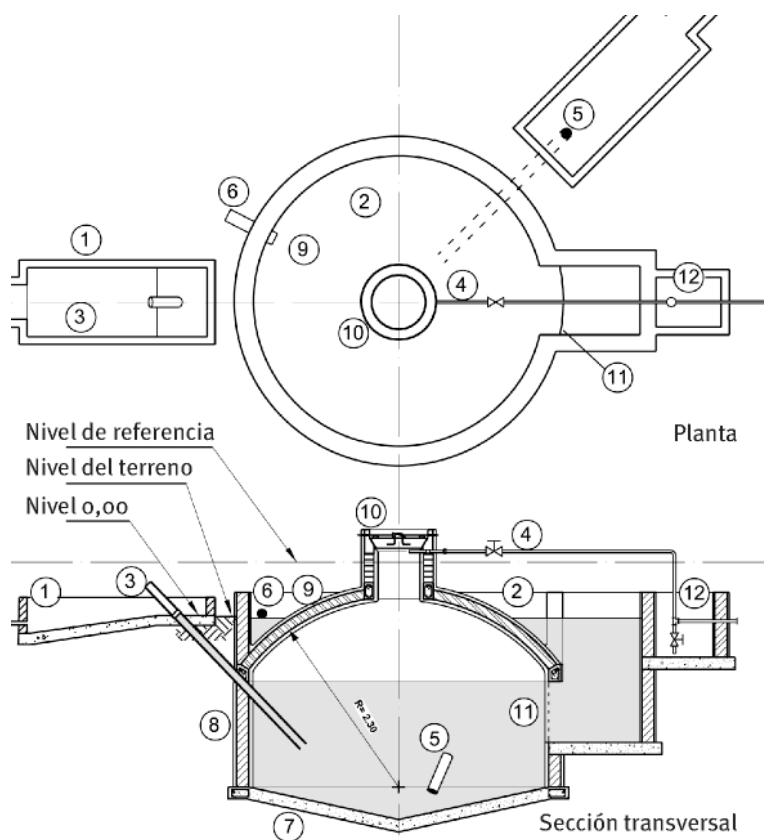


- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1. TANQUE DE MEZCLA (DESARENADOR) | 7. LOZA DE FONDO |
| 2. TANQUE DE COMPENSACIÓN | 8. MURO CIRCULAR |
| 3. TUBO DE CARGA | 9. CÚPULA DE LADRILLOS |
| 4. TUBO DE SALIDA DEL BIOGÁS | 10. CUELLO |
| 5. TUBO DE SALIDA DE LODOS | 11. ACCESO DEL TANQUE DE COMPENSACIÓN |
| 6. TUBO DE REBOSO | |

Fig. 5. Biodigestor tipo Nicarao.

Cuando el volumen del biodigestor excede los 100 m^3 se utilizan, por lo general, otras tecnologías más complejas, como son:

- Fermentador de contacto.* Una parte del material orgánico ya digerido es reciclado a un reactor de mezcla continua, donde se incorpora material orgánico crudo y se asegura una alta concentración de bacterias metanogénicas.
- Biodigestor de manto de lodo de flujo ascendente.* Su configuración hidráulica produce una capa de sólidos suspendidos con gran contenido de bacterias, lo que asegura un alto grado de biodegradación.



- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1. TANQUE DE MEZCLA (DESARENADOR) | 7. LOZA DE FONDO |
| 2. TANQUE DE COMPENSACIÓN | 8. MURO CIRCULAR |
| 3. TUBO DE CARGA | 9. CÚPULA DE LADRILLOS |
| 4. TUBO DE SALIDA DEL BIOGÁS | 10. CUELLO |
| 5. TUBO DE SALIDA DE LODOS | 11. ACCESO DEL TANQUE DE COMPENSACIÓN |
| 6. TUBO DE REBOSO | 12. TRAMPA DE AGUA |

Fig. 6. Biodigestor tipo GBV.

c) *Biodigestor de cama fija*. Constituido por un lecho o filtro de piedras, piezas de cerámicas o plásticas, etc., que producen un área de adherencia de las bacterias. Se emplea para líquidos con poco contenido de sólidos en suspensión.

d) *Digestión de fases*. Las fases de digestión ácida y metanogénica son producidas separadamente, lo que asegura las condiciones óptimas para lograr el mayor rendimiento en la biodegradación y, por tanto, en la producción del biogás.

Estos biodigestores, de más de 100 m³, suelen emplear gasómetros separados del biodigestor y son utilizados generalmente como

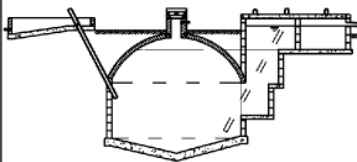
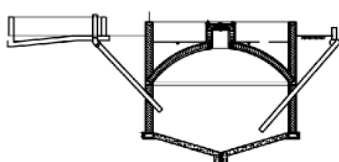
Esquema y algunos valores comparativos de los modelos			
Nicarao		GBV	
			
Características			
	UM	Nicarao	GBV
Área neta	m³	23	13
Tiempo de ejecución	h	96	60
Horas/días	h/d	5	5
Materiales			
	UM	Nicarao	GBV
Cemento	Bolsa	80	35
Arena	m³	5	3
Piedra 38,1 mm	m³	6	2
Bloque (0,15)	U	420	260
Ladrillo	U	500	700
Acero (3/8")	kg	150	27
Acero (1/4")	kg	21	5

Fig. 7. Resultados de la implementación de los biodigestores tipos Nicarao y GBV, de 12 m³ para un ejemplo concreto.

elementos (objetos de obra) dentro de un sistema de tratamiento, aunque ello se ha logrado también con el sistema constructivo de cúpula fija, diseño modular, hasta 300 m³ de capacidad, como es el caso del construido para el motel Las Tepas, en el municipio de Ranchuelo, provincia de Villa Clara.

Los tipos de biodigestores expuestos hasta aquí, que exigen un alto rigor técnico y una disponibilidad económica adecuada, no siempre son atractivos para dar respuesta a los usuarios con limitaciones financieras y que con esfuerzos propios pretenden construir una planta de biogás confiable. Por tal motivo, se trabaja en el desarrollo de un concepto que integra la situación y posibilidades del usuario a un diseño que abarata los costos de estas instalaciones y disminuye su área, lo que las haría accesibles a un amplio sector de la población cubana. Los diseños de estos modelos, denominados GBV (ver Fig. 6), no se ciñen a un solo tipo de material ni forma, sino abarcan una diversa gama de posibilidades y situaciones que enfrentan los usuarios que saben comprender la esencia del biogás. El diseño del modelo GBV se concibe a partir de las bondades del citado modelo Nicarao, por lo que pueden considerarse dentro de la referida evolución. Los modelos GBV, diseñados para condiciones específicas, requieren obligatoriamente de un reconocimiento minucioso del lugar y de una encuesta a los usuarios (metodología GBV), que de una u otra forma intervienen en el diseño. En la figura 7 se exponen los parámetros principales de un biodigestor de 12 m³, para un caso dado a partir de los conceptos de los modelos Nicarao y GBV.

Dimensionamiento

Para el correcto dimensionamiento de un biodigestor familiar de tecnología simple se requiere conocer los factores siguientes:

- a) Demanda energética del usuario.
- b) Cantidad de biomasa disponible.
- c) Temperatura media del lugar.
- d) Producción específica de gas según la biomasa disponible.

El conocimiento de estos factores permite dimensionar el volumen requerido del biodigestor, el volumen del almacenamiento del gas y el volumen del tanque de compensación.

Existen referencias que facilitan la información mínima o de partida sobre los factores antes mencionados, como los que se muestran a continuación:

El biogás, al igual que otros gases como el LPG (licuado) y el gas natural, tiene una gran variedad de usos, tanto doméstico como industrial. Su principal uso doméstico es en las cocinas y el alumbrado, por cuanto no requiere ser purificado.

Los usos más importantes del biogás para determinar la demanda energética del usuario son:

- a) *Cocinas*. Se emplea con una presión de 75-90 mm de columna de agua (CA), a razón de 0,38-0,42 m³ por persona-día. Para presiones inferiores el per cápita debe calcularse a razón de 0,5 m³/día.
- b) *Alumbrado*. Si se utiliza una lámpara de 100 candelas (aproximadamente 60 W), esta consume de 0,11 a 0,15 m³/h de biogás, requiriendo una presión de 70 a 85 mm de CA.
- c) *Calderas*. En dependencia del tamaño del quemador, los consumos serán:
 - Diámetro del quemador 50 mm: 0,32 m³/h.
 - Diámetro del quemador 100 mm: 0,46 m³/h.
 - Diámetro del quemador 150 mm: 0,63 m³/h.

d) *Motores de combustión interna*. El biogás es un combustible excelente para motores, tanto de gasolina como diésel. Sólo se registra una ligera disminución de la potencia y el motor trabaja algo más caliente que con el combustible líquido. Si se dotan de un mezclador de aire-gas adecuado, los motores de gasolina pueden trabajar con 100 % de biogás, sin necesidad de gasolina, incluso en el arranque. No ocurre lo mismo con los motores Diesel, debido a que la temperatura al final de la carrera de compresión no es superior a los 700 grados, y la temperatura de ignición de la mezcla aire-biogás es de 814 grados, por lo que se hace necesaria la inyección de una pequeña cantidad de combustible diésel antes de finalizar la carrera de compresión del pistón, para obtener la ignición de la mezcla y asegurar el funcionamiento normal del motor. En condiciones óptimas se logra economizar entre 70 y 85 % del combustible diésel, sustituyéndolo por biogás. El consumo en motores es 0,45-0,54 m³/h por caballo fuerza (HP) de carga, o 0,60-0,70 m³/h por KW de carga, con una presión de 25 a 100 mm de CA.

e) *Soldaduras*. La temperatura de una llama de oximetano es de alrededor de 3 000 grados, o sea, 250 grados menos que la llama oxiacetilénica. La temperatura de la llama oxi-biogás sería menor aún en dependencia del porcentaje de metano del biogás, por lo que no sería aplicable a las soldaduras ferrosas, aunque sí puede utilizarse para soldar aleaciones de latón, cobre y bronce.

En resumen, la demanda energética de los usuarios se puede calcular según los parámetros expuestos en la tabla 1.

TABLA 1.
Demanda energética de los usuarios

EQUIPO	CONSUMO
COCINA (1 QUEMADOR)	150-200 L/HORA
LÁMPARA DE ILUMINACIÓN	120-200 L/HORA
REFRIGERADOR DOMÉSTICO	50-100 L/HORA
MOTOR DE COMBUSTIÓN	500 L/HORA POR HP
COCINA INDUSTRIAL	1 000-3 000 L/HORA
CONSUMO POR PERSONA (1 COMIDA)	150-300 L
CONSUMO POR VIVIENDA (5 PERSONAS Y 2 COMIDAS)	1 500-2 400 L/DÍA

Algunos de los índices de consumo que también pueden tomarse como base de cálculo, cuando el biogás se utiliza para cocinas, se exponen en la tabla 2.

TABLA 2.
Índices de consumo de gas según el tipo de cocina y su uso

TIPO DE USO	CONSUMIDORES/USUARIO/DÍA
COCINA COLECTIVA (ALMUERZO).	0,20
COCINA COLECTIVA (ALMUERZO Y CENA)	0,30
COCINA INDIVIDUAL (USO DOMÉSTICO)	0,45

Teóricamente se puede obtener biogás de cualquier material orgánico. Este material orgánico, o biomasa, debe de contar con 5-10 % de partes sólidas para constituir un material apropiado, como cieno de fermentación.

Una de las materias orgánicas más utilizadas es el estiércol fresco de ganado vacuno, que contiene alrededor de 16 % de material sólido y 84 % de agua, y que se recomienda mezclar en proporción 1:1 con agua. El cieno de fermentación para introducir en una planta de biogás tiene entonces 8 % de material sólido y 92 % de agua.

Algunos índices de consumo a partir de las biomásas más utilizadas y disponibles en Cuba para la producción de biogás se exponen en la tabla 3.

TABLA 3.
Índices para determinar la producción de biogás a partir del peso y características de la biomasa

	EXCRETA HÚMEDA DIARIA (KG/ANIMAL)	BIOGÁS (M ³ /DÍA)	PROPORCIÓN EXCRETA-AGUA	TIEMPO DE RETENCIÓN ACONSEJABLE (DÍA)
VACA	10	0,360	1:1	40
TORO	15	0,540	1:1	40
CERDO (50 KG)	2,25	0,101	1:1-3	40
POLLO	0,18	0,108	1:1-8	30
CABALLO	10	0,300	1:1-3	30
CARNERO	2	0,100	1:1-3	40
TERNERO	5	0,200	1:1	40
PERSONA ADULTA	0,40	0,025	1:1	60
CACHAZA	0,035 kg/kg	0,100	1:4	30
RESIDUAL DE MATADERO	(1 m ³ biogás/25 kg de residuos)			40
RESIDUAL DE DESTILERÍA	(15 m ³ biogás/m ³ de residuos)			40
RESIDUAL DE LEVADURA	(4 m ³ biogás/m ³ de residuos)			40
LÍQUIDO DEL CAFÉ	(5 m ³ biogás/m ³ de residuos)			40
CÁSCARA DE CAFÉ	(0,1 m ³ biogás/m ³ de residuos)			50
CÁSCARA DE CAFÉ	(0,4 m ³ biogás/25 kg de materia sea)			60

Es necesario subrayar que el estiércol de cada lugar tiene sus características propias debido a la variación de la alimentación, manejo y raza de los animales, tiempo de estabulación, existencia de piso de hormigón en los establos o cochiqueras, etcétera. Todo esto indica

la necesidad de realizar mediciones, en el lugar, del volumen y características del estiércol producido.

En cuanto a la temperatura, existen tres rangos reportados:

- Psicrófilico: de 10 a 25 °C (temperatura ambiente).
- Mesófilico: de 30 a 40 °C.
- Termófilico: de 45 a 60 °C.

El rango en que se desarrollan las bacterias metanogénicas es de 35 a 55 °C (la temperatura óptima es de 30 a 35 °C), por lo que para el clima cubano, con temperatura promedio de 25 °C, algunos autores aplican un factor de corrección de 1,3 para el cálculo del volumen necesario de digestión, aunque casi todos los biodigestores funcionan en los límites de temperatura mesófilas; por ende, la digestión ocurre cerca de su temperatura óptima (35 °C), en la cual, al parecer, se combinan las mejores condiciones para el crecimiento de las bacterias y la producción de metano, con un corto tiempo de digestión de los desechos.

Una vez predeterminado el volumen del biodigestor, se procede a calcular el volumen de diseño, con dos posibles partidas:

1. Tratar todo el residual y obtener los subproductos que de ello se derive.
2. Tratar solamente la parte del residual que garantice la energía que se requiera.

Para el caso de biodigestores de campana flotante, de poco uso en la actualidad, el parámetro que acota el diseño es el que establece la relación diámetro-altura, que se recomienda entre 0,5-1,5. Algunos parámetros orientativos para la construcción de estos biodigestores con excretas vacunas, se indican en la tabla 4.

TABLA 4.
Algunos parámetros orientativos
para la construcción de biodigestores de campana flotante

ESTIÉRCOL VACUNO (KG/DÍA)	VOLUMEN DE GAS (M ³ /DÍA)	DIÁMETRO INTERIOR DEL BIODIGESTOR (M)	ALTURA TOTAL (M)
50	2	1,6	4,15
80	3	1,8	4,65
112	4	2,2	4,65
150	6	2,4	4,85
200	8	3,2	5,23
250	10	3,6	5,73
400	15	3,8	5,73
550	20	4,55	5,73
690	25	5,15	6,23
970	35	5,95	6,23

Las fórmulas fundamentales que se emplean para el dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija (caracterizado por sus tres partes: cónica, cilíndrica y esférica), se exponen en la figura 8.

Los pasos que se deben seguir para su empleo son los siguientes:

1. Se calcula el volumen total (V_{tot}), sobre la base del volumen de la mezcla agua-estiércol y el tiempo de retención.
2. Se calcula el radio del volumen predefinido (R).

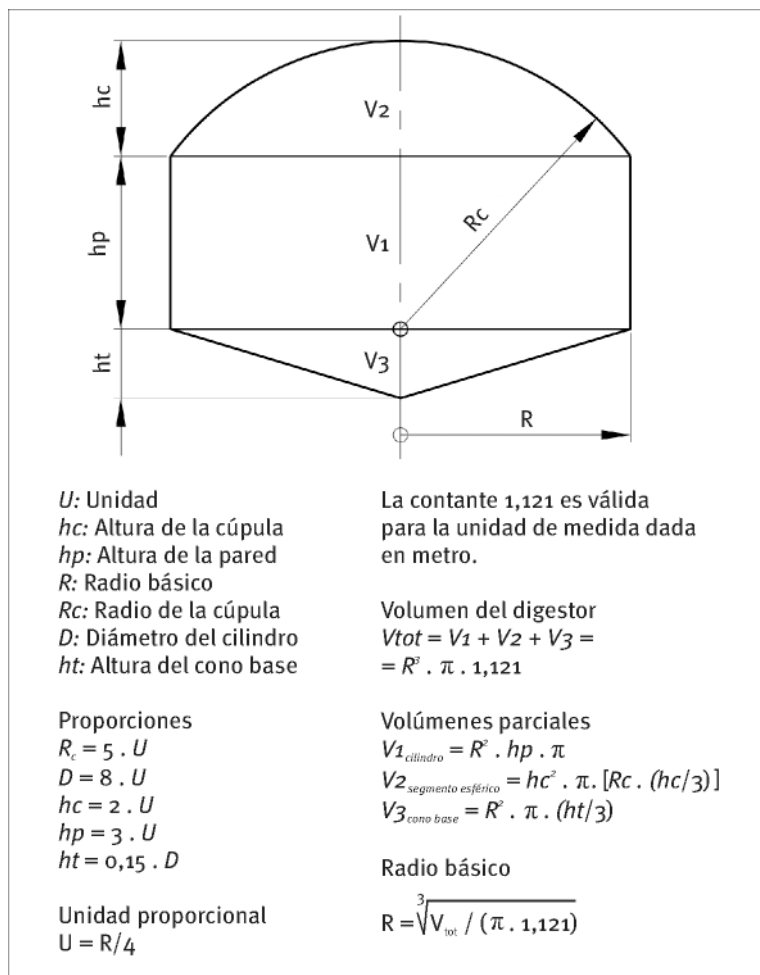


Fig. 8. Partes en que se divide un biodigestor de cúpula fija y sus fórmulas de cálculo.

3. Se calcula la unidad en metros ($U = R/4$).
4. Se determina el resto de las denominaciones.

Algunos parámetros en cuanto a volúmenes de almacenamiento de gas para biodigestores de cúpula fija, tipificados en nuestro país, se señalan en la tabla 5.

TABLA 5.
Relación entre volúmenes de biodigestor y almacenaje de biogás para plantas típicas de cúpula fija

VOLUMEN DEL BIODIGESTOR (M ³)	12	24	36	42
VOLUMEN DE ALMACENAJE DEL GAS (M ³)	3,75	7,15	8,14	10,30
RELACIÓN VOLUMEN DEL BIODIGESTOR/ /VOLUMEN DE ALMACENAJE DEL BIOGÁS	3,20	3,36	4,36	4,07

EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO

El cálculo del aporte orgánico de la población animal para una temperatura ambiente de 10 a 25 °C (Psicrofílica), se realiza a partir de los datos de la tabla 6.

TABLA 6.
Aporte orgánico de la población animal

TIPO/ESPECIE	CANT. DE CABEZAS	PVP, KG	PVE, KG	CANT. EXCRETA, KG/DÍA	TE, HORAS/DÍA
CERDOS	100	45	50	2,25	24
VACAS	10	400	350	10	6

Donde:

PVP: Peso vivo promedio de la población animal de diseño.

PVE: Peso vivo equivalente tomado de la tabla 3 referido a la especie animal.

Te: Horas del día que el animal permanece estabulado.

El cálculo en cerdos se realiza de la manera siguiente:

$$10 \text{ cabezas} \cdot (PVP / PVE) \cdot \text{cantidad de excreta} \cdot (Te / 24) = \\ = 100 \cdot 0,90 \cdot 2,25 \cdot 1 = 202,5 \text{ kg estiércol/día}$$

Conociendo previamente que para los cerdos y vacas los sólidos suspendidos se estiman en alrededor de 20 %, su valor en kilogramos será:

$$SS = 202,5 \text{ kg} \cdot 0,2 = 40,4 \text{ kg sólidos suspendidos/día}$$

El cálculo en vacas se realiza de la manera siguiente:

$$10 \text{ cabezas} \cdot (PVP / PVE) \cdot \text{cantidad de excreta} \cdot (Te / 24) = \\ = 10 \cdot 1,14 \cdot 10 \cdot 0,25 = 28,5 \text{ kg estiércol/día}$$

$$SS = 28,5 \text{ kg} \cdot 0,2 = 5,7 \text{ kg sólidos suspendidos/día}$$

Entonces,

$$\text{Estiércol total/día} = 202,5 + 28,5 = 231 \text{ kg/día}$$

Una vez determinado la cantidad de excreta, se calcula el volumen total teniendo en cuenta la dilución recomendada (ver Tabla 3).

De esta manera el volumen de mezcla por día en el digestor será:

$$Vt = 231 \text{ kg estiércol/día} + (3 \cdot 231 \text{ kg agua/día}) = 693 \text{ kg mezcla/día}$$

Es decir,

$$Vt = 0,69 \text{ m}^3/\text{día}$$

El cálculo se ha hecho sobre la base de la recogida del estiércol sin vehiculación hídrica.

En los casos en que la limpieza del establo sea con mangueras, se procurará que el agua en la mezcla no exceda la proporción recomendada en la referida tabla.

Considerando 40 días de retención, para la estabilización de la materia orgánica, el volumen total de digestión ($V_1 + V_2 + V_3$) será:

$$Vt = 0,69 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 40 \text{ días} = 27,6 \text{ m}^3$$

Se diseña un biodigestor para 28 m^3 o se selecciona, entre los digestores típicos, el que mejor convenga según criterio del diseñador; en este caso se ha tomado el de 24 m^3 .

Es recomendable que la carga orgánica no rebase los $2,0 \text{ kg/m}^3/\text{día}$, por lo que a partir de los sólidos volátiles calculados, se efectúa el chequeo:

$$40,4 \text{ kg (cerdos)} + 5,7 \text{ kg (vacas)} = 46,1 \text{ kg SS/día}$$

Por lo tanto, la carga orgánica diaria en el volumen del digestor será:

$$(46,1 \text{ kg SS/día}) / 24 \text{ m}^3 = 1,92 \text{ kg SS/m}^3/\text{día}$$

Lo que constituye un valor aceptable según el criterio recomendado.

Por lo general, el tanque de compensación tendrá un volumen equivalente al volumen de gas en el segmento esférico $V_2 = V_{tc}$; conociendo que el radio del digestor es igual al radio del tanque de compensación se determina la altura (h) del cilindro:

$$h = V_{tc} / (\pi \cdot R^2)$$

Dejando un borde libre de 20 cm, la altura total será:

$$h_{tc} = h + 0,20$$

Instalaciones complementarias

TUBERÍAS

El gas producido en el biodigestor debe ser conducido a los lugares de uso a través de tuberías. La tubería de presión de PVC resulta adecuada para esta finalidad, ya que presenta las ventajas siguientes: resistente a la corrosión, facilidad de instalación y menores precios. Su desventaja radica en la necesaria protección contra los rayos solares y el movimiento de animales y transporte pesado.

El diámetro de la tubería requerida depende de la distancia desde la planta hasta el lugar de consumo del gas, así como del flujo máximo de gas requerido y de la pérdida de presión admisible. El flujo máximo del gas se obtiene sumando los consumos de los equipos que funcionen simultáneamente. La tabla 7 permite seleccionar el diámetro de la tubería.

Tabla 7.
Pérdidas de presión en mm de columna de agua,
por cada 10 m de tuberías de PVC

CAUDAL (M ³ /H)	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"
	17 MM	23 MM	30 MM	43 MM	54 MM
0,5	1,0	0,3	0,1		
1,0	2,5	0,7	0,2		
2,0	7,0	1,8	0,6		
2,5	9,9	2,5	0,8		
3,0	13,1	3,3	1,0	0,2	
4,0	20,7	5,2	1,6	0,3	
5,0	29,6	7,4	2,2	0,4	
6,0	29,7	9,8	2,9	0,6	
7,0		12,6	3,7	0,7	
8,0		15,7	4,6	0,9	0,3
9,0		19,0	5,6	1,0	0,4
10,0		22,6	6,6	1,3	0,5

TRAMPAS DE AGUA Y PENDIENTES DE LA TUBERÍA

El gas proveniente de un biodigestor sale generalmente saturado con vapor de agua, parte del cual puede condensarse en la tubería, lo que causa obstrucciones si la tubería no ha sido correctamente instalada.

El agua condensada en las tuberías debe escurrir hacia los puntos bajos donde están localizadas las trampas de agua. De acuerdo con la topografía del terreno y la longitud del trayecto, varía la cantidad de trampas requeridas. Una pendiente de 2 % es suficiente para la instalación. El diámetro mínimo para la conducción deberá ser de $\frac{3}{4}$ pulgadas, mientras que para las instalaciones dentro de la vivienda es de $\frac{1}{2}$ pulgada.

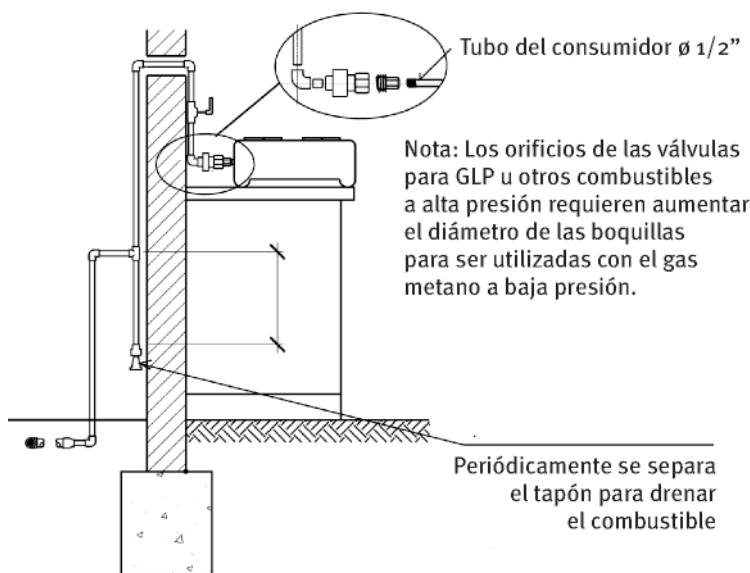


Fig.9. Instalación de una trampa de agua a la cocina.

Existen diferentes tipos de trampas de agua, como la de tipo cerrado con una válvula de bola para evacuar el agua condensada (siendo el tipo más usado); mientras que la de tipo abierto, como la trampa en V, debe tener una altura que compense la presión de la planta (Fig. 9). Las trampas de agua deben ser inspeccionadas periódicamente por el usuario.

Para las válvulas de cierre se recomienda el uso de las de bola, ya sean metálicas o de PVC, y se debe chequear su hermeticidad contra el escape del gas. Se deberá colocar una válvula a la entrada de cualquier dispositivo para consumo del gas, así como a la salida del biodigestor.

Como regla, en las grandes plantas son colocadas trampas contra incendio para evitar su propagación a través de la tubería. Estas trampas consisten en sellos hidráulicos a través de los cuales pasa el gas en una sola dirección (no permiten su circulación en sentido contrario).

REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE SULFURO DE HIDRÓGENO

El H_2S es necesario eliminarlo si su concentración es mayor de 2 %, por las molestias que ocasiona y su alto poder corrosivo. Esta eliminación se realiza por absorción con hidratoférrico $Fe(OH)_3$, el que puede ser regenerado por exposición al aire (Fig. 10 y 11).

En el interior de la trampa de H_2S se coloca viruta de hierro obtenida en un taller de tornería

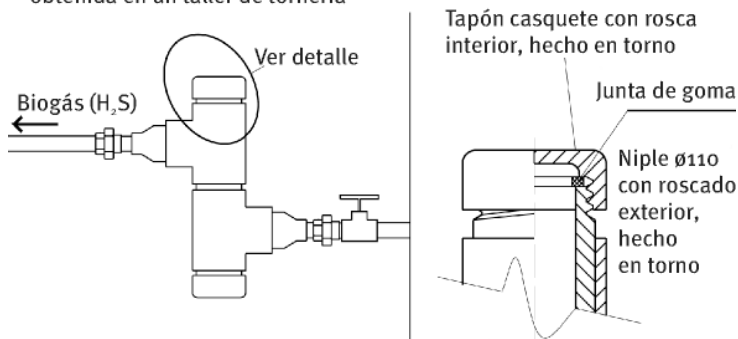


Fig. 10. Montaje de una trampa de ácido sulfhídrico.

La reducción del CO_2 es complicada tecnológicamente, para lo cual se emplea el hidrato de cal, y se obtiene como subproducto final del carbonato de calcio. La reducción del CO_2 se hace necesaria en plantas donde se comprima el gas en balones, para uso posterior.

TANQUE DE MEZCLA-DESARENADOR

Este tanque, en cualquier tipo de planta con alimentación semicontinua, tiene un volumen interno un poco mayor que el volumen de carga diario, entre 10-20 %.

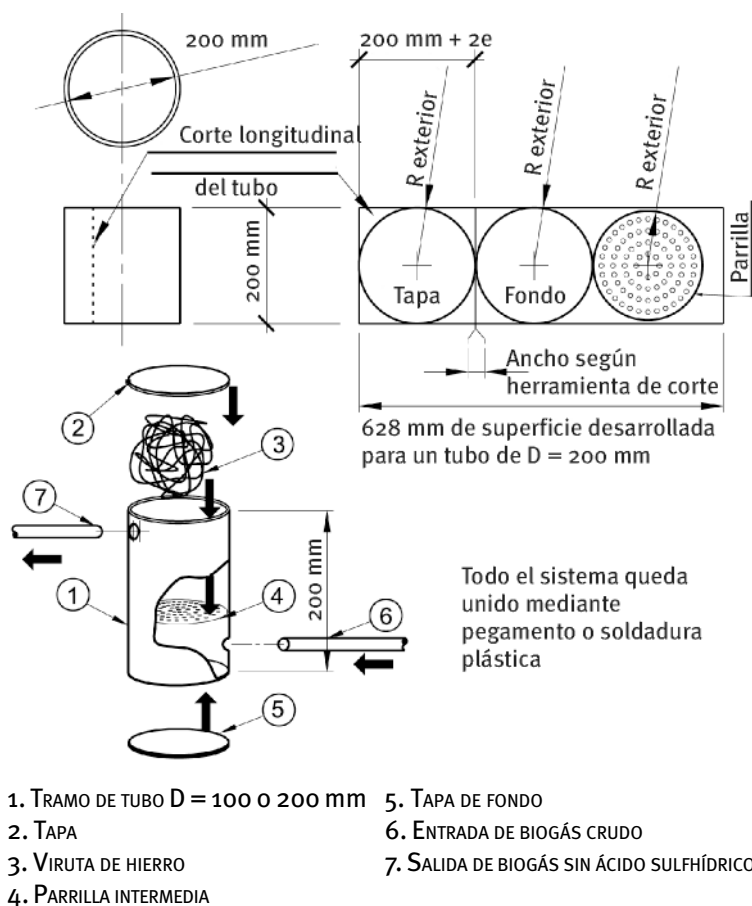


Fig. 11. Montaje de una trampa de ácido sulfhídrico realizada con tuberías y accesorios plásticos.

En el desarenador es conveniente construir el piso del tanque con una pequeña inclinación hacia el lado opuesto del tubo de carga, para evitar que materiales inertes penetren en el biodigestor, como piedras que por accidente sean arrastradas por el sustrato. Es conveniente dejar una abertura en el lado de la inclinación, por donde se puedan evacuar estos materiales.

Por lo general, el tubo que comunica el desarenador con el biodigestor es de PVC y tiene un diámetro que varía entre 10 y 15 cm, en

dependencia del tamaño de la planta. El extremo que penetra en el biodigestor debe estar a una altura entre 40 y 60 cm del fondo, para evitar que el material sedimentado lo obstruya. Si el tamaño de la planta lo justifica, pueden emplearse dos tubos de carga.

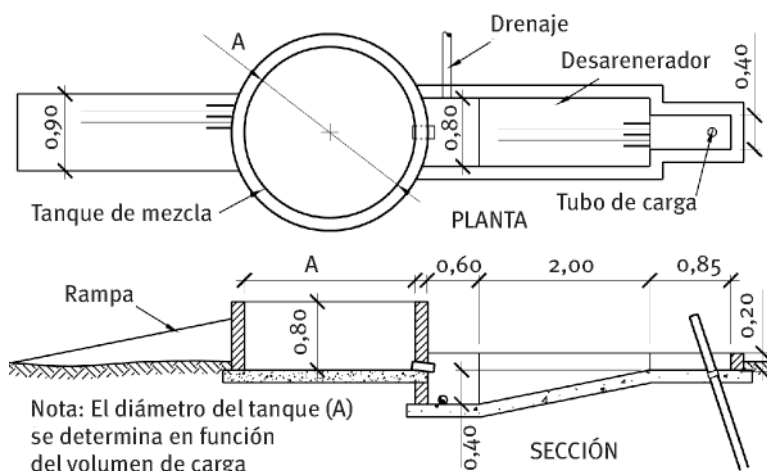


Fig. 12. Tanque de mezcla y desarenador típico para plantas sencillas de biogás.

Como en este tanque es donde se efectúa la mezcla del estiércol con agua, se requiere colocar tapones en el tubo de descarga y en el de evacuación de sedimentos, fácilmente removibles sin necesidad de tocar el sustrato. Todas las características anotadas se muestran en la figura 12.

Consideraciones para el diseño y cálculo estructural de una planta de biogás

En el diseño de una planta de biogás, además de la determinación de las dimensiones volumétricas y proporciones de sus componentes o partes fundamentales, en función de la producción de excreta a procesar y el volumen de biogás se requiere realizar los cálculos estructurales de las partes. De acuerdo con las cargas y esfuerzos a que estarán sometidas cada una y a la forma o esquema general seleccionado para la obra, se determinan las tensiones y sollicitaciones en sus diferentes partes, a partir de las cuales se seleccionan las dimensiones y esfuerzos de cimientos, vigas, losas, etc., así como se precisan las dimensiones de estos elementos que previamente habían sido seleccionados a partir del diseño volumétrico.

Un requisito esencial en una planta de biogás es que debe ser impermeable. El depósito de gas no debe tener fugas y por esta razón se deben tener en cuenta los cálculos que eviten fisuras.

Como es sabido, la formación de fisuras comienza por aquellas zonas donde las tensiones o sollicitaciones a tracción son de mayor magnitud, las cuales pueden ser originadas tanto por el efecto de las cargas estáticas a que está sometida la estructura, por la ocurrencia de desplazamiento o asentamientos diferenciales de algunas de sus partes o de la cimentación, o como consecuencia de la dilatación o contracción que sufre la estructura por el efecto de cambios de temperatura.

Las fuerzas internas y externas que actúan sobre la estructura de una planta de biogás pueden definirse como sigue:

Fuerzas internas: Flexión, fuerzas verticales, de gravedad, de torsión, etcétera.

Fuerzas externas: Acción de la presión de la tierra, presión o carga hidráulica, peso propio, presión del gas, cargas variables, etcétera.

El efecto o magnitud de la acción, tanto de la acción de las cargas externas como sobre la estructura dependen, en gran medida, de la forma de su construcción.

De igual manera, las fuerzas internas pueden ser disminuidas si se selecciona una forma de construcción apropiada. Tal es el caso de las estructuras conformadas por superficies curvas (bóvedas, cúpulas, cilindros, etc.), en las que se logra una distribución más uniforme del efecto de las fuerzas externas, originándose un «reparto» más distribuido de las fuerzas internas, lo que disminuye la concentración de tensiones y por tanto los «picos» en sus diagramas.

En comparación con construcciones formadas por superficies planas, las construcciones en forma de bóveda pueden compensar mejor y con más seguridad las cargas orientadas en diferentes direcciones.

Aparecen grietas en aquellos sitios donde las tensiones son fuertes. Esto ocurre fundamentalmente en los bordes, esquinas, ángulos y en aquellas secciones donde existen cargas concentradas.

En construcciones angulares se crean picos por concentración de tensiones en las esquinas, por lo que los biodigestores de plantas de cúpula fija nunca deben tener forma angular.

Se originan grietas también debido a tensiones de tracción, mientras que en secciones sometidas a tensiones de compresión nunca se originan grietas. Por esta razón, la cámara de gas de una planta de cúpula fija debe estar sometida siempre a tensiones de compresión.

La presión hidráulica del cieno de fermentación está orientada hacia afuera. La presión de la tierra está orientada hacia adentro. Si ambas presiones se presentan dentro del margen dado, se alivia la carga de la construcción.

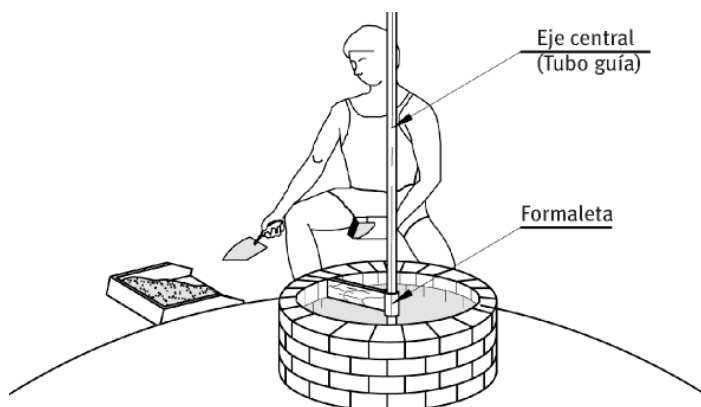


Fig. 13. Ejecución y terminación del cuello típico para una planta de biogás de los modelos Nicarao y GBV.

En una construcción en forma de bóveda aparece la carga desde afuera, aún cuando en la época de seca la tierra esté dura y agrietada.

Una forma redonda es siempre apropiada porque no tiene esquinas, la carga se distribuye mejor y se necesita menor cantidad de materiales de construcción para un mismo volumen de almacenamiento.

Algunos detalles más precisos, en cuanto al diseño y cálculo de las partes fundamentales que conforman la estructura de un biodigestor de cúpula fija, se exponen en las figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11.

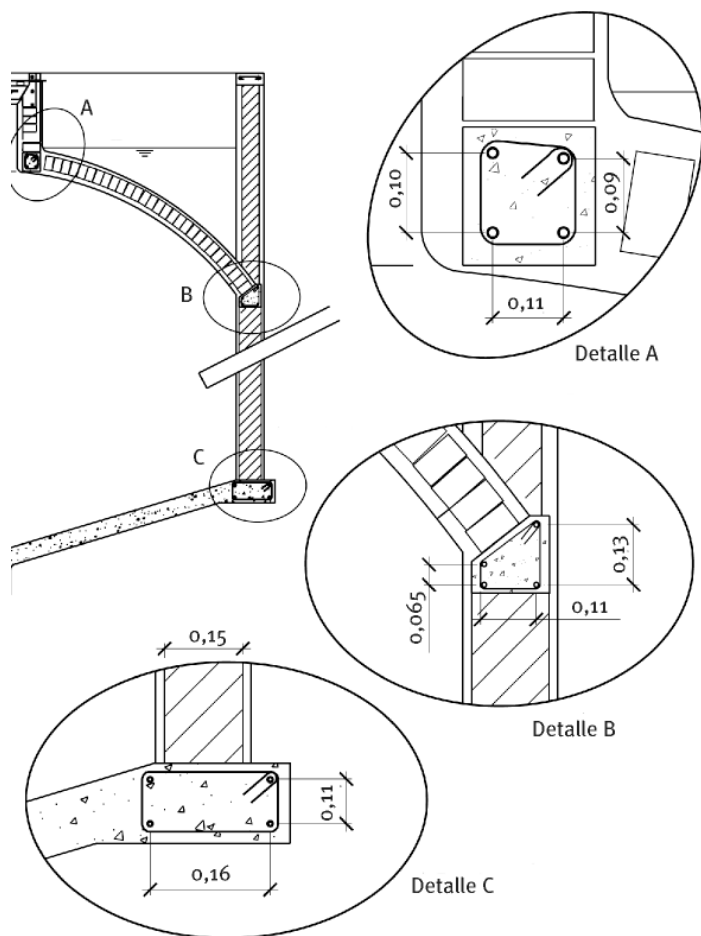


Fig. 14. Anillos de refuerzo para la construcción de plantas de biogás de los tipos Nicarao y GBV.

PLACA DE FONDO

La placa o losa de fondo constituye la cimentación de la obra y es la encargada de repartir y transmitir al suelo soportante todo el peso de la estructura, además de garantizar, a la vez, la necesaria estabilidad y solidez de la obra en su conjunto. Mientras mayor rigidez posea esta losa, menor será la posibilidad de que ocurran asentamientos diferentes, deformaciones indeseables que puedan originar fisuras y, en general, mayor uniformidad en la distribución de las cargas y en las condiciones de trabajo a que se somete el suelo sobre el cual se levanta la obra (Fig. 15).

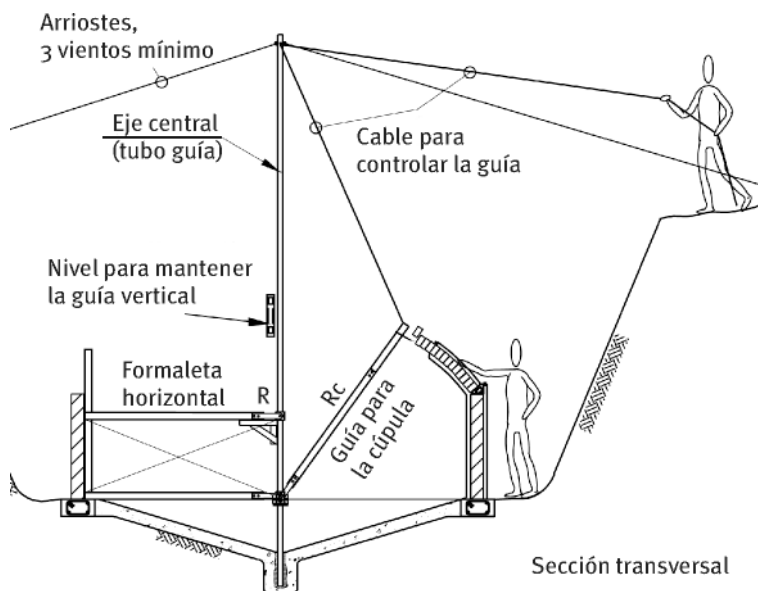


Fig. 15. Ejecución de las partes principales de una planta de biogás tipo Nicarao y GBV.

Por otra parte, el área que bordea la losa desempeña un papel fundamental en la magnitud de las tensiones que finalmente se transmiten al suelo, siendo estas menores en la medida en que dicha área aumente.

No obstante, el adecuado diseño de la losa de fondo debe estar, en todos los casos, basado en dependencia del tipo de suelo sobre el que se va a cimentar la obra y en estrecha relación con el aspecto

económico, en lo que a cantidad y tipo de materiales de construcción se refiere.

Como regla, para la construcción de la losa de fondo deberán emplearse materiales locales. Por razones de rentabilidad se recomienda, según el caso, el empleo de los materiales siguientes:

- Piedra de hormigón con relleno de mortero y lechada de cemento.
- Mampostería de ladrillo con repello de cemento.
- Hormigón armado.

En suelos blandos se requiere de una losa que posea una rigidez mayor, capaz de repartir lo más uniformemente posible las cargas y que no se deforme ni fisure por asentamientos del subsuelo. Para ello se recomienda el empleo de losas de hormigón simple o armado, así como la conformación de losas cónicas, con las que se alcanza mayor rigidez con menor espesor de la losa, en comparación con los espesores necesarios que requerirían losas circulares planas.

En suelos más compactos o de mayor resistencia, como los compuestos por arcillas compactas, areno-arcillosos o rocas fragmentadas o blandas, se debe emplear losas de piedra de hormigón o macadán con relleno de mortero. En estos casos, al igual que en los de suelos blandos, se recomienda que la losa sea cónica; en el perímetro exterior se conforma un «tacón», o anillo exterior de hormigón armado, que refuerza la capacidad de carga y aumenta la rigidez de la placa.

En suelos de gran resistencia, como los rocosos, se permite el empleo de losas de mampostería o de cantos, combinadas con sus sellos de mortero y una zapata o anillo circular para apoyo de la cúpula o muros.

En suelos considerablemente blandos, como es el caso de los arcillosos, lodo, etc., se debe colocar una capa de arena de 10 a 20 cm de espesor en la superficie de contacto entre el suelo y la losa de fondo, previamente compactado y nivelado.

En todos los casos, antes de efectuar la fundición de la losa deberá comprobarse que la superficie sobre la cual se va llevar a cabo la fundición esté perfectamente nivelada, uniforme y limpia.

MAMPOSTERÍA Y MORTERO

El mortero y los ladrillos deben tener, más o menos, la misma solidez. Si los ladrillos son blandos, el mortero tampoco puede ser muy duro.

El mortero de cemento siempre debe estar elaborado con una adición de cal, pues de esta forma la mezcla obtenida es más fácil de

trabajar, además de que se logra una mejor impermeabilidad en el elemento o en la superficie en que se aplica.

La parte más importante del mortero es la arena. Esta debe estar limpia, y no debe contener arcilla, ni polvo, ni materia orgánica. La arena con un alto contenido de polvo o arcilla absorbe mucho más cemento para lograr una misma resistencia, en relación con la arena limpia. La arena debe contener un máximo de 10 % de polvo o arcilla. Si el contenido es más alto, la arena debe ser lavada. Con lejía de sosa se puede comprobar si ésta contiene mucha materia orgánica.

El mortero de cemento puede prepararse en distintas proporciones o relación de mezcla arena-cemento-cal, en función del elemento o lugar de la obra donde será aplicado. Entre estas relaciones se pueden mencionar las indicadas en la tabla 8.

TABLA 8.
Proporciones recomendadas para la preparación de morteros

ELEMENTO	RELACIÓN ARENA-CEMENTO-CAL
MORTERO DE RELLENO EN PISO, MUROS DE BLOQUE, ETCÉTERA	5:1:(0,5)
REPELLO DE MUROS (EXTERIORES)	6:1:(0,3)
REPELLOS EN GENERAL	4:1:(0,3)
CÚPULA DE MAMPOSTERÍA	4,5:1:(0,5)
ENLUCIDOS	3:1:(0,3-0,5)

En los repellos y la conformación de muros generalmente se utiliza mortero con relación 4:1, con arena que pase por el tamiz de 3 mm.

En el caso de muros verticales, en lugar de ladrillos pueden emplearse bloques de hormigón entre 0,15 y 0,20 m de espesor, aunque en estos casos generalmente resulta más costoso que si se emplearan ladrillos.

Cuando se utilizan bloques en los muros del biodigestor, la literatura recomienda que sean «macizados» con mortero de cemento, con una relación de 5:1 o 6:1. No obstante, en la provincia de Villa Clara se han construido plantas con muros de bloques no macizados sin que se hayan apreciado fallas o problemas por mala impermeabilización.

CASCO ESFÉRICO O CÚPULA DE MAMPOSTERÍA

El casco esférico o cúpula (ver Fig. 13) tiene la función de constituir la cubierta o tapa del reservorio o tanque donde se almacena el cieno de fermentación para su digestión y su descompo-

sición para la obtención del biogás, o sea, la cubierta del biodigestor. En la práctica generalizada de construcción de plantas de biogás ha prevalecido y se impone la construcción de esta cubierta en forma de cúpula y, en algunos casos, de bóveda (en biodigestores no circulares), debido a su relativamente fácil ejecución, ya que no requiere de encofrados y permite la utilización de ladrillos, así como el ahorro de materiales que se alcanza y el efecto que se logra con esta forma en el aprovechamiento del volumen de gas almacenado y la distribución de cargas estáticas en los muros y cimientos de la obra.

Es importante destacar que en el espacio que encierra la cúpula del biodigestor es donde generalmente se acumula o almacena durante mayor o menor tiempo el biogás que se desprende de la biodigestión del cieno fermentado. Por ello resulta muy importante para el funcionamiento adecuado y la eficiencia de la planta, la calidad con que se construya dicha cúpula.

Un casco esférico es fácil de construir porque el radio siempre parte del mismo punto central. Una vara de una medida o longitud constante es el único utensilio que se necesita, fijada en uno de sus extremos al punto geométrico que sirve de centro o foco de la cúpula. Mediante el movimiento rotatorio circular desde el muro de apoyo hasta la boca o cuello final del extremo libre de la vara, se va determinando la posición y colocando los ladrillos hasta que queda conformada la cúpula.

En la parte superior de la cúpula, cuando el ángulo de inclinación de la vara es superior a 45° con respecto a la horizontal, generalmente se recomienda sujetar el primer ladrillo de cada camada mediante ganchos preparados al efecto, hasta que el próximo ladrillo quede colocado. Esto es necesario porque la inclinación que va alcanzando la pared de la cúpula provoca inestabilidad y deslizamiento del ladrillo debido a la colocación del siguiente.

Una vez levantada la cúpula, interior y exteriormente, se recubren las superficies con repello grueso y fino, y en la superficie interior se realiza un estucado, sobre el cual se aplican una o dos manos de pintura impermeabilizante. En ocasiones el estucado puede aplicarse, además, en la superficie interior de los muros.

CUELLO

El cuello del biodigestor (ver Fig. 16) está constituido por un muro cilíndrico compuesto por dos secciones (según la solución de que se trate), apoyado sobre la viga circular de cerramiento, que se

funde en todo el perímetro donde termina la mampostería de la cúpula y le sirve de cierre.

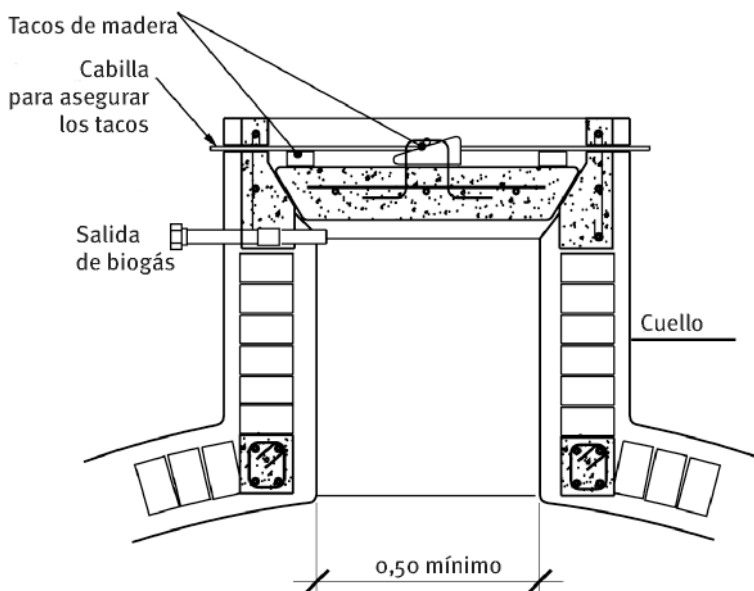


Fig. 16. Cuello para una planta de biogás tipo Nicarao y GBV, que permite el acceso y la extracción del biogás.

El cuello se conforma también con mampostería de ladrillos, repleados por ambas superficies (interior y exterior) con repello grueso, fino y estuque en el interior. Tiene como función permitir el acceso o visión al interior del biodigestor, a la vez que en él se coloca la tubería que recoge el biogás acumulado en el interior de la cúpula.

Es importante destacar que sobre el cuello se sitúa una tapa de cierre, que debe garantizar una hermeticidad perfecta, a fin de que no ocurra escape del biogás acumulado en el interior. Para lograr esto existen diferentes métodos, pero el más comúnmente utilizado consiste en la colocación de la tapa sobre un sello de mortero fresco y posteriormente el recubrimiento de ésta con una capa de arcilla plástica (o barro) bien amasado, de 3 a 10 cm de espesor (en los extremos), sobre la cual se mantiene permanentemente una capa de agua de 5 cm para que no se seque y cristalice, lo que origina fisuras de retracción que pueden romper la hermeticidad.

El cuello del biodigestor (ver Fig. 16) está cerrado arriba con una tapa removible de hormigón armado de 10 cm de grosor, que se construye con el mismo molde utilizado para su asiento. La tapa se coloca sobre una junta de arcilla que evita el escape del biogás al exterior. Para mantener la arcilla húmeda se mantendrá sobre la tapa un sello hidráulico y éste se cubrirá a la vez con una tapa de hormigón de un espesor de 0,7 cm, que será el terminal del cuello. El cuello se construirá en dos secciones, primero con ladrillos y después con hormigón armado. El mortero para la colocación de los ladrillos tendrá una dosificación de 1:3 (cemento y arena), mientras que el hormigón tendrá una dosificación 1:2:3 (uno de cemento, dos de arena y tres de piedra).

El cuello se construye encima del anillo de compresión (hormigón armado), con cinco hiladas de ladrillos o citara. Es recomendable la colocación de la primera hilada en las últimas horas del fraguado del hormigón del anillo, para lograr una continuidad en el fraguado del sistema. Para obtener una buena conformación del cuello por su forma cilíndrica se debe utilizar el tubo guía con la ayuda de una pequeña formaleta (listón de madera), que tendrá 0,27 cm de largo (radio), con el cual el interior del cuello tendrá 0,50 cm de diámetro después del repello. Colocadas ya las cinco hiladas, se retirarán el tubo guía y la formaleta para dar paso a la segunda etapa.

Concluida la colocación de las cinco hiladas de ladrillos, se procede a situar el primer encofrado metálico, en cuya ranura se colocará el tramo de tubería de 30 cm (de acero o galvanizado), por donde saldrá el biogás. A este tubo se le suelda un anillo de alambón ($\frac{1}{4}$ ") para hacer estanco la junta de hormigón; se confeccionará un aro de acero (1 cm) que será la armadura del primer anillo; posteriormente se fundirá con hormigón de gravilla y se dejará endurecer para continuar con el segundo anillo.

Detalles constructivos y materiales de construcción

Los materiales usados en la construcción de una planta de biogás deben ser de buena calidad (Tabla 9).

Tabla 9.
Materiales usados en la construcción de una planta de biogás

1. CIMENTACIÓN Y VIGAS DE CERRAMIENTO Y ZAPATA (ANILLO)	
ELEMENTOS	MATERIALES
LOSA DE CIMENTACIÓN DEL BIODIGESTOR	Hormigón Rbk = 15-20 Mpa
LOSA DE CIMENTACIÓN DEL TANQUE DE COMPENSACIÓN	Cemento P o PP-200, 250
LOSA DE LA VENTANA	Arena gruesa lavada, sin materia orgánica
VIGA DE AMARRE REFORZADA (CERRAMIENTO DE MUROS)	Grava gruesa.
TAPA DEL CUELLO	Acero en barras con Rbk-200-300 Mpa
2. MAMPOSTERÍA	
a) DE BLOQUE DE HORMIGÓN	
BLOQUES DE HORMIGÓN DE 15 A 20 CM DE ESPESOR	Cemento P o PP-200, 250
MORTERO DE CEMENTO	Arena fina
MORTERO PARA MACIZADO (EVENTUAL)	Arena gruesa
b) DE LADRILLOS	
LADRILLOS DE BARRO COCIDO	Cemento P o PP-200, 250
MORTERO DE CEMENTO	Arena fina Cal apagada
3. ACABADOS	
REPellos DE MUROS	Cemento P o PP-200, 250
REPellos DE CÚPULA	Arena fina
ESTUCADO DE CÚPULA	Cal apagada Pintura impermeabilizante En ocasiones se utiliza arena fina de mar para el repello fino y el estucado de la cúpula
4. TUBERÍA Y ACCESORIOS	
TUBERÍA DE SUMINISTRO DE CIENO A LA PLANTA	Tubos de PVC
TUBERÍA DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DE BIOGÁS	Accesorios (uniones, codo, etc.) Limpiador y pegamento para PVC Válvulas de cierre Pueden emplearse tuberías de otro tipo de material (hierro galvanizado, polietileno)

Es imprescindible que todos los materiales de construcción que se utilizarán en la obra se encuentren lo más próximo posible a ella, a fin de ahorrar tiempo y trabajo. Al ubicarlos debe evitarse que se mezclen o se ligen; deben situarse en un lugar limpio y de fácil acceso para su acarreo.

El cemento deberá almacenarse en un lugar seco, donde no reciba humedad. Debe definirse el sitio para el mezclado de los materiales, que debe estar entre la excavación y los materiales.

MATERIALES MÁS USADOS EN LA OBRA

Cemento. Debe ser de calidad (Portland), preferentemente de 350 kg/cm², se utilizará para confeccionar los morteros y hormigones en toda la obra.

Piedra (rajón cabezote). Se utilizará si el subsuelo es de poca firmeza, arcilloso; se excavará una capa de piedras, sobre la que se fundirá el cono.

Piedra de hormigón (¾"). Será empleada para construir el hormigón del cono y el fondo del tanque de compensación, de la caja de carga y el desarenador.

Gravilla. Se empleará para conformar el hormigón de los anillos, intermedios, el terminal del muro de bloque y la base de la cúpula, el anillo de cierre de ésta, así como en las tapas y el cuello.

Arena. Se utilizarán dos tipos de arena: lavada (utilizada en la confección de todos los hormigones) y de cantera (empleada en los morteros, para levantar muros, los resanos y el estuco de la cúpula).

Cal. Junto con la arena se usará en el estuco para el interior de la cúpula.

Ladrillo de cerámica. Se prefiere el estándar (12 x 25 x 6-5 cm) de 140 kg/cm²; con el cual se construirá la cúpula y parte del cuello.

Bloques de hormigón. Los bloques huecos de hormigón deben corresponder con las normas de fabricación, con los que se construirán el muro del biodigestor y el del tanque de compensación, la caja de carga y el desarenador.

Acero. Se utilizarán cabillas de 3/8 o 1/2" corrugada tipo A 30, y cabillas lisas 1/4 (6 mm) de tipo A-24 en todas las armaduras, en los anillos y en las armaduras de las tapas.

En conformidad con estos usos, la cantidad de materiales necesarios para los biodigestores típicos que hemos denominado de pequeña y mediana escala, son los que se relacionan en la tabla 10.

Tabla 10.

Listado de materiales para biodigestores típicos de cúpula fija del tipo Nicarao, con volúmenes de 12, 24 y 42 m³

No	MATERIALES	U/M	V-12	V-24	V-42
1	Cemento	Saco	80	100	120
2	Arena	m ³	5	7	10
3	Grava	m ³	6	8	11
4	Bloque de 15 cm	U	420	530	740
5	Ladrillo macizo	U	510	780	1 120
6	Acero 3/8"	kg	149	173,6	282,72
7	Acero 1/4"	kg	21	27	36
8	Puntilla	kg	3	3	3
9	Alambre de amarre	kg	5	5	7
10	Madera de construcción	m ³	0,3	0,3	0,5
11	Excavación	m ³	26	50	90
12	Relleno	m ³	11	25	45
13	Material de encofre	m ²	7	8	10

Observaciones:

1. Las tuberías, válvulas y otros materiales y accesorios para el traslado del biogás al usuario, no se indican por la diversidad de situaciones que pueden darse.

2. Las cantidades de materiales que se deben utilizar pueden variar de acuerdo con el lugar y objetivos en general de la planta (utilización o no de gasómetros, inclusión o no de lechos adicionales para aprovechar el lodo extraído, etc.), por lo que los valores de estas cantidades son promedio.

Es importante señalar la incidencia que tiene la selección y calidad de los materiales en la estanquidad y seguridad de la obra. Una planta de biogás no impermeable deja de ser una planta de biogás. En la página 50 se refiere al proceso de estucado e impermeabilización, pero también es imprescindible el diseño por fisuración y formación de grietas que ocurren en las zonas donde las tensiones y solicitaciones a tracción son de mayor intensidad, que son disminuidas evitando ángulos, realizando muros circulares, etc. Se debe evitar la posible ocurrencia de desplazamientos y asentamientos diferenciales en cualquier parte de la estructura. También se debe ubicar la planta alejada de sitios donde se produzcan vibraciones por motores o paso de vehículos.

Herramientas y dispositivos

HERRAMIENTAS

Las herramientas utilizadas son las que generalmente se emplean en obras de albañilería, excavación y movimiento de tierra, fundición de hormigón y elementos de mampostería.

Herramientas para la excavación y movimiento de tierra. Barra de acero (barreta), palas, picos, carretillas (vagones), cubos, mandarina, polea o romana, apisonador manual.

Herramientas de albañilería. Nivel de burbujas manual, hilo (cordel), nivel de manguera, escuadra de albañil, flota, plomada, cuchara de albañil.

Otras herramientas manuales: Cinta métrica, alicates, tenazas, martillos, estacas de madera o metal, segueta, hachuela, cincel, serrucho, zaranda con abertura de malla de 3 mm, alambre o soga.

DISPOSITIVOS

El biodigestor está compuesto básicamente por tres elementos estructurales con forma de tres figuras geométricas definidas: losa de cimentación (cono), muro circular (cilindro) y cúpula superior (esfera). Para facilitar la construcción se recomienda disponer de los dispositivos siguientes:

Eje central. Se instala un tubo de hierro galvanizado de 2" de diámetro y 6 m de longitud en un agujero conformado en el vértice del fondo cónico, aplomándose debidamente y fijándolo mediante arriostes o vientos (tres como mínimo), en su parte superior para conservar su verticalidad. El agujero donde se apoya el tubo será rellenado con mortero pobre, para lograr cierto empotramiento, pero que permita retirar el tubo una vez finalizados los trabajos y pueda éste ser utilizado en otra obra.

Guía rectangular. Se utiliza para la construcción del muro circular. Puede elaborarse con listones de madera, o mejor aún con tubos gal-

vanizados. Se fija al eje central (del cual se retiró previamente la escuadra utilizada para la conformación de la losa), de manera que gire libremente alrededor de éste. Generalmente, el extremo libre de la guía se arrastra mediante un tirante (viento), al extremo superior del eje central.

Escuadra de madera. Se requiere para la fundición de la losa con placa cónica de fondo. Se ajusta al eje central, sobre el cual gira con el radio y la altura requerida por la losa.

Guía o formaleta recta. Se utiliza para la construcción de la cúpula esférica. Se ajusta en un extremo al eje central (del cual fue retirado previamente la guía rectangular), girando libremente alrededor de éste y, además, con una bisagra o eje adicional que permite su movimiento circular en el plano vertical.

Ganchos de sujeción. Se utiliza para la colocación de contrapesos para la sujeción de los ladrillos durante la construcción de las últimas hiladas que conforman la cúpula. Se elaboran con cabillas de 3/8 pulgadas.

Partes principales

LOSA DE CIMENTACIÓN

Con los niveles correspondientes en la excavación se procede a fundir la losa, lo cual por lo general se realiza manualmente (excepto en plantas grandes).

El enrase o nivelación de la superficie de terminación de la losa se efectúa con la ayuda de la escuadra de madera, acoplada al eje central.

En caso de losas de hormigón, se recomienda que éste posea una resistencia ≥ 15 Mpa, para que sea resistente a la compresión a que estará sometida la losa y, además, debe ser impermeable, lo que se logra mediante la adecuada dosificación de los agregados. La relación agua-cemento de la mezcla debe ser menor o igual a 0,5.

El sitio donde se realizará la mezcla debe ubicarse lo más cerca posible de la excavación, sobre un piso firme y limpio.

La fundición de la losa se hará en un solo día, para que todo el hormigón posea la misma edad y se eviten juntas de fundición. El vestimento del hormigón se realiza por sectores, desde el centro hacia afuera, empleando la escuadra de madera permanentemente para el control de los niveles de la superficie que se debe lograr.

MURO CILÍNDRICO

Se coloca la guía para el muro circular (guía rectangular), con cuyo auxilio se determina la correcta posición que debe dársele a cada ladrillo o bloque en el momento de su colocación. Durante la ejecución de la mampostería se rectifica la verticalidad y la horizontalidad, y los niveles en las hiladas.

En la conformación del muro generalmente se utilizan bloques de 20 o 15 cm de espesor, aunque también pueden emplearse ladrillos en citara. En todos los casos éstos deben ser de buena calidad. Es importante que al levantar el muro se tengan en cuenta los orificios o inser-

tos de tuberías o conductos de entrada y salida del cieno de fermentación en el biodigestor, según la solución o esquema de la planta.

VIGA DE CERRAMIENTO O CIERRE DEL MURO

Esta parte, también denominada viga de apoyo, sirve como elemento de cierre del muro y, a la vez, de apoyo de la cúpula.

Esta viga posee una forma triangular o trapezoidal, y se apoya uniformemente sobre el muro. Se funde con hormigón armado con una resistencia de 20 Mpa.

Es importante que la superficie superior de la viga, una vez fundida, posea la debida inclinación, de manera que se logre el ángulo preciso con que debe colocarse la primera hilada de los ladrillos que conforman la cúpula.

CÚPULA O DOMO ESFÉRICO

Sobre la viga de cierre del muro se indica la colocación de la primera hilada de ladrillos, utilizando la guía o formaleta para la cúpula.

El radio que se debe mantener se señalará en la formaleta mediante una puntilla clavada y bien aplomada en su canto inferior, de manera que indique la posición del interior en el que debe quedar colocado el ladrillo.

La formaleta se va moviendo a la posición del siguiente ladrillo que se colocará, y así sucesivamente se va repitiendo la operación en cada hilada. De este modo va quedando conformada la cúpula, curvándose lentamente el muro hacia el interior y disminuyendo su abertura circular superior. Cuando esta curvatura es tal que provoca el desprendimiento del ladrillo en el momento de su colocación, se emplean entonces los ganchos de sujeción, que se van colocando sobre los ladrillos recién puestos, lo que evita que se desprendan, y presionándolos contra los ladrillos de la hilada anterior.

VIGA DE CIERRE

Sirve de elemento de cierre de la cúpula, manteniendo el orificio necesario en ésta para el acceso o inspección del interior del biodigestor. Sirve, además, de base para el cuello.

Su sección es trapezoidal y se conforma con hormigón armado de una resistencia de 15-20 Mpa.

Su encofrado se apunta desde adentro del biodigestor o desde afuera con ganchos, lo cual no es muy común.

CUELLO

Encima de la viga se construye el cuello, que tiene forma cilíndrica y se conforma con ladrillos. Consta de dos partes; en la primera se colocan los ladrillos en doble citarón, hasta alcanzar la altura a la que va colocada la primera tapa, que sirve como cierre hermético del biodigestor. A continuación se mantiene el cuello con un muro en citara hasta su extremo superior, donde va colocada otra tapa de protección.

TAPAS DE HORMIGÓN

La primera tapa que se debe fundir garantiza el cierre hermético del biodigestor; la segunda cumple la función de evitar la evaporación del agua que recubre la arcilla colocada encima de la primera tapa.

Ambas tapas generalmente se funden aparte, mediante el empleo de moldes con las dimensiones sugeridas.

En la conformación de las tapas puede emplearse hormigón con arena fina (gravilla), con resistencia de 15 Mpa, colocando una malla de alambrón como refuerzo.

Es importante prever en ambas tapas, durante su fundición, la colocación de ganchos insertados que sirvan para el agarre, a fin de poderlas manipular y mover fácilmente según sea necesario a la hora de destapar el biodigestor.

Trabajos de terminación y acabado

Si los trabajos de diseño y construcción revisten una esencial importancia para el funcionamiento y explotación óptima de una planta de biogás, los trabajos de terminación y acabado constituyen también un proceso de máxima importancia para una obra, ya que son los que deben garantizar la debida protección y estanqueidad de los elementos que la componen, y a la vez brindarle la adecuada estética a todo el conjunto.

Entre los trabajos fundamentales de terminación y acabado de una planta de biogás, se pueden mencionar los siguientes:

- Repellos de los distintos elementos y partes.
- Relleno y nivelación del terreno al nivel definitivo, una vez realizados todos los rehinchos.
- Restauración de los niveles normales del terreno y conformación del sistema de drenaje exterior, así como de los accesos a la planta.
- Pintura de las superficies visibles y expuestas, a fin de darle un adecuado aspecto estético a la planta.
- Eventual protección y cercado del área que ocupa la planta, en caso de ser necesario.

REPELLOS

Además de las características de los repellos descritas anteriormente, es necesario señalar que por regla general no deben poseer un espesor menor de 2 cm, y que el proceso de aplicación recomendable es el siguiente:

Primero: Lechada de agua-cemento-arena sobre la superficie.

Segundo: Colocación del repello, cuya proporción mínima es de 1:3.

Tercero: Lechada de agua-cemento (según el tipo de elemento).

Este último se aplica a superficies que requieran de mayor estanqueidad, como es el caso del interior del biodigestor y del tanque de compensación.

ESTUCADO

E IMPERMEABILIZACIÓN

En zonas de acumulación de gas, como el interior de la cúpula y el cuello, se recomienda, como regla general, aplicar un estucado sobre el repello, que sirve a su vez de superficie adecuada para la aplicación de la protección impermeabilizante. Esta última generalmente se obtiene mediante el empleo de varias manos de pintura a base de agua con cemento. En ocasiones esta impermeabilización se logra con la aplicación de pinturas esmaltes o sintéticas, que deben ser aplicadas estando la superficie bien seca, pues en caso contrario la práctica ha demostrado que se producen desprendimientos, y se pierde su efecto hermetizador e impermeabilizador.

RELLENOS

Y NIVELACIÓN DEL TERRENO

Independientemente de las labores de rehincho, y una vez terminadas éstas, en las zonas aledañas a los objetos de obra por lo general el terreno mantiene irregularidades y acumulación de escombros y residuos como consecuencia de las labores de construcción realizadas. Es importante restaurar el terreno a su aspecto original y, de ser necesario, mejorar aún más el aspecto que ofrece la instalación en su conjunto. Estos trabajos son simples, pero sin embargo es notable el efecto que producen en la imagen de la instalación.

PINTURA EN GENERAL

Como complemento de los trabajos anteriores, la aplicación de pinturas corrientes sobre las superficies visibles o expuestas de los elementos y partes de la planta constituyen siempre un factor estético y de terminación que hacen de una planta de biogás una instalación agradable, y permiten borrar la imagen que lamentablemente a veces se tiene de que por emplear deshechos orgánicos debe ser un lugar necesariamente sucio y desagradable. Generalmente, para ello puede emplearse una simple lechada de cal, con la que se logra el efecto estético y sanitario requerido.

PROTECCIÓN

Y CERCADO DEL ÁREA

Aunque por regla general una planta de biogás no requiere de limitaciones en cuanto a su acceso, dada su ubicación, la presencia de animales y aves de corral o de personas ajenas a la

instalación y que desconocen su funcionamiento pueden producir averías por tupición en los conductos de entrada, golpes en zonas sensibles (como el cuello del biodigestor), eventuales manipulaciones de válvulas y registros de la tubería que conducen el gas, etc. Por ello se aconseja la colocación de una cerca perimetral que limite el acceso a la planta y la proteja de la ocurrencia de este tipo de percances. También debe ser evaluado con la debida antelación, a fin de que en el balance de los recursos necesarios se contemple este importante aspecto.

PUESTA EN MARCHA

La puesta en marcha de una planta de biogás requiere de un grupo de operaciones que por consiguiente aseguran su explotación. De conjunto con los mantenimientos, en tiempo y forma, garantizan el éxito del funcionamiento en el período para el cual fue concebida. Los aspectos principales a tener en cuenta para el logro de este propósito, se relacionan a continuación:

- Después de ser construido, el digestor debe ser curado, es decir, llenarlo de agua sin carga orgánica durante diez o doce días.
- Cargar el digestor tan rápido como se pueda (durante la etapa de curado se puede acumular la mayor cantidad de excreta posible para disponer del volumen necesario).
- Una vez lleno el digestor, no se debe adicionar más mezcla hasta pasados quince días, aproximadamente. Las bacterias metanogénicas no aparecerán hasta después de transcurridas las etapas de hidrólisis y acidificación.
- El tiempo de puesta en marcha puede ser disminuido utilizando un inóculo proveniente de otro digestor en operación donde ya existe la presencia de las bacterias metanogénicas.
- Dejar abierta la válvula de salida del gas durante el período de espera (para dejar escapar el aire).
- Una vez transcurrido el período de espera se cierra la válvula y se observa el nivel de agua en el tanque de compensación; al generar el biogás éste desplaza el líquido y eleva el nivel en el tanque hasta el reboso.
- Dejar escapar el gas inicial ya que puede ser explosivo y peligroso, o también no ser combustible por exceso de dióxido de carbono (CO_2).

EXPLOTACIÓN

Durante todo el período de explotación se deben tener en cuenta los aspectos siguientes:

- La mezcla de la excreta de diferentes animales mejora la producción de biogás de la planta.
- Evitar que penetre tierra o arena al interior del digestor (estos materiales ocupan volumen y no alimentan a las bacterias metanogénicas).
- Evitar la presencia de restos de forraje y pajas (estos materiales forman costras que impiden el movimiento del agua y la salida del gas).
- Evitar la presencia de residuos de aceite, jabón, detergentes o antibióticos (estos materiales pueden destruir las bacterias metanogénicas).

MANTENIMIENTO

La periodicidad de las labores de mantenimiento depende de las condiciones específicas de cada digestor:

- Eliminación de la nata y el sobrenadante.
- Eliminación de sólidos y lodos en el tanque de compensación.
- Chequeo del estado de las tuberías.
- Drenaje de las trampas de agua y puntos bajos de las tuberías.
- La planta de biogás debe ser un lugar agradable y acogedor, por ello pintar y mantener la limpieza es tan necesario como su funcionamiento satisfactorio.

Selección, diseño y ejecución de plantas del tipo GBV

La correcta selección de un diseño y su dimensionamiento garantizan el éxito de su funcionamiento estable. En el acápite sobre los tipos de plantas se hizo referencia a las características del modelo GBV y a la importancia que tienen en él las características y posibilidades del usuario en las condiciones específicas de Cuba. Es por ello que a continuación se expone, a modo de ejemplo, la instalación construida en el Jardín Zoológico de Santa Clara, en abril de 2006, y los conceptos, criterios y recomendaciones fundamentales que se tuvieron en cuenta para la selección, diseño y construcción de esa planta de biogás, que forma parte de las acciones de un programa integral para el desarrollo y consolidación del Jardín Zoológico de Santa Clara, como un centro coordinador y de referencia para fomentar el desarrollo sostenible en la provincia de Villa Clara.

El Jardín Zoológico de Santa Clara se encuentra situado a menos de un kilómetro del centro de la ciudad, ocupa una extensión de 2,9 hectáreas y no cuenta con un sistema para el tratamiento de las excretas de los animales. Tomando en consideración también la limitada disponibilidad de recursos para la ejecución del proyecto, se decidió asumir los criterios de diseño de los modelos GBV, para valorar la factibilidad real de construir una planta de biogás. Los modelos GBV, como ya se expuso, diseñados para condiciones específicas, requieren obligatoriamente de un reconocimiento minucioso del lugar, así como de una encuesta a los usuarios que de una u otra forma intervienen en el diseño. Del análisis de los resultados obtenidos (Tabla 11), se infiere que la construcción exitosa de la planta de biogás está en dependencia de la posibilidad de adecuarla con los materiales de construcción disponibles. De esta manera, se asume la concepción del diseño de la planta de biogás para el Jardín Zoológico de Santa Clara y se elaboran las instrucciones para integrarla a otras actividades complementarias, con vistas a establecer un sistema de trata-

miento a ciclo cerrado que le incorpore valor agregado a la solución, dentro de otras acciones que contempla el citado programa integral.

TABLA 11.
Resultados de los aspectos principales de la metodología GBV,
para las condiciones del Jardín Zoológico de Santa Clara

NO.	ASPECTOS ANALIZADOS PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE CONSTRUIR LA PLANTA DE BIOGÁS	RESULTADOS
1	Necesidad e interés del usuario.	Favorable
2	Disponibilidad financiera para adquirir los recursos necesarios.	Desfavorable
3	Disponibilidad de materiales de construcción y en desuso que puedan ser destinados a la planta de biogás.	Favorable
4	Disponibilidad de materia orgánica, agua y espacios.	Favorable
5	Características del manto freático, suelo y topografía del lugar.	Favorable
6	Posibilidades de uso del efluente del biodigestor. Favorable	
7	Conocimiento para aplicar la tecnología del biogás.	Favorable
8	Recurso humano para la explotación y ejecución de la planta de biogás.	Favorable

Nota: En el lugar existía una construcción en desuso, tipo fosa, mal concebida y sin terminar, que se aprovechó como emplazamiento principal de la nueva instalación.

El punto de partida para el diseño fue el tratamiento de todo el residual que generan los animales y obtener los subproductos que de ellos se deriven.

La cantidad de excreta que diariamente generan los animales del Jardín Zoológico es de 120 kg, lo que significa un volumen aproximado de 150 L. Este volumen, en proporción 1:2 con el agua para su mezclado, hace un total de cieno de fermentación de 450 L. Si tomamos un tiempo de retención de veinte días, teniendo en cuenta que el biogás forma parte de un sistema de tratamiento a ciclo cerrado, entonces el volumen del biodigestor será:

$$V_d = 450 / 20 = 22 \text{ días}$$

Auxiliándonos en los datos que se reportan en la tabla 3, medianamente una interpolación de las excretas que se asumen (pollo, caballo y cerdos), para simular la que se genera en el Jardín Zoológico, se puede arribar al criterio de que por cada 12,43 kg de la mezcla de estas excretas, se obtiene 0,51 m³ de biogás como promedio, por lo que la cantidad de biogás que se producirá diariamente según este cálculo será aproximadamente:

$$V_{\text{biogás}} = 5 \text{ m}^3/\text{día.}$$

Una vez predeterminado el volumen de biogás, se procede a calcular el volumen de diseño (V_d) del biodigestor, teniendo en cuenta el formulario indicado en la figura 8, así como los pasos que se deben seguir al respecto.

El diseño resultante de la planta con sus respectivas medidas, a partir de los cálculos, criterios, conceptos y análisis realizados, se

exponen en la figura 18. El buen empleo de los conocimientos expuestos permitió hacer una correcta selección, diseño y ejecución de la planta de biogás del Jardín Zoológico de Santa Clara, que funciona establemente para las condiciones y posibilidades concretas del ejemplo dado.

Otros ejemplos del desarrollo de los modelos GBV, igualmente a partir de dichos conocimientos, aunque para usuarios con otras características y posibilidades, son los diseños que se muestran en las figuras 17-27.

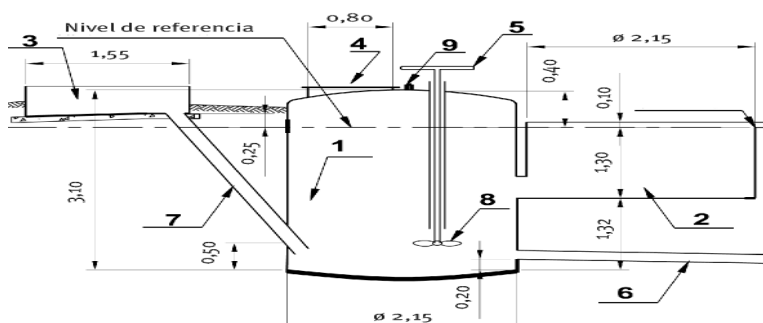


Fig. 17. Diseño híbrido con diferentes materiales (de los tipos GBV y Nicarao), ya que aprovecha un tanque tipo silo en desuso, así como otros recursos locales, tomando en cuenta las potencialidades y posibilidades del usuario. El diseño de esta planta de biogás de 45 m^3 de capacidad, puesta terminada en diciembre del 2006, fue concebida para satisfacer en una primera etapa la cocción de los alimentos para los trabajadores del complejo hidráulico Comandante Faustino Pérez, en la provincia de Guantánamo. Esta obra fue ejecutada con esfuerzos propios y tiene previsto en una segunda etapa, con la ubicación de un gasómetro, el suministro a cuatro viviendas de los propios trabajadores del referido complejo.

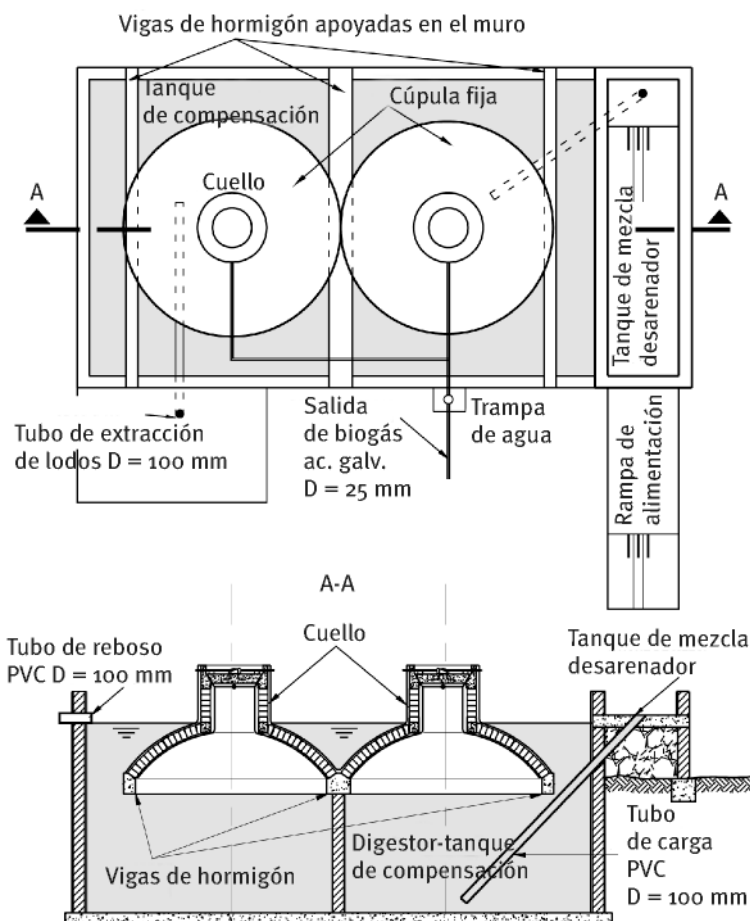
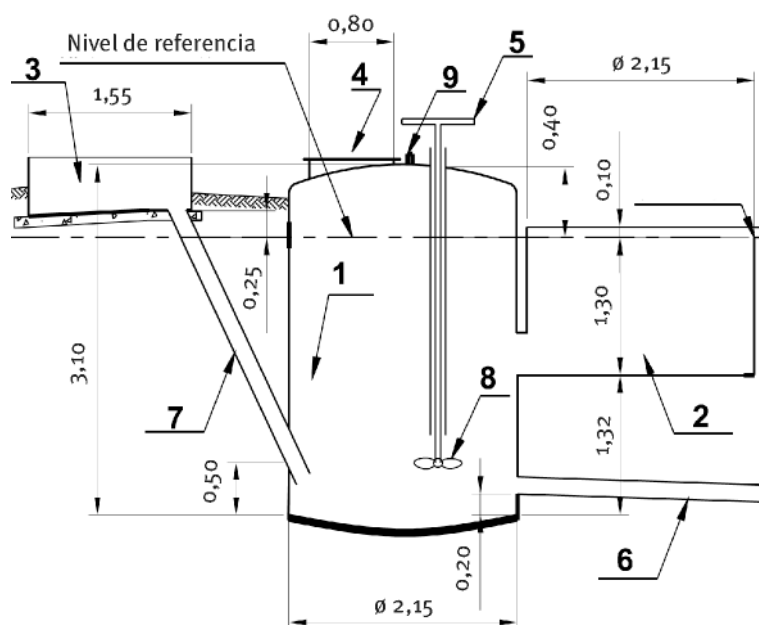


Fig. 18. Planta de biogás del tipo GBV desarrollado y adecuado al entorno con materiales de construcción convencionales, a partir de una fosa en deshuso enclavada en el lugar. Este biodigestor de 20 m³ de capacidad, instalado en enero de 2006, fue concebido para satisfacer la cocción de alimentos que se le suministran a los animales que se enferman en el zoológico de Santa Clara, Villa Clara. Esta obra fue ejecutada con esfuerzos propios.



- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1. BIODIGESTOR | 6. TUBERÍA PARA LA EXTRACCIÓN DEL LODO |
| 2. TANQUE DE COMPENSACIÓN | 7. TUBERÍA DE ENTRADA |
| 3. TANQUE DE MEZCLA | 8. PALETAS DEL REVOLVEDOR |
| 4. CUELLO O REGISTRO DE INSPECCIÓN. | 9. TUBERÍA PARA LA SALIDA DEL GAS. |
| 5. REVOLVEDOR MANUAL | 10. SALIDA DEL EFLUENTE. |

Fig. 19. Diseño atípico desarrollado con la utilización de tanques en desuso como parte de un proyecto de tesis. Esta planta de biogás de 10 m³ de capacidad, construida en la Universidad de Moa, fue concebida a partir de la implementación de la metodología GBV, que tiene implícita el propio concepto del arte del biogás en Cuba.

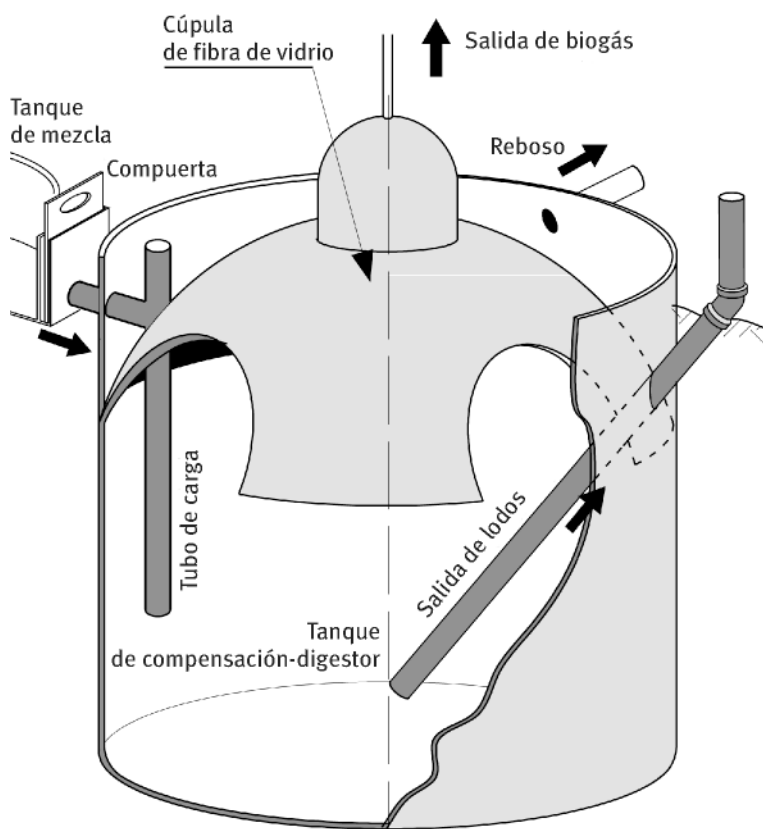


Fig. 20. Diseño fabril del tipo GBV, desarrollado y adecuado al entorno con fibra de vidrio. Esta planta de biogás de 12 m³ de capacidad, puesta en marcha en el 2001, fue concebida para satisfacer la cocción de alimentos de núcleos familiares de hasta de seis personas, en condiciones de montaña de difícil acceso. Se ubicaron cuatro plantas de este tipo en el municipio de El Salvador, provincia de Guantánamo.

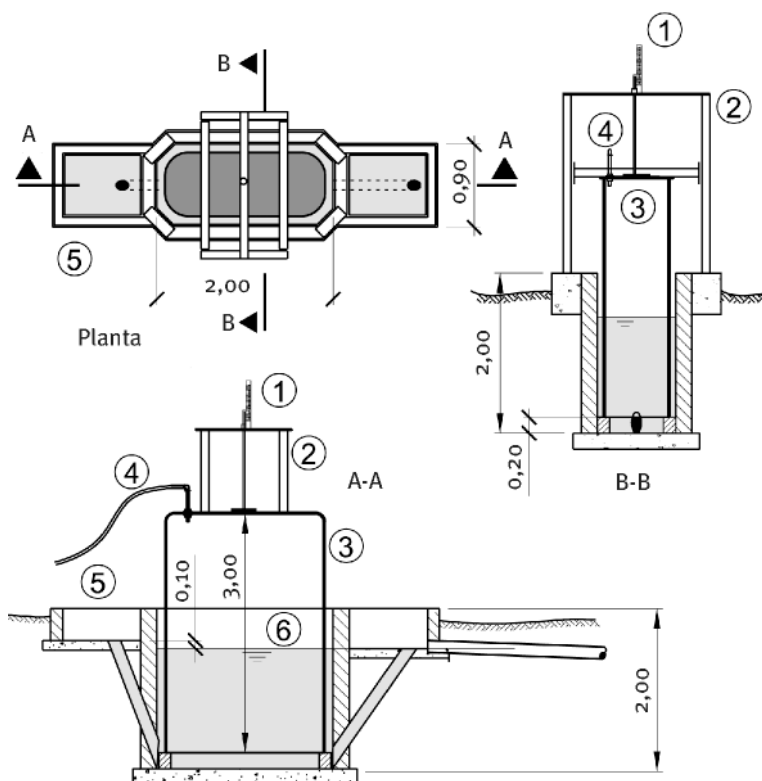


Fig. 21. Diseño atípico, desarrollado a partir de los conceptos de la metodología GBV, aprovechando un casco de transformador eléctrico desechado. Esta planta de biogás de 8 m³ de capacidad, construida con esfuerzos propios en el municipio de San Cristóbal, provincia de Pinar del Río, fue concebida a partir de la creatividad del usuario, contribuyendo con ello al arte del biogás en Cuba.

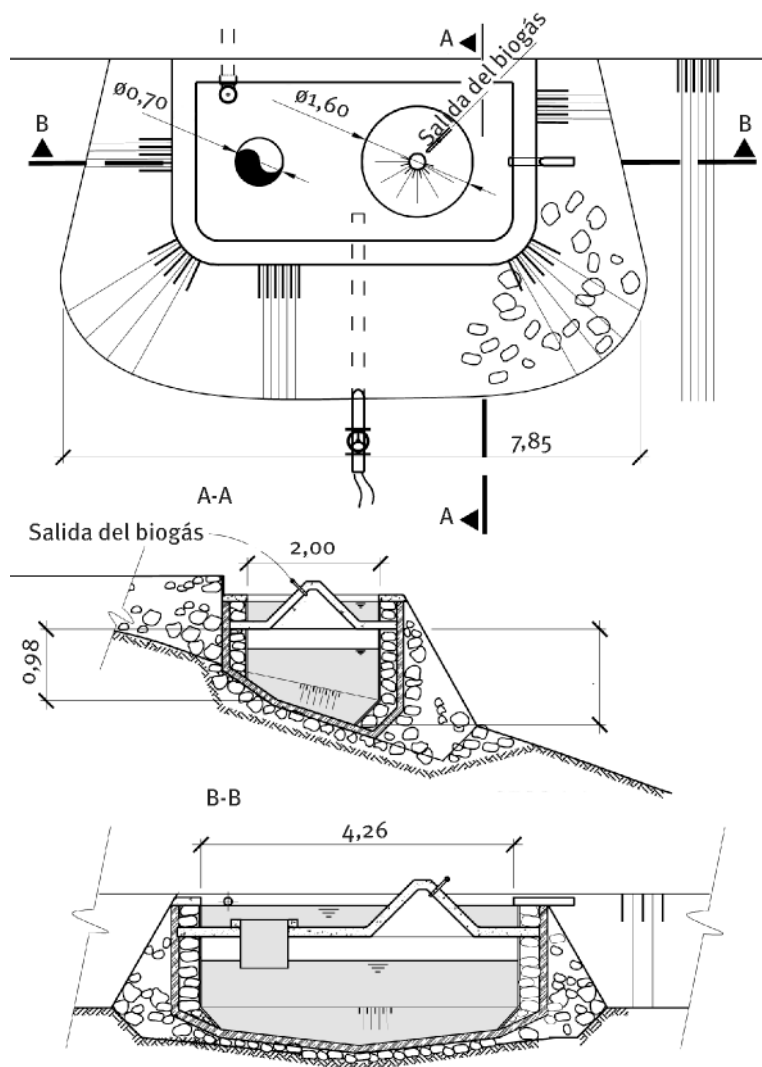


Fig. 22. Diseño totalmente atípico, desarrollado a partir de los conceptos de la metodología GBV, tomando en cuenta las características y posibilidades de los usuarios y aprovechando la utilización de los recursos locales y disponibles. Esta planta de biogás de aproximadamente 9 m³ de capacidad fue construida en una zona montañosa y de difícil acceso en el municipio de San Cristóbal, provincia de Pinar del Río.

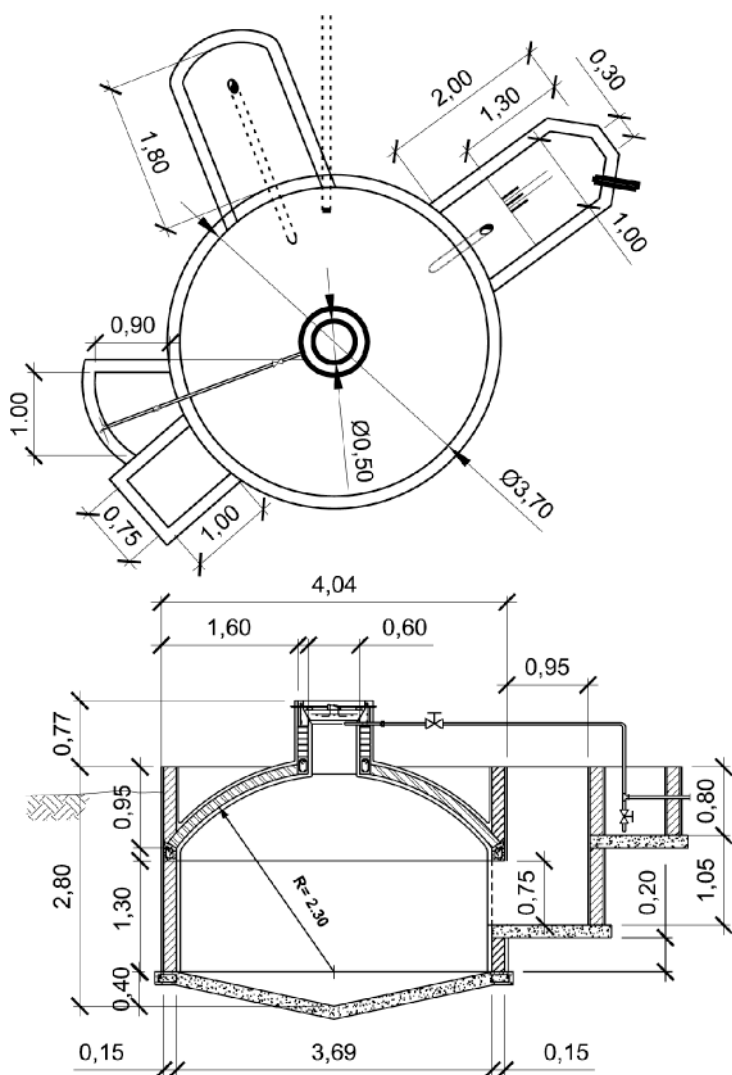


Fig. 24. Diseño del tipo GBV adecuado al entorno con materiales convencionales de construcción en la presa Margarita, a 5 km del poblado de Jicotea, Ciego de Ávila. Esta planta de biogás de 22 m³ se concibió para satisfacer la cocción de alimentos de los trabajadores que allí laboran y de la familia de la vivienda que tiene a su cargo la custodia de la presa. Esta obra fue ejecutada con esfuerzos propios.

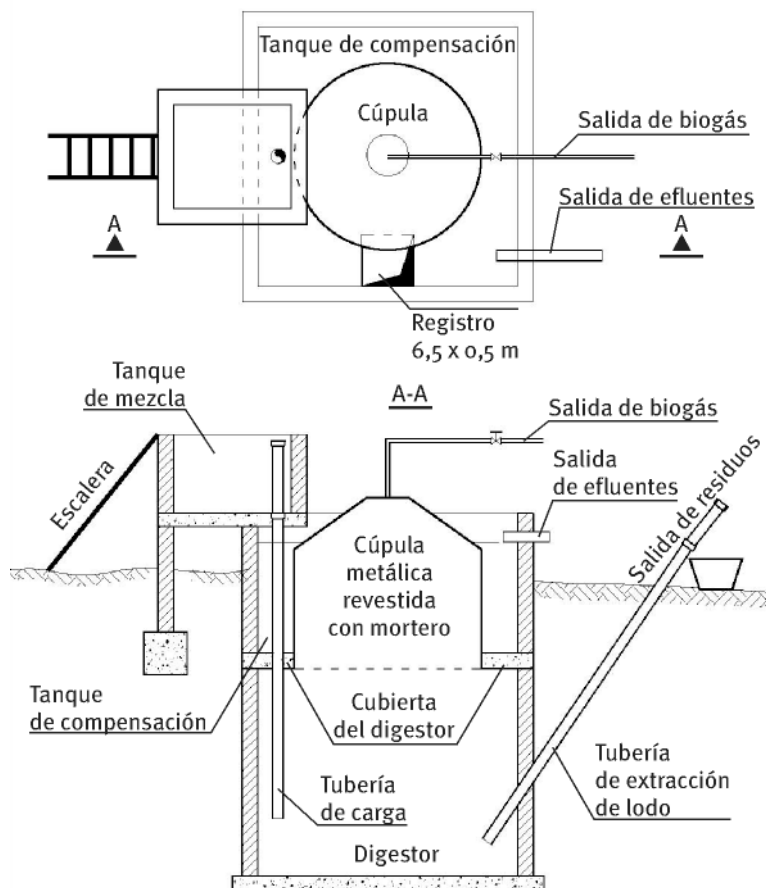


Fig. 25. Diseño atípico del tipo GBV, desarrollado y adecuado al entorno con materiales de construcción convencionales, a partir de una fosa construida y una campana metálica en desuso. Esta planta de biogás de 12 m^3 de capacidad, puesta en marcha en el 2002, fue concebida para satisfacer la cocción de alimentos de una vivienda ubicada en el batey Efraín Alfonso, del municipio de Ranchuelo, provincia Villa Clara. Esta obra fue ejecutada con esfuerzos propios.

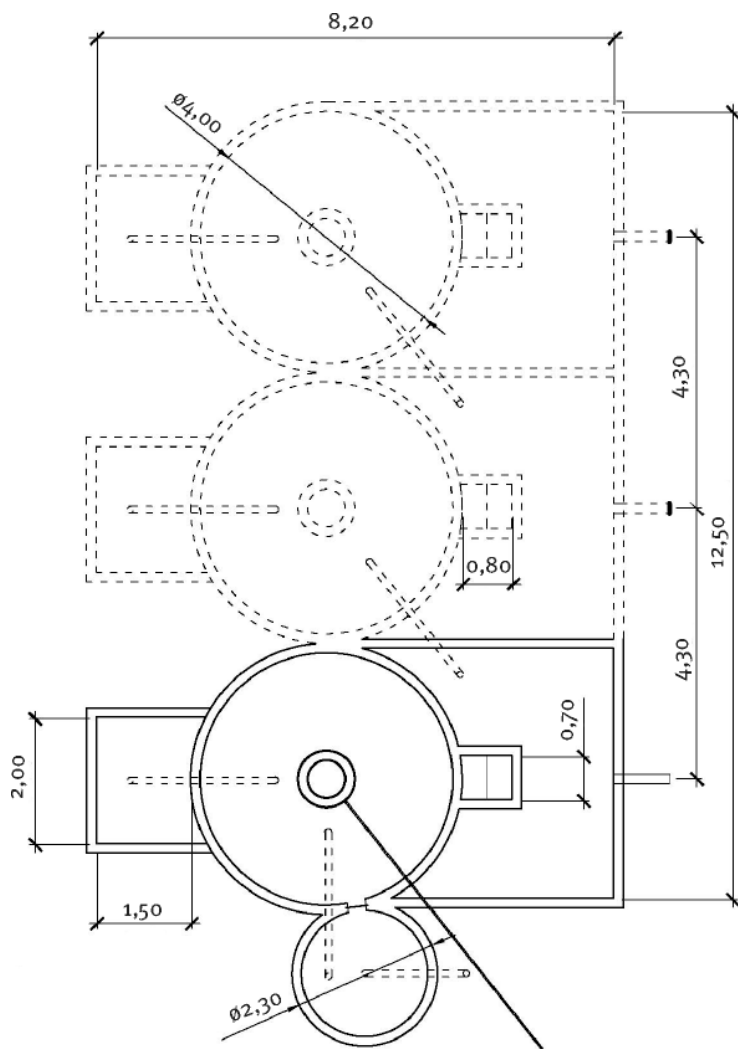


Fig. 26. Diseño típico de cúpula fija, concebido con materiales convencionales de la construcción, a partir de la metodología GBV. Esta planta de biogás de 126 m³ de capacidad ha sido diseñada para satisfacer la cocción de alimentos de los profesores del Instituto Politécnico Agropecuario No. 8, un consultorio y una vivienda, y posteriormente para el abastecimiento de biogás a la cocina centralizada del ese politécnico de la Ciudad Escolar Camilo Cienfuegos, Bartolomé Masó, Granma.

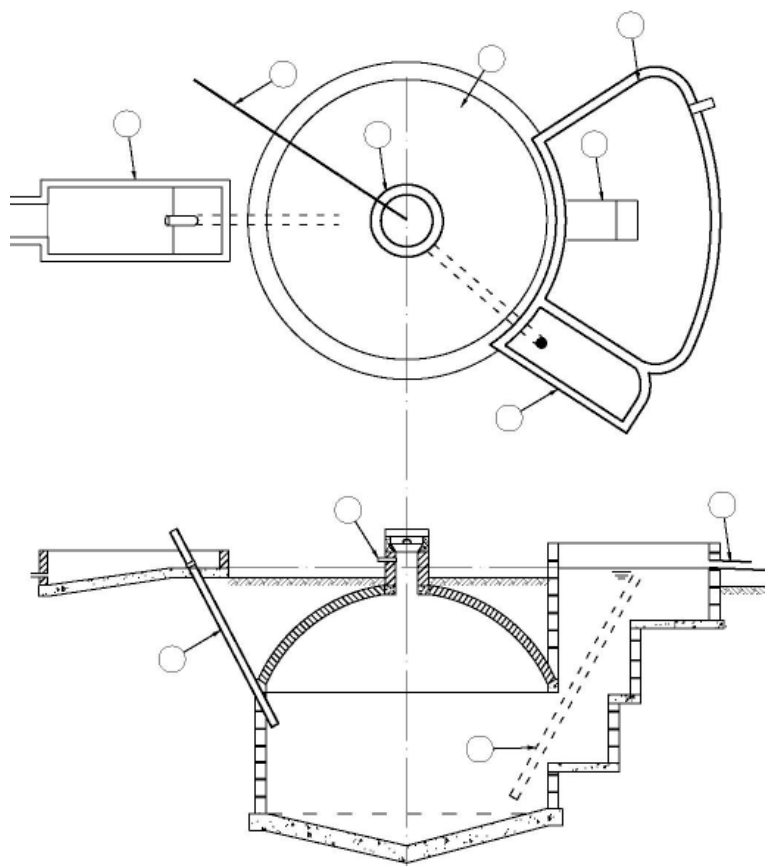


Fig. 27. Diseño típico de cúpula fija concebido con materiales convencionales de la construcción, a partir de la metodología GBV. Esta planta de biogás de 12 m³ de capacidad ha sido diseñada para satisfacer la cocción de los alimentos de un núcleo familiar de cuatro personas de la unidad 4 en Ciudad Escolar Camilo Cienfuegos del municipio Bartolomé Masó, provincia Granma.

Bibliografía

- CHAUR, B. J. «El biogás». *Boletín didáctico No. 32*. ICA. Bogotá: 1992.
- COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. «Alternativas energéticas nacionales», en *Energía* (2): 3, 1992.
- _____. Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía. La Habana: 1993.
- CORTADA, J. L. Materiales del 3er. Curso Internacional sobre Biogás, impartido en la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2004.
- CRUZ RODRÍGUEZ, F. «Biogás de cachaza», en *Energía* 6 (2): 1991.
- FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Biomass Energy Profiles. Rome: 1983.
- GUARDADO, J. A. «El arte del biogás en Cuba». Taller CUBASOLAR 2006. Villa Clara-Cienfuegos: 2006.
- _____. *Sistema de tratamiento a ciclo cerrado para granjas de auto-consumo porcino-agrícola*. La Habana: CUBAIDIS, 1993.
- _____. «Tecnología de bajo costo para el tratamiento de residuales porcinos», en *Cuba. XXII Congreso AIDIS*. San Juan: 1990.
- _____. *Tecnología de bajo costo para el tratamiento de residuales porcinos en Cuba*. San Juan: XXII Congreso AIDIS, 1990.
- _____. *Tecnología del biogás. Manual del usuario*. La Habana: Ed. CUBASOLAR, 2006.
- GUARDADO, J. A. Y PEDRO URBINA. «Sistema de tratamiento a ciclo cerrado». Conferencia Latinoamericana de Agricultura Sustentable. Movimiento Agroecológico Latinoamericano (MAELA) y el Instituto para la Producción e Investigación de la Agricultura Tropical (IPIAT de Venezuela). Coro, Venezuela: 1995.
- GUARDADO, J. A., ET AL. Materiales de los diez talleres celebrados anualmente en diferentes provincias de Cuba (1995-2005).
- GUARDADO, J. A., ET AL. Taller nacional con participación extranjera «Actualización y perspectivas para la producción de biogás en Cuba». Sancti Spíritus: 2006.

- KRAMER, PEDRO. Materiales del seminario-taller celebrado en Santa Clara, agosto de 1994.
- MARCHAIM, U. «Biogas Processes for Sustainable Development», en *Agricultural Services Bulletin* 95, 1992.
- MITZLAFF, KLAUS. *Engines for Biogas*. GATE-GTZ. Lengericher Handelsdruckerei, Lengerich, Alemania, 1988.
- MONTALVO, S. Y L. GUERRERO. *Tratamiento anaerobio de los residuos. Producción de biogás*. Chile: 2003.
- MUCHE H., ZIMMERMANN. *La purificación del biogás*. GATE-GTZ. Lengericher Handelsdruckerei, Lengerich, Alemania, 1985.
- RAMOS, J. Y J. A. GUARDADO. Alternativa para la captación y aprovechamiento del biogás. La Habana, XIV Asamblea FMI, 1993.
- SÁENZ, R. Reuso de aguas residuales preparadas en agricultura y piscicultura. Lima: 1986.
- SASSE H., LUNDWING. *La planta de biogás*. Republica Federal de Alemania: 1984.
- _____. *Production and Utilization of Biogas in Rural Areas of Industrialized and Developing Countries*. GTZ. Eschborn, Alemania, 1986.
- URICH, GUNTER. Materiales del seminario-taller celebrado en Cárdenas, noviembre de 1993.
- VÁZQUEZ DURAÑONA, O., ET AL. «Planta de biogás de pequeñas dimensiones para fincas lecheras», en *Ciencias Técnicas Agropecuarias* 9 (1): 2000.
- WERNER U., STÖHR. *Biogas Plants in Animal Husbandry*. GATE-GTZ. Lengericher Handelsdruckerei, Lengerich, Alemania, 1989.
- ZAMORA G., LUIS. *Metodología para la construcción de una pequeña planta de biogás*. Bayamo: Universidad de Granma, 2004.
- ZAPATA C., A. *Utilización del biogás para generación de electricidad*. Fundación CIPAV, 2004.

Este libro ha sido impreso
por la Editorial CUBASOLAR.
Se terminó de imprimir en La Habana,
en febrero de 2007.
«Año 49 de la Revolución».

La obra del Dr. José Antonio Guardado Chacón constituye un aporte significativo al conocimiento para valorar, seleccionar, dimensionar y construir una planta de biogás en Cuba, como parte de la divulgación científico-popular que lleva a cabo el país para contribuir a la implementación de la tecnología del biogás en las condiciones y características específicas de los usuarios de nuestros campos y ciudades. El libro forma parte del creciente desarrollo del arte del biogás en Cuba.

El autor es «Premio a la vida y obra», otorgado por la Sociedad de Ingeniería Hidráulica de la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba (UNAICC). Es Investigador Agregado, Profesor Titular de la Universidad Central y del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER) y directivo del Comité Regional Latinoamericano de la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. Fundador del Grupo de Biogás de Villa Clara y principal coordinador de los talleres nacionales sobre el biogás en Cuba, durante más de una década. Es autor de la obra *Tecnología del biogás. Manual del usuario*.