

Biodigestor : Una Aproximación al Diseño

El estudio y evaluación de los Sistemas de Biogas forma parte de la Electiva Técnica "Sistemas Alternativos de Energía", ofrecida por la Facultad de Ingeniería. El presente artículo es un producto de dicho curso e intenta ser informativo, estando centrado en el proceso del diseño preliminar. Las ecuaciones han sido extraídas de diversas fuentes y se pretende dar las pautas de evaluación técnica de cualquier Biodigestor, sin tocar los problemas prácticos y de experiencia que de ello se deriva.

Agradezco la colaboración prestada por los estudiantes Guillermo Garcés y Pedro A. Cuervo y en especial al Ingeniero Arturo Martínez R. por su participación en la parte correspondiente a Biogas en el curso mencionado.

NOMENCLATURA

Pmez=Peso de la mezcla (lb)	K = Coeficiente, función de la temperatura dentro del digestor, es a la vez un factor de ayuno de la bacteria para que comience a ingerir alimento.
Hmez=Humedad de la mezcla (Fracción decimal)	Kc = Función de la temperatura, y es la cantidad mínima necesaria para que la bacteria se multiplique.
Va=Volumen del agua (Pies cúbicos)	FS = Factor de seguridad.
Pa=Peso del agua (lb)	TD = Tiempo de detención (días)
a=Peso específico del agua (lb/pie ³)	Vt = Volumen del tanque (Pie cúbico, m ³)
VI=Volumen de los lodos (Pies cúbicos)	PI = Peso de los sólidos no biodegradables (lb)
SVmez=Sólidos volátiles de la mezcla (lb)	P1 = Peso de los sólidos producidos en forma de bacteria (lb)
SVcon=Concentración de los sólidos volátiles (lb/pie ³)	Ps = Peso de los sedimentos totales (lb)
DQO=Demanda Química de Oxígeno (lb/pie ³ , P.P.M)	Pts = Peso total de los sedimentos (lbs)
TRS=Tiempo de retención de los sólidos (días)	
a=Coeficiente, función de la cantidad de bacterias producidas en la alimentación.	
b=Coeficiente de ayuno.	

**JULIO MARIO RODRIGUEZ
DEVIS**

**Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Asistente,
Universidad Nacional**

Las plantas y árboles en general son colectores de energía solar, siendo almacenada en la estructura celular. En una escala geológica, se transforman, de una manera natural, en combustibles fósiles. Sin embargo, las plantas, árboles y una gran variedad de desperdicios orgánicos (conocidos como bio-masa) pueden ser

convertidos —acelerados por procesos tecnológicos— en una gran diversidad de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, conocidos como biocombustibles.

Este proceso tiene la ventaja de que es el método mejor y más simple conocido para tratar los desperdicios de humanos y de animales, minimizando los ries-

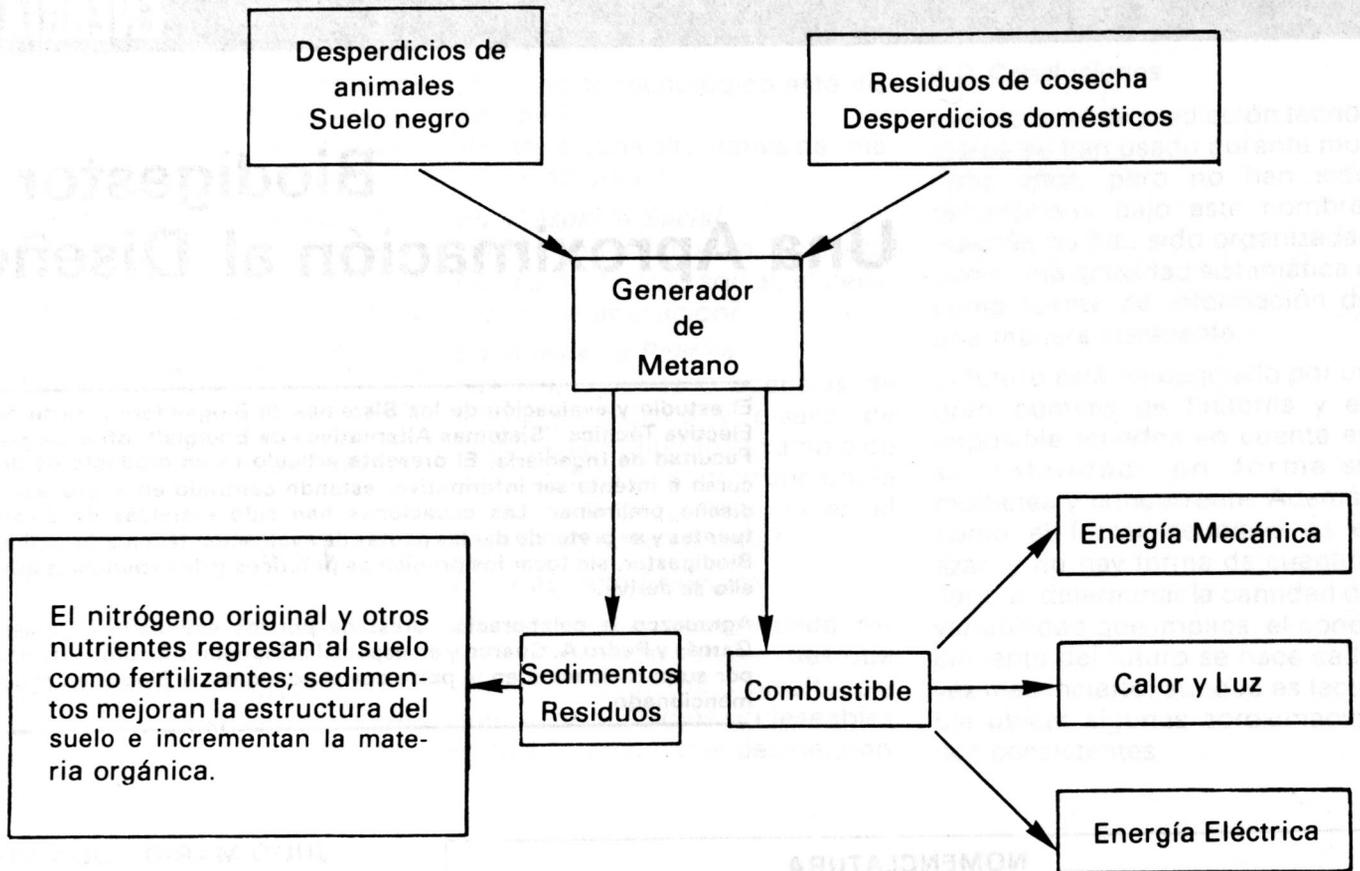


FIGURA 1.

gos de salud pública debido a su manejo y almacenamiento; por otra parte, el residuo que queda después de utilizar el gas tiene un gran valor como fertilizante pues contiene todos los nutrientes esenciales que están presentes en la materia prima. El artículo se centrará en una de las formas de extracción de energía llamada digestión anaeróbica. Este es un método microbiológico de producir combustible gaseoso (biogas) que contiene típicamente un 70 por ciento de gas metano (CH₄), un 30 por ciento de dióxido de carbono (CO₂) y trasas de ácido sulfídrico (H₂S). El material se "envasa" en un recipiente cerrado y hermético al aire en donde las bacterias ácidas rompen los materiales orgánicos y los descomponen en químicos simples.

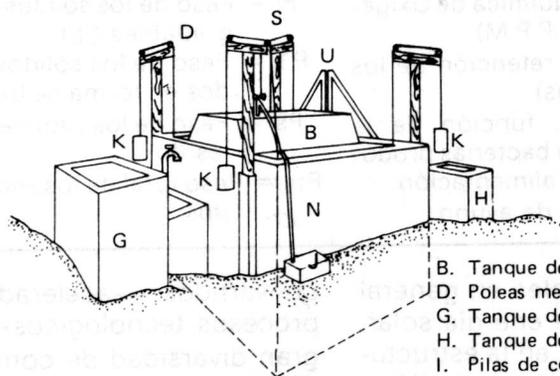
Otra bacteria convierte entonces los químicos en biogas (figura 1). El porcentaje de metano en el volumen total de biogas producido durante el proceso depende grandemente del control de ciertos parámetros, como son los sustratos, la relación carbono-nitrógeno, la temperatura, la can-

tidad de carga orgánica, el pH y la concentración de sólidos. Todos ellos influyen en el delicado balance de la población microbial entre las bacterias formadoras de ácidos y las bacterias metanogénicas.

A continuación se dará una pequeña explicación de los parámetros antes anotados y que deben ser tenidos en cuenta en el proceso de diseño.

Sustrato: El sustrato inicial o material orgánico debe tener un gran contenido de carbón, principalmente en forma de celulosa, hemicelulosa, azúcares, lípidos y proteínas. Debe ser bajo en ligninas que no son biodegradables e impiden el rompimiento microbial de la celulosa.

Relación Carbono-Nitrógeno: La óptima relación masa C/N es de 30:1. Una relación alta indica una



GENERADOR DE BIO GAS (METANO)

Diseño de Arturo Martínez R.

- B. Tanque de almacenamiento de gas
- D. Poleas metálicas 15 cms.
- G. Tanque de mezcla
- H. Tanque de abono digerido
- I. Pilas de contrapesas
- J. Grifo de drenaje
- N. Manguera flexible conectada a tubería principal
- P. Digestor
- K. Contrapesa
- L. Toma de Agua
- S. Llave para gas
- U. Guía metálica para tanque de gas

sustancia que es deficiente en nitrógeno, lo que hace que la biodigestión termine cuando no haya carbón. Una relación baja usualmente indica que habrá una pérdida de nitrógeno durante el proceso.

Temperatura: Las súbitas fluctuaciones de temperatura pueden retardar o detener el proceso. La temperatura óptima está comprendida generalmente en un rango de 30° a 38°C (rango mesofílico). La reacción se retardará a temperaturas más bajas hasta detenerse a los 10°C. También pueden funcionar en un rango de 54°C a 60°C (bacterias termofílicas). Para mantener la temperatura deseada hay que introducirle calor por lo que se pueden usar colectores solares.

Factor pH: El rango óptimo del pH es de 7.0 a 7.2, pero puede variar entre 6.6 y 7.6. Si el sistema se trasforma, el pH caerá debido a la excesiva producción de ácido lo que será difícil de corregir posteriormente.

Agitación: Se aconseja agitar diariamente para mantener el material pesado distribuido en todo el sistema.

Concentración de sólidos: El material vegetal y los desechos animales generalmente requieren ser diluidos en agua para reducir las concentraciones de sólidos entre el 7 y 9 por ciento.

Carga orgánica: Los digestores de alimentación continua pueden ser trastornados si se le echa el material fresco muy rápido. La carga óptima varía de acuerdo a parámetros como el diseño del digestor, la clase de sustrato y la temperatura.

Proceso de diseño

Para que se justifique la construcción de una planta de gas se deben cumplir al menos tres requisitos.

- Para que se justifique económicamente su construcción, la planta más pequeña debe, al menos, producir gas para cocinar una familia de 4 personas. (Mientras más grandes son más económicas y eficientes).

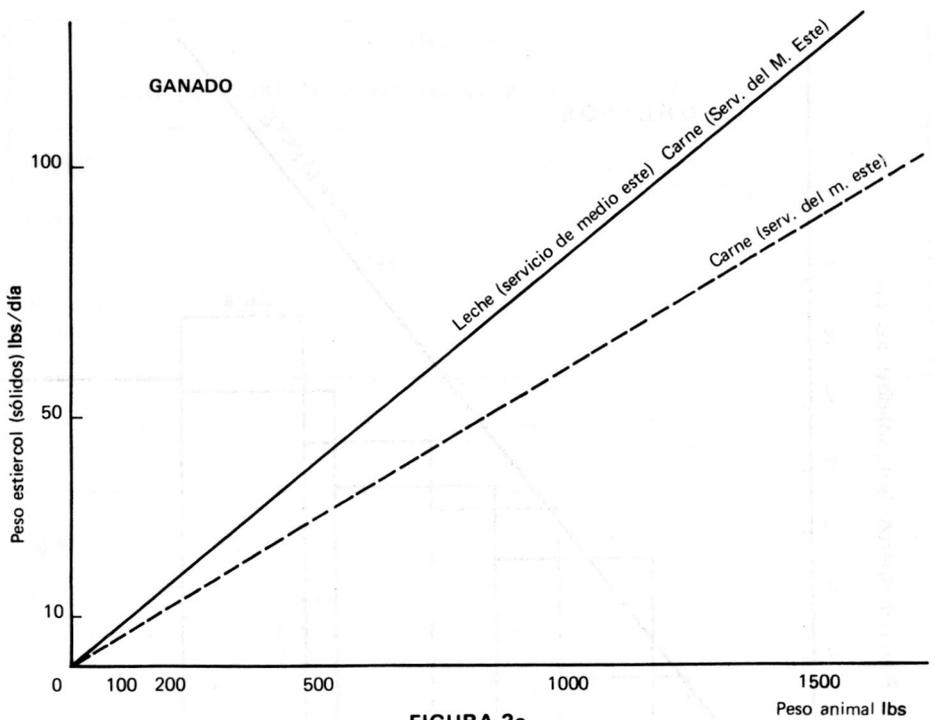


FIGURA 2a.

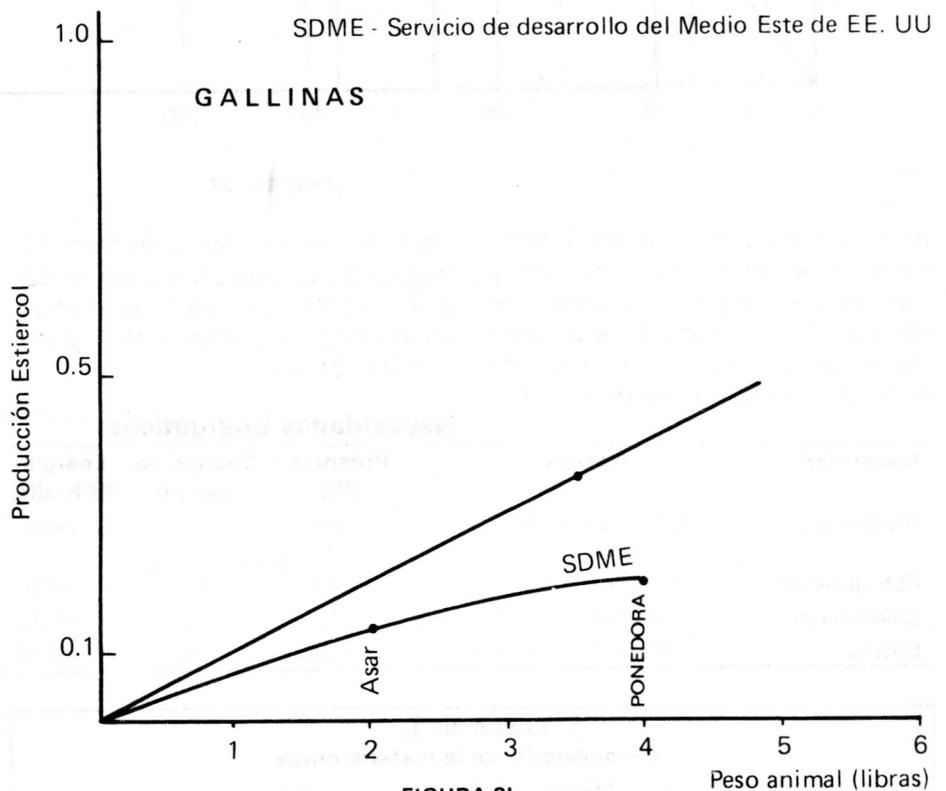


FIGURA 2b.

- La cantidad de materia prima debe ser lo suficiente como para producir el gas.
- Debe haber agua en la cantidad suficiente como para mezclar el material.

Para el diseño que se efectuará, se tomarán datos obtenidos en tablas y gráficas de diversas fuentes (ver bibliografía); es importante anotar que para hacer un buen

diseño, se deben contar con los datos reales del Laboratorio (porcentaje de C/N, humedad, sólidos, volátiles, etc.) para una materia prima definida. La calidad y cantidad de los excrementos de animales están influenciados por la dieta que varía en cada región y por el estado de salud de los animales. Se busca suplir las necesidades energéticas básicas

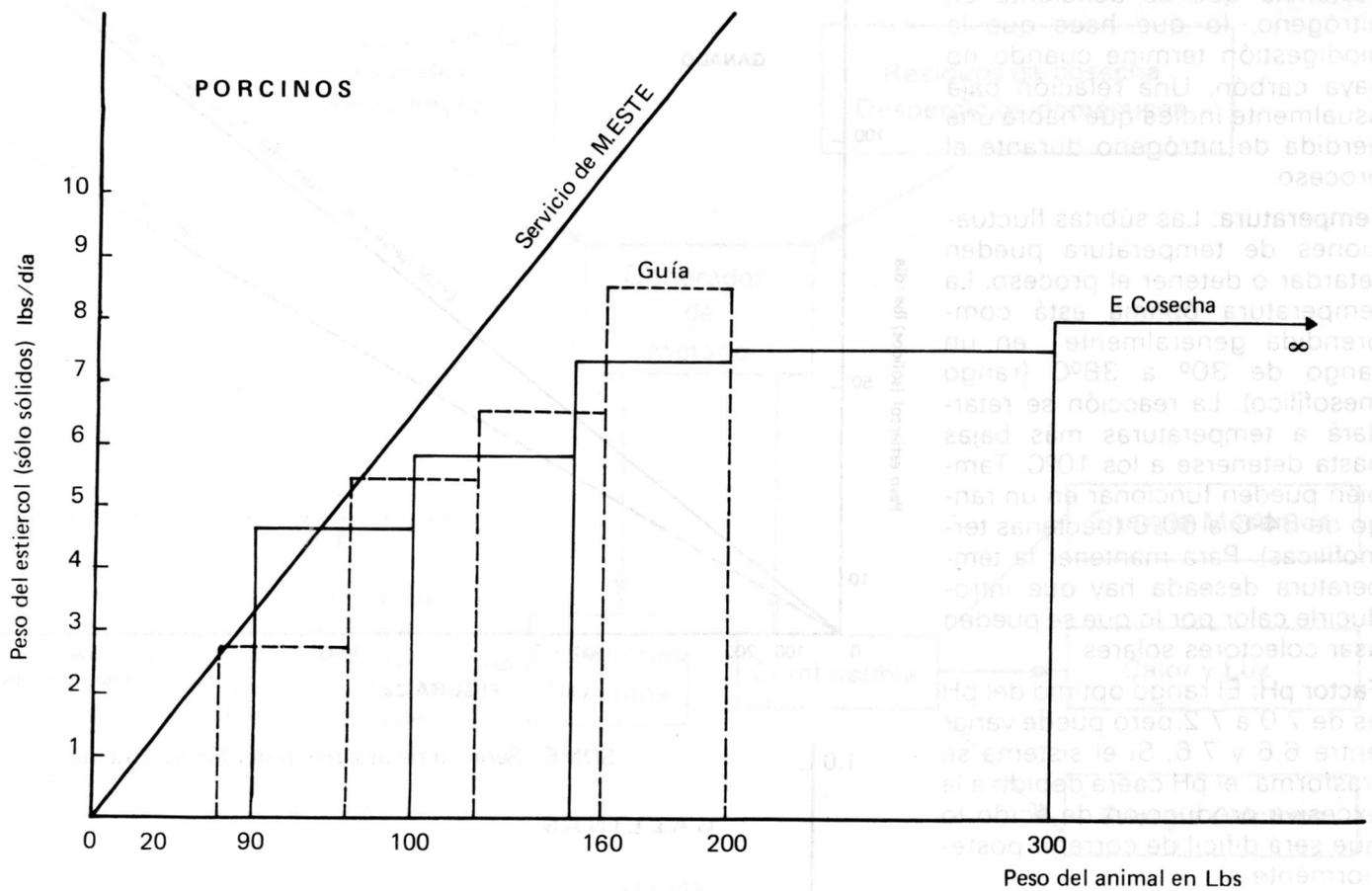


FIGURA 2C

de una casa rural que está dedicada a la producción avícola y cuenta con algunas cabezas de ganado. La finca produce 2 toneladas de gallinaza y 800 kg de boñiga diarios en materia prima;

además en ella se alimentan 12 trabajadores que producen de 65 a 75 libras de residuos diarios (desechos de campo). Ver gráficos 2a, 2b y 2c.

Necesidades Energéticas

Necesidad	Aparato	Potencia (W)	Tiempo de uso (h)	Energía (W-h/día)
Alumbrado	8 Bombillas de 60 W c/u	480	5	2400
Refrigeración	Nevera	300	10	3000
Calefacción	Calentador 10 galones	2000	2	4000
Cocina	Estufa de 4 puestos	4600	6	2700

Otros datos estimativos son:

Una nevera de 1/4 HP consume 1.7 m³/h por m³ de espacio; una cocina de 3 puestos para 6 personas consume 0.42 m³ de gas por persona por día; una estufa para calentar agua consume 0.07 m³ de gas por cada hora por litro de agua; una lámpara para luz consume 0.01 m³ de gas por cada vatio (W) hora que deseemos reemplazar.

El total de energía necesaria (más un 10%) será de 40 Kw-h/día o 136480 Btu/día.

El gas Metano en su estado puro tiene un poder calorífico entre 896 y 1069 Btu/pie³ pero debido a las impurezas del biogas se ha comprobado experimentalmente que posee un poder calorífico de 550 Btu/pie³ de gas.

La cantidad de gas a consumir (V) será la energía necesaria total sobre el poder calorífico o sea 248.1 Pie³ de gas por día.

Los sólidos totales se definen por el "peso seco" de la materia prima, o la porción que permanece-

TABLA Nº 1. Composición de la materia prima

Estos datos han sido tomados de (1), (2) y (3).

Material (Residuos)	% Humedad (H)	% Sólidos totales (S/T)	% Nitrógeno (N)	% Carbono (C)	% Sólidos Volátiles (SV)	C/N
Gallinaza	65.0	35.0	6.3	94.5	65.0	15
Reses (Boñiga)	86.0	14.0	1.7	30.8	80.0	18
Cerdos	87.0	13.0	3.8	76.0	85.0	20
Basuras Verdes	1.0	99.0	3.04	54.7	77.8	18
Residuos de papel	7.0	93.0	0.05	4.0 a 6.0	97.1	813
Desechos de campo (a)	7.2	37.0	1.2	90.0	63.0	75
Excrementos Humanos	73.0	27.0	6.0	36 a 60	92.0	6 a 10
Orina humana	94.0	6.0	18.0	14.0	75.0	0.8

(a) Estos datos son estimativos de una mezcla (Residuos de cocina, plantas hidrófilas, etc).

cerá si el material fuese secado a una temperatura de 212°F hasta que no hubiese más pérdidas de peso por deshidratación.

Los sólidos volátiles son la porción de los sólidos totales a los que quemados a 1100°F, no permanecen fijos. Esta es la parte de que se alimentan las bacterias. la porción que permanece se llama sólidos fijos.

Total de Materia Prima Diaria

Para encontrar el porcentaje en peso del Metano purificado (colocando trampas de gas al biogas producido) para la materia prima (mezcla)

$$\frac{\text{Pie}^3 \text{CH}_4}{\text{lb. Mezcla}} = \sum_{i=1}^n (\%ST * \%SV * \frac{\text{Pie}^3 \text{ biogas} * \% \text{CH}_4}{\text{lb biogas}}) i \quad 1$$

en donde n es la clase de materia prima usada. Para nuestro caso n = 3 (Gallinaza, Boñiga y Desechos de campo).

$$\frac{\text{Pie}^3 \text{CH}_4}{\text{lb Mezcla}} = 0.68 + 0.102 +$$

Material	Proporción (%)	Pie ³ gas libra mat. prima	% CH ₄ (%)
Gallinaza	100	5.0	59.8
Boñiga	100	1.4	65.2
Cerdos	100	5.2	65.0
Basuras de cocina	100	3.4	61.9
Residuos de papel	100	3.5	67.1
Desechos de campo	100	4.82	60.0

Datos tomados de (2) y (3). Esta tabla muestra de una manera muy general y aproximada el potencial de producción de biogas (60 por ciento metano, 40 por ciento dióxido de carbono) de materias primas si el contenido de sólidos volátiles es conocido.

$$0.674 = 1.456$$

Se deduce que los porcentajes de gallinaza, boñiga y desechos son de 46.7, 7 y 46.3 por ciento respectivamente.

Aumentamos en un 25 por ciento la producción necesaria de gas debido a impurezas (310 pies cúbicos).

El peso de la materia prima es la producción necesaria de gas sobre el resultado de la ecuación 1. El peso resultante es de 213 libras de Mezcla al día (Pmez); el

porcentaje de cada materia prima es 100 lb/día de gallinaza, 15 lb/día de boñiga y 98 lb/día de desechos.

La diferencia en desechos necesarios se obtendrán de las plantas acuáticas que crecen en los pantanos y de material vegetal.

Relación C/N de la Mezcla

Se conoce la relación C/N de cada una de las materias primas; para encontrar la relación de la mezcla se usa:

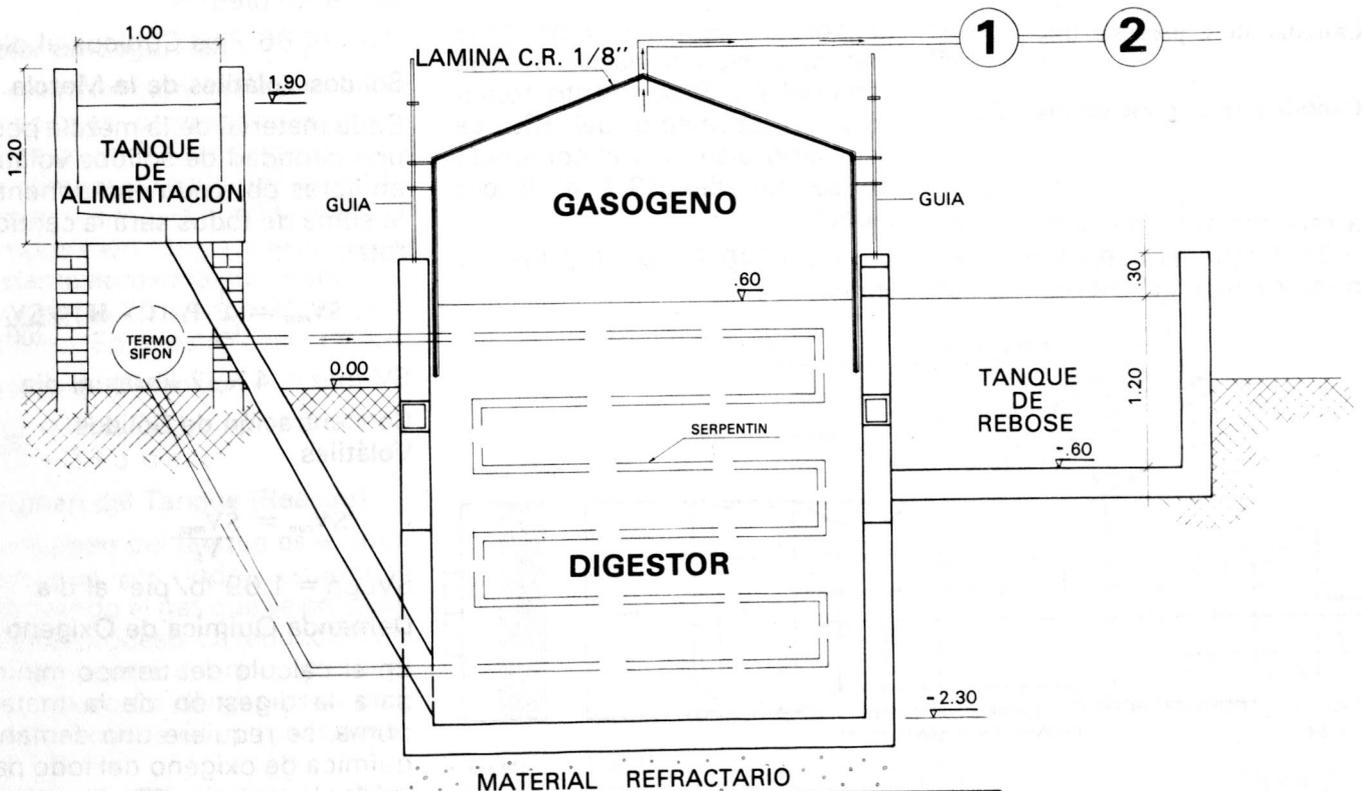


FIGURA 3.

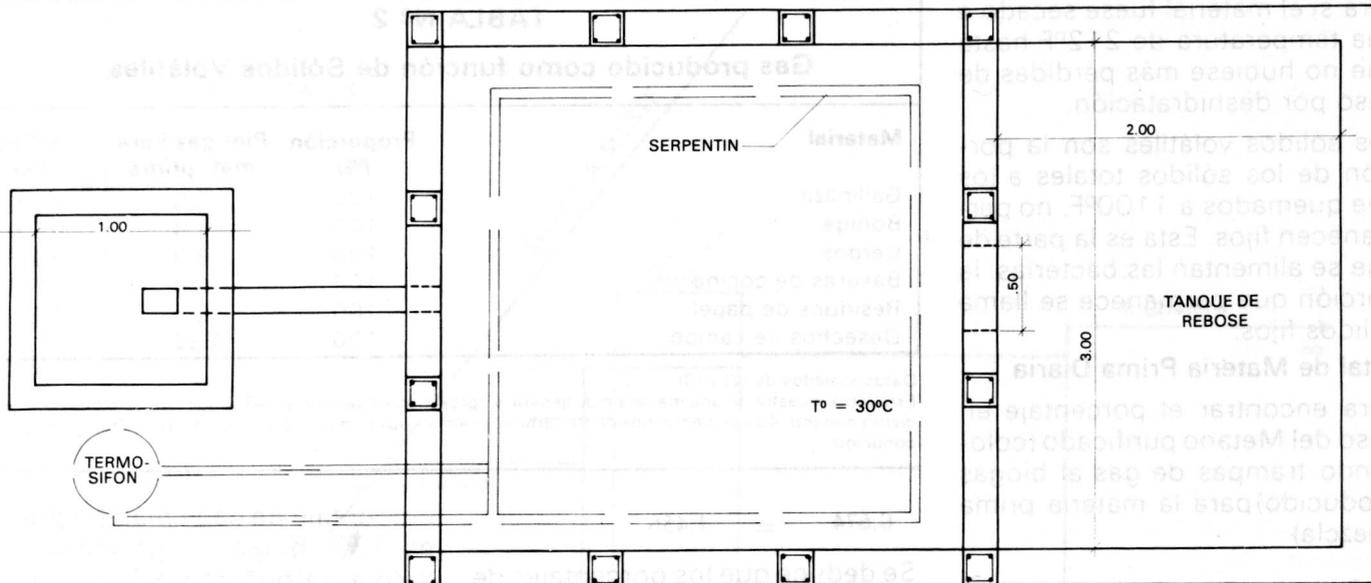


FIGURA 4. Planta general

FIGURA 4.

$$(Cantidad\ de\ N\ presente/lb)_i = (Total\ de\ materia\ prima / día * \frac{\% ST}{100} * \frac{\% N}{100})_i$$

$$(Cantidad\ de\ N\ presente/lb)_{mezcla} = \sum_{i=1}^n (Cantidad\ de\ N\ presente/lb)_i \quad 2a$$

$$(Cantidad\ de\ C\ presente/lb)_i =$$

$$(Cantidad\ de\ N\ presente/lb \times (C/N))_i$$

$$(Cantidad\ de\ C\ presente/lb)_{mezcla} = \sum_{i=1}^n$$

$$(Cantidad\ de\ C\ presente/lb)_i \quad 2b$$

La relación C/N de la mezcla es de 25:1, que es aceptable, pues en la práctica los valores usuales

son de 20:1 hasta 25:1 (Valores bajos de C/N hacen que el gas salga más impuro, con mayor H₂S y CO₂, por lo que se deberán colocar y cuidar mejor las trampas).

Humedad de la Mezcla

$$H_{mez} = \frac{\sum_{i=1}^n (\% Materia\ prima \times \% H)_i}{100} \quad 3$$

$$H_{mez} = 39.7\%$$

Agua a Adicionar

La porción de los sólidos de la materia prima en relación al agua varía del 7 al 9 por ciento, tomamos un promedio del 8%. Es necesario disminuir el contenido de sólidos del 39.7 al 8 por ciento.

$$Va = 0.1845 P_{mez} - 0.2 P_{mez} \times H_{mez}$$

Va = 22.38 Pies Cúbicos de agua al día.

$$Pa = Va \times \gamma_a = 22.38 \times 62.4 = 1396.9\ lb\ por\ día. \quad 4$$

Volumen del 8% de lodos

Llamamos lodo a la materia prima (mezcla) con un 8 por ciento de sólidos que se le introducen al digestor.

$$Vl = 0.192 P_{mez} (1 - H_{mez}) \quad 5$$

en donde el factor 0.192 es utilizado para lodos con densidad de 65 lb/pie³.

$$Vl = 24.66\ Pies\ Cúbicos\ al\ día$$

Sólidos Volátiles de la Mezcla

Cada material de la mezcla posee una cantidad de sólidos volátiles en libras por cada componente y la suma de todos será la cantidad total.

$$SV_{mez} = \sum_{i=1}^n P_i (1 - H_i) \% \frac{SV_i}{100} \quad 6$$

$$SV_{mez} = 41.72\ libras\ al\ día$$

Concentración de Sólidos Volátiles

$$SV_{con} = \frac{SV_{mez}}{V_L} \quad 7$$

$$SV_{con} = 1.69\ lb/pie^3\ al\ día$$

Demanda Química de Oxígeno

En el cálculo del tiempo mínimo para la digestión de la materia prima, se requiere una demanda química de oxígeno del lodo para oxidar la materia y descomponerla. El DQO puede ser aproximada-

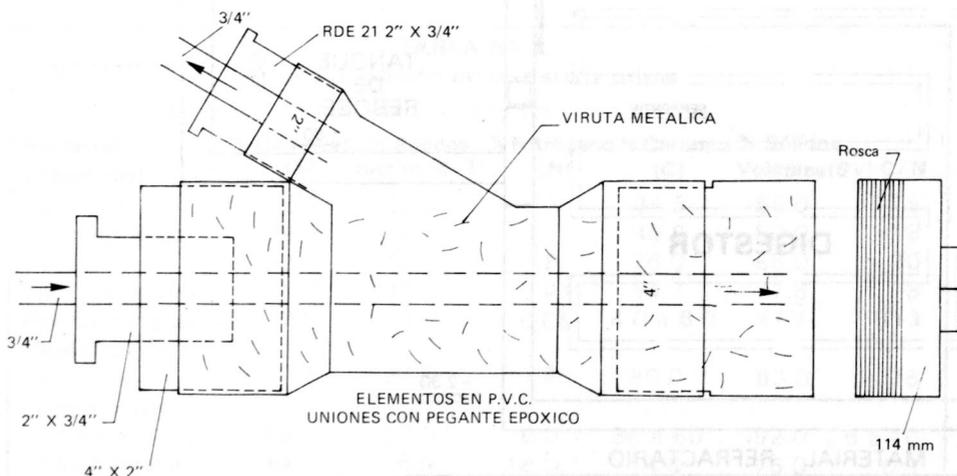


FIGURA 5. Aditamento para eliminación del Acido Sulfídrico -H₂S

damente igual a 1.5 veces la concentración de sólidos volátiles pero con un 50% de sólidos biodegradables.

$$DQO = 0.5 \times 1.5 SV_{con} \quad 8$$

$$DQO = 1.26 \text{ lb/Pie}^3$$

Es conveniente expresarlo en partes por millón (1 lb/Pie³ es igual a 16000 P.P.M.).

$$DQO = 20280 \text{ P.P.M.}$$

Tiempo de Retención Mínimo

El tiempo de retención de los sólidos es el tiempo promedio que los sólidos que entran permanecen en el digestor, suponiendo que los sólidos que salen son reemplazados continuamente. Hay un TRS mínimo en la que los microorganismos empiezan a consumir el alimento y a reproducirse.

$$\frac{1}{TRS_{min}} = \left[a \times K \times \left[1 - \left(\frac{K_c}{K_c + DQO} \right)^{1/2} \right] \right] - b \quad 9$$

TABLA N ^o 3		
Temperatura (°F)	K	Kc
59	3.37	18500
68	3.97	10400
77	4.73	6450
86	5.60	3800
95	6.67	2235

Tomado de (3) $a = 0.04$
 $b = 0.015$ (bacteria nueva)
 $TRS_{min} = 8.33$ días

Factor de Seguridad

Se utiliza únicamente cuando hay variaciones pronunciadas en la temperatura o cuando no es posible alimentar regularmente el digestor; o si no es posible medir la composición de la mezcla con bastante aproximación. Puede variar de 1 a 20 siendo 20 el caso extremo. En nuestro caso, FS = 4.

Tiempo de Detención

$$TD = FS \times TRS_{min} \quad 10$$

$$TD = 33.3 \text{ días}$$

Volumen del Tanque (Reactor)

El volumen del tanque es el volumen que los lodos ocuparían excluyendo el gas que se produciría en el proceso. La reducción del líquido ocurre cuando comienza la producción de gas pero para fines prácticos es insignificante.

$$V_t = V_l \times TD \quad 11$$

$$V_t = 822 \text{ pie}^3 \text{ o } 24 \text{ m}^3$$

Cantidad de Sedimentos

Los sedimentos producidos en el digestor son una combinación de una porción de sólidos no biodegradables introducidos dentro del digestor y la cantidad de bacterias producidas durante el proceso de digestión.

$$P_1 = \frac{P_{mez} (1 - H_{mez})}{[1 - 0.5 SV_{mez}]} \quad 12$$

$$P_2 = \frac{0.04 \times 0.75 SV_{mez}}{1 + (0.015 \times TD)} \quad 13$$

$$P_s = P_1 + P_2 \quad 14$$

$P_s = 116.68$ lb de sedimentos al día.

Como el sedimento digerido es aproximadamente el 10 por ciento de los sólidos en peso, la cantidad total de sedimentos (10 por ciento de sólidos + 90 por ciento de agua) será:

$$P_{ts} = 10 P_s \quad 15$$

$$P_{ts} = 1166.8 \text{ lb sw sedimentos totales por día}$$

El volumen total será de 18 pies cúbicos por día.

Campana

Normalmente es de 0.3 a 0.5 el volumen del tanque o la mitad del gas que se produce diariamente.

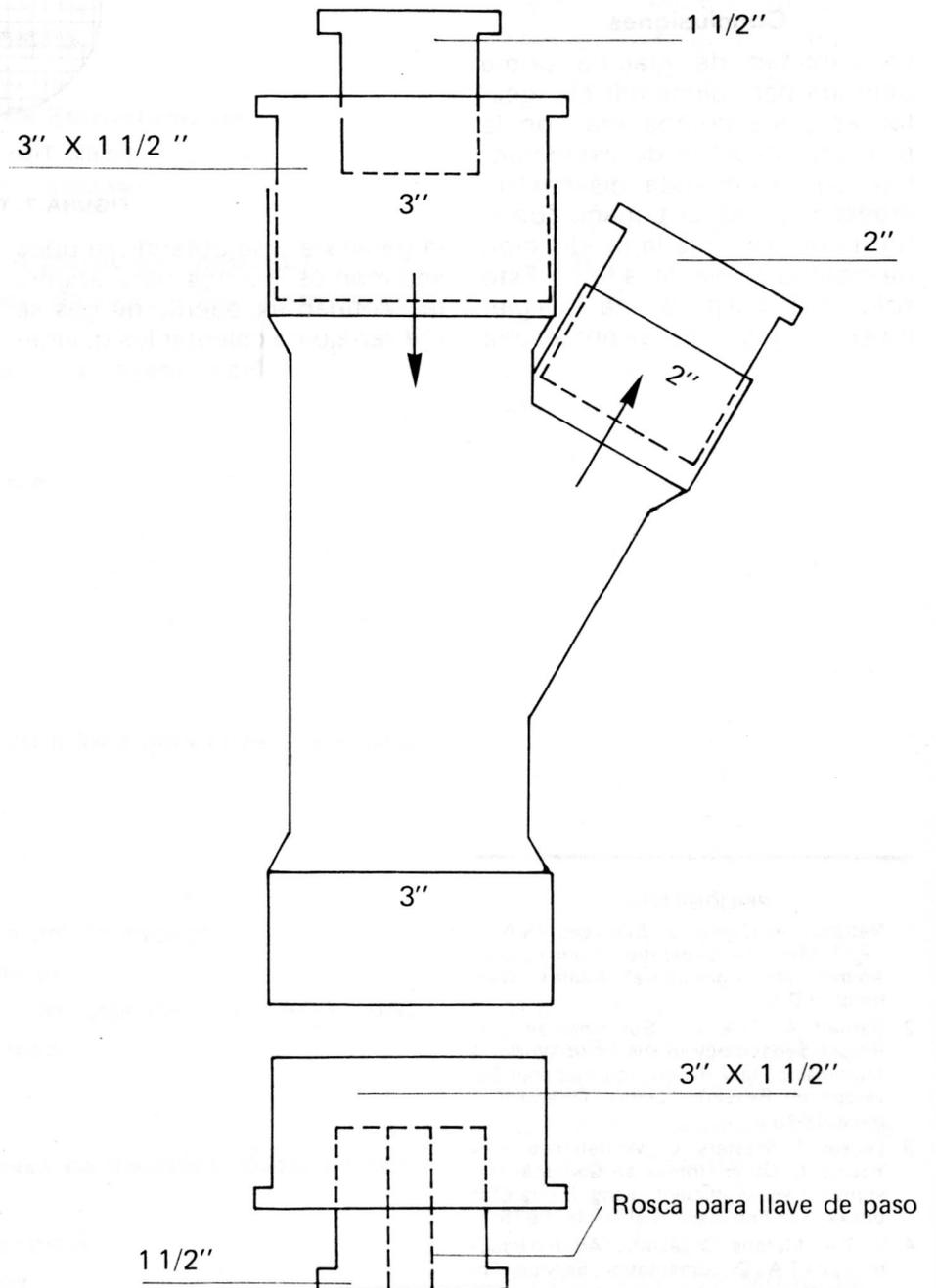


FIGURA 6. Aditamento para eliminar agua

Tanque de Mezcla o Alimentación

El volumen debe ser igual al volumen diario de alimentación; debe tener suministro de agua y alimentación.

Tanque de Rebose

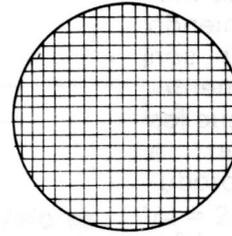
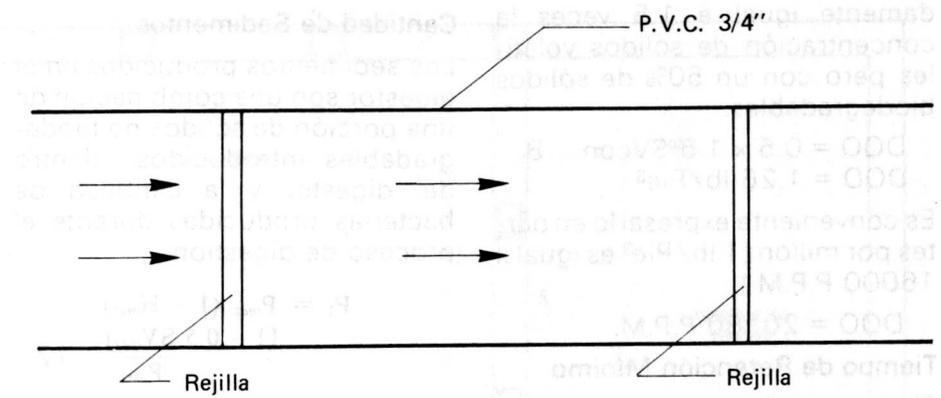
Debe ser tres veces mayor que el de la mezcla y con una profundidad máxima de 1.5 m.

Consideraciones Generales

El digestor es de alimentación continua (diaria) con un rango de temperatura de 30°C (Mesotílico). Para conservar esa temperatura se recomienda enterrar el tanque y calentar la mezcla con energía solar.

Conclusiones

La cantidad de materia prima utilizada para alimentar el digestor es poca comparada con la producción diaria de excrementos. Se recomienda diseñar un digestor de mayor tamaño con el fin de utilizar toda la producción de materia prima de la finca. Esto solucionaría el problema de higiene en los galpones, se procesaría



Rejilla Tipo "COLEMAN"

FIGURA 7. Trampa de llama

la gallinaza y se obtendrían unos sedimentos buenos para abono; la cantidad excedente de gas se utilizaría para calentar los galline-

ros y para futuros usos. Es conveniente recalcar que mientras mayor sea el bio-digestor, más económico resulta.

BIBLIOGRAFIA

1. National Academy of Sciences (N.A.S). 1977. Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes, Washington D.C.
2. Barnett, A.; Pyle, L. y Subramanian, S.K. Biogas Technology in the Third World: A Multidisciplinary Review, International Development Research Centre, Ottawa, Canada. 1978.
3. Leckie, J.; Masters, G.; Whitehouse, H. y Young, L. Other Homes an Garbage: Designs for self-Sufficient Living, Sierra Club books, San Francisco, California. 1975.
4. V.I.T.A. Metane Digesters: An Introduction; V.I.T.A. Documentation Service. Fotocopias.