

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

- La digestión anaerobia ha sido y es muy aprovechada por muchas comunidades carentes de infraestructura energética básica. En países como China, India, Pakistán, se utiliza para cocción de alimentos y calefacción, aunque con técnicas muy rudimentarias que producen bajos rendimientos.
- En el Ecuador, en el año 2000, un grupo de investigadores de la ESPE realizó una visita técnica a la región oriental, concretamente al cantón Taisha, donde se encuentra el Batallón de Selva BS 50 Morona. Allí se ha constatado que existe un biorreactor de 25m³, que jamás ha entrado en funcionamiento, por la dificultad de recolectar el estiércol del ganado para cargarlo en la cámara de fermentación, dadas las difíciles condiciones climáticas de la localidad. Por otra parte, esta zona tiene un importante recurso al disponer de abundante biomasa residual, la misma que debidamente seleccionada puede ser utilizada en instalaciones de generación de biogás. Esta visita ha servido de base para la realización de varias investigaciones que son de dominio público y que permitirán tecnificar y optimizar los procesos convencionales de conversión de energía sustentada en la biomasa para obtener combustible gaseoso tal como el CH₄ y bio abono orgánico líquido BIOL.

- En el año 2005 se instala, en el sector sur del Campus Politécnico, un Biorreactor con capacidad de 0.5m³, con sistema de calentamiento utilizando energía solar térmica de baja temperatura para abastecer de energía calórica al hogar de fermentación, evitando con esto cambios bruscos de temperatura que afecten las condiciones fermentativas de la mezcla de desechos vegetales y orgánicos.

1.2 Definición del problema

En el modelo de fermentación anaeróbica de tipo convencional instalado en la ESPE, se utilizaron cargas con mayor proporción de estiércol 60%, y la producción de metano se alcanzó en 21 días, con un porcentaje del 21,29%, la combustión de este gas genera una llama amarillenta, de bajo poder calorífico, por lo que es necesario optimizar el proceso mediante el desarrollo de cargas vegetales que cumplan con el siguiente procedimiento: Secado natural, secado artificial en horno, relación C/N dentro de norma 25:1, mantener constante la temperatura del sustrato para evitar reducción del proceso de fermentación, y llama de combustión que sea de color azul intenso, son características que se pretende mejorar en esta investigación.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Mejorar las características y las prestaciones del proceso de obtención de metano a partir de cargas con mayor incidencia de biomasa residual para propiciar el desarrollo de otras instalaciones de mayor alcance, que pueda beneficiar al sector agroindustrial del Ecuador.

1.3.2 Específicos

- Determinar la mezcla óptima de mayor eficiencia para la producción de BIOGAS a partir del uso de desechos vegetales, en cámaras de fermentación anaerobias.

- Acelerar el proceso de obtención de biogás, mediante el uso de materia vegetal miniaturizada, con cargas debidamente dosificadas.
- Determinar el régimen de operación del biodigestor

1.4 Alcance

Mediante el desarrollo del presente proyecto, se pretende poner a punto el sistema de biorrección de 0.5 m³, con el propósito de que cumpla con los estándares de seguridad y confiabilidad, implementando procedimientos que permitan operar en forma óptima el equipo, utilizando mezclas vegetales debidamente concebidas y cargadas en micro recipientes anaeróbicos, cuyos resultados sirvan de referencia para homologar la instalación actual, así como también, futuras instalaciones de mayor capacidad que estén orientadas al servicio de las comunidades campesinas, que por su localización geográfica no disponen de infraestructura energética básica. Además, se lo pueda utilizar en actividades académicas, de investigación y extensión en vista del ámbito de las energías renovables tendrán un importante peso específico en el contexto energético mundial durante los próximos años, debido al costo y a la escasez de los recursos energéticos basados en los combustibles fósiles y sus impredecibles consecuencias sobre el medio ambiente.

1.5 Justificación e importancia

a) Déficit de abastecimiento energético

En el Ecuador existe una gran cantidad de comunidades que se encuentran alejadas del sistema nacional interconectado, es decir no disponen de electricidad, para estas localidades especialmente las que se encuentran en la región oriental, el aprovechamiento óptimo de la biomasa residual para obtener combustible puede significar una razón de mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes y de la producción de sus poblaciones.

b) Contaminación ambiental

El uso extensible de combustibles fósiles causa el deterioro de la capa de ozono, lluvia ácida, y el efecto invernadero con lo que se alteran los procesos naturales y se afecta el clima a escala global. Frente a esta situación, 34 países se comprometieron en Kyoto, a reducir las emisiones e invertir en investigación y desarrollo de tecnologías adecuadas para el aprovechamiento óptimo de las fuentes de energía convencional, con especial énfasis en las *energías renovables*, por lo antes expuesto es que en el Ecuador se deben realizar proyectos con orientación al desarrollo científico y tecnológico de estas fuentes de origen natural y sustentables en la escala humana del tiempo.

c) Localización geográfica

Una gran cantidad de poblaciones del Ecuador continental, no disponen de vías acceso para el transporte terrestre, por lo que el suministro de gas licuado de petróleo (GLP) o cualquier otro tipo de combustible se hace muy complejo por las distancias que los separa de los centros de comercialización y en la mayoría de casos se requiere esperar varios días para acceder y/o comprar los cilindros de gas de uso doméstico.

d) Aspectos políticos y socioeconómicos

Los gobiernos de turno no invierten en proyectos de infraestructura energética destinada al mejoramiento de la calidad de vida de las poblaciones marginales, debido a que no resulta económicamente rentable, ya que el poder adquisitivo de estos sectores es relativamente bajo comparado con los sectores urbanos.

e) Innovación tecnológica

La innovación y el desarrollo de proyectos tecnológicos permitirán a las empresas, centros de investigación y universidades, contar con los conocimientos y la experiencia necesarios para difundirlos en beneficio de la comunidad, porque caso contrario solo serán entes consumidores de bienes que se producen en los países desarrollados.

CAPITULO 2

DETERMINACION DE LAS ESPECIFICACIONES FUNCIONALES DEL BIORREACTOR

2.1 Energía disponible para calentamiento

En el diseño térmico preliminar del sistema de fermentación, se asume que los valores de temperatura de agua, a la entrada y salida del cilindro son de 39 °C y 27 °C, respectivamente. Además, sumando las masas de sustrato y agua de la camisa se tiene un valor de 999.83 Kg. Por lo que el calor necesario para el proceso es de 2.79 Kw., mientras que el calor útil Q_u obtenido en cada colector es 0.517 KW. Por lo tanto el número de colectores para abastecer este requerimiento térmico es de 5.40, aproximando al entero superior se requieren 6 colectores que aportan en total 3Kw. Sin embargo, con el propósito de realizar la homologación de la instalación de ACS, en el presente trabajo se realiza un análisis de tipo teórico y experimental, considerando los aspectos funcionales del equipo con las condiciones reales de operación.

2.1.1 Instalación de colectores solares

Está constituida por 6 colectores planos, que sirven para aplicaciones de baja temperatura, alrededor de los 42°C, están conformados por una placa negra de aluminio llamada absorbedor, en la parte inferior y lateral se coloca el aislamiento térmico de lana vidrio de 2" de espesor. Por los tubos de cobre, circula el fluido de calentamiento, que en este caso es el agua. En la parte inferior del colector se tiene

una lámina de acero galvanizado, para soportar el aislamiento térmico. La cubierta está constituida por una placa de vidrio de 4mm de espesor, a menos que el contenido de hierro en el vidrio sea importante, este transmitirá por lo menos el 85% de la radiación solar visible para ángulos de incidencia próximos a la normal, en cuanto al tamaño, el colector es de 1x2 m, y espesor de 10 cm., la inclinación para el caso de la latitud 0°, puede ser de 10 ° a 15 °, orientada al sur, con el propósito de evitar la acumulación de polvo, y que en caso de lluvia o granizo se pueda evacuar rápidamente, evitando con esto la rotura del vidrio. En esta instalación el ángulo de inclinación de los colectores planos es de 15°. A continuación, se puede observar la distribución de los colectores.

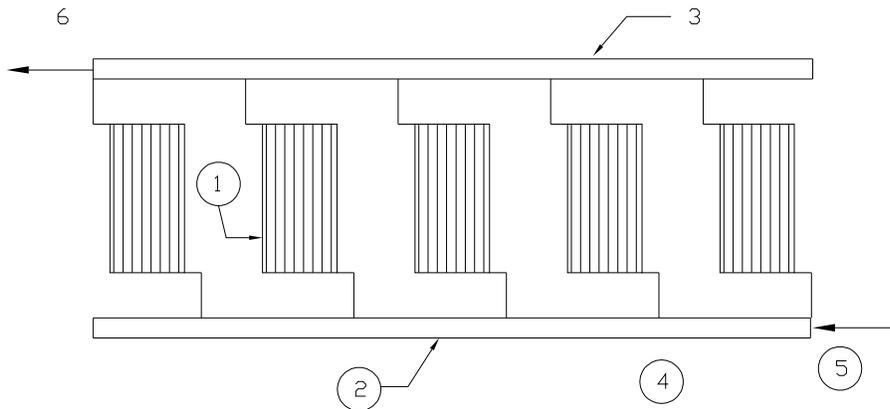


Figura 2.1 Instalación de colectores planos para calentamiento de agua

Denominación:

1. Colector solar plano
2. Distribuidor del fluido de baja temperatura
3. Tubería de cobre para agua caliente
4. Tubería de acero galvanizado para distribución de agua fría
5. Ingreso de agua desde la cámara de fermentación
6. Salida de agua caliente del campo solar hacia el biorreactor.

La zona de radiación infrarroja comprende toda el área cubierta del colector, la misma que dependiendo del ángulo de incidencia genera una distribución de temperaturas no homogénea en la placa de calentamiento. En el siguiente esquema

se pueden observar los 6 colectores acoplados en paralelo, la temperatura promedio anual de ingreso del agua es de 16,2 °C y se lo designa por T₁, la temperatura de salida varía de acuerdo a las siguientes consideraciones¹:

- Estación del año
- Nubosidad
- Microclima circundante
- Grado de contaminación atmosférica
- Acumulación de polvo o suciedad
- Calidad de aislamiento térmico
- Tipo de convección natural o forzada

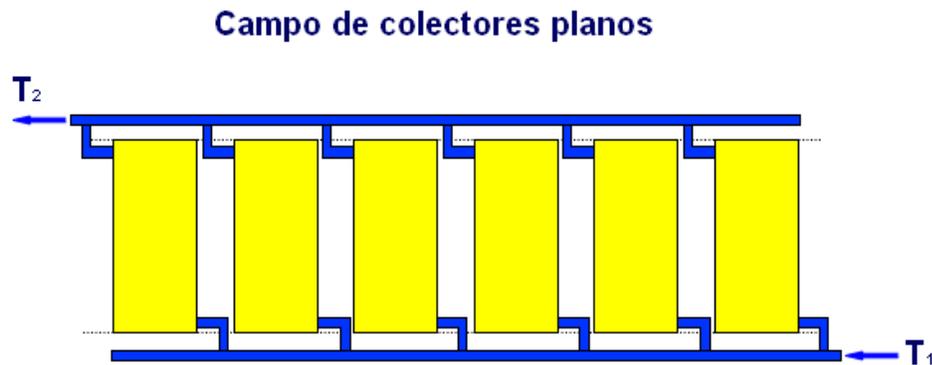


Figura 2.2 Zona de radiación térmica del colector

El abastecimiento de la energía térmica que requiere el proceso de biorreacción, se realiza mediante el uso de un recurso renovable como es el solar de baja temperatura. Se ha establecido, por estudios anteriores, que la temperatura óptima del agua para calentar la cámara de fermentación debe ser de 38°C. Sin embargo en condiciones de alta irradiación se pueden alcanzar temperaturas del fluido térmico de hasta 52°C, la misma que puede afectar el proceso de fermentación y la producción de biogás.

Para comprender de mejor manera la tecnología del colector plano, se realiza un esquema donde se puede observar los elementos constitutivos principales.



Figura 2.3 Componentes del captador básico

2.1.2 Balance térmico de los colectores solares

Para analizar el aporte térmico real de los captadores planos, se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Régimen permanente, flujos de calor unidimensionales
- Tubos paralelos, caudales de agua uniformes, cabezales sin efecto
- Cubierta delgada, no absorbente, opaca en el infrarrojo
- Gradientes térmicos independientes en direcciones x e y
- Propiedades termofísicas independientes de la temperatura

Suponiendo que el gradiente de temperatura a través de la placa de vidrio es despreciable, comparado con el gradiente a través de la película de aire estancada, la temperatura de equilibrio del absorbente se estima de acuerdo con el siguiente balance energético.

Balance energético del colector solar plano

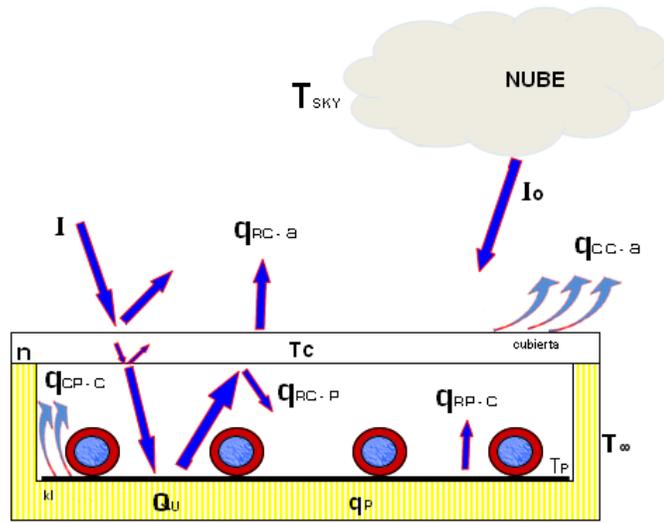


Figura 2.4 Balance energético del captador básico

Tomando en cuenta el esquema anterior, es necesario comprender las formas de transferencia de energía que se producen en el colector. Por lo tanto, sin recurrir a complejas explicaciones se procede a identificar cada una de ellas:

I: Irradiación solar incidente

I_o : Radiación difusa

q_{rc-a} : Irradiación desde la cubierta hacia el cielo

q_{rc-p} : Irradiación desde la cubierta hacia la placa negra

q_{rp-c} : Irradiación desde la placa negra hacia la cubierta

q_{cc-a} : Transferencia de calor por convección desde la cubierta hacia el ambiente

q_{cp-c} : Transferencia de calor por convección desde la placa hacia la cubierta

Q_u : Calor útil transferido hacia el fluido de proceso que en este caso es el agua

q_p : Calor perdido por la base del colector hacia el ambiente

T_c : Temperatura de la cubierta que puede alcanzar hasta los 70°C en condiciones de estancamiento y sin carga, por lo que los cambios cíclicos de temperatura puede originar rotura del vidrio.

T_p : Temperatura de placa

Con estas indicaciones, se puede aplicar el principio de conservación de la energía de acuerdo con la siguiente afirmación:

$$\text{Energía útil} = \text{Radiación absorbida} - \text{Pérdidas térmicas}$$

Por otra parte, para el caso de las tuberías de conducción de agua se puede utilizar el siguiente esquema:

Balance energético del tubo de calentamiento del fluido

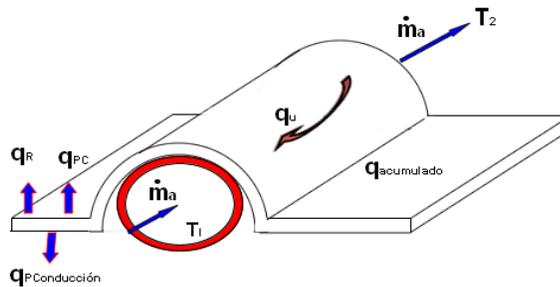


Figura 2.5 Balance energético en el tubo del colector

En sentido longitudinal el flujo de calor en estado estable, puede representarse de la siguiente manera:

Transferencia de calor en la tubería del colector

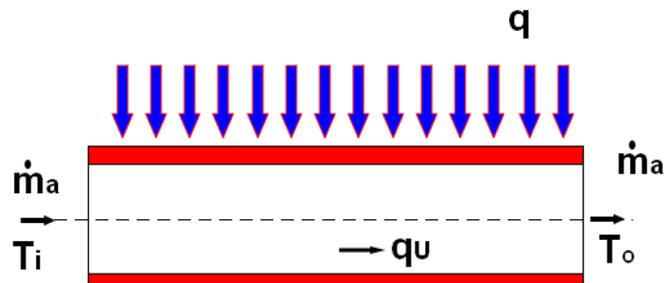


Figura 2.6 Transferencia de calor hacia el fluido de proceso

Algunos autores utilizan para designar a la temperaturas de entrada y salida como T1 y T2 respectivamente, sin embargo otros lo designan de la siguiente manera T_i temperatura de ingreso al colector y T_o la temperatura de salida del fluido caliente, esto puede ser causa de confusión por esta razón en este apartado se explica de manera detallada. Con el modelo anteriormente propuesto, se puede obtener una correlación matemática para determinar la cantidad de calor que puede ser transferido al agua en la placa colectora².

$$Q_u = F_R [\alpha \tau G - U_L (T_1 - T_2)] \quad (2.1)$$

Donde:

Q_u Potencia útil por m^2 de superficie colectora expresada en (W), F_R Factor de remoción del calor, α absortancia de la placa negra, τ transmitancia del vidrio G Radiación solar incidente (W/m^2), U_L Coeficiente global de pérdidas placa ambiente ($W/m^2/K$), T_1 Temperatura de ingreso del fluido, ($^{\circ}C$), T_2 temperatura de salida del fluido termo vector ($^{\circ}C$)

2.1.3 Rendimiento del colector plano

La eficiencia del colector está dada por la relación entre la energía útil absorbida por el agua para la radiación solar incidente, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{Q_u}{G} \quad (2.2)$$

2.1.4 Reflexión en interfaces

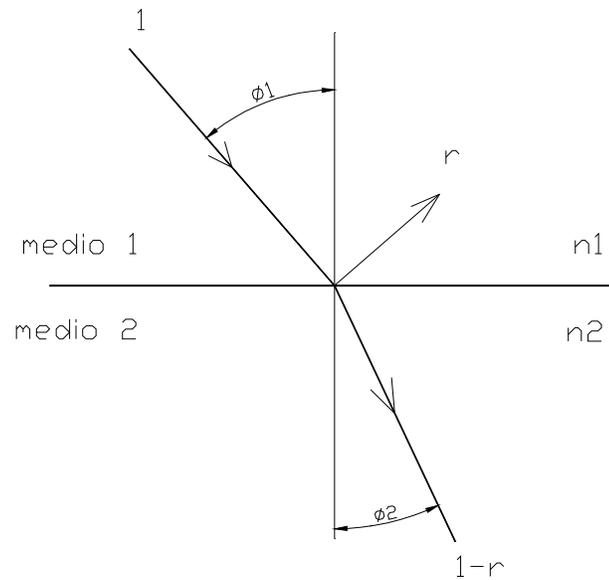


Figura 2.7 Angulo de incidencia y de refracción

De acuerdo con la ley de Snell se establece que

$$n_1 \text{sen} \phi_1 = n_2 \text{sen} \phi_2$$

Para el caso de paredes simples, donde n_1 es el índice de refracción del medio 1 y n_2 es el índice de refracción del medio 2, ϕ_1 es el ángulo de incidencia, y ϕ_2 ángulo de refracción.

Para el caso de paredes compuestas la refracción y reflexión de la luz será múltiple, como se lo puede observar en el siguiente gráfico:

Reflexión y Refracción de la luz en paredes compuestas

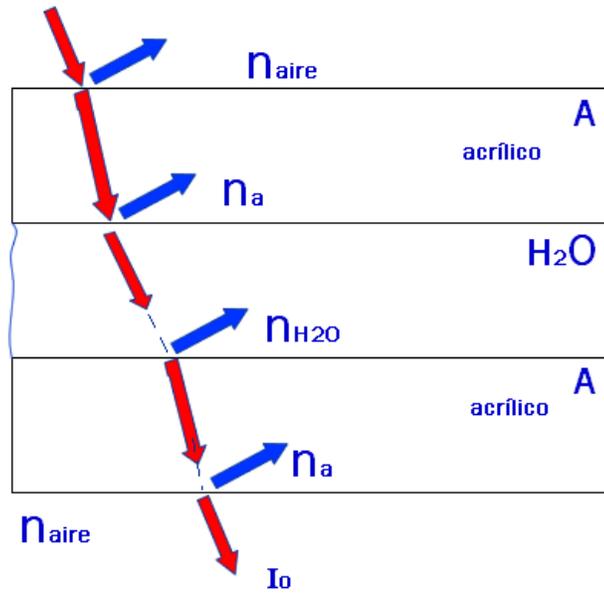


Figura 2.8 Paredes compuestas

Para explicar el índice de refracción en este tipo de medios, se realiza un esquema de superficies compuesto por acrílico-agua-acrílico donde se observa que la luz sufre interferencias para atravesar los diferentes cuerpos. En forma matemática el índice de refracción se expresa así:

$$n = \frac{n_1}{n_2}$$

Donde se tiene que:

n_1 índice de refracción del acrílico, y n_2 índice de refracción del agua.

El valor aproximado del factor $\alpha\tau$, puede determinarse mediante el siguiente procedimiento que depende del tipo, número de cubiertas, espesor del vidrio.

Si la luz solar directa forma un ángulo ϕ_1 con la normal a la superficie colectora, se obtendrá el ángulo de refracción, mediante la siguiente expresión:

$$\theta_2 = \arcsen\left(\frac{\text{sen}\phi_1}{1.53}\right) \quad (2.3)$$

Se calcula el coeficiente de refracción de la superficie del vidrio por las dos componentes de la luz polarizada que atraviesa la cubierta con:

$$A = \frac{\text{sen}^2(\phi_2 - \phi_1)}{\text{sen}^2(\phi_2 + \phi_1)} \quad (2.4)$$

A Polar perpendicular

$$B = \frac{\text{tg}^2(\phi_2 - \phi_1)}{\text{tg}^2(\phi_2 + \phi_1)} \quad (2.5)$$

B Polar paralela

Si el ángulo de incidencia es nulo, se debe usar para *A* y *B* el valor de 0.044

Se calcula la transmitancia del vidrio por cada una de las dos componentes considerando la hipótesis para un vidrio completamente transparente.

$$\tau_A = \frac{1 - A}{1 + (2N - 1)A} \quad (2.6)$$

$$\tau_B = \frac{1 - B}{1 + (2N - 1)B} \quad (2.7)$$

Donde N es el número de placas de vidrio

Por lo tanto, la transmitancia media será:

$$\tau_r = \frac{(\tau_A + \tau_B)}{2} \quad (2.8)$$

La atenuación total del vidrio está dada por;

$$\tau = \tau_r e^{\frac{-KNT}{\cos \phi_2}} \quad (2.9)$$

Donde **K** es el factor de atenuación del vidrio, y se asume un valor entre 0.5 a 3.0 m^{-1} respectivamente para vidrio muy limpio o muy opaco.

Para un vidrio de cubierta con medio contenido de hierro, el valor de **K** es de $2 m^{-1}$, **N** corresponde al número de placas de vidrio, **T** espesor de la cubierta, comúnmente se utiliza el de 0.004 m; ϕ_2 ángulo de refracción.

El valor global del producto $\alpha\tau$ que toma en cuenta la absorción y refracción será entonces;

$$(\alpha\tau) = \frac{\alpha\tau}{[1 - (1 - \alpha)\rho_d]} \quad (2.10)$$

Donde ρ_d reflejancia para la luz difusa y tiene un valor de 0.16 para un vidrio, 0.24 para dos vidrios y 0.29 para tres vidrios.

En la práctica se supone cubierta no absorbente con

$$(\tau\alpha)_e = 1.01 \cdot (\tau\alpha) \approx 1.02\tau\alpha \quad (2.11)$$

2.1.5 Coeficiente global de pérdidas del colector plano

Para realizar el análisis de la formulación matemática, y la posterior determinación de los valores numéricos de las resistencias térmicas, es necesario identificar cada una de ellas. En el interior del captador en la separación cubierta placa negra tenemos la resistencia a la transferencia de calor por convección y radiación R_2 , en el aislamiento térmico la resistencia a la transferencia por conducción R_{ais} , en los alrededores la resistencia a la transferencia de calor por convección y radiación R_1, R_3 estas consideraciones se las puede observar en el gráfico que se presenta a continuación.

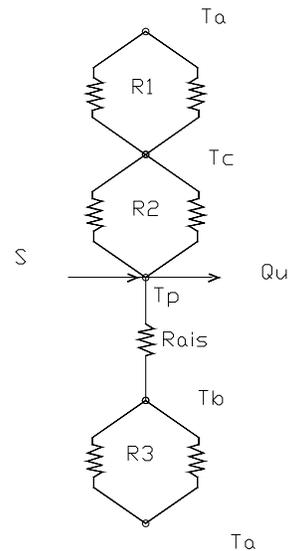


Figura 2.9 Esquema eléctrico equivalente del colector:

Para el cálculo de las resistencias térmicas, se utilizan las siguientes expresiones matemáticas:

$$R_1 = \frac{1}{h_{c,c-a} + h_{r,c-a}} \quad (2.12)$$

$h_{c,c-a}$ Coeficiente de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente W/m²K;

$h_{r,c-a}$ coeficiente de transferencia radiante entre cubierta y ambiente W/m²K

$$R_2 = \frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} \quad (2.13)$$

$h_{c,p-c}$ Convección libre flujo interno en cavidad rectangular inclinada W/m²K,

$h_{r,p-c}$ Coeficiente de transferencia radiante entre placa y cubierta W/m²K

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,b-a} + h_{r,b-a}} \quad (2.14)$$

$h_{c,b-a}$ Convección forzada flujo externo W/m²K, $h_{r,b-a}$ Coeficiente de transferencia radiante entre base del colector y el ambiente W/m²K

$$R_{\text{ais}} = \frac{e_a}{k_a} \quad (2.15)$$

k_a Coeficiente de transferencia de calor por conducción en el aislamiento térmico

W/mK, e_a espesor del aislamiento térmico

Considerando el análisis anterior, se procede a determinar el coeficiente global de transferencia de calor U , para el caso de configuraciones como el colector plano, indicando que éste es proporcional al recíproco de la suma de las resistencias térmicas.

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2} \quad (2.16)$$

Donde, U_t es el coeficiente de pérdidas por la parte superior del colector W/m²K

$$U_b = \frac{1}{R_{\text{ais}} + R_3} \quad (2.17)$$

Donde, U_b es el coeficiente de pérdidas por la parte inferior del colector W/m²K

De tal manera que el coeficiente global de transferencia de calor U_L está definido por:

$$U_L = U_t + U_b \quad (2.18)$$

2.1.6 Cálculo de coeficientes de transferencia de calor

Para determinar los coeficientes de transferencia de calor por convección forzada flujo externo, $h_{c,c-a}$, $h_{c,b-a}$ se utiliza la ecuación de **Watmuff**

$$h = 2.8 + 3v \quad (2.19)$$

Donde: v es la velocidad del viento en m/s y h en W/m²/K

El coeficiente de transferencia de calor $h_{c,p-c}$, se puede estimar de la relación dada por Hollands³, obtenida de estudios experimentales de la convección natural de aire entre dos placas paralelas, con la inferior a mayor temperatura que la superior, la expresión recomendada es:

$$Nu = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708 \cdot (\sin 1.8\beta)^{1.6}}{Ra \cdot \cos \beta} \right] \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos \beta} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (2.20)$$

En esta ecuación, los términos entre paréntesis que contienen el signo positivo indican que si los valores internos son negativos, entonces se toman como cero.

Por lo tanto el número de Nusselt se calcula así:

$$Nu = \frac{h_{c,p-c} L_{p-c}}{k_{aire}} \quad (2.21)$$

En cambio, para determinar el número de Rayleigh se utiliza la siguiente expresión:

$$Ra = \frac{g \beta_{aire} (T_p - T_c) L_{p-c}^3}{\nu_{aire} \alpha_{aire}} \quad (2.22)$$

Los coeficientes de radiación térmica se determinan con las expresiones que se indican a continuación;

Cubierta ambiente

$$h_{r,c-a} = 4\sigma T_{m,c-a}^3 \epsilon_c \quad (2.23)$$

Base del colector ambiente

$$h_{r,b-a} = 4\sigma T_{m,b-a}^3 \epsilon_{bc} \quad (2.24)$$

Coeficiente placa cubierta

$$h_{r,p-c} = \frac{4\sigma T_{m,p-c}^3}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (2.25)$$

Donde se tiene que:

ϵ_p Emisividad de la placa colectora; ϵ_c Emisividad de la cubierta, σ es la constante de Stefan – Boltzmann y su valor corresponde a $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$

Para encontrar el valor medio de las temperaturas se tiene las siguientes expresiones:

La temperatura media cubierta ambiente es; $T_{m,c-a} = \frac{T_c + T_a}{2}$

Donde T_c y T_a son las temperaturas de cubierta y ambiente en $^{\circ}\text{K}$.

Para la parte inferior del colector la temperatura media base ambiente se define por

$T_{m,b-a} = \frac{T_b + T_a}{2}$; con T_b y T_a que corresponden a las temperaturas de la base del captador y la del ambiente en $^{\circ}\text{K}$.

La temperatura media entre placa absorbadora y la cubierta se encuentra con;

$T_{m,p-c} = \frac{T_p + T_c}{2}$ Para lo cual T_p y T_c corresponden a las temperaturas de placa y vidrio respectivamente.

2.1.7 Factor de eficiencia de aleta recta

Se asume el caso mas frecuente de que la placa absorbadora de espesor δ , está acoplada a una serie de tubos de cobre de diámetro D , separados una distancia W , de tal manera que con la expresión siguiente se calcula la eficiencia de la aleta;

$$F = \frac{\operatorname{tgh}m\left(\frac{W-D}{2}\right)}{m\left(\frac{W-D}{2}\right)} \quad (2.26)$$

Donde $m = \left(\frac{U_L}{K\delta}\right)^{\frac{1}{2}}$

2.1.8 factor de eficiencia del colector

El segundo factor correctivo F' corresponde a la eficiencia de transferencia de calor desde la placa colectora hacia el fluido de proceso que puede ser agua o aceite térmico, se calcula con;

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W-D)F]} + R_{\text{union}} + \frac{1}{h_{fi} \pi D_i} \right]} \quad (2.27)$$

Donde $\frac{1}{R_{\text{union}}} > 30 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$; y h_{fi} es el factor de intercambio térmico pared-fluido

A continuación se indican algunas interpretaciones físicas para F'

- Cociente entre la energía útil captada por el colector y la que captaría si la placa absorbente estuviera a la temperatura del fluido.
- Resistencia térmica placa-ambiente dividida por la resistencia térmica fluido-ambiente

- F' depende de la geometría del colector y del caudal másico de fluido. La dependencia con la temperatura es escasa.

A continuación, para utilizar la ecuación (2.27), primeramente es necesario verificar si el flujo es laminar o turbulento, para lo cual se calcula el número de Reynolds así;

$$R_e = \frac{DV\rho}{\mu} \quad (2.28)$$

Con μ la viscosidad dinámica en Kg/m s; ρ la densidad del fluido en Kg/m³ y V la velocidad en m/s

Para el caso del agua,

Si $Re < 2100$ se utiliza la expresión

$$h_{fi} = \frac{1.12}{D} \left[3.46R_e \frac{D}{L} + 2029 \left(\frac{D^2 R_e}{L} \right)^{\frac{4}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.29)$$

En la región de transición $2100 < Re < 10000$

$$h_{fi} = \frac{0.112 \left(R_e^{\frac{2}{3}} - 125 \right)}{D} \quad (2.30)$$

Si $Re > 10000$ se tiene flujo turbulento

$$h_{fi} = \frac{0.112 R_e^{0.8}}{D} \quad (2.31)$$

Por último se obtiene el factor de evacuación de calor del colector (F_R):

$$F_R = \frac{\text{calor util captado por el fluido}}{\text{calor util captado con placa a } T_{fi}} = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c [S - U_L (T_{fi} - T_a)]} \quad (2.32)$$

Donde

\dot{m} Masa del fluido en Kg/s; C_p el calor específico del líquido termo vector, A_c área del colector, S radiación absorbida $\frac{W}{m^2}$

Arreglando la expresión anterior se tiene:

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(\frac{U_L A_c F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (2.33)$$

Para determinar la temperatura aproximada de la placa se utiliza la siguiente correlación;

$$T_{pm} = T_{fi} + Q_u \left[\frac{1}{h_{fi} \pi n DL} + \frac{1}{U_L F_R} \left(1 - \frac{F_R}{F'} \right) \right] \quad (2.34)$$

El cálculo temperaturas medias⁴ permite la obtención de temperaturas de referencia para la determinación de las propiedades termofísicas de los fluidos en el cálculo de los diversos coeficientes⁵ (h_{fi} , U_L , F , F' , F_R).



Figura 2.10 Campo de colectores solares planos

2.2 Volumen de Biorreacción

El volumen de carga total del biorreactor es de 0.693 m^3 . Sin embargo es necesario adicionar un 25% para el almacenamiento de biogás por lo que con este incremento se tiene 0.866 m^3 . Con esta consideración, el diámetro del cilindro es de 0.77m. y la altura de 1.6 m.

A continuación en la Figura 2.11 se puede observar las partes constitutivas del reactor donde en el interior se encuentra el sustrato, que corresponde a una mezcla de desechos orgánicos, vegetales, estiércol y agua en una proporción 1:1. En el exterior del cilindro se encuentra la camisa de agua con un espesor de 10cm, este fluido recircula de manera intermitente por el campo de colectores solares planos, llevando calor hacia la zona de biorreacción.

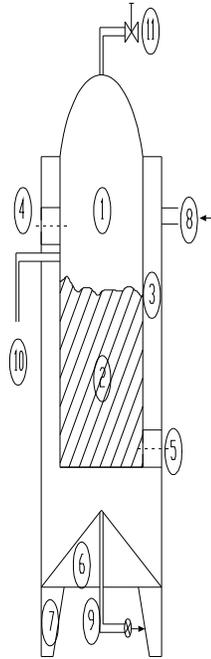


Figura 2.11 Esquema del reactor para fermentación de biomasa

Denominación:

1. Cámara de almacenamiento de biogás.
2. Cámara de fermentación o de carga de biomasa.
3. Camisa para circulación de agua de calentamiento.
4. Ducto de carga de desechos orgánicos.
5. Ducto de extracción de desechos orgánicos.
6. Recipiente.
7. Estructura de soporte.
8. Toma de alimentación de agua caliente a camisa de calentamiento.
9. Salida de agua de camisa hacia colectores solares.
10. Conexión de salida de biogás.
11. Válvula de seguridad.

2.3 Aspectos básicos del diseño ⁶

En el diseño del biorreactor para procesamiento de cargas orgánicas, se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- Peso del sustrato y del agua de calentamiento
- Volumen de carga
- Tiempo de retención del sustrato, aproximadamente 35 días
- Temperaturas de proceso tanto del campo solar como para la fermentación anaeróbica
- Caudal de desplazamiento del fluido térmico
- Factor de corrosión
- Tipos de cargas
- Volumen para acumulación del gas
- Presión interna
- Tipo de abastecimiento energético
- Rendimiento del campo solar

2.4 Temperaturas del proceso

2.4.1 Campo solar

En condiciones favorables de funcionamiento, en el campo solar se tiene una temperatura media de ingreso del agua de 16,2°C y a la salida de los colectores aproximadamente 42°C.



Figura 2.12 Biorreactor y campo solar en proceso de montaje

2.4.2 Biorreactor

Para el diseño térmico del biorreactor se ha considerado una temperatura de ingreso del agua de 39°C y para la salida de cámara una temperatura de 27 °C. Además, el sustrato debe permanecer a 38°C, evitando de esta manera fluctuaciones importantes que puedan deteriorar las condiciones de biofermentación.

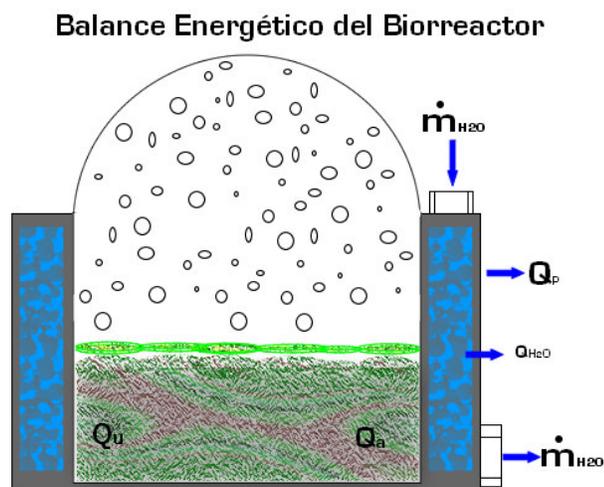


Figura 2.13 Aspectos energéticos del biorreactor

La características externas del biorreactor, son las que se muestran a continuación, aquí podemos observar en la parte inferior la línea de alimentación de agua de la red en la zona lateral, el ingreso del agua caliente proveniente del campo de colectores solares planos, en la parte superior derecha la toma para carga, y en la parte izquierda la toma para salida del BIOL.



Figura 2.14 Biorreactor de tipo cilíndrico vertical

2.5 Presión de almacenamiento y condiciones de carga inicial en los recipientes de prueba

2.5.1 Presión interna generada en la fermentación

En las pruebas de generación de biogás utilizando recipientes cilíndricos, se pudo observar que la presión interna del recipiente alcanza los 50 PSI, para cargas que tienen la siguiente composición: 60% de estiércol de bovino y 40% de materia orgánica vegetal.

2.5.2 Condiciones de carga inicial

Para poder definir la mezcla estiércol-materia vegetal de mejor rendimiento metanogénico, en el primer estudio se realizan 9 tipos de cargas, acondicionando recipientes cilíndricos, donde se colocan los medidores presión y temperatura, sin implementar un medidor de PH que hubiese sido más representativo.

La selección de la mezcla se realiza considerando el aumento de presión como comportamiento directo de la cantidad de biogás acumulada dentro de estos cilindros aislados térmicamente, y manteniéndolos en las mismas condiciones atmosféricas.

Fecha de inicio: 16 De marzo del 2005 Hora: 19:00
 Temperatura ambiente: 16 °C.
 Fecha de finalización: 13 de mayo del 2005. Hora: 12:00
 Temperatura de carga: 42 °C.

Tabla 2.1 Porcentaje de mezclas biodegradables

CILINDRO No.	HIERBA		ESTIÈRCOL		TIERRA Kg.	AGUA Kg.	CARGA TOTAL Kg.
	%	Kg.	%	Kg.			
1	10	0,3	90	2,7	1	3	7
2	20	0,6	80	2,4	1	3	7
3	30	0,9	70	2,1	1	3	7
4	40	1,2	60	1,8	1	3	7
5	50	1,5	50	1,5	1	3	7
6	60	1,8	40	1,2	1	3	7
7	70	2,1	30	0,9	1	3	7
8	80	2,4	20	0,6	1	3	7
9	90	2,7	10	0,3	1	3	7

Resultados obtenidos con cargas reducidas:

Recipiente de fermentación experimental N° 4

Realizando el análisis de gases se obtiene la siguiente composición:

Metano CH₄: 53,8%

Bióxido de carbono CO₂: 44,51%

Sulfuro de Hidrógeno H₂S:<2%

Oxígeno: O₂ 0%

A continuación es necesario indicar las características de los compuestos químicos que constituyen el biogás, así tenemos que el CH₄ es incoloro y apenas soluble en agua en su fase líquida, el CO₂ es un gas incoloro, denso y poco reactivo, en cuanto al H₂S es un gas incoloro y con un fuerte olor a huevos podridos. Se ha comprobado una ausencia total de contenido de oxígeno en la muestra correspondiente al recipiente 4.

2.6 Análisis de cargas preliminares en el biorreactor

Las cargas para el abastecimiento del biorreactor pueden tener diversas mezclas de desechos orgánicos. Sin embargo, una de las primeras cargas realizadas tiene características que se las demuestra en la Tabla 2.2

Tabla 2.2 Características de carga en el biorreactor de 0.5 m³

ORDEN	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PORCENTAJE
1	Estiércol	Kg.	120	72,51
2	Kykuyo	Kg.	45,5	27,49
3	Agua	Kg.	264	
4	Total materia orgánica	Kg.	165,5	
5	Total sustrato	Kg.	429,5	
6	Proporción		1.6:1	
7	Producción estimada de biogás	m ³	11	

Carga de prueba preliminar realizada por Vega-Rodríguez

Fecha: 29/11/2005

Fecha de inicio de calentamiento: 30/11/2005

En las primeras cargas realizadas tanto a nivel experimental como en el prototipo se pudo observar en los datos de cargas, que existe una gran influencia del estiércol vacuno en las mezclas, también se ha añadido agua en una proporción del 50%, así como pocas cantidades de desechos vegetales, sin su respectiva preparación, tampoco se toma en cuenta la relación carbono nitrógeno, la misma que es de extrema importancia para que el proceso de fermentación de óptimos resultados. En uno de los recipientes de experimentación con cargas primarias, se realizó la combustión para constatar la generación de una llama de color amarillento, es decir se generó un proceso ineficiente de baja temperatura. Con estas consideraciones se presenta a continuación los datos obtenidos en estos ensayos preliminares cuyas cargas tienen exceso de desechos orgánicos provenientes de ganado vacuno.

Tabla 2.3 Datos de presión y temperatura del proceso de fermentación

Fecha / Hora	T sustrato	P biogás	P camisa	Ti colectores	Ts col.	Pcol.
dd/mm/aa hora	°C	PSI	PSI	°C	°C	PSI
30/11/05 08:30	21,5	0	0	20	25	0
30/11/05 12:30	32	0	28	35	36	32
30/11/05 16:30	32,5	0	27	25	25	29
01/12/05 08:30	30	0	27	26	25	29
01/12/05 12:30	35	0	35	39,5	38,5	40
01/12/05 16:30	38	1	35	39	40	39,5
02/12/05 08:30	34	5	34	25	22	38
02/12/05 12:30	35	6	32	39	39	36
02/12/05 16:30	41	8	28	18	28	28
03/12/05 08:30	35	8	24	16	27	29

03/12/05	12:30	37	8,5	27	41,5	41	32
03/12/05	16:30	41	9	26	43	41	30
04/12/05	08:30	35	9	32	20	45	35
04/12/05	12:30	37,5	9	27	39,5	38	31,5
04/12/05	16:30	35	9	23,5	36	36	31
05/12/05	08:30	33	8,5	48	24	27	50
05/12/05	12:30	36	9	48	40	39	53
05/12/05	16:30	35	9	30	35	35	33
06/12/05	08:30	31	8,5	35	24	26	36
06/12/05	12:30	36	9	31	41	41	36
06/12/05	16:30	37	9	30	39	38	31
07/12/05	08:30	33,5	9	30	20	21	31,5
07/12/05	12:30	38	10	2	43	43,5	10
07/12/05	16:30	45	11	20	47	46	23
08/12/05	08:30	40	11	23	35	40	28
08/12/05	12:30	45	12	39	50	50	42
08/12/05	16:30	45	13	50	48	46	52
09/12/05	08:30	42	12,5	44	29	45	43
09/12/05	12:30	49	13	45	53,5	54	50
09/12/05	16:30	43	12,5	25	42	43	30
10/12/05	08:30	37	11	28	35	33	24
10/12/05	12:30	48	12	42	50	51	29
10/12/05	16:30	48	12	25	51	50	25

Continuación Tabla 2.3

Fecha / Hora	Temperatura sustrato	Presión biogás	Presión camisa	Temperatura ingreso colectores	Temp. salida colectores	Presión agua colectores	
dd/mm/aa hora	°C	PSI	PSI	°C	°C	PSI	
11/12/05	08:30	43	11	51	21	35	36
11/12/05	12:30	46	12	41	50	51	43
11/12/05	16:30	46	11,5	40	47	46	43
12/12/05	08:30	42	10	24	16	16	26
12/12/05	12:30	41	10	24	43	42	30
12/12/05	16:30	41	10	44	42,5	43	48
13/12/05	08:30	38	9	40	36	36	42,5
13/12/05	12:30	43	8	25	48	48,5	30

13/12/05	16:30	49	8	28	49	48	30
14/12/05	08:30	43,5	7,5	38	42	42	40
14/12/05	12:30	46	8	36	50	50,5	40
14/12/05	16:30	47	8	38	49	49	40
15/12/05	08:30	38	7	34	39	38,5	38
15/12/05	12:30	40	7	38	41	41	41
15/12/05	16:30	43	6,5	24	45	46	28
16/12/05	08:30	33	6	48	33,5	34	52
16/12/05	12:30	37	6	56	42,5	43	62
16/12/05	16:30	35	6	27	33	32	32
17/12/05	08:30	32	6,5	28	22	19	30
17/12/05	12:30	40	6,5	38	44	43	40
17/12/05	16:30	35	6	33	28	30	33
18/12/05	08:30	31	5	40	29	22	41
18/12/05	12:30	36	5	36	40	41	38
18/12/05	16:30	34	5	24	34	33	25
19/12/05	08:30	30	5	26	18	17	28
19/12/05	12:30	32	5	36	35	35	40
19/12/05	16:30	36	5	36	37	37	40
20/12/05	08:30	33	5	30	22	20	32
20/12/05	12:30	36	5	34	41	41	38
20/12/05	16:30	36	5	30	34	32	35

Fuente: Estudio de fermentación anaeróbica realizado por Vega, Rodríguez

ESPE, Sangolquí-Ecuador, 2006

Resultados obtenidos con la carga del biorreactor:

A los 21 días, en el equipo prototipo, se produjo biogás con una concentración promedio de:

Metano CH₄: 21,29%

Bióxido de carbono CO₂: 76,95%

Sulfuro de hidrógeno H₂S:<2%

Oxígeno: O₂ 0%

De acuerdo con lo anteriormente descrito, se observa una menor cantidad de metano equivalente al 21, 29% y una gran proporción de CO₂ con un valor de 76,95 %, lo cual indica que con este tipo de carga, se tiene en su período inicial de fermentación de la biomasa, una mayor incidencia en la producción del CO₂.

Como en todo proceso de fermentación anaeróbica tradicional, el tiempo de producción de biogás es muy prolongado, en vista de que la materia prima que ingresa al reactor no es debidamente preparada y tampoco se toma en cuenta la relación carbono nitrógeno, ni la posibilidad de utilizar un catalizador que mejore las condiciones de producción rápida del CH₄, por lo que es necesario proponer otro tipo de mezclas que puedan descomponerse con mayor velocidad y en el menor tiempo posible. Esta mejora se pretende conseguir con el desarrollo del presente estudio.

2.7 Homologación campo de colectores

2.7.1 Fundamento

El método de las curvas f es uno de los más utilizados para hacer cálculos de las prestaciones de los sistemas solares de baja temperatura. Se desarrolló en la Universidad de Wisconsin (Beckman, Klein, Duffie, 1977). Es un método en base mensual que utiliza los resultados de ajustes de prestaciones calculadas en el programa TRNSYS para simular el comportamiento de diversas instalaciones en diferentes localizaciones, los cálculos para esta aplicación están en el Anexo 2.5

El método aporta la fracción solar a partir de dos parámetros adimensionales que se calculan a partir de las características técnicas de los componentes utilizados, la demanda de energía y las condiciones meteorológicas y de operación.

2.7.2 Definición del Método

Siendo f la fracción solar (porcentaje de la demanda que cubre el sol), se utiliza una función del tipo:

$$f = f(X, Y)$$

Las variables de diseño son:

- Área de captación
- Capacidad de almacenamiento
- Caudales de fluido
- Presentación de intercambiadores, etc.

Los tipos de sistemas que pueden evaluarse con el método son:

- Calefacción (y ACS) donde el sistema de captación es de líquido o de aire
- Producción de ACS solo, tanto con sistema de captación por líquido o aire

Los parámetros adimensionales utilizados son:

$$X = \frac{\text{Pérdida del captador}}{\text{Demanda}} = \frac{A_c F'_R U_L (T_{ref} - T_a) \Delta t}{L} \quad (2.35)$$

$$X = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Demanda}} = \frac{A_c F'_R (\tau \alpha) H_T}{L} \quad (2.36)$$

Tabla 2.4 Parámetros de análisis

A_c	Área de capacitación (m ²)
F'_R	Factor captador - intercambiador
U_L	Coeficiente global de pérdidas del captador (W/m ² K)

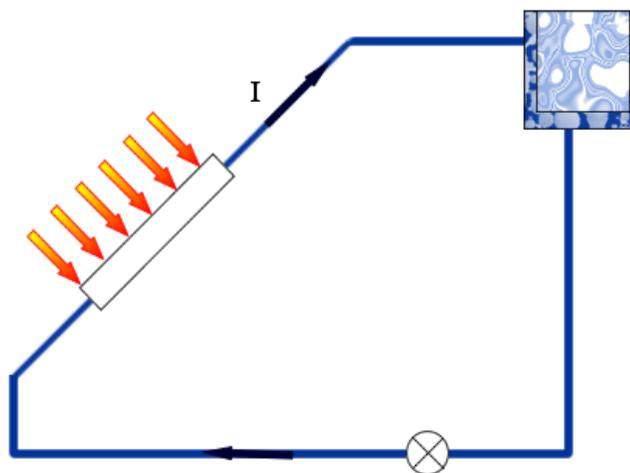
Δt	Tiempo total del mes (s)
T_a	Temperatura ambiente media mensual (°C)
T_{ref}	Temperatura de referencia (°C)
L	Demanda mensual de energía (J)
H_T	Radiación diaria media mensual sobre captadores(J/m ²)
N	Número de días del mes
$(\tau\alpha)$	Media mensual del producto $(\tau\alpha)$

Para calcular el factor captador-intercambiador se utiliza la expresión:

$$\frac{F'_R}{F_R} = \left[1 + \left(\frac{A_c F_R U_L}{(m C_p)_c} \right) \left(\frac{(m C_p)_c}{\Sigma(m C_p)_{min}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (2.37)$$

2.7.3 Sistemas con líquido

El sistema tipo considerado se muestra en la figura 2.15



Tanque de almacenamiento de agua calentado indirectamente y colector solar

Figura 2.15 Esquema de la configuración estándar para sistemas de líquido como fluido de transferencia y almacenamiento.

Los rangos de validez de los parámetros son los que se muestran en la tabla 2.5, no deben utilizarse las correlaciones fuera de los rangos indicados.

Tabla 2.5 Rango de validez de los parámetros

0,6	<	$(\tau\alpha)_n$	<	0,9
5	<	$F'_R A_c$	<	120 m ²
2,1	<	U_L	<	8,3 W/m ² K
30	<	β	<	90°
83	<	$(UA)_h$	<	667 W/K

La expresión que da la cobertura solar en función de los parámetros definidos es:

$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3 \quad (2.38)$$

Cuando la capacidad de almacenamiento no es 75 L/m² debe modificarse el parámetro X antes de utilizar la correlación.

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{V / A_c}{75} \right)^{-0,25} \quad (2.39)$$

La capacidad real de almacenamiento (V/A) no debe ser inferior a 40 L/m² ni superior a 327 L/m².

Existe también una modificación en función del tamaño del intercambiador del lado de la carga. Se define el siguiente parámetro, cuyo valor estándar es 2.

$$\frac{\Sigma_L C_{\min}}{(UA)_{ed}} \quad (2.40)$$

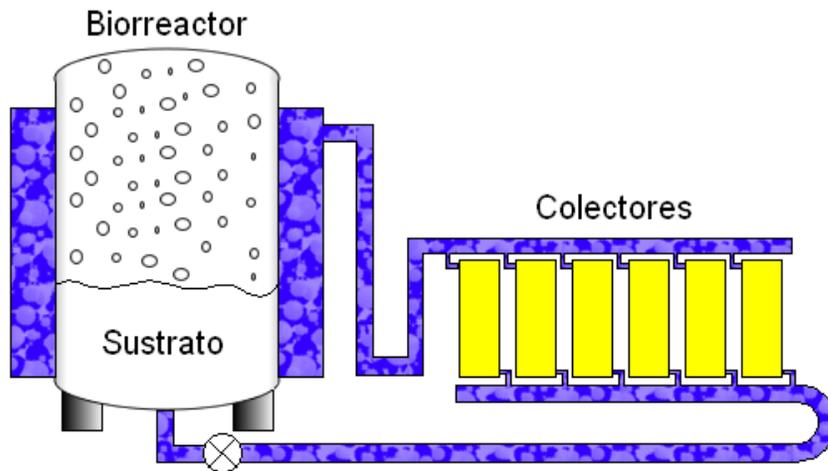
Donde:

E_L	Efectividad del intercambiador agua-aire del lado de la carga
C_{\min}	Capacidad del fluido mínimo (W/K)
$(UA)_{ed}$	Coeficiente de pérdida del edificio (W/K)

La corrección para este parámetro se establece sobre el parámetro Y:

$$\frac{Y_c}{Y} = 0,39 + 0,65 \exp\left(\frac{-0,139(UA)_{ed}}{E_L C_{\min}}\right) \quad (2.41)$$

Cuando el sistema es solo para preparación de agua caliente sanitaria, el esquema de principio considerado se muestra en la Figura 2.16



Lineas de conducción de agua caliente en el Biorreactor

Figura 2.16 Esquema de la configuración estándar para sistemas de preparación de agua caliente.

El captador puede ser de aire o agua. En este caso el rendimiento se ve afectado por la temperatura de reposición (T_r) y la temperatura mínima de preparación del agua (T_w). La corrección utilizada se define a continuación (las temperaturas se introducen en °C):

$$\frac{X_c}{X} = \frac{11,6 + 1,8T_w + 3,86T_r - 2,32T_a}{100 - T_a} \quad (2.42)$$

2.7.4 Sistemas de aire

La configuración estándar considerada se define en la Figura 2.17



Figura 2.17 Esquema de la configuración estándar para sistemas de aire.

Los rangos de validez de los parámetros son los mismos que para los sistemas de líquido (ver tabla 2.5). La correlación utilizada para calcular la cobertura solar es:

$$f = 1,040Y - 0,065X - 0,159Y^2 + 0,00187X^2 - 0,0095Y^3 \quad (2.43)$$

El caudal de aire de referencia utilizado para obtener la correlación es de 10 L/sm². Si esto no fuera el caudal real (V), se corrige con la expresión:

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{V / A_c}{10} \right)^{0,28} \quad (2.44)$$

El caudal real debe estar entre 0,5 y 2 veces el estándar (10 L/sm²).

Por último, se corrige el parámetro X en función de la capacidad de almacenamiento del lecho de rocas utilizado. La capacidad estándar es de 0,25 m³ de roca por cada m² de captador, (350 kJ/m²K). La correlación es:

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{\text{Capacidad}_{-real}}{0,25} \right)^{-0,30} \quad (2.45)$$

La capacidad real de almacenamiento debe estar entre 0,5 y 4 veces la capacidad estándar.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE CARGAS DE PRUEBA

3.1 Materia orgánica⁷

Existe una diversidad de materia orgánica que se puede cargar en el digestor para la obtención de subproductos como el metano y el bioabono, mediante el proceso de fermentación anaeróbica, es decir; en ausencia de oxígeno en cámaras confinadas. Por otra parte, sabemos que en estado natural, el material orgánico se encuentra sumergido en charcos de agua estancada, como sucede frecuentemente en los pantanos, allí sufren transformaciones bioquímicas en su composición y producen burbujas de gas, que tienden a elevarse hacia la superficie, algo similar sucede en el estómago de los animales, particularmente en los rumiantes, a este último proceso se le conoce como digestión. De forma convencional la materia prima conocida como sustrato se transforma en el interior de los biorreactores, los cuales tienen diferentes características y formas. Es común utilizar los modelos Chino e hindú, donde el componente principal de carga son los residuos provenientes de los animales, así podemos tener la presencia de desechos de vacuno, equino, porcino, auquénidos, gallinaza, etc.; que pueden ser combinados con pequeñas proporciones de biomasa vegetal y otras sustancias como urea, tierra y agua con el propósito de tener una mezcla húmeda. A continuación se pueden observar algunos tipos de desechos que se emplean en el presente proyecto. En cuanto a las características de la biomasa, es imperante que su tamaño sea lo más pequeño posible, para permitir una mejor homogenización de las mezclas y evitar regiones intermoleculares muy lejanas que afectan el rendimiento de la fermentación.



Figura 3.1 Recursos orgánicos para obtención de CH₄ y BIOL

Todos los desechos contienen carbono y nitrógeno. Estos elementos son el alimento que las bacterias utilizan para crecer y reproducirse. Durante el proceso de fermentación, el carbono es consumido más pronto que el nitrógeno. Cuando los materiales entran en el biodigestor, deben contener 25 a 30 veces más carbono que nitrógeno para que se produzca una mejor fermentación. Sin embargo es necesario tomar en cuenta que si existe un exceso de carbono, en consecuencia el proceso es lento y al tener un exceso de nitrógeno se afecta al poder fertilizante del bioabono orgánico líquido conocido como BIOL (Itintec, 1983). En la tabla 3.1 se indican los siguientes aspectos: características del recurso, humedad, sólidos totales en porcentaje, carbono considerando la materia prima en base seca, cantidad de nitrógeno, y la relación carbono nitrógeno(C/N).

Tabla 3.1 Desechos utilizados para la fermentación anaeróbica

Características	Humedad %	Sólidos Totales %	Carbono* % (seco)	Nitrógeno % (seco)	C/N
Vacunos	79	21	32	1,5	21
Ovinos	73	27	60	3,7	16
Equinos: caballos, mulas Bueyes	75	25	47	2,4	20
Porcinos	69	31	73	2,6	28
Gallinazas	44	56	70,2		12
Auquénidos	57	43	42	3,7	11
Cuyes	32	68	37,2	2,22	17
Conejos	20	80	47,2	2,02	23
Chala de maíz	15	85	39	0,7	56
Paja de arroz	8	92	41,2	0,7	59
Paja de cebada	7	93	42,0	0,88	48
Paja de trigo	8	92	46	0,53	87
Totorales	35	65	41	0,23	178
Hojas de plátano	89	11	42	1,10	38
Pastos	67	33	40	2,52	16
Hierbas y hojas secas	50	50	41	1	41

*base seca

En cuanto al volumen de estiércol producido por las distintas especies animales son variables de acuerdo con el peso, tipo de alimentación y manejo de los mismos.

Tabla 3.2 Cantidades de estiércol producido por distintos tipos de animales y su rendimiento en gas

Especie animal	Peso (kg)	Producción de estiércol (Kg/día)	Sólidos Volátiles (l/kg.)	CH ₄ (%)
Cerdos	50	4,5 - 6	340 - 550	65 - 70
Vacunos	400	25 - 40	90 - 310	65
Equinos	450	12 - 16	200 - 300	65
Ovinos	45	2,5	90 - 310	63
Aves	1.5	0,06	310 - 620	60
Caprinos	40	1,5	110 - 290	--

En esta tabla se puede observar que el estiércol de porcino genera un mayor porcentaje de biogás pudiendo variar desde el 65 al 75%, le sigue en importancia el de vacuno, y equino.

3.2 Materia vegetal

En nuestro medio es común observar que al desecho vegetal se lo considera como una basura y no se le da ninguna utilidad posterior. Por lo que luego del corte se lo arroja al botadero municipal dificultando las labores de recolección y aumentando los costos de transporte, almacenamiento y afectando el medio ambiente y la salud de las comunidades circundantes.



Figura 3.2 La biomasa considerada como un desperdicio

Para el proceso de digestión anaeróbica se puede utilizar pasto verde, hojas secas, residuos de cerveceras, cascarilla de arroz, hojas de banano, tamo de trigo o de cebada, hojas de remolacha, cáscaras de cereales, hortalizas, hojas de árboles, desechos alimenticios entre otras especies.

3.3. Cantidad de agua y volúmenes del digestor⁸

3.3.1 Agua necesaria para la mezcla

El contenido de agua en la mezcla, está relacionado con la cantidad de estiércol húmedo, la misma que no debe tener residuos de detergente, jabón ni tampoco pesticidas que pueden afectar el crecimiento bacteriano. Para realizar la mezcla, el agua debe ser medida y alimentada de acuerdo con la masa de la carga orgánica. Podemos observar en la tabla 3.3 donde la cantidad de agua necesaria depende también del tipo de estiércol, así tenemos al vacuno que tiene una humedad del

79%, requiere el 57% de agua y la gallinaza con una humedad del 44% necesita alrededor de 83% de agua.

Tabla 3.3 Cantidad de agua en porcentaje

Tipo de estiércol	Agua (%)
Vacuno	57
Equino	64
Porcino	72
Gallinaza	83

Fuente: ININTEC, Lima, 1983

Si no se dispone de datos como los indicados en la tabla anterior, para que la digestión se lleve a cabo en buenas condiciones, es necesario preparar un lodo con un contenido de humedad superior al 85%. Sin embargo de ello, muchas veces se utiliza la siguiente proporción: Por cada Kg de estiércol se añade 1 litro de agua que es equivalente a un Kg es decir están en una relación 1:1

Dentro de los aspectos teóricos, si queremos alcanzar una humedad h_L , fijada como óptima, el volumen de agua V_{agua} en litros, a añadir por Kg de biomasa original con humedad h_B será:

$$V_{agua} = \frac{h_L - h_B}{1 - h_L} \quad (3.1)$$

3.3.2 Densidad del sustrato

En los diversos estudios realizados sobre las mezclas se toma como referencia la densidad del agua para el sustrato; pero en la realidad lo que se debe utilizar no es una densidad absoluta sino más bien una densidad aparente, con lo cual se puede

proceder a calcular el volumen del sustrato con mejor aproximación. La ecuación para calcular la densidad aparente ρ_a se define de la siguiente manera:

$$\rho_a = \rho_v \frac{V_v}{V_T} + \rho_e \frac{V_e}{V_T} + \rho_u \frac{V_a}{V_T} \quad (3.2)$$

Donde: ρ_v densidad del desecho vegetal, ρ_e densidad del estiércol, ρ_a densidad del agua, V_T, V_v, V_e, V_a corresponden a los volúmenes total, de vegetal, estiércol y agua respectivamente. Otra alternativa de determinar la densidad es la que se desarrolla en forma experimental en el capítulo 6.

3.3.3 Volumen del sustrato

El volumen diario de lodos Q_L en m³/ día, a alimentar en el digestor será:

$$Q_L = \left(\frac{1}{\rho_B} + V_{agua} \right) \cdot P_B \quad (3.3)$$

De allí que:

ρ_B densidad de la biomasa, P_B peso de la biomasa en Kg.

3.3.4 Volumen del digestor

El volumen del digestor experimental se determina según la siguiente expresión en la que se tiene en cuenta más del 15% necesario para lodos:

$$V_D = \frac{Q_L \cdot TRH}{0,85} \quad (3.4)$$

Aquí, THR es el tiempo de retención hidráulico o el tiempo que permanece la materia a digerir dentro del mismo.

3.3.5 Volumen del gasómero

El volumen V_G del gasómero se obtiene teniendo en cuenta el porcentaje de sólidos volátiles que se van a digerir, definido previamente y que suele ser de un 80%, y el valor del rendimiento en la conversión de biogás R tomado de la tabla 3.7, se debe tener en cuenta también el número de días de producción $n^\circ / \text{días}$, sin consumo de gas y las condiciones de presión P , y de máxima temperatura en grados Kelvin, que va a soportar. La expresión resulta:

$$V_G = (0,8.SV_L + SM_L).Q_L.R.\frac{T}{273.P}.n^\circ \quad (3.5)$$

SV_L y SM_L corresponden a concentración de sólidos volátiles y minerales

3.4 Tipos de mezclas

3.4.1 Mezclas con mayor proporción de estiércol

De acuerdo con las investigaciones realizadas por el ITINTEC se presenta una tabla con las proporciones adecuadas para diferentes tipos de cargas de desechos donde la mayor cantidad de materia prima corresponde al estiércol de animales.

Tabla 3.4 Porcentaje de mezcla vegetal estiércol

ORDEN	TIPO DE MEZCLA	VEGETAL (%)	ANIMAL (%)
1	Estiércol de vacuno Hierbas y hojas secas	33	67
2	Estiércol de equino Hierbas y hojas secas	52	48
3	Gallinaza Hierbas y hojas secas	84	16
4	Estiércol de porcino Hierbas y hojas secas	22	78
5	Estiércol de auquénido	84	16

En la quinta mezcla y siendo la única la de los auquénidos, se puede observar que se ha utilizado una mayor cantidad de vegetal 84% y animal únicamente el 16%.

3.4.2 Mezclas con mayor proporción de carga vegetal

En forma tradicional el uso del estiércol de animales para obtener biogás, siempre se ha dado en mayor proporción. Sin embargo, en la presente investigación, se pretende utilizar una mayor proporción de vegetales, siguiendo un procedimiento de preparación previo a fin de lograr que la fermentación anaeróbica se lleve a cabo con un rendimiento y producción de biogás aceptables.

- Corte de la biomasa
- Selección
- Secado solar
- Prefermentado
- Secado artificial en horno de combustión de biomasa
- Molienda
- Pesaje
- Alimentación de agua y aditivo
- Mezclado
- Alimentación en los digestores
- Encapsulado o cierre hermético



Figura 3.3 Vegetal en preparación

En la tabla 3.5 se pueden observar las combinaciones efectuadas entre vegetal, estiércol y urea, que son analizados con mayor detenimiento en el capítulo 6; el sustrato en forma de lodos se carga en 10 biorreactores experimentales.

Tabla 3.5 Porcentaje de mezclas biodegradables

Tipo de estiércol	Hierba (g)	Estiércol (g)	Urea (g)	Biomasa (g)	Vegetal (%)	Estiércol (%)	urea (%)
Vacuno	1200	285	15	1500	80,00	19,00	1,00
	1200	502	12	1714	70,01	29,29	0,70
	1200	780	10	1990	60,30	39,20	0,50
Equino	1200	285	15	1500	80,00	19,00	1,00
	1200	497	12	1709	70,22	29,08	0,70
Porcino	1200	285	15	1500	80,00	19,00	1,00
	1200	497	12	1709	70,22	29,08	0,70
Gallinaza	1200	578	0	1778	67,49	32,51	0,00
Pasto verde	1500	462	10	1972	76,06	23,43	0,51
Hierba seca	1500	400	5	1905	78,74	21,00	0,26

3.5 Tiempos de fermentación

Dependiendo de las características de la biomasa y de las combinaciones del sustrato se consigue un mayor o menor tiempo de fermentación.

Tabla 3.6 Tiempos de fermentación de residuos de granja

Materia prima	Tiempo de fermentación (días)
Estiércol vacuno	115
Estiércol de porcino	115
Paja 30 mm de longitud	120
Paja 2 mm de longitud	80
Mata de patata	50
Hojas de remolacha	14
Hierba	24

En la práctica, un sustrato compuesto por vegetales y estiércol, tiene un tiempo promedio de fermentación de 45 días. Sin embargo al utilizar cargas con mayor contenido de vegetales con granulometría fina se logra reducir el tiempo de 13 a 20 días, lo cual será verificado en este proyecto de investigación.

3.6 Análisis de cargas

Normalmente hay dos formas para producir biogás:

- El método húmedo, cuando el sustrato tiene un máximo de 15% de materia seca
- El método seco cuando el sustrato tiene una proporción de materia seca del 25%, de mayor rendimiento en energía

Se ha procedido a utilizar el segundo procedimiento, donde la cantidad de vegetal varía del 70 al 90%. Las materias orgánicas utilizadas son vacuno, equino, porcino, gallinaza, pasto fresco y hierba seca; los cuales se mezclan con una proporción de urea para añadir nitrógeno, desechos alimenticios y agua. Es necesario indicar que al pasto se lo reduce a harina vegetal, y luego es re-hidratado hasta alcanzar la humedad original.

3.7 Producción de biogás

3.7.1 Temperaturas del proceso y PH

Cuando el proceso ocurre a temperatura constante de 35 °C se llama *proceso mesofílico*, y de este proceso obtienen los mayores rendimientos, otro de los factores físico químicos que intervienen en el proceso es el PH y el contenido en sólidos, en cuanto al primero se debe mantenerlo entre 6.5 y 6.7 que es el intervalo de máxima actividad metabólica de las bacterias metanogénicas. En lo que respecta al análisis de transferencia de calor^{9,10} entre el sustrato y el agua de calentamiento se lo puede resolver en estado estable o en estado transitorio, mediante el uso de ecuaciones diferenciales.

3.7.2 Contenido de metano

Dependiendo de la facilidad de degradación de la materia orgánica, se debe obtener un gas inflamable con las siguientes características:

- Metano CH₄: 50 al 70%
- Anhídrido carbónico CO₂: 30 al 40%
- Acido sulfhídrico H₂S, H₂, y otros: < 5%

El poder calorífico de este gas depende de la concentración de metano que está alrededor de 5000 Kcal/m³.

La cantidad de metano que se genera en los biorreactores, depende del tipo de estiércol que se utilice, así en la tabla 3.6, el mayor rendimiento se consigue con hojas de remolacha y la menor cantidad al utilizar matas de patatas.

Tabla 3.7 Porcentaje de metano

Materia prima	Contenido de CH4 (%)
Estiércol vacuno	80
Estiércol de porcino	81
Paja 30 mm de longitud	80
Paja 2 mm de longitud	81
Mata de patata	75
Hojas de remolacha	85
Hierba	84

Para proceder a clasificar y combinar las mezclas adecuadas, se necesita conocer la cantidad de gas que puede producir cada materia prima por lo que se ha elaborado la tabla 3.8 donde se indica la producción de gas en m³ por Kg de materia seca.

Tabla 3.8 Materias primas bioproductoras de CH₄ y sus rendimientos en biogás

Características de la materia prima	Gas total	Contenido en
	(m ³ /kg de materia seca)	metano (m ³ /kg de materia seca)
Lodos de aguas residuales urbanas	0,43	0,34
Espumas de aguas residuales	0,57	0,40
Basuras urbanas	0,61	0,38
Desechos de fabricación de papel	0,23	0,14
Desperdicios urbanos	0,28	0,18
Desechos de mataderos:		
Contenido intestinal	0,47	0,35
Vísceras	0,09	0,04
Sangre	0,16	0,08
Lodos residuales de la industria láctea	0,98	0,74
Lodos residuales de levaduras	0,49	0,42
Lodos residuales de papeleras	0,25	0,15
Residuos cerveceros (lúpulo)	0,43	0,33
Estiércol de establos (con paja)	0,29	0,22
Estiércol de caballo	0,40	0,30
Estiércol de vacuno	0,24	0,19
Estiércol de cerdo	0,26	0,21
Paja de trigo	0,35	0,27
Hojas de patatas	0,53	0,40
Hojas de maíz	0,49	0,41
Hojas de remolacha	0,46	0,39
Pastos	0,50	0,42

Fuente: Castillo, Francisco, La Bioconversión de la Energía, pág., 203

3.8 Condiciones para la biodigestión y seguridad industrial

3.8.1 Condiciones para la biodigestión

Las condiciones para la obtención de metano en el digestor son las siguientes:

1. Temperatura entre los 20 °C y 60 °C
2. pH (nivel de acidez/ alcalinidad) alrededor de siete.
3. Ausencia de oxígeno.
4. Gran nivel de humedad.
5. Materia orgánica
6. Que la materia prima se encuentra en trozos más pequeños posible.
7. Equilibrio de carbono/ nitrógeno.

Otro factor a tener en cuenta, aunque solo afecta al proceso en circunstancias muy particulares, es la presión. Se ha llegado a constatar que a presiones del orden de 700 Kg/cm², los microorganismos aún cumplen su proceso metabólico, aunque muestran grandes dificultades para desarrollar su tarea, por otra parte, a presiones menores que la atmosférica, se observa que por debajo de los 0,35 Kg/cm² de presión absoluta, el proceso de metanización se detiene. Para efectos prácticos, las condiciones usuales de presión a que se realiza la fermentación metanogénica es entre 0.7 y 1.4 Kg/ cm² de presión absoluta, la destrucción de sólidos volátiles es del orden del 60% en las condiciones optimas de temperatura y pH, para tiempos de retención entre 12 y 25 días.

3.8.2 Seguridad industrial

Para reducir los riesgos de trabajo inherentes al biogás, es importante tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- a) Cuidar que no se produzcan mezclas de gas con el aire. Si se producen en la proporciones de 1:5 a 1:15, la combustión puede comenzar con una chispa producida por un interruptor de luz, una herradura, cigarrillo encendido, destello fotográfico, chispero por fricción.
- b) Cuando se pone en marcha, la red de distribución está llena de aire que debe ser eliminado. Después de haber purgado el gasómetro o el digestor, de los primeros gases generados, cuando ya se tiene la producción normal, hay que dejar correr el gas por todas las cañerías y dejarlo escapar a la atmósfera, antes de intentar encenderlo. Para esto sugerimos que se ventilen los ambientes dado que la toxicidad del biogás es muy parecida a la del gas natural.
- c) Mantener siempre presión positiva en el digestor, gasómetro y línea de distribución. Esto es para evitar la entrada de aire o de un posible retroceso de llama.
- d) Frente a cualquier duda que pueda indicar la posibilidad de un retroceso de llama, hay que colocar trampas de llama, o corta fuegos, en líneas próximas a los lugares de combustión.
- e) Periódicamente constatar la inexistencia de pérdidas en la línea de gas, en todas las uniones, acoplamientos, válvulas, etc. de la instalación.
- f) Asegurar la eliminación de H₂S (sulfuro de hidrógeno), ya sea para evitar su acción tóxica o corrosiva, ya que esto último a la larga origina pérdida y lo primero que puede ocasionar la muerte.

CAPITULO 4

DISEÑO DE COMPONENTES DEL BIOGESTOR

4.1 Accesorio de carga

Para que el biogás no retorne al digestor, se debe colocar una válvula de retención, para sistemas de gas o aire comprimido, toma lateral de 1/8 NPT, cuerpo de bronce, temperatura máxima de operación, 232 °C, presión máxima de 250 PSI.



Figura 4.1 Válvula antiretorno

4.2 Sistema de captación de biogás

4.2.1 Presión interna

En el diseño de recipientes sometidos a presión, es necesario tomar en cuenta varios aspectos relacionados con los materiales, la presión de trabajo, el tipo de uniones y sus características, el efecto de la corrosión, el factor de seguridad, tipo de aplicación entre otros criterios.

1. Presión de operación

La presión que se requiere en el proceso del que forma parte el recipiente, a la cual trabaja normalmente éste.

2. Presión de diseño

La presión que se emplea para diseñar el recipiente. Se recomienda diseñar un recipiente y sus componentes para una presión mayor que la de operación. Este requisito se satisface utilizando una presión de diseño de 30 psi o 10 % más que la presión de trabajo, la que sea mayor. También debe tomarse en consideración la presión del fluido y de cualquier otra sustancia contenida en el recipiente.

3. Máxima presión permitida de operación

La presión interna a la que está sujeto el elemento más débil del recipiente correspondiente al esfuerzo máximo admisible, cuando se supone que el recipiente está:

- a) En estado de desgaste por corrosión
- b) A una temperatura determinada
- c) En posición normal de trabajo
- d) Bajo el efecto de otras cargas (carga de viento, presión externa, presión hidrostática) que son aditivas a la presión interna.

Una práctica común que siguen muchos usuarios y fabricantes de recipientes sujetos a presión, es considerar la presión máxima de trabajo permitida de la cabeza o del casco, y no la de elementos pequeños como bridas, aberturas, etc.

Se emplea muy a menudo la expresión máxima presión permitida “nuevo” y “frío”. Esta es la presión a la cual está sujeto el elemento más débil del recipiente al punto máximo admisible, cuando el recipiente:

- a) No está corroído (es nuevo)
- b) La temperatura no afecta su resistencia (temperatura ambiente) (frío).

Y las dos otras condiciones anteriores (c y d) tampoco necesitan ser tomadas en consideración.

4. Presión de la prueba hidrostática

Una y media veces la máxima presión permitida de operación, o la presión de diseño, cuando no se hacen los cálculos para determinar la presión máxima permitida de trabajo.

Si el valor del esfuerzo del material del recipiente a la temperatura de diseño es menor que a la temperatura de prueba, la presión de prueba hidrostática debe incrementarse proporcionalmente.

Prueba hidrostática de los recipientes multicámaras: norma UG-99 (e)

Puede efectuarse una prueba neumática en lugar de una prueba hidrostática, de acuerdo a la norma UG-100

Las pruebas necesarias para establecer la presión máxima de trabajo permitida cuando la resistencia de alguna parte del recipiente no puede calcularse con un grado satisfactorio de seguridad, están prescritas en la norma UG-101.

5. Valores del esfuerzo máximo permitido

El esfuerzo a compresión máximo permitido para usar en el diseño de recipientes cilíndricos sujetos a cargas que produzcan esfuerzo de compresión en el casco debe determinarse de acuerdo a la norma, párrafo UG-23(b), (c) y (d).

6. Eficiencia de juntas

Existen una serie de fórmulas que se emplean para calcular el espesor de pared requerido, y la presión máxima de trabajo permitida para los tipos de casco y de cabeza de uso más frecuente. Las fórmulas para casco cilíndrico se dan para la costura longitudinal, ya que es la que rige generalmente.

El esfuerzo de la costura circunferencial rige solamente cuando la eficiencia de la junta circunferencial es menor que la mitad de la eficiencia de la junta longitudinal, o cuando además de la presión interna, hay cargas adicionales (carga de viento, reacción de las silletas), que producen flexión o tensión longitudinales. La razón de esto es que el esfuerzo que se origina en la costura circunferencial es igual a la mitad del que se origina en la costura longitudinal.

De acuerdo con lo anterior, las fórmulas para la costura circunferencial son:

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P} \quad (4.1)$$

P: Presión de diseño o presión de trabajo máxima permitida lb/pul²

S: Resistencia del material lb/pul²

E: Eficiencia de junta

R: Radio interior en pulgadas

T: Espesor del material en pulgadas

Otro procedimiento matemático, para determinar el espesor de pared para un recipiente sometido a presión es el que se indica a continuación.

4.2.2 Determinación del espesor en tubos sometidos a presión

Las fórmulas para calcular el espesor del cilindro y de las cabezas son las siguientes:

$$e = \frac{pd}{2} \cdot \frac{1}{\sigma_{ad}m} + c \quad (4.2)$$

$$e' = \frac{pR}{2} \cdot \frac{1}{\sigma_{ad}m} + c \quad (4.3)$$

Para $R = d$ y $e' = e$.

Por lo tanto:

p . la presión interior, kg/cm².

e . el espesor de la pared del tubo, cm.

e' , el espesor del fondo (o de la esfera), cm.

τ_{ad} , la tensión máxima admisible, kg/cm^2 .

m, el módulo de la junta o de debilitación.

c, constante del material (por conservación)

Tensión admisible (para p de máximo a 0):

$\tau_{ad} = 250$ a 500 kg/cm^2 para tubos de función gris.

$\tau_{ad} = 1200$ a 1730 kg/cm^2 , para tubos de chapa de acero.

Módulo de junta:

m = 1, para tubos sin soldadura (de acero o función gris).

m = 0,85 para tubos con juntas soldadas.

m = 0,70 para tubos con juntas remachadas.

Constante del material:

c = 1 a 3 mm, según posibilidades de conservación.

Precisión de prueba, $p' = 1,5 p$

Espesores mínimos recomendables:

e = 2 a 3 mm, para tubos de acero sin soldadura.

e = 4 a 5 mm, para tubos de acero soldados.

e = > a 8 mm, para tubos de función gris.

4.2.3 Volumen del recipiente

Por facilidades, para el transporte del gas hacia la zona de combustión o para trasladarlo al laboratorio de análisis de gases se considera almacenar la cuarta parte del volumen disponible en el Biorreactor. Por lo tanto, se tiene $0.125m^3$.

4.2.4 Diámetro del recipiente

De acuerdo con la ASHRAE, la altura del cilindro se puede tomar de 1.5 a 2 veces el diámetro interior del recipiente por lo que de la fórmula del volumen al despejar el diámetro se tiene:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V}{1.5 \cdot \pi}}$$

Reemplazando valores

$$D = \sqrt[3]{\frac{4(0.125)}{1.5 \cdot \pi}}$$
$$D = 0,47m$$

Por lo tanto el diámetro es de 47 cm y la altura aproximadamente de 70 cm.

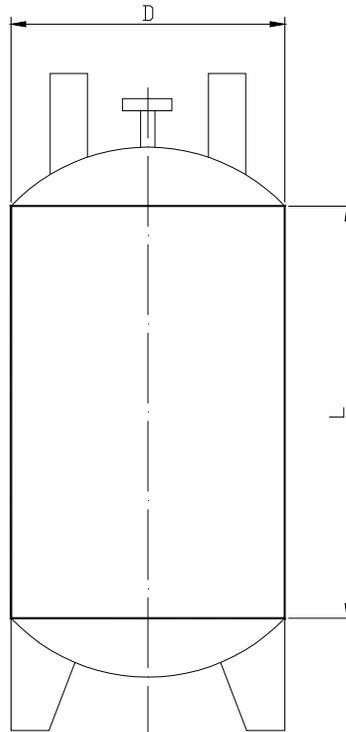


Figura 4.2 Acumulador

4.2.5 Cálculo del espesor del cilindro

Para determinar el espesor del recipiente se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Presión interna (P) de 60 Psi
- Presión de Prueba de 1.5 P
- Espesor para corrosión de 2.5 mm
- Esfuerzo admisible de $1730 \frac{Kg}{cm^2}$ par tubos de chapa de acero
- Modulo de uniones soldadas de 0.85
- Diámetro del recipiente 47 cm
- presión interna de 4,2 Kg/cm²

A continuación se indica el procedimiento de cálculo del espesor mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$e = \frac{pd}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{ad}^m} + c$$

Donde: e Espesor del material en cm; p La presión interior en Kg/cm²; m módulo de la junta o de debilitación; c constante del material por efecto de corrosión reemplazando valores.

$$e = \frac{(4.2)(47)}{2(1730)(0.85)} + c$$

$$e \cong 0.67 + c$$

Si como factor de conservación da 2.5 mm

El espesor del material será de 1/8" o 3 mm

4.2.6.- Presión de prueba

Si $p' = 1.5 p$ entonces

$$p' = (1.5) (4.2) = 6.3 \text{ Kg/cm}^2;$$

4.2.7 Tensión máxima de prueba

$$T_{max} = \frac{p'd}{2c} = \frac{(6.3)(47)}{2(0.3)}$$

$$T_{max} = 493,5 \text{ Kg/cm}^2$$

La tensión máxima admisible para la soldadura es $2600(0.85) = 2210 \text{ Kg/cm}^2$

Por lo tanto $493,5 \text{ Kg/cm}^2$, es mucho menor que 2210 Kg/cm^2

El espesor calculado satisface los requerimientos de resistencia del material.

4.2.6.- tensión máxima del calderín en perfecto estado de conservación

$$T_{max} = \frac{(4.2)(47)}{2(0.3)} = 329 \text{ Kg/cm}^2$$

4.3 Selección de Alternativas de Captación de Biogás.

4.3.1 Filtros para aire y gases

Los filtros para alta presión incluyen un rango de modelos desde 1/4" a 2" en conexión NPT y capacidades de flujo hasta de 670 cfm (at 100 psig). Los materiales del envase son acero inoxidable 316L o acero al carbono con recubrimiento superficial cincado. En el sistema de biorreacción deben ensamblarse en tres partes, la primera en la línea de abastecimiento de biogás hacia el recipiente de acumulación, el segundo filtro entre el compresor de aire y el recipiente de fermentación y el tercero entre el acumulador y el quemador, con el propósito de reducir la presencia de humedad en los ductos, así como también el exceso de vapor de agua que afecta al proceso de combustión.



Figura 4.3 Filtro para aire o gases

4.3.2 Compresor de aire

Mediante el uso de este equipo se puede abastecer de aire comprimido para elevar la presión en el acumulador, así como también para abastecer con oxígeno del aire al proceso de combustión del biogás. El compresor puede ser de 6HP y debe suministrar una presión de 120 PSI.



Figura 4.4 Compresor de aire

4.4 Anclajes y cimentación

4.4.1 Anclajes

El biodigestor se encuentra soportado por cuatro columnas de acero estructural ASTM A36, con bases de acero soldadas en la parte inferior, de acuerdo con la siguiente distribución:

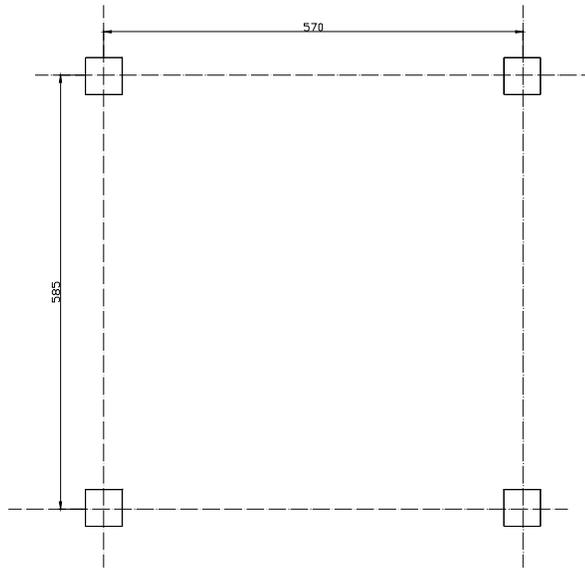


Figura 4.5 Distribución de las bases del biorreactor

Si el peso total del biorreactor es de 2333 Kg, cada soporte deberá resistir una fuerza de compresión de 582,25 Kg, la misma que será transmitida hacia el suelo.

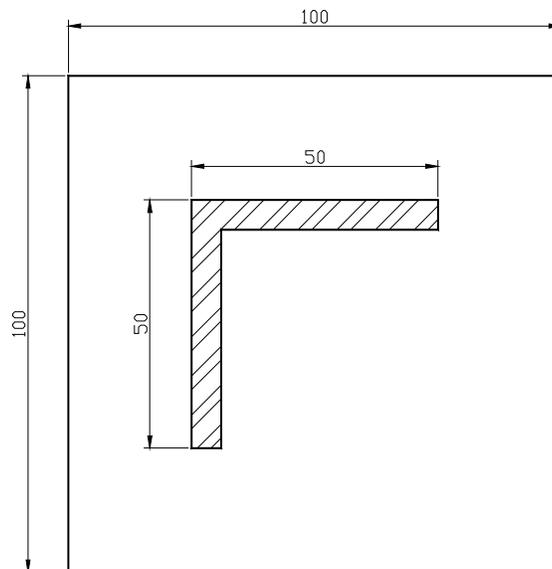


Figura 4.6 Dimensiones de la base y perfil columna

4.4.2 Cimentación

Para el diseño de la cimentación, es necesario considerar algunos criterios para su dimensionamiento.

En una estructura en que las losas estén sometidas a cargas gravitacionales, y se hallan soportadas por vigas perimetrales de mayor peralte, tanto la sección transversal de las columnas como las dimensiones en planta de los plintos conviene que guarden proporciones similares a los módulos de las losas, para que el diseño sea lo más económico posible. Este criterio obedece a que se espera que se presenten momentos flectores mayores en la dirección de las luces más largas.

En el presente diseño se toma similar las dimensiones de los lados del plinto

Cuando las estructuras están sometidas a sismos, se pueden hacer crecer, a criterio del diseñador, las dimensiones de ciertas columnas en una dirección (dirección x), y hacer crecer otras columnas en la dirección ortogonal (dirección y). En este caso, las dimensiones de los plintos conviene que se aproximen a la proporcionalidad con las dimensiones de las columnas y no con las dimensiones de los módulos de losas, debido a que los momentos flectores causados por los sismos serán mayores en la dirección de la mayor dimensión de las columnas.

Cuando el área de cimentación de los plintos de una edificación supera aproximadamente el 25% del área del suelo de construcción, generalmente resulta más económico reemplazar los plintos por vigas de cimentación, o por losas de cimentación con vigas de cimentación.

Dimensionamiento de la superficie de contacto entre el plinto y el suelo de soporte:

La capacidad resistente admisible del suelo en la zona de laboratorios de la ESPE es $q_a = 1.5 \text{ Kg/cm}^2$; la resistencia última del hormigón es 210 Kg/cm^2 , el esfuerzo de fluencia del acero es $F_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$, y el nivel de cimentación es 0,4 m por debajo de la superficie del suelo.

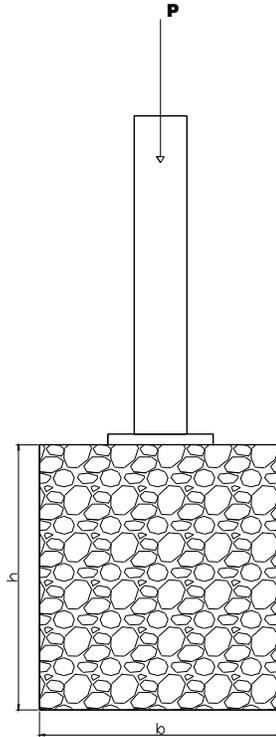


Figura 4.8 Fuerza de compresión sobre el plinto

Si no existieran momentos flectores, la sección transversal requerida sería:

$$A = \frac{P}{q_a} = \frac{558,25 \text{ Kg}}{1,5 \text{ Kg / cm}^2}$$

$$A = 372,26 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto el cateto del plinto será

$$b = \sqrt{372,36}$$

$$b = 20 \text{ cm}$$

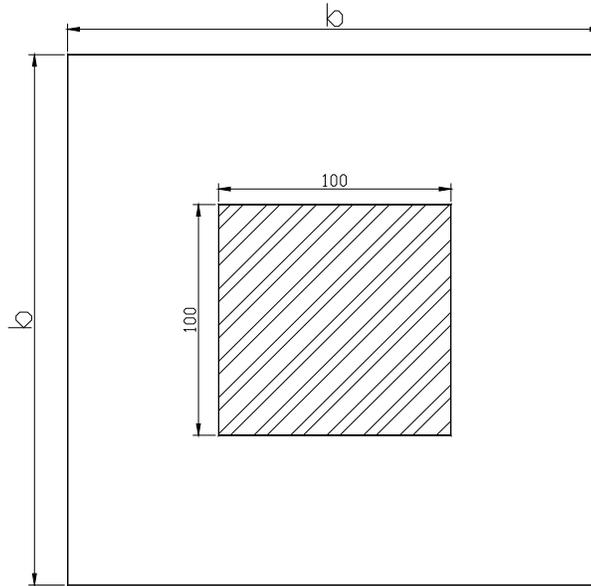


Figura 4.9 Geometría del plinto

Cálculo de q_{\max}

$$q_{\max} = \frac{558,25 \text{ Kg}}{(20 \text{ cm})(20 \text{ cm})} = 1,395 \text{ Kg / cm}^2$$

Este valor es apenas inferior a la resistencia del suelo por lo que es necesario aumentar las dimensiones del plinto. Tomando en cuenta el incremento del 15% en la longitud de acuerdo con el CEC 2000, es decir se le da un valor de 23 cm.

$$q_{\max} = \frac{558,25 \text{ Kg}}{(23 \text{ cm})(23 \text{ cm})} = 1,05 \text{ Kg / cm}^2$$

El esfuerzo máximo es menor al permisible, por lo que es satisfactoria la dimensión del plinto.

4.5 Distribución en planta

El biorreactor en su primera etapa, fue instalado en un lugar próximo a los talleres de mantenimiento automotriz de la ESPE, situación que afectaba su cuidado y mantenimiento dada la distancia hacia los laboratorio de energías no convencionales del DECEM, por esta situación se ha considerado importante trasladarlo a la zona de bodega, muy cerca del laboratorio de mecánica de fluidos e hidráulica. Aquí se ha realizado la readecuación para la nueva instalación del sistema de fermentación anaeróbica calentado por energía solar. A continuación se puede observar un esquema representativo de la distribución en planta.

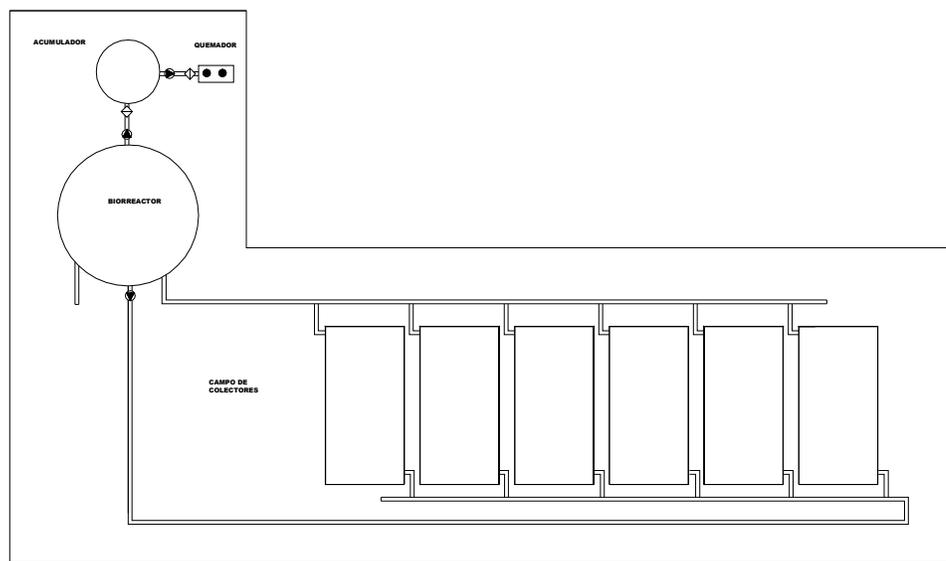


Figura 4.10 Distribución en planta del biorreactor y campo solar

Con respecto a la parte dimensional, se lo puede observar en los planos del ANEXO 4

4.6 Acoplamiento de componentes

Para realizar las diversas pruebas o ensayos de laboratorio, se debe contar con un equipamiento de fácil adquisición y ensamblaje:

- Compresor de aire de 6HP
- Acumulador de biogás
- Un quemador de aplicación industrial
- Mesa de trabajo
- Sistema de biorreacción
- Sistema de calentamiento de agua para mantenimiento de la temperatura en el interior de la cámara de fermentación
- Instrumentos de medición.

Es importante indicar que los elementos que se acoplan al sistema son desmontables para facilitar su manipulación y traslado.

Un detalle de acoplamiento de elementos para generación, conducción y usos del biogás se lo puede observar en el siguiente gráfico.

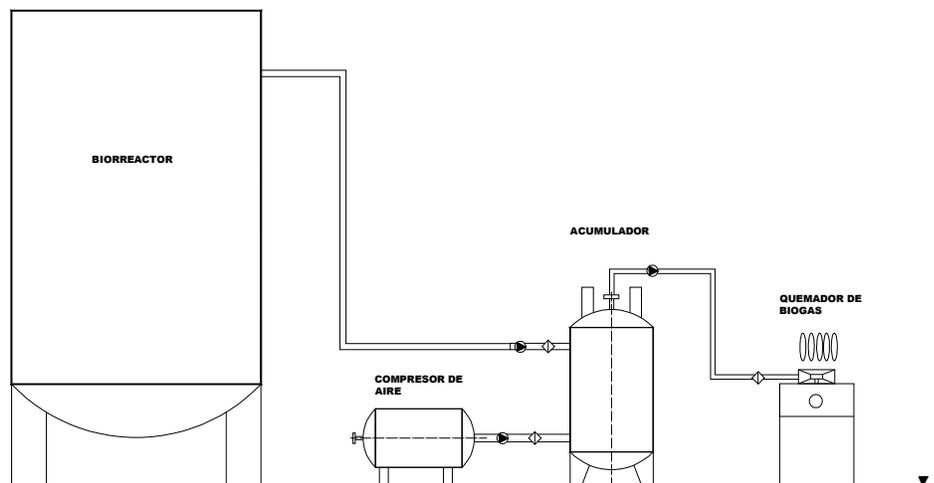


Figura 4.11 Acoplamiento de componentes para pruebas experimentales de fermentación anaeróbica

CAPITULO 5

CONSTRUCCION DE COMPONENTES

5.1 Diagrama de procesos de fabricación

5.1.1 Cimentación

Debido a que el peso con carga del biorreactor sobrepasa las 2 toneladas, es necesario realizar la cimentación tomando en cuenta los datos de diseño desarrollados en el capítulo 4, para conocer como se ha procedido a construir las bases de soporte del equipo, se puede consultar el ANEXO 5.1 que contiene el diagrama de elaboración de los plintos, considerando cada actividad y sus respectivos tiempos. Por otra parte, es necesario indicar que para evitar el impacto de la lluvia y la presencia de lodos por debajo de la instalación, se procedió a pavimentar un área de 48m², y así permitir una mejor operación del equipo.

5.1.2 Recipientes de biorreacción

En este proyecto se construyeron 10 recipientes de acero al carbono de espesor 3mm, para soportar presiones superiores a 120 PSI, las cargas vegetales fueron alimentadas a través de una toma de 2", y en el cilindro se practicaron agujeros de 1/2" de diámetros para colocar las uniones que soportan tanto al manómetro como al medidor de temperatura, en la parte superior se acopla una válvula para controlar el caudal de salida de biogás. La operaciones tecnológicas para la fabricación de los recipientes para muestras experimentales, se encuentran en e ANEXO 5.2.

5.1.3 Acumulador

Es el recipiente donde se alimentará el biogás para las diversas pruebas de combustión y análisis de gases, tiene similares características a los cilindros utilizados para transportar GLP de uso doméstico. De allí que es necesario utilizar un acero que sea de bajo costo y resista de forma adecuada el factor corrosión. El diagrama de fabricación de este recipiente, se lo puede observar en el ANEXO 5.3.

5.2 Selección de materiales

Tabla 5.1 Materiales utilizados en el proyecto

ORDEN	DESCRIPCION DE RUBROS	APLICACION
1	Acero al carbono A42	Recipientes a presión
2	Lana de vidrio	Aislamiento térmico
3	Uniones roscadas	Acoplamiento de instrumentos de medición
4	Electrodos E6010 $\Phi \frac{1}{8}$ ''	Para uniones mediante soldadura utilizando el proceso SMAW
5	Pintura	Recubrimiento anticorrosivos
6	Quemador 2000 W	Pruebas de combustión de biogás
7	Acero estructural ASTM A42	Para soportes de anclaje
8	Acero ASTM A36	Para zapatas

5.3 Mano de Obra

Tabla 5.2 Mano de obra y descripción de responsabilidades

ORDEN	DESCRIPCION CALIFICACION	UNIDAD	CANTIDAD	OBSERVACION
1	Mecánico	Hr	80	Debe tener conocimientos de soldadura, procesos de fabricación y montajes mecánicos
2	Soldador	Hr	20	Preparar juntas, reconocimiento de materiales, calibración del equipo, elaboración de cordones de soldadura mediante técnicas debidamente aplicadas
3	Ayudante Mecánico	Hr	80	Debe conocer los diversos procesos de manufactura, manejo de herramientas manuales y de potencia, realizar trabajos aplicando criterios técnicos y de seguridad industrial
4	Gasfitero	Hr	10	Realizar uniones roscadas y acoples para sistemas de conducción de gas, ensamblar accesorios, conocer sobre riesgos del manejo de gases y asegurar la calidad de sus trabajos
	Total horas		190	

Hr: horas de trabajo planificadas

5.4 Procesos de fabricación

En este proyecto de optimización del proceso de obtención de biogás, se deben utilizar varios productos y desarrollar diferentes actividades entre los cuales se enumeran los siguientes:

- Conformado mecánico sin arranque de viruta; corte, barolado, estampado.
- Taladrado para colocar de acoples y tomas
- Soldadura para realizar uniones fijas.

Ensamblaje de componentes utilizando herramientas manuales

5.4.1 Soldadura

Es un proceso térmico que funde los materiales a unir, a través de un arco eléctrico que salta entre el material base y el material de aporte. Mediante soldadura se puede conseguir uniones que garantizan seguridad y estanqueidad, la calidad del proceso depende del soldador y del procedimiento utilizado. Para soldar los recipientes se utiliza la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, más conocido como proceso SMAW.

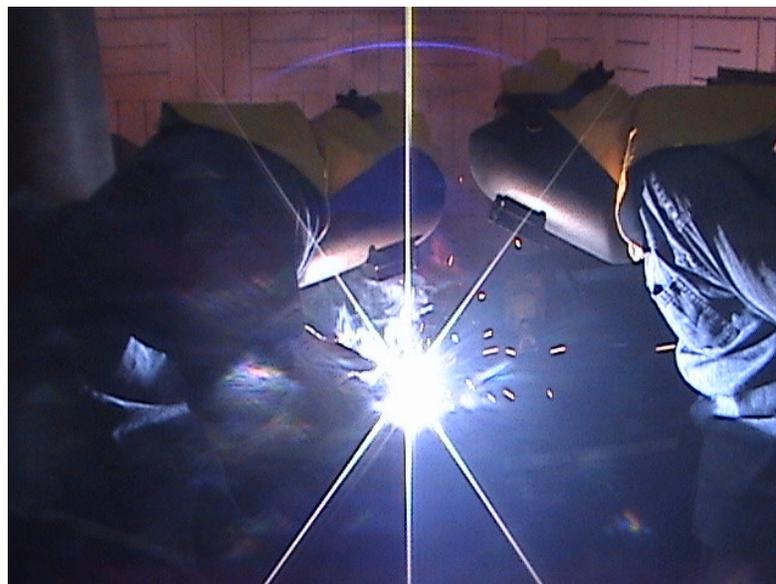


Figura 5.1 Soldadura SMAW

El electrodo utilizado es el E6010 con diámetro del núcleo de acero de 1/8" aproximadamente, el cordón de soldadura debe estar formado por varias capas que dependen del espesor del material, la calidad de junta debe cumplir con las siguientes características:

- Porosidades e incrustaciones muy limitadas
- Menor zona afectada por el calor
- Parámetros de soldadura aplicados según criterios técnicos
- Soldadura homogénea
- Uniformidad
- Buena apariencia
- Resistencia mecánica

A continuación se puede observar un cordón de soldadura de aceptables características



Figura 5.2 Cordón de soldadura utilizando electrodo E6010

Dentro de la industria metalmeccánica, los trabajos de mayor relevancia tienen que ver con la soldadura de recipientes para soportar presión interna o presión externa, cuando estos están sometidos a presiones inferiores a la atmosférica es decir cuando se hace vacío. Los procesos de soldadura más utilizados son los siguientes: SMAW, GMAW, FCAW, y el SAW, la aplicación de cada uno de ellos dependerá de

la calidad de junta que se obtenga y que permita garantizar la seguridad de uso y confiabilidad del recipiente.



Figura 5.3 Soldadura de cabezas toriesféricas en un recipiente para soportar presión interna generada por gases como el CH₄

5.4.2 Corte

El corte de metales se puede realizar de diferentes maneras:

- Oxicorte
- Mediante el uso de sierra manual
- Sierra de vaivén
- Corte por plasma
- Utilizando cizalla manual
- Electro hilo
- Laser
- Cizalla eléctrica, mecánica o neumática

El corte oxiacetilénico es muy utilizado en nuestro medio, por sus costos razonables y por la capacidad de corte, es decir que se puede oxicortar chapas de acero al carbono de hasta 4" o 100 mm., con facilidad, también se pueden lograr configuraciones especiales cuando se utiliza un pantógrafo o rieles de sujeción.



Figura 5.4 Corte oxiacetilénico utilizando un pantógrafo

La desventaja que tiene el oxicorte es que no puede cortar los materiales ligeros en vista de su menor punto de fusión, tampoco se puede aplicar para el corte de fundición gris, aceros de media, baja y alta aleación, no se puede oxicotar el cobre y sus aleaciones. Existe un método moderno para cortar metales y es el corte por Plasma, que puede alcanzar profundidades de hasta 2". Sin embargo hay que tener presente los costos y también la tecnología en la cual se fundamenta la aplicación.

5.4.3 Doblado

Es una operación que permite variar la geometría del material mediante el uso de mordazas que soportan al material base, y bajo la acción de mecanismos que rotan con respecto a un eje de referencia, mediante el doblado se puede obtener una gran variedad de formas geométricas tales como cajas, bandejas para secado, paredes de hornos, estructuras metálicas, soportes, racks para equipos electrónicos, recipientes, entre otros que sirven para aplicaciones en la industria aeroespacial, naval, automotriz, metalmecánica, doméstica, agrícola. En la figura 5.5 que se presenta a continuación, se puede observar un producto metalmecánico obtenido mediante corte y doblado a 90°.



Figura 5.5 Canal metálico obtenido mediante procesos de doblado a 90°

5.4.4 Barolado

Consiste en curvar la chapa metálica para darle forma cilíndrica o elíptica



Figura 5.6 Barolado de un perfil

5.4.5 Estampado

Mediante esta operación se pueden fabricar las cabezas de los recipientes a presión, utilizando los procedimientos de fabricación registrados en el Código ASME IX. En el Ecuador existen pocas empresas que estampan el sello ASME, una de las más reconocidas es ACINDEC, que desarrolla recipientes en acero inoxidable y al carbono.



Figura 5.7 Cabeza toriesférica obtenida mediante estampado

5.4.6 Taladrado

Sirve para realizar agujeros de diferentes diámetros para posteriormente acoplar neptos roscados, o tomas mediante soldadura.



Figura 5.8 Taladro de pedestal para acoplamiento de brocas de vástago cónico

5.5 Montaje

Consiste en la operación tecnológica por medio del cual se unen, partes y piezas, conjuntos y subconjuntos, sistemas y subsistemas que pueden ser: Mecánicos, neumáticos, hidráulicos, eléctricos, electrónicos, los mismos que permiten obtener un producto final debidamente estructurado, funcional y versátil.

5.5.1 Requerimientos de montaje

Se debe considerar los siguientes aspectos.

- Planos de detalle
- Planos individuales
- Planos acotados
- Procedimiento de montaje
- Normativas de seguridad para reducir riesgos del trabajo
- Conocimiento sobre el manejo de herramientas manuales y de potencia
- Criterios técnicos
- Tipos de uniones a realizar
- Reconocimiento de materiales
- Manipulación de materiales
- Riesgos físicos, químicos y biológicos
- Lectura e interpretación de diagramas

5.5.2 Ejecución del trabajo

- Ajustes de partes y piezas según normas
- Limpieza e inspección
- Verificación
- Puesta a punto

5.6 Documentación

El manejo de documentación técnica es muy importante en los trabajos de fabricación de máquinas o equipos, así se tiene que utilizar catálogos y normas tanto nacionales como internacionales, de las cuales se indican las siguientes:

- Catálogos de electrodos: AGA, WEST ARCO, LINCOLN, ASSAB
- Códigos: ASME IX, API 1104, AWS D1.3
- Manual ASHRAE
- Normas OSHA
- ISO 9000, 14000 y 18000
- Normas INEN
- Plan de manejo ambiental

Todos estos criterios, vertidos en estos documentos deben ser debidamente aplicados para desarrollar cualquier proyecto concebido de manera inteligente, para evitar daños a terceros o impactos irreversibles sobre el medio ambiente. El presente proyecto trata de enfocar estas recomendaciones con el propósito de aprovechar un recurso energético renovable como es el caso de la biomasa, pero utilizando un modelo de producción que se espera sea de mayor rendimiento que los tradicionales.

CAPITULO 6

PARTE EXPERIMENTAL

6.1 Modelo experimental

El desarrollo del presente proyecto se sustenta en este capítulo 6, donde se pretende demostrar que la producción de biogás tendrá mayor eficiencia que los modelos convencionales, para lo cual se propone las siguientes hipótesis:

- El crecimiento de las bacterias metanogénicas se intensifica al utilizar cargas pulverizadas de biomasa residual
- Los microorganismos se desplazan con mayor velocidad en medios homogéneos y de baja perturbación al movimiento
- La llama de combustión del biogás debe ser azul

6.1.1 Bacterias fermentativas

Existen diversas especies de bacterias metanogénicas que actúan bajo determinadas condiciones de presión y temperatura en ausencia de oxígeno, estos minúsculos cuerpecillos infinitesimales se encargan de degradar la materia orgánica en mayor o menor proporción, dependiendo de las características de la materia prima y de las condiciones del medio en que ellas se encuentran, no debemos olvidar que son muy propensas a los cambios bruscos de temperatura y a la acción

de jabones o detergentes que terminarían afectando el crecimiento bacteriano. A continuación se observa una bacteria de forma circular.

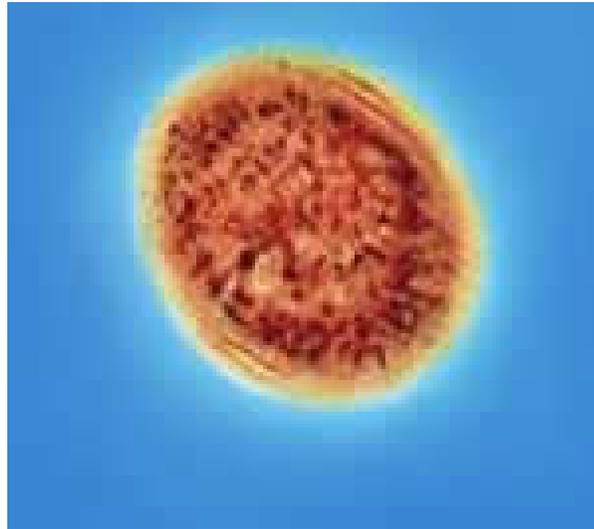


Figura 6.1 Bacteria metanogénica

6.1.2 Tamaño de la bacteria metanogénica

Las bacterias pueden tener un tamaño que varía desde 0.5 hasta 5 micrómetros

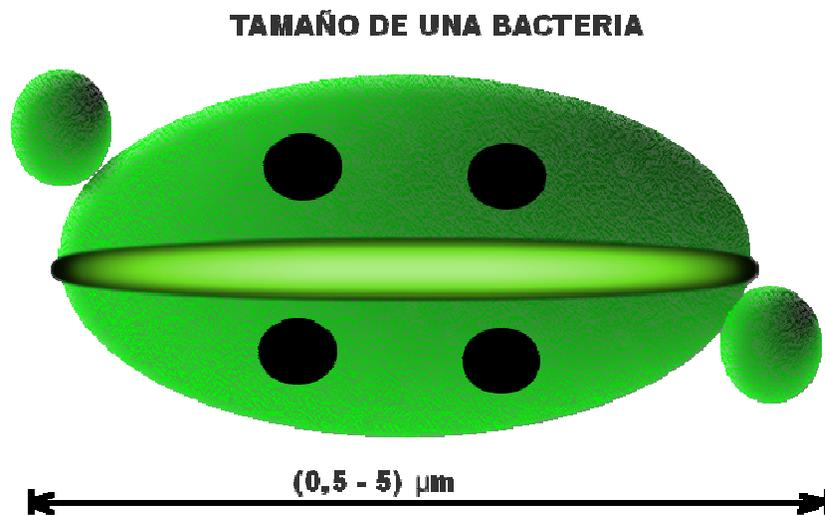


Figura 6.2 Longitud de una bacteria metanogénica

6.1.3 Crecimiento bacteriano

En los modelos tradicionales de fermentación, las cargas no son debidamente preparadas por causas económicas y tecnológicas, por esta razón puede ocurrir que el crecimiento bacteriano sea muy aislado y la proliferación de las cepas bacterianas sea también limitado, con el consecuente bajo rendimiento en la producción de biogás. En la figura siguiente podemos identificar a un desecho vegetal atacado por nidos de bacterias localizadas a grandes distancias de separación entre ellas, considerando su tamaño microscópico.

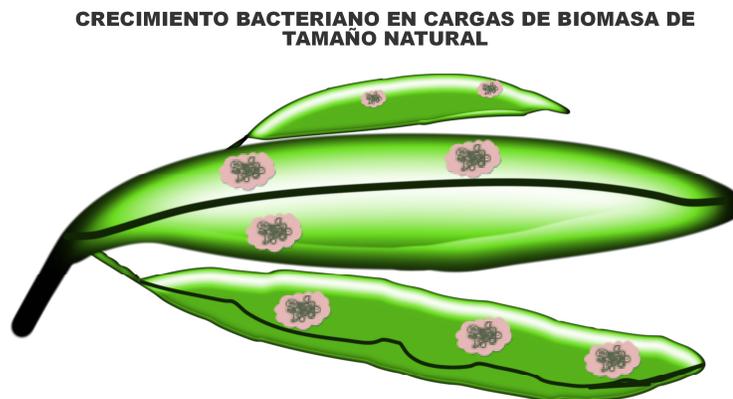


Figura 6.3 Crecimiento bacteriano en un residuo vegetal

Realizando una mejor aproximación a la zona de proliferación bacteriana, se puede observar que los grupos dispersos de bacterias no tendrán la capacidad de sobrevivir, como también de procesar con mayor eficacia la materia prima, ya que deben recorrer intersticios o espacios vacíos donde no existe ninguna actividad, es por esto que reducimos la materia orgánica, para intensificar el crecimiento de las cepas depredadoras.

CRECIMIENTO BACTERIANO

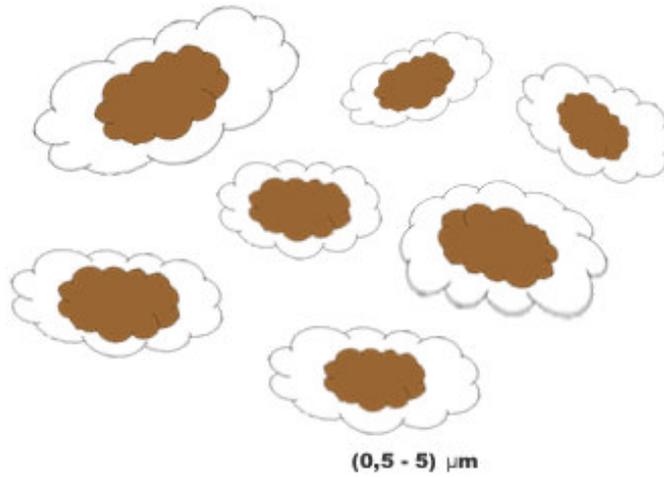


Figura 6.4 Crecimiento bacteriano separado por intersticios o espacios vacíos

En las mezclas de harina vegetal con otros elementos se podrá obtener una mejora considerable en las condiciones de fermentación anaeróbica.

CRECIMIENTO BACTERIANO EN CARGAS DE HARINA VEGETAL

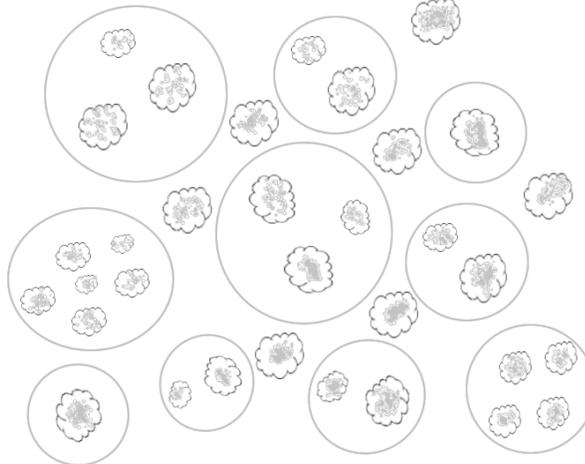


Figura 6.5 Crecimiento en las cargas vegetales peletizadas

6.1.4 Producción de biogás en los modelos tradicional y mejorado

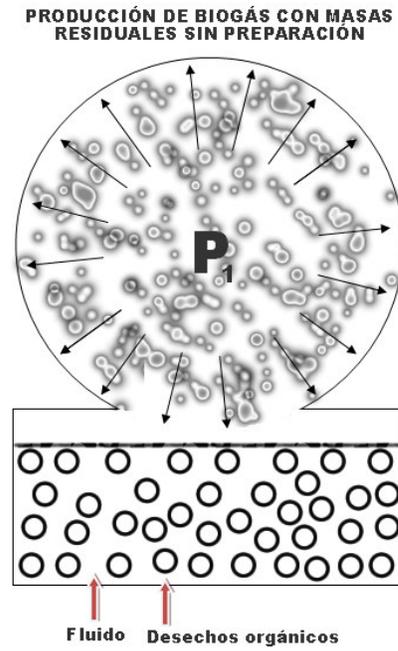


Figura 6.6 Producción de biogás con cargas sin preparación

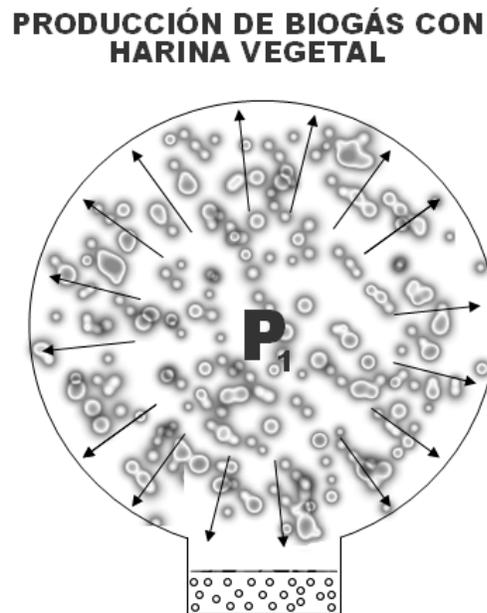


Figura 6.7 Producción de biogás con cargas vegetales peletizadas

6.1.5 Parámetros del proceso de fermentación

Calor por reacción bioquímica

Las cargas de biomasa sufren en forma natural transformaciones físico químicas que generan calor de reacción, y se pueden alcanzar temperaturas de hasta 60°C en el interior del sustrato, este calor se disipa hacia el ambiente por los fenómenos de convección y conducción, es necesario tomar en cuenta que el calor almacenado demora muy poco tiempo y es de baja entalpía.

CALOR DE REACCIÓN DE BIOMASA RESIDUAL

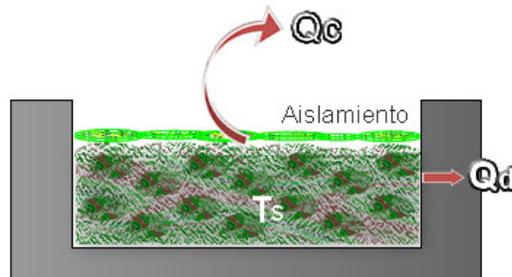


Figura 6.8 Silo con cargas de biomasa residual y aislamiento superior

Presión interna generada por el biogás

La presión en el interior del recipiente para una adecuada producción de biogás puede variar entre 0.7 y 1.4 Kg/cm²

DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL BIORREACTOR

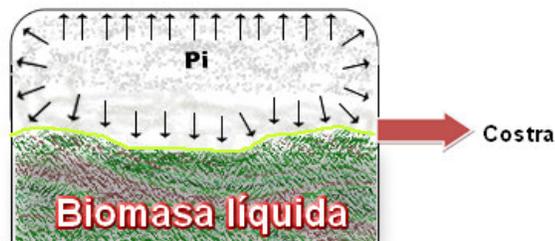


Figura 6.9 diagrama de presiones en el interior del recipiente

Temperatura de fluidos en el proceso de fermentación

Existen campos de temperaturas que pertenecen a los diversos fluidos del proceso, es decir que habrá estratificación de temperaturas en el sustrato, en el interior de la cámara de agua caliente sanitaria y en el recipiente de acumulación de biogás; el cual en muchos casos, especialmente cuando se evacuen los gases; se originarán caídas de presión con la consecuente reducción de la temperatura.

TEMPERATURAS DE PROCESO EN LA BIORREACCIÓN

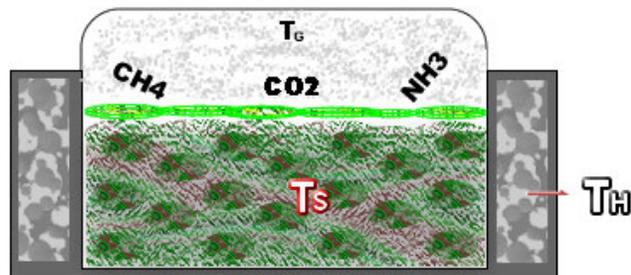


Figura 6.10 Temperatura de los fluidos de proceso

Desplazamiento por convección natural

A parte de la costra semisólida, el biogás debe vencer la tensión superficial, fuerzas gravitatorias, apoyado por las fuerzas originadas por el mecanismo de convección natural, esta afirmación la podemos observar en el siguiente gráfico.

ETAPAS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

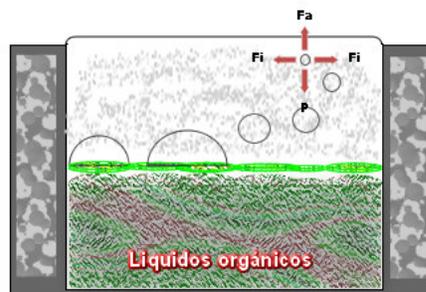


Figura 6.11 Separación de las moléculas de biogás desde el sustrato

MOLÉCULAS DE VAPOR EN LA INTERFASE DEL LÍQUIDO-BIOGÁS

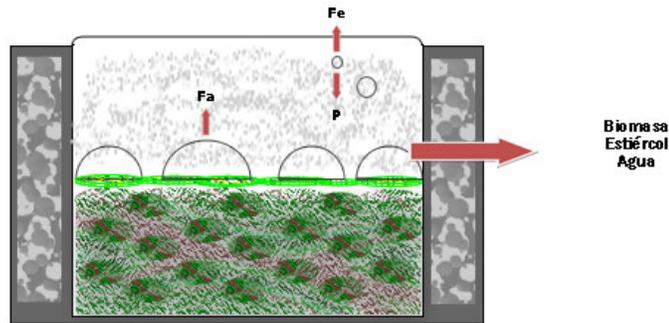


Figura 6.12 Fuerzas verticales sobre las moléculas de biogás

Este efecto es similar a lo que ocurre cuando el agua inicia su primera etapa de ebullición, es decir; cuando en la base del recipiente aparecen pequeñas burbujas que suben lentamente hacia la superficie del líquido se origina un desplazamiento debido a los efectos de convección libre.

Gases producidos por el proceso de fermentación anaeróbica

El proceso de biodegradación sin la presencia de oxígeno produce los siguientes gases: amoníaco NH_3 , Bióxido de carbono CO_2 , sulfuro de hidrógeno H_2S , Metano CH_4 , Vapor de agua, los cuales dependiendo de su cantidad afectan la calidad del biogás obtenido.

SALIDA DE BIOGÁS DE LA CÁMARA DE REACCIÓN

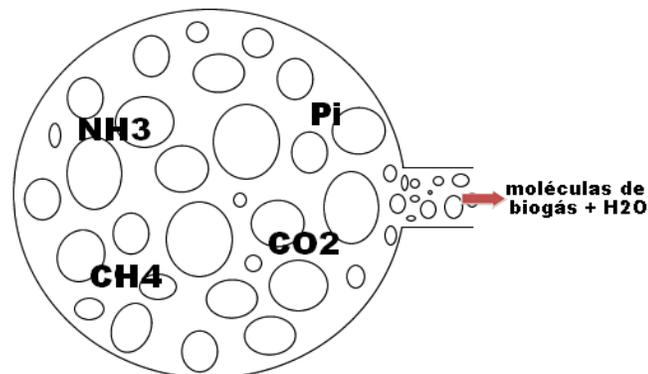


Figura 6.13 Elementos constitutivos del biogás

Afinamiento del proceso

Se podrá obtener biogás de mejor calidad, en el menor tiempo, y con mejores resultados en el proceso de combustión, cuando se utilicen cargas de desechos vegetales que hayan sido debidamente seleccionadas y preparadas, de tal manera que la actividad bacteriana tenga un crecimiento exponencial. De allí que es necesario tomar en cuenta el cuidado de las cepas bacterianas para evitar su aniquilamiento debido a los cambios bruscos de temperatura y de pronto a los efectos nocivos del agua jabonosa. Esto debe complementarse con una instalación apropiada para la generación, calefacción, almacenamiento, conducción y combustión considerando para ello un exceso de aire del 15%.

Un esquema particular del proceso se puede observar en la figura 6.14 donde se tienen los siguientes componentes: Colector de desechos, recipiente hermético para biorreacción, líneas de conducción, acumulador, filtros de separación de humedad, dispositivo de cocción.

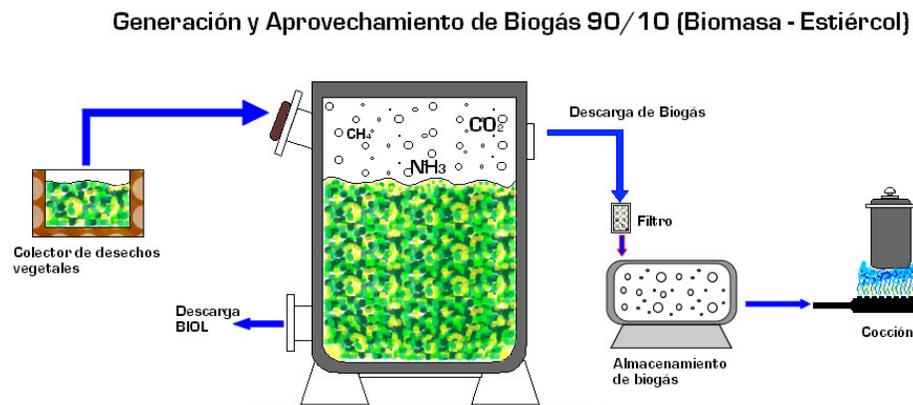


Figura 6.14 Obtención de biogás con alta incidencia de cargas vegetales peletizadas

6.2 Datos de Cargas

De acuerdo con los lineamientos establecidos en el Capítulo 3, se procede a determinar el tipo de mezclas a utilizar en este estudio, no sin antes indicar, que se realiza un proceso inverso, es decir; en la conformación del sustrato no será predominante la presencia del estiércol de los animales, por el contrario; se pondrá especial énfasis en utilizar en mayor proporción el desecho vegetal prehidratado, o en verde, en vista de que con los resultados que se logren mediante el desarrollo de la presente investigación, se puedan generar aplicaciones energéticas destinadas a zonas marginales del Ecuador, donde se disponga de importantes recursos de biomasa vegetal que sean aprovechadas de forma eficiente. Por otra parte, si se trata de utilizar el estiércol como carga principal en grandes instalaciones de producción de biogás, la recolección se torna compleja, si los animales se encuentran en pastoreo libre o semi estabulados.

6.2.1 Materia prima

La carga de material biológico para la producción experimental de biogás, esta compuesta por lo siguiente:

- Hierba seca
- Pasto fresco
- Estiércol: vacuno, equino, porcino, gallinaza, en menor proporción
- Urea para aumentar el contenido de nitrógeno de la mezcla
- Desechos alimenticios

En el estado inicial cada uno de estos componentes tiene una densidad aparente, la misma que se ha determinado experimentalmente y sus valores se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 6.1 Densidad aparente de los componentes orgánicos

Material	Volumen (ml)	Peso (g)	Densidad Aparente (Kg/m ³)
Hierba seca	615	110	178,9
Hierba húmeda	615	226	367,5
Estiércol de gallina	615	195	317,1
Estiércol de vacuno	615	639	1039,0
Estiércol de caballo	615	451	733,3
Estiércol de porcino	615	649	1055,3
Agua	615	615	1000,0

Las diversas proporciones de mezclas se pueden observar en la tabla 6.2

Tabla 6.2 Combinaciones de biomasa, pesos y porcentajes

Tipo de desecho	Hierba (g)	Estiércol (g)	Urea (g)	Biomasa (g)	Vegetal (%)	Estiércol (%)	Urea (%)
vacuno	1200	285	15	1500	80,00	19,00	1,00
	1200	502	12	1714	70,01	29,29	0,70
	1200	780	10	1990	60,30	39,20	0,50
equino	1200	285	15	1500	80,00	19,00	1,00
	1200	497	12	1709	70,22	29,08	0,70
porcino	1200	285	15	1500	80,00	19,00	1,00
	1200	497	12	1709	70,22	29,08	0,70
gallinaza	1200	578	0	1778	67,49	32,51	0,00
Pasto verde	1500	462	10	1972	76,06	23,43	0,51
Hierba seca	1500	400	5	1905	78,74	21,00	0,26

Para el caso de la mezcla de vegetal con vacuno se consideran los siguientes porcentajes:

Vegetal (%)	Estiércol de vacuno (%)
80	19
70	29
60	39

Con estas cargas orgánicas, se debe determinar cual se ellas produce la mayor proporción de metano, así como también, menor tiempo de fermentación, mayor presión interna y temperatura del proceso por reacción bioquímica.

6.2.2 Relación carbono nitrógeno(C/N)

Como se había indicado anteriormente, las mezclas orgánicas deben tener una relación carbono nitrógeno C/N, de 20/1 hasta 30/1, tomando en cuenta que para conseguir la mezcla ideal se deben combinar materias primas con baja proporción de nitrógeno con otras de mayor cantidad de Carbono.

Tabla 6.3 Relación carbono nitrógeno

Tipo de desecho	Hierba (g)	Estiércol (g)	Urea (g)	Biomasa (g)	Relación (C/N)
vacuno	1200	285	15	1500	24,7
	1200	502	12	1714	26,5
	1200	780	10	1990	27,6
equino	1200	285	15	1500	24,4
	1200	497	12	1709	25,8
porcino	1200	285	15	1500	25,2
	1200	497	12	1709	27,2
gallinaza	1200	578	0	1778	22,4
Pasto verde y residuos alimenticios	1500	462	10	1972	22,6
Hierba seca y residuos alimenticios	1500	400	5	1905	35

Considerando la tabla 6.3, se puede afirmar que las mezclas tienen una relación carbono nitrógeno dentro del rango establecido, no así la última que tiene una C/N superior a 30. Sin embargo, su rendimiento se lo verifica en los resultados finales.

6.2.3 Biomasa prehidratada

Los desechos vegetales predominantes, pasan por un proceso de preparación donde luego del corte con máquina, se realiza un presecado con energía solar, a continuación la fermentación al aire libre y luego se procede al secado en un horno con cámara de lecho fijo, que funciona con la combustión de cascarilla de arroz. Luego viene la molienda hasta convertirlo en harina vegetal. Si la humedad final del pasto seco es del 12 % para la carga, se necesita prehidratarla, es decir; si el contenido de humedad final es del 12%, este debe alcanzar el 67% mediante la prehidratación que consiste en añadir agua hasta que se convierta en una mezcla húmeda, de acuerdo a lo que se puede observar en la tabla 6.4

Tabla 6.4 Agua para rehidratación de la biomasa seca

Humedad del pasto fresco (%)	Humedad final de la hierba seca (%)	Agua de rehidratación (g)	Biomasa (g)
67	12	2272,73	3772,73
67	12	2272,73	3986,73
67	12	2272,73	4262,73
67	12	2272,73	3772,73
67	12	2272,73	3981,73
67	12	2272,73	3772,73
67	12	2272,73	3981,73
67	12	2272,73	4050,73
67	67	0,00	1972,00
67	12	2840,91	4745,91

La expresión utilizada para determinar la cantidad de agua de prehidratación del vegetal seco se define como:

$$\Delta W = S_d \left(\frac{X_i}{100 - X_i} - \frac{X_f}{100 - X_f} \right) \quad (6.1)$$

Donde: ΔW , cantidad de agua para prehidratar la mezcla orgánica, S_d masa del sólido seco, X_i contenido de humedad inicial del vegetal antes del secado, X_f contenido de humedad final del vegetal seco que en este caso es equivalente al 12%.

6.2.4 Densidad del sustrato

En los trabajos realizados sobre fermentación anaeróbica, se puede observar que el valor de la densidad del sustrato, se lo considera igual a 1000 Kg/m³, es decir equivalente a la densidad del agua dulce. Sin embargo para tener una mejor apreciación de la densidad para cada tipo de sustrato, se establece la tabla 6.5

Tabla 6.5 Datos experimentales de densidad de sustratos

Sustrato	Densidad aparente (Kg/m ³)
HS+V+U	1209,76
HS+E+U	1287,80
HS+P+U	1247,15
HS+G	1308,94
HH+A+U	1000
HS+A+U	1000

Denominación:

Las siglas anteriores significan lo siguiente:

HS: Herva Seca

V: Estiércol de vacuno

U: Urea

P: Estiércol de porcino

G: Estiércol de gallinaza

A: Residuos alimenticios

Para la mezcla entre vegetal seco, residuos alimenticios y urea se establece una densidad de 1000 Kg/m³ debido a que se utilizó sopa, donde se tiene una mayor cantidad de agua.

6.2.5 Volumen del sustrato y del gasómero

El sustrato esta compuesto por una importante proporción de agua, que depende del tipo de carga biológica y de la humedad. Existen proporciones definidas de cantidad de agua necesaria, con respecto a la masa de estiércol y esta puede ser de 1:1 dando buenos resultados en la producción de biogás, y BIOL.

En este caso se ha realizado la alimentación del agua considerando un 85 % en peso de la mezcla orgánica.

El volumen del sustrato V se obtiene con esta expresión:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (6.2)$$

Donde:

m masa de sustrato, ρ densidad de la mezcla. Con la ecuación anterior se determina el volumen de lodos.

El gasómero consiste en la cámara donde se almacena el biogás, y su tamaño tiene relación con los siguientes parámetros: Volumen de sustrato, temperatura del proceso, capacidad de generación de biogás, proporción de sólidos volátiles y minerales, presión interna de cámara, número de días de producción en la cual no se consume el subproducto. Por otra parte, tomando en cuenta que los cilindros tienen un volumen definido de 16 litros, se realiza la diferencia entre este valor y la cantidad de sustrato.

Tabla 6.6 Cantidad de agua, volúmenes del sustrato y del gasómero (VG)

Biomasa (g)	Agua añadida (g)	Agua Comp.(g)	Sustrato (g)	Volumen del sustrato (lt)	VG (lt)	VG (%)
3772,73	3206,82	500	7480	6,18	9,82	61
3986,73	3388,72	700	8075	6,68	9,32	58
4262,73	3623,32	0	7886	6,52	9,48	59
3772,73	3206,82	0	6980	5,42	10,58	66
3981,73	3384,47	0	7366	5,72	10,28	64
3772,73	3206,82	500	7480	6,00	10,00	63
3981,73	3384,47	500	7866	6,31	9,69	61
4050,73	3443,12	0	7494	5,73	10,27	64
1972,00	1676,20	0	3648	3,65	12,35	77
4745,91	4034,02	0	8780	8,78	7,22	45

6.3 Instrumentación utilizada

6.3.1 Balanza digital

Con este instrumento de medición se realizó la determinación del peso de la materia prima en su estado original: Vegetales, estiércol, urea, desechos alimenticios, posteriormente se mide el peso del fluido de proceso, que en este caso es el agua y el peso del sustrato. Las características de la balanza digital son:

- Capacidad:30000 g
- Apreciación: 1 g

El procedimiento de medición utilizado es el siguiente:

- Ubicación de la balanza en un sitio libre de vibraciones
- Limpieza de la balanza
- Colocación de protección para evitar derrame de líquidos
- Encerar
- Colocación de la materia prima



Figura 6.15 Balanza digital pesando el sustrato

6.3.2 Medidor de volumen

Consiste en un recipiente de vidrio con capacidad de 2 litros, y permite realizar la medición del volumen de agua necesario para las siguientes actividades:

- Alimentación de agua para rehidratación de la harina vegetal
- Alimentación de agua para humedecer la mezcla y obtener el sustrato

Un recipiente de mayor capacidad fue colocado en la proximidad del lugar de pesaje y mezclado a fin de evitar derrames o demoras en la medición del volumen del fluido.



Figura 6.16 Recipiente de vidrio para medición de volumen de agua

6.3.3 Medidor de temperatura del sustrato

Este instrumento se ensambla en la parte inferior del reactor, con el propósito de medir la temperatura del sustrato durante el tiempo que dura el experimento. En el primer día de carga, se puede observar que marca la temperatura ambiente, y conforme avanzan los días debe indicar el incremento de temperatura producida por los cambios bioquímicos del sustrato. Sus características generales son:

- Marca WIKA
- Rango de medición: 0-100 °C
- Apreciación: 1°C
- Tipo: Carátula



Figura 6.17 Medidor de temperatura interna del digestor

6.3.4 Manómetro indicador de presión interna

Este dispositivo se coloca en la parte superior del digestor, con el propósito de medir la presión que se genera por la acumulación de los gases producidos por el proceso de fermentación. En la figura 6.18 podemos observar que el manómetro indica una presión interna de 34 PSI.

Características generales:

- Marca: WIKA
- Rango de medición: 0-60 PSI
- Apreciación: 1PSI
- Tipo: Carátula



Figura 6. 18 Manómetro para medir la presión interna del reactor

6.3.5 Medidor de temperatura ambiente

La temperatura promedio en el sitio de pruebas es de aproximadamente 16,2 °C



Figura 6. 19 Termómetro de bolsillo para temperatura ambiente

6.3.6 Medidor de humedad relativa

La humedad relativa depende de las condiciones ambientales y dependiendo de la estación, puede variar del 40% al 60%



Figura 6. 20 Higrómetro

6.3.7 Medidor de PH



Figura 6. 21 PHímetro

6.4 Hoja de pruebas

El modelo para registro de datos, debe permitir colocar en forma consecutiva los valores de presión y temperatura de los 10 recipientes de ensayo, el formato que mejor se adapta a este requerimiento se lo puede observar en la tabla 6.7 que se indica a continuación:

Tabla 6.7 Hoja para datos de presión y temperatura

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]										
Temperatura [°C]										
Fecha										
Hora										
T. ambiente [°C]										
Clima										

6.5 Facilidades requeridas para el experimento

6.5.1 Equipo

Es indispensable disponer de recipientes totalmente herméticos y en perfecto estado de conservación para evitar fugas, así como también los efectos debido a los altos niveles de corrosión interna.



Figura 6. 22 Instrumentos de medida de presión y temperatura

En lo referente a la tapa, esta debe ser totalmente sellada, ya que por esta parte pueden escapar los gases producidos en la fermentación anaeróbica: CO_2 , CH_4 , H_2S , vapor de agua.



Figura 6. 23 Tapa con acople roscado

La protección de los recipientes, para inhibir temporalmente la corrosión debe realizarse utilizando recubrimientos anticorrosivos de acuerdo con el siguiente procedimiento: Colocación del fondo de aceite, posteriormente pasar tres capas de fondo gris y luego pintura de color que permita identificar que el recipiente contiene combustible gaseoso, almacenado a alta presión.



Figura 6. 24 Recipiente con fondo anticorrosivo

Cada uno de los cilindros debe ser previamente analizado mediante una prueba hidrostática, para evitar la presencia de fugas en el momento de la producción de biogás.



Figura 6. 25 Verificación de recipientes para cargas experimentales

El aislamiento térmico permite que el sustrato se mantenga a una temperatura adecuada, para evitar la aniquilación de las cepas bacterianas por el cambio brusco de temperaturas.



Figura 6. 26 Colocación de aislamiento térmico

El aislamiento térmico debe cubrir en su totalidad al recipiente. Además, es necesario proteger contra la humedad, debido a que la lana de vidrio pierde sus propiedades que afectan su conductividad térmica.



Figura 6. 27 Recipiente con aislamiento térmico

6.5.2 Materia prima

Tomando en cuenta la siguiente figura se indica que el aprovechamiento energético de la biomasa es muy necesario ya que se está utilizando un recurso renovable.



Figura 6. 28 Materia prima en estado de crecimiento

Un método adecuado para acelerar el proceso de fermentación, consiste en dejar a la intemperie la biomasa residual, con el propósito de que se degrade bajo condiciones naturales.



Figura 6. 29 Materia prima en estado de descomposición natural

6.5.3 Preparación

Mediante el secado, en horno de lecho fijo, se consigue reducir el contenido de humedad de la masa vegetal, para posteriormente proceder a la molienda, con lo cual se facilita el mezclado y la carga en los pequeños biorreactores.



Figura 6. 30 Secado en horno

Luego de secar la biomasa, es necesario protegerla contra la acción de la humedad o para evitar la presencia de roedores que anidan en su lecho, originando pérdida de calidad de la materia prima para obtención de biogás.



Figura 6. 31 Bandeja con hierba seca

Existen una gran variedad de desechos orgánicos, producidos por el agro, los cuales pueden utilizarse para obtención del biogás, así tenemos: Cáscaras de habas, fréjol, cáscaras de arveja, hojas de col, cebolla, cáscaras de remolacha entre otras especies que pueden ser utilizadas para balancear determinadas mezclas, de tal manera que se mejore la relación C/N.



Figura 6. 32 Desechos orgánicos

Para añadir una proporción de nitrógeno, a fin de mejorar las características del bioabono orgánico líquido, hemos añadido pequeñas porciones de urea, en cada carga.



Figura 6. 33 Colocación de urea

El mezclado de las cargas biodegradables se realizó en forma manual, dado que solo se requería de 4 a 5 Kg de sustrato, para cargar en los modelos de fermentación.



Figura 6. 34 Mezclado

El pesaje del sustrato es importante, para poder determinar la densidad de la sustancia que se introduce en la cámara de fermentación, ya que de otra manera se complica sustancialmente su cálculo porque no se conoce en forma exacta las propiedades del desecho vegetal ni tampoco de las otras composiciones.



Figura 6. 35 Pesaje del sustrato en balanza digital

6.5.4 Carga

La carga del sustrato semilíquido se realiza en forma manual, debido a la cavidad de alimentación que es muy reducida, aproximadamente tiene un diámetro de 2".



Figura 6. 36 Carga en el biorreactor

6.5.5 Protección térmica

En la siguiente figura se puede observar una fotografía realizada en la noche, en un recipiente que estaba totalmente protegido contra la intemperie.



Figura 6. 37 Envoltura térmica

6.6 Tiempos de fermentación de cargas combinadas

Los tiempos de fermentación para toma de datos y pruebas de combustión se encuentran entre 8 y 21 días, tomando en cuenta que en determinado experimento, el medidor de presión empezó a marcar a partir del cuarto día de carga.

6.7 Presión interna

En el proceso de fermentación anaeróbica utilizando biomasa residual previamente preparada se alcanzaron presiones entre 50 y 60 PSI.

6.8 Determinación de la composición química

Si se utiliza celulosa, que es uno de los principales componentes de la biomasa, la mayoría de procesos pueden ser resumidos como:



El peso molecular de la celulosa se calcula así:

$$C_6 = 12 \times 6$$

$$H_{10} = 1 \times 10$$

$$O_5 = 16 \times 5$$

El peso molecular PM, de la expresión $(C_6H_{10}O_5)$ es de 162 g/mol. El número de moles n se encuentra dividiendo la masa m de la sustancia vegetal para el peso molecular PM de la siguiente manera:

$$n = \frac{m}{PM}$$

Si la masa de vegetal es de 1500 gramos, entonces se tiene que:

$$n = \frac{1500}{162}$$

$$n = 9,259 \text{ mol}$$

Reemplazando en la expresión estequiométrica se tiene:

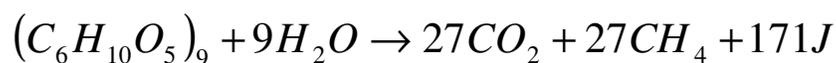


Tabla 6.8 Características de sustancias

Sustancia	Peso molecular (g/mol)	Número de moles (mol)	Masa (g)
$(C_6H_{10}O_5)$	162	9,259	1500
H_2O	18,02	9,259	166,8
CO_2	44,01	27,77	1222,15
CH_4	16,04	27,77	445,43

En esta reacción se produce una cantidad de calor equivalente a 41 cal.

6.9 Tecnología de la combustión

6.9.1 Definiciones y clasificaciones de los principales fenómenos relacionados con la combustión

Por combustión, en sentido amplio, puede entenderse toda reacción química relativamente rápida, de carácter notablemente exotérmico, que se desarrolle en fase gaseosa o en fase heterogénea (gas-liquido, gas-sólido), sin exigir necesariamente la presencia del oxígeno, con o sin manifestaciones del tipo de llamas o de radiación visible. A su vez, las llamas pueden definirse como reacciones de combustión que se propagan a través del espacio, a velocidad inferior a la del sonido, acompañada normalmente de radiaciones visibles: su característica de propagación en el espacio en condiciones de velocidad limitada las diferencia claramente de otras reacciones.

El concepto de llama implica el de movimiento, y por consiguiente, un frente de avance de la reacción, el denominado "frente de llama": supuesto limitado el volumen de mezcla en la reacción, obtenida la llama su propagación se auto extingue.

Si la mezcla destinada a la combustión fluye dentro de un tubo hacia un extremo libre del mismo, en condiciones definidas de flujo, la llama puede quedar aparentemente inmóvil en el extremo libre. Si la velocidad del gas aumenta más allá de un cierto límite, la llama languidece, apagándose por completo; por el contrario, si la velocidad de flujo de la mezcla disminuye sensiblemente, puede producirse el llamado "retorno de la llama" dentro del tubo. Estas observaciones implican la definición de una velocidad peculiar de la llama, que es función de la naturaleza del combustible gaseoso, de las condiciones en que se produce la combustión y, en menor medida, de las dimensiones del aparato en el que se verifique.

Esta velocidad depende de la conducción del calor y de la difusión de las partículas activas, originadas en la combustión, en sentido opuesto al del flujo del gas; pero no es muy elevada proporción, dado que la combustión térmica gaseosa que condiciona los resultados sigue un proceso lento y puede variar entre unos pocos

cm/seg. (propano-aire) hasta algunos metros/seg. (Mezcla estequiométrica hidrogeno-oxigeno). Una mezcla estequiométrica aire-vapor de queroseno tiene, por ejemplo, una velocidad de llama de unos 40cm/seg.

Para que se produzca una llama es necesaria tanto la presencia del combustible y del comburente como la de un iniciador; este puede ser una chispa o una fuente de calor, como un hilo incandescente o una llama piloto.

Para la combustión de una mezcla inflamable, GAYDON señala que la cantidad mínima de energía necesaria, en el caso de igniciones instantáneas (chispas) debe ser proporcional a $1/P^2$ (siendo P la presión del gas); en el caso de fuentes de calor permanente (hilo incandescente, llama piloto) debe tenerse en cuenta el factor tiempo, la geometría del local y el coeficiente de difusión.

Una mezcla inflamable puede encenderse por sí misma si se conduce a una temperatura a la cual la reacción entre el combustible y el comburente alcanza una velocidad suficientemente elevada. La ignición visible esta precedida por un intervalo de temperaturas en el que se verifican reacciones preliminares de oxidación, a velocidad más lenta. La temperatura limite, mas allá de la cual se produce siempre la ignición, se denomina de autoencendido. Para valores en torno a esta temperatura se verifica un cierto retardo en la ignición, llamado *periodo de inducción*, que tiende a ser menos duradero a medida que cese la temperatura. Este, a su vez, depende de la naturaleza de las paredes del recipiente, de la presión y de la presencia de catalizadores o inhibidores de la combustión. Observando el comportamiento de la mezcla aire-metano, al crecer la temperatura, puede apreciarse en determinadas condiciones la formación de las denominadas “*llamas frías*”, fenómenos luminosos que se distinguen de las llamas normales por su baja temperatura y por su espectro, caracterizado por la presencia de bandas de formalina (en lugar de bandas de los radicales C – C y CH asociados a las combustiones normales).

6.9.2 Condiciones límite para se produzca la llama

a) Límites de inflamabilidad

Partiendo de mezclas estequiométricas de combustible-comburente, y procediendo en la escala de las concentraciones, tanto hacia mezclas más ricas como hacia las más pobres en combustible, se llega en ambos casos a mezclas límite, en las cuales el calor producido por un volumen de la mezcla en combustión resulta suficiente para propagar la llama en el ambiente circundante, por difusión molecular y térmica. Ambos límites marcan el superior e inferior de inflamabilidad. Vienen dados por el porcentaje de concentración del combustible en la mezcla combustible-comburente. En general, los límites corresponden a mezclas que dan lugar a bajas temperaturas de combustión, en las cuales no puede propagarse la llama (en otras palabras, se tiene una pérdida de energía, por lo que la mezcla circundante no puede alcanzar la temperatura de ignición). Los valores de ambos límites cambian mediante variaciones de la presión y la temperatura.

b) *Límites de temperatura*

Además de los límites de inflamabilidad ya reseñados, existen límites de temperatura definidos por las temperaturas máximas y mínimas a que pueden encontrarse los gases que intervienen en la combustión, respectivamente en el instante inicial del encendido y en el instante final, como productos quemados (campo de temperatura de la llama).

c) *Límites de presión*

Los límites de presión definen el intervalo de presiones dentro del cual puede existir una llama; se ha hecho experiencias demostrativas al respecto y se ha constatado que, por lo que se refiere al límite inferior que está por debajo de las 10^{-3} atmósferas, todas las llamas tienden a extinguirse. El límite superior es muy difícil de determinar, debido a la peligrosidad de la mezcla; hasta el momento se han conseguido combustiones a presiones de hasta 100 atmósferas.

d) *Quenching (efecto pares)*

Debe aun consignarse, por su puesto "limitador", el llamado *efecto Quenching* de las paredes sobre la llama. Puede advertirse este fenómeno observando una llama que sale de un tubo; debido a las pérdidas de calor localizadas en la zona de contacto en los bordes y a los efectos de difusión en la pared de los elementos activos, a través de los cuales se desarrolla la combustión, en torno a los bordes se centra una parte de la reacción, por lo cual la llama queda claramente destacada del quemador.

Temperatura de llama

En la combustión de un determinado material pueden conseguirse llamas de temperaturas diversas, según las condiciones experimentales utilizadas; ejercen una influencia determinante en ello; el poder calorífico del combustible y su composición, el tipo de comburente (aire, oxígeno o mezcla de ambos) y la velocidad global de combustión. Este último dato depende a su vez de la reactividad del combustible, de la forma y eficacia del sistema de combustión y de la temperatura inicial de los reactivos. El cálculo teórico de la temperatura de una llama (temperatura ideal) se basa normalmente en el supuesto de que la reacción se produzca de un modo completo, en proporción estequiométrica, con una mezcla perfectamente homogénea y en un tiempo brevísimo (de modo que no se produzcan pérdidas de calor por el ambiente). Debe tenerse en cuenta además del calor unitario de la reacción, el calor sensible de los reactivos, de manera que puedan determinarse el contenido térmico global de los productos que intervienen; en consecuencia se calcula la temperatura de la llama (temperatura adiabática ideal) multiplicando el calor específico medio de los gases quemados por su cantidad, y dividiendo el contenido térmico global por este valor.

Las temperaturas que se obtienen mediante este cálculo son siempre más altas que las reales, por cuanto muchas de las hipótesis formuladas son prácticamente irrealizables.

Hasta temperaturas de llama de 1800°C pueden hacerse caso omiso del fenómeno de disociación de los gases quemados; a partir de 2000°C este fenómeno cobra mucha importancia, condicionando los resultados de la combustión (debido a las elevadas características endotérmicas de las reacciones de disociación).

Por consiguiente, las combustiones perfectamente estequiométricas, son de difícil realización en la práctica; generalmente se necesitan grandes excesos de aire, que contribuyen a la vez a una mezcla deficiente de los reactivos, y a una reducción posterior de la temperatura de la llama.

El cálculo de la temperatura según el método antes señalado debe tener en cuenta por lo menos dos factores limitadores: la disociación de los productos de la combustión y los excesos de aire necesario para completar la reacción. Dicho cálculo se obtiene mediante el sistema de aproximaciones sucesivas, o más cómodamente utilizando gráficos especialmente preparados para este propósito. El valor que se alcanza aun siendo más exacto que el anterior, solo tiene todavía un significado teórico, por cuanto no considera las pérdidas de calor por irradiación, cuya influencia solo puede determinarse cuando se conocen las condiciones reales del ambiente.

La importancia de alcanzar altas temperaturas de combustión proviene del hecho bien conocido de que el calor se transmite solamente de un cuerpo caliente o uno más frío; es indispensable, por tanto, que los gases estén a un nivel térmico muy elevado si quiere conseguirse que un gran porcentaje de calor liberado se transfiera a los cuerpos que se quieren calentar (especialmente si estos se encuentran ya a una temperatura elevada).

Es interesante observar que las llamas más calientes no son aquellas a las que corresponde en teoría la máxima liberación de energía, sino aquellas cuyos productos finales son estables y, por lo tanto, poco disociados. En la reacción cianógeno-ozono se alcanzan, por ejemplo, 5.000°K, debido a que los productos finales, CO y N₂, son térmicamente muy resistentes.

Tabla 6.9 Temperaturas teóricas de combustión de algunos gases combustibles (teniendo en cuenta la disociación y el exceso de aire)

Gases combustibles	Temperatura de combustión °C			
	Indicé de aire n = 1,0*		n = 1,3*	
	Sin disociación	Con disociación	Sin disociación	Con disociación
<i>Gases puros</i>				
Hidrogeno... ..	2280	2180	1910	1900
Oxido de carbono	2410	2150	2040	1960
Metano... ..	2050	1950	1680	1670
Etano... ..	2130	2000	1740	1730
Propano... ..	2170	2040	1770	1760
n-Butano... ..	2210	2060	1800	1790
Etileno... ..	2320	2140	1890	1880
Propileno... ..	2290	2090	1860	1840
<i>Gases técnicos</i>				
Gas de alto horno	1290	1290	1170	1170
Gas de gasógeno de cok ...	1690	1650	1480	1480
Gas de agua cok	2200	2040	1860	1840
Gas de coquería	2100	2000	1740	1730
Gas ciudad... ..	2120	2000	1760	1740

$$* n = \frac{\text{Volumen de aire empleado}}{\text{Volumen de aire estequiométrico}}$$

Tipos de llama

Los principales parámetros que concurren a la definición de una llama son:

- Modalidad de mezcla del combustible con el comburente
- Velocidad del flujo gaseoso
- Posición de la llama con respecto a la boca del quemador
- Tipo del material con combustión.

Desde el punto de vista de la mezcla, las llamas se distinguen en:

- Llamas de difusión
- Llamas premezcladas

Una llama puede considerarse de difusión cuando la mezcla del combustible con el comburente se realiza en el instante de la combustión mediante un proceso de tipo difusor, mientras que se dice *premezclada*, cuando la mezcla de los fluidos se realiza previamente y la combustión tiene lugar en un medio constituido por una mezcla combustible-comburente en íntimo contacto.

La llama que se obtiene en un quemador Bunsen con su válvula de aire cerrada, es del tipo de difusión (lo mismo que la que se produce en la extremidad libre de una mecha sumergida en aceite, o en una vela); la que se consigue en un quemador Bunsen con la válvula del aire abierta es, en cambio, del tipo premezclado.

En este caso, el frente de llama puede considerarse como una onda de deflagración que avanza a través de la mezcla: las llamas de difusión no se caracterizan por una velocidad específica de combustión, y la reacción química de oxidación puede estar precedida en algunos casos por reacciones de pirolisis del combustible.

La segunda distinción se refiere a la velocidad de flujo de los reactivos; en función de este parámetro las llamas se clasifican en:

- a) *Llamas laminares*
- b) *Llamas turbulentas*

Una llama puede considerarse del tipo laminar cuando los fenómenos de mezcla y de transporte ocurren a través de procesos moleculares con los estratos del fluido en movimiento paralelo y distribución parabólica de la velocidad (pasando de un valor cero en la periferia a un valor máximo en el centro del flujo); y es del tipo turbulento cuando en el flujo del gas aparecen vértices de tipo macroscópico, y el número de REYNOLDS (Re) resulta mayor de 2500-3000 (en estas condiciones, el gas sale del tubo con un silbido distintamente perceptible, y la llama, que tiene tendencia a acortarse, adopta un aspecto de torbellino).

Desde el punto de vista dinámico, frente a las *llamas en movimiento*, o llamas explosivas libres, existen las *llamas estacionarias*, llamadas así por que el combustible se quema poco a poco a medida que pasa a través de una determinada

zona del sistema (normalmente la boca del tubo del quemador) dando lugar a una llama aparentemente fija. Estas llamas que pueden ser tanto del tipo de difusión como premezcladas, han de considerarse entre las más importantes desde el punto de vista práctico.

Finalmente, las llamas pueden clasificarse en función del estado del combustible considerado. El estudio de las *llamas de los combustibles sólidos* en lechos granulares fijos, resulta más bien complejo, por cuanto intervienen tanto reacciones de pirolisis como combustiones de tipo homogéneo y heterogéneo; relativamente más simples son los estudios sobre la combustión de chorros de carbón finamente pulverizado. A este tipo de fenómeno se aproximan las *llamas de combustibles líquidos*, fuertemente atomizados o dispersos, que suelen utilizarse en la mayoría de aplicaciones para la calefacción doméstica e industrial y en los motores alternativos y de aviación.

6.10 Análisis de llamas

6.10.1 Modelos

Analizando el proceso de combustión del biogás, producido por una carga de estiércol, biomasa residual en una proporción 70/30 se puede observar que la llama generada es de color amarillento, con ligeras trazas rojizas, esta situación permite deducir las siguientes consideraciones:

- Relación aire/combustible inadecuada es decir déficit de aire
- Biogás de menor calidad
- Mayor concentración de combustible

Un modelo de llama de estas características se puede observar a continuación.

LLAMA GENERADA POR LA COMBUSTIÓN 70/30 DE CARGA
ESTIÉRCOL-BIOMASA RESIDUAL

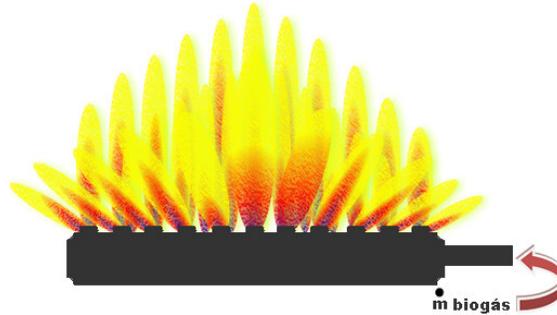


Figura 6.38 Tipo de llama al quemar biogás producido por estiércol

Para obtener una llama de mejor calidad se requiere tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Preparación de la biomasa: secado, molienda
- Relación carbono/nitrógeno
- Tipo de mezclas
- Tiempo de fermentación
- Separación del CO₂
- Relación aire combustible óptima

Con los parámetros anteriormente indicados se plantea la posibilidad de obtener una llama de mejor calidad y de mayor rendimiento térmico, como la que se observa en la siguiente figura:

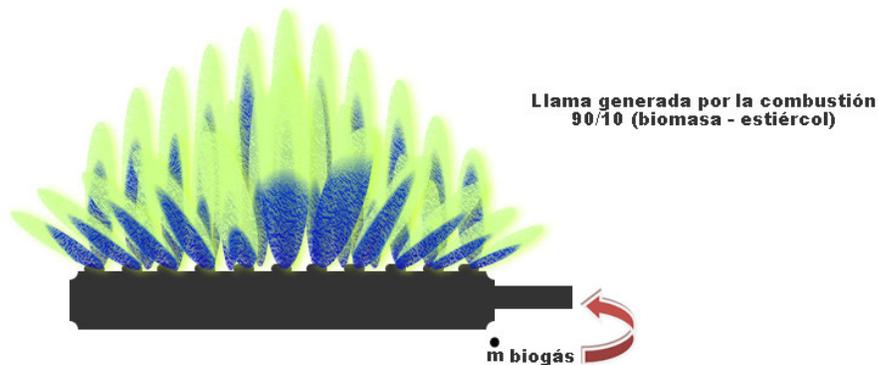


Figura 6.39 Tipo de llama producida por la combustión de CH₄ con cargas de mayor incidencia de desechos vegetales

6.10.2 Llamas producidas en combustión real

En la práctica se pudo observar las características de las llamas de combustión de biogás obtenido al fermentar estiércol y desechos vegetales. En la primera toma se puede observar que no se tiene una combustión completa, en vista de la poca producción de gas metano, y la mayor presencia de CO_2 , así como también del bajo contenido de CH_4 en el gas.



Figura 6.40 Combustión de biogás producido por estiércol predominante

La llama azul que se observa más abajo, es el resultado de la combustión de biogás obtenido al cargar 90% de vegetal y 10% de estiércol de vacuno.



Figura 6.41 Combustión de biogás producido por biomasa residual predominante

6.11 características del proceso mejorado

Preparación de la materia prima vegetal

- Selección de la materia prima
- Limpieza y clasificación
- Secado solar (presecado)
- Cargar en el horno
- Secado y agitación
- Verificación del contenido de humedad de acuerdo con el peso final
- Descargar
- Colocar en funda de polietileno para evitar humidificación
- Molienda
- Entrega

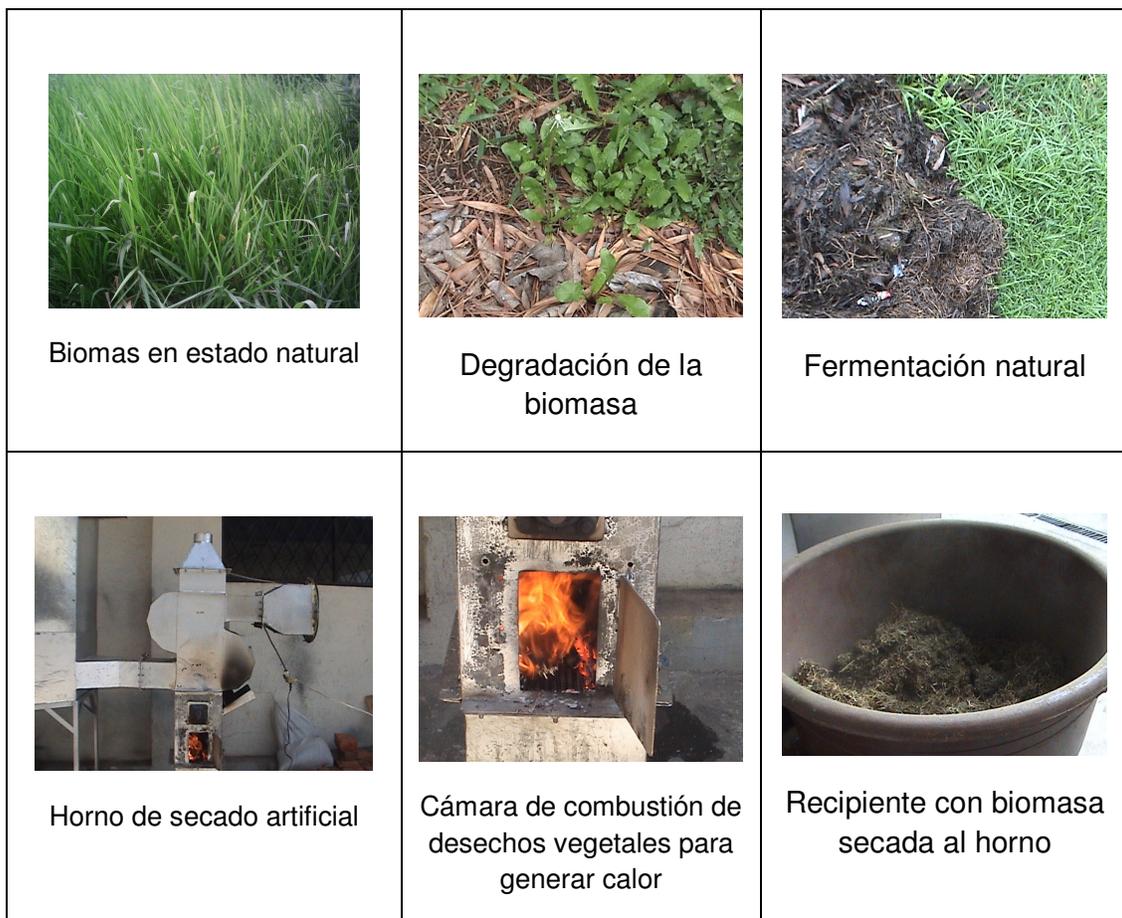


Figura 6.42 Preparación de la materia prima vegetal

Elaboración de cargas de desechos orgánicos

- Definición de materia prima
- Pesaje de cada una de las muestras componentes
- Pesaje del agua de rehidratación y humidificación
- Pesaje de la masa de urea
- Mezclado de componentes
- Determinación de la densidad del sustrato
- Carga manual en el biorreactor
- Inicio de fermentación anaeróbica



Figura 6.43 Elaboración de cargas con desechos orgánicos

Proceso de combustión

- Verificar de la presión interna del recipiente de biorreacción
- Acoplamiento de quemador
- Apertura de la válvula de salida de gas del recipiente
- Encendido
- Verificación de llama
- Verificación ruido
- Tiempo de combustión
- Medida de presión en el interior del recipiente
- Verificar gases no quemados

 <p>Verificación del estado de recipientes</p>	 <p>Lectura de la presión interna</p>	 <p>Manómetro indicador de presión interna</p>
 <p>Quemador de uso industrial</p>	 <p>Llama carburante con mayor presencia de CH₄</p>	 <p>Llama oxidante con mayor presencia de oxígeno</p>

Figura 6. 44 Combustión de biogás

CAPITULO 7

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Curvas representativas

Se puede analizar los datos recopilados provenientes de un determinado experimento o medición de variables, mediante la utilización de diversos tipos de curvas que permiten determinar su tendencia, estas pueden ser de forma exponencial, logarítmica, lineal o polinómica. Partiendo del diagrama de dispersión de datos, se procede a realizar la regresión matemática, para calcular los coeficientes numéricos de la ecuación planteada, con la cual también se obtiene información referente a los valores máximos y mínimos así como la tendencia de la curva.

7.2 Muestreo para aceptación

7.2.1 Estadística

La Estadística estudia los métodos científicos para recoger, organizar, resumir y analizar datos, así como para sacar conclusiones válidas y tomar decisiones razonables basadas en tal análisis.

En un sentido menos amplio, el término estadística se usa para denotar los propios datos o números derivados de ellos, tales como los promedios. Así se habla de estadística de empleo, estadística de accidentes, etc.

7.2.2 Población y muestreo

a) Estadística inductiva y descriptiva

Al recoger datos relativos a las características de un grupo de individuos u objetos, sean alturas y pesos, temperaturas, presiones; suele ser imposible o nada práctico observar todo el grupo, en especial si es muy grande. En vez de examinar el grupo entero, llamado población o universo, se examina una pequeña parte del grupo, llamada muestra.

Una población puede ser finita o infinita. Si la población consiste en todas las mediciones de presión en los 10 recipientes durante un día, es finita; mientras que la determinada por todos los posibles resultados durante cada hora, en todos los recipientes y a lo largo del proceso de fermentación, puede volverse extremadamente grande. Es decir tiende a infinita.

Si una muestra es representativa de una población, es posible inferir importantes conclusiones sobre la población a partir del análisis de la muestra. La fase de la Estadística que trata con las condiciones bajo las cuales tal inferencia es válida se llama estadística inductiva o inferencia estadística. Ya que dicha inferencia no es del todo exacta, el lenguaje de las probabilidades aparecerá al establecer nuestras conclusiones.

La parte de la Estadística que solo se ocupa de escribir y analizar un grupo dado, sin determinar conclusiones sobre un grupo mayor, se llama estadística descriptiva o deductiva.

Antes de entrar en el estudio de la Estadística, recordemos algunas nociones matemáticas relevantes.

b) Variables discretas y continuas

Una variable es un símbolo, tan como X, Y, H, x o B, que puede tomar un conjunto prefijado de valores, llamado dominio de esta variable. Si la variable puede tomar un solo valor, se llama constante.

Una variable que puede tomar cualquier valor entre dos valores dados se dice que es una variable continua; en caso contrario diremos que la variable es discreta.

En la práctica se acostumbra a tomar el tamaño de las muestras entre el 5 al 10% del tamaño de la población.

7.3.- Análisis estadístico de muestras

7.3.1 Diagrama circular

Estadístico: Presión

Uno de los parámetros importantes dentro del proceso de fermentación anaeróbica es la presión, la cual es una magnitud de fácil medición utilizando un manómetro. Para determinar su variación en cuanto al tiempo, se han realizado los registros de datos, durante 16 días consecutivos, después de evacuar las trazas de CO₂ que se generan en la primera etapa. Para poder analizar los datos de presión, se toman 4 cilindros de los más representativos es decir los números: 3, 5, 8, y 10. Con valores que se indican en la tabla 7.1. Para el caso del cilindro 3, se tiene que la medición N° 16 alcanza 18PSI, es decir tendrá un gas a mayor presión interna. Las cargas introducidas en este recipiente fueron: 60,30 % de materia orgánica vegetal, 39,20 % de estiércol de vacuno y 0,50 % de urea. El cilindro número 5 alcanza 14 PSI, y corresponde a una composición de 70,22 % de vegetal, 29,08% de estiércol de equino y 0,70% de urea, los cilindros 8 y 10 alcanzan 11 PSI respectivamente. A continuación, se puede observar el incremento de presión en los cilindros considerados como los de mayor producción energética.

Tabla 7.1 Datos de presión de 4 cilindros más representativos

ORDEN	CILINDRO 3	CILINDRO 5	CILINDRO 8	CILINDRO 10
1	3	2	2	0
2	2	1	1	0
3	2	1,1	1	0
4	2,1	1,1	0,9	0
5	3	1,1	1,5	0
6	3	2	1,8	0
7	3,1	2	1,8	0
8	3	2	1,8	0
9	4	3	2	0
10	6	4,8	2,2	1
11	8	7	3	2
12	11	8,5	3,1	3
13	14	10,5	8,5	9
14	15,5	12	9,5	10,5
15	17	13	10	10,5
16	18	14	11	11

Es necesario tomar en cuenta que con el biogás producido en estos cilindros, se realizaron las pruebas de combustión, con el propósito de determinar si la llama generada sería oxidante o carburante, la misma que se puede identificar por medio de la coloración de la llama, así se tiene que la llama carburante es de color rojizo y amarillento, no se puede identificar las zonas de la llama en vista de que arde en forma irregular. En cuanto a la llama oxidante se puede observar que presenta una forma geométrica muy bien definida, es decir se puede identificar el dardo penacho y la zona de reducción, con temperaturas de llama que pueden variar desde 1200 °C hasta 2800 °C, si se podría quemar el metano con comburente que puede ser el Oxígeno.

A fin de realizar una exposición más detallada de los resultados obtenidos, se procede a utilizar herramientas estadísticas, que consiste en lo siguiente:

- Diagramas circulares
- Diagramas de dispersión
- Diagrama de barras

Los cuales representan instrumentos válidos para determinar porcentajes, valores de coordenadas, tendencia, dispersión de datos entre otros aspectos.

RECIPIENTE	CILINDRO 3	CILINDRO 5	CILINDRO 8	CILINDRO 10
PRESION(PSI)	18,0	14,0	11,0	11,0

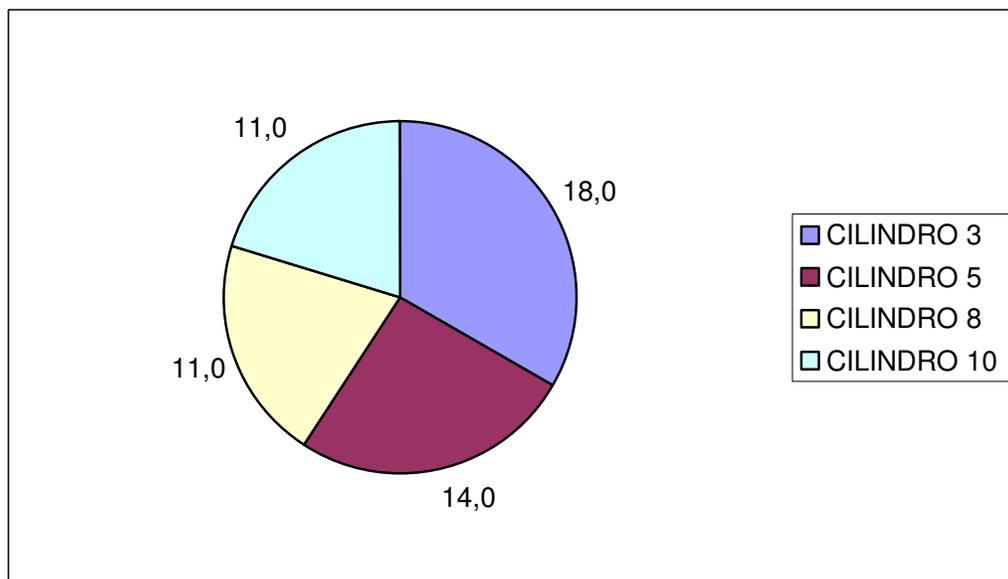


Figura 7.1 Diagrama indicador de presión interna

Haciendo referencia a la figura 7.1 se indica que el cilindro N° 3 que contiene 60,30% de harina vegetal, 39,20 % de estiércol, 0,5% tiene un incremento de presión mayor que los otros recipientes, por lo que se puede afirmar que hay una mejor generación de biogás en su interior, dando por consiguiente un mayor rendimiento energético en la combustión del metano, al decaer la presión, el tamaño de llama disminuye notablemente, los cilindros 8 y 10 con mayor proporción de biomasa residual tienen menor presión interna.

7.3.2 Diagrama de dispersión

Una forma de interpretar la variación de las cantidades de presión interna, consiste en representarlos en los diagramas de dispersión de se observan a continuación.

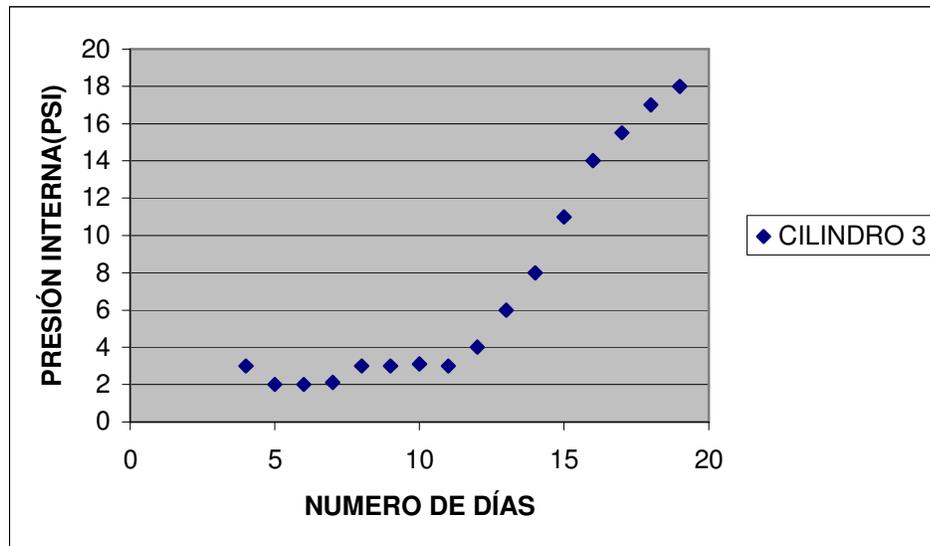


Figura 7.2 Datos de presión interna del recipiente 3

Con respecto al diagrama de dispersión, representado en la figura 7.2 se indica que la presión interna del recipiente número 3, cargado con aproximadamente el 60% de harina vegetal, tiene un incremento de presión a partir del día 11, es decir las condiciones de fermentación anaeróbica son óptimas en vista de que existe una mayor producción de biogás, para que dé como resultado un incremento continuo de la presión.

Entre el 4º y 11º día de medición, se observa que existe una escasa manifestación de generación de biogás, por lo que se podría pensar que las cepas bacterianas están con crecimiento lineal antes que exponencial, o pueden estar adormecidas por las condiciones interiores del recipiente, tales como la temperatura del sustrato, composición de la mezcla, tamaño de la biomasa, PH, entre otras variables que pueden afectar el normal desempeño de la digestión anaeróbica.

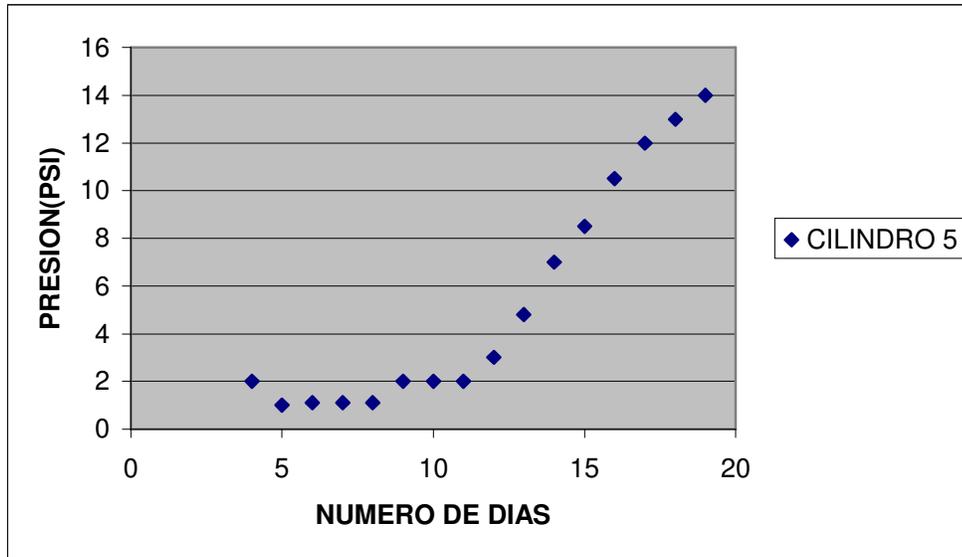


Figura 7.3 Datos de presión interna del recipiente 5

El cilindro N° 5 que tiene una carga compuesta por harina vegetal y equino en una relación 70/30 aproximadamente, alcanza en el día 16 un valor de presión de 14 PSI. En el tramo inferior, se puede observar que durante el 4º y 11º día, existe una disminución del valor de presión y posteriormente un pequeña recuperación, esto resulta porque la válvula de salida de gas o la tapa del recipiente no estuvieron debidamente sellados y que luego por el efecto del mismo gas o por la presencia de corrosión se pudo sellar completamente.

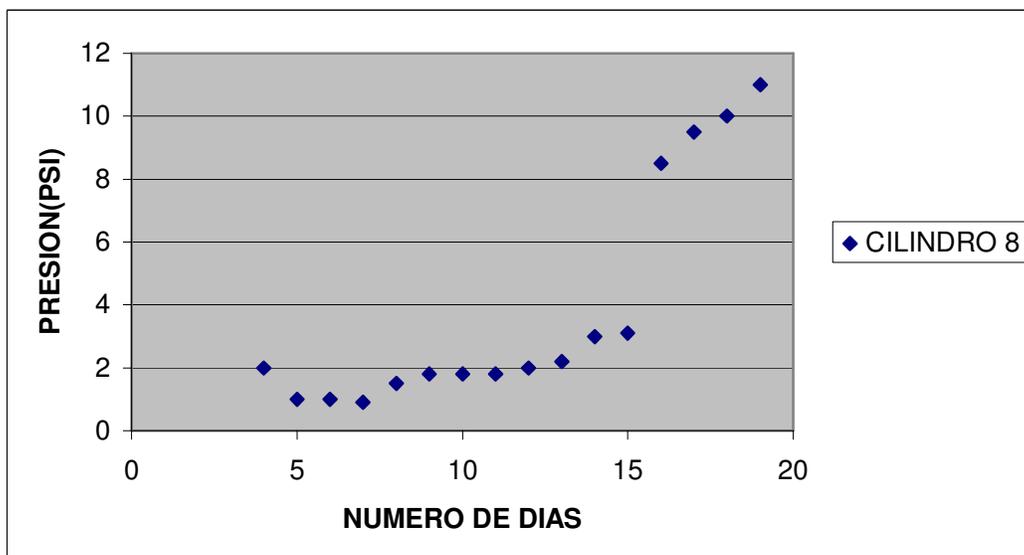


Figura 7.4 Datos de presión del recipiente 8

Analizando los datos de presión, registrados en la figura anterior, se observa que desde el 4º al 15º día de medición, en la primera etapa hay un decaimiento del valor, a continuación empieza a subir la presión, para luego dar un salto que sobrepasa los 8 PSI. Esta anomalía pudo haber ocurrido por fallas en la toma de datos o por que la fermentación tuvo las condiciones óptimas a partir del 15º día, o por la presencia de una capa endurecida de sustrato que impedía la liberación del gas o porque las fuerzas ascensionales del fenómeno de la convección natural no fueron lo suficientemente grandes como para vencer el peso de las partículas y las fuerzas viscosas.

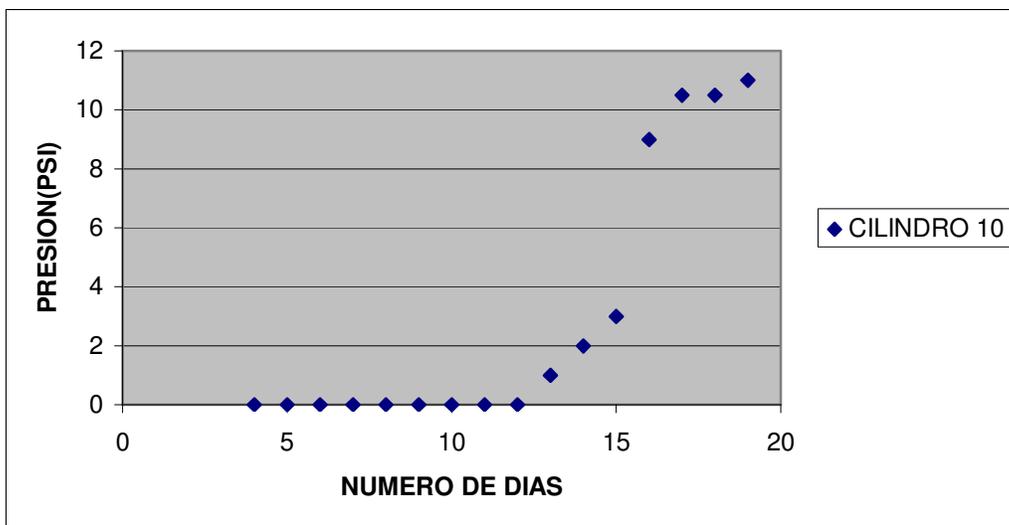


Figura 7.5 Datos de presión interna del recipiente 10

En el cilindro número 10, cargado con 78,74% de hierba seca, 21 % de estiércol y 0,26 % de urea, se puede observar que en los días 4º al 11º no existe la presencia de un incremento de presión interna, esto debe haber ocurrido por la poca cantidad de bacterias existentes en el agua o el estiércol, dada las proporciones de carga con mayor incidencia de harina vegetal. A partir del 15º día se produce un salto debido al incremento de actividad bacteriana, que ocasiona una mayor producción de biogás.

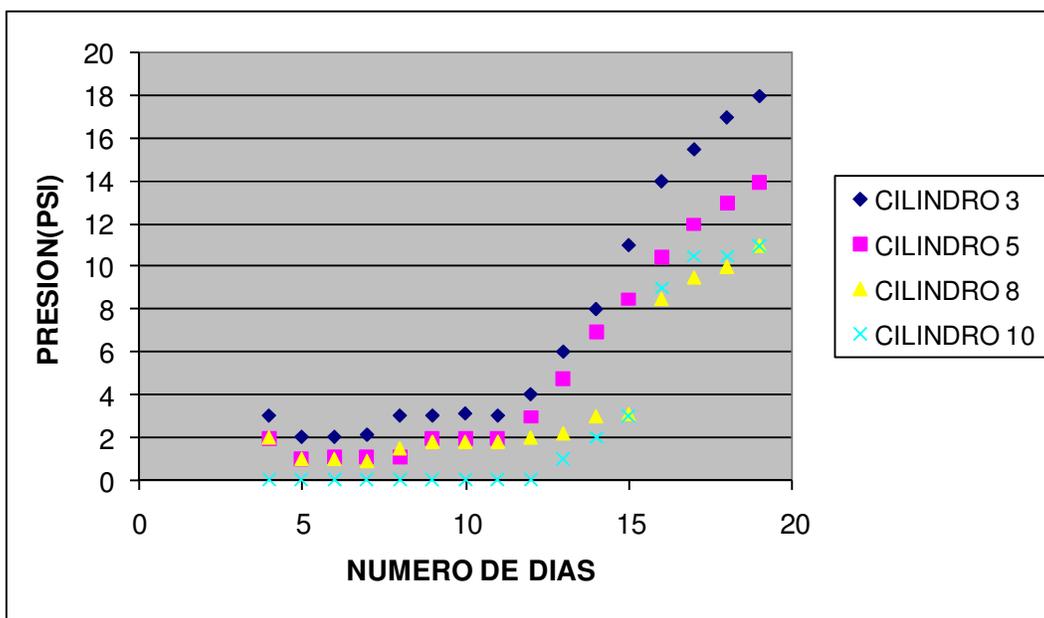


Figura 7.6 Variación de presión en los recipientes más representativos

Para tener una clara concepción sobre el incremento de presión ocurrido en los recipientes más representativos, se realiza un diagrama de dispersión en conjunto representado en la figura 7.6 donde la presión interna del cilindro 3 alcanza 10 PSI, el cilindro 5 los 14 PSI, y los cilindros 8 y 10 los 11 PSI respectivamente. Analizando este gráfico se puede observar que la mezcla de vegetal y vacuno en proporción 60/40 genera mayor presión interna en un mismo tiempo, eso no significa que tenga mayor proporción de CH₄, que las restantes, al contrario puede estar produciéndose continuamente mayor concentración de CO₂, tal como pudo verificarse con el recipiente 5 que luego de alcanzar los 55 PSI tenía 75,03 % de CO₂, 23,80% de CH₄, H₂O el 1.11 %, Nitrógeno el 0.06%. De acuerdo con los análisis de laboratorio de cromatografía de gases.

7.3.3 Diagrama de barras

Para una mejor interpretación de los datos de presión interna, se utiliza el diagrama de barras representado en la siguiente figura 7.7

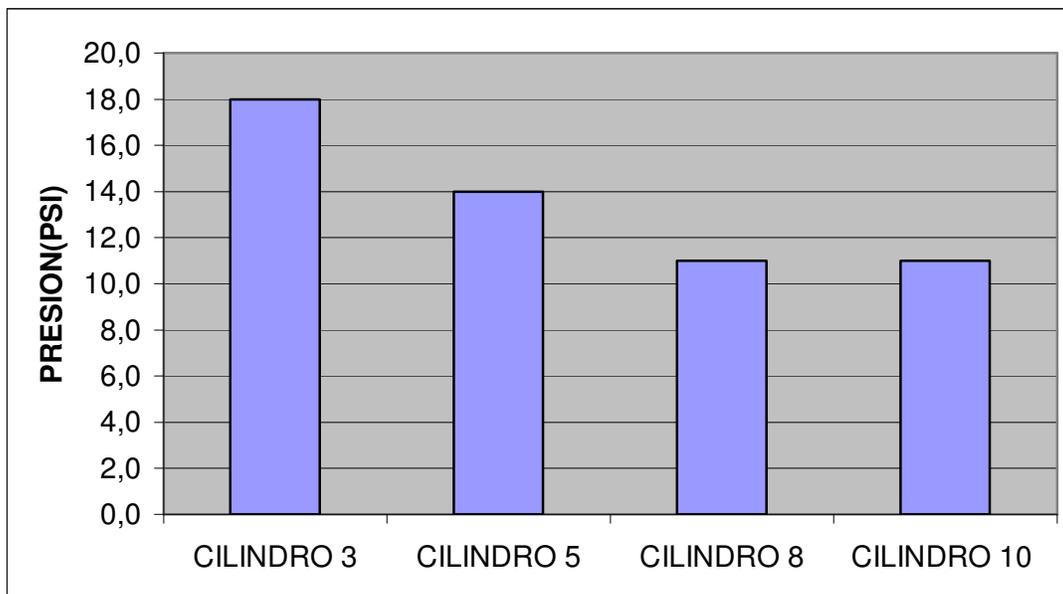


Figura 7.7 Diagrama barras sobre presiones internas de los recipientes

En el diagrama de barras de la figura anterior se puede observar con mejor claridad la presión alcanzada por el recipiente 3, el cilindro 5, en ese lapso de tiempo alcanzó los 14 PSI, y posteriormente en el momento de la realización del análisis de gases se midió una presión de 55 PSI.

7.4 Selección de parámetros para el proceso de producción de Biogás

7.4.1 Parámetros de funcionamiento

- Presión de 0.7 a 1.4 Kg/cm²,
- Temperatura del sustrato 38 °C
- Tiempo medio de generación de metano, 12 a 14 días
- PH de 6.5 a 6.7

7.4.2 Consideraciones del método

El método utilizado en este proyecto comprende la preparación de la materia vegetal, así como la composición de las mezclas, la carga debidamente dosificada, adición de urea para mejorar la relación carbono nitrógeno, es decir; se procede con

un nivel de investigación más rígido, con respecto al primer estudio, realizado con cargas que tenían mayor incidencia de desechos orgánicos de animales y además no se ponía interés en la preparación del tamaño de los desperdicios.

7.4.3 Mezcla óptima y composición

- Tipo de mezcla representativa: vegetal 70,22%, estiércol de equino 29,08%, urea 0,7%
- Relación C/N de 25/1 a 30/1
- Cantidad de agua añadida 50% con respecto al peso seco de materia orgánica
- Tamaño del desecho vegetal tamiz 80

7.4.4 Características de los procesos de fermentación

En la tabla descrita a continuación, se observan las diferencias establecidas entre un proceso tradicional de producción de biogás, procesos 1, cargado con mayor porcentaje de estiércol y el proceso 2 que tiene mayor incidencia de harina vegetal.

Tabla 7.2 Cuadro comparativo entre las cargas de mayor incidencia

ORDEN	PROCESO 1	PROCESO 2
1	Menor incremento de presión	Rápido incremento de presión
2	Demora en la fermentación	Fermentación más rápida
3	Menor calidad de llama	Llama de mejor calidad
4	Contaminantes en la combustión: Hollín, combustibles no quemados	Menor incidencia de contaminantes: Llama oxidante
5	Llama de color amarillento	Llama azul
6	Difícil abastecimiento de materia prima: Estiércol	Facilidad para recolección de desechos vegetales
7	Menor costo de preparación	Mayor costo de preparación
8	Menor crecimiento bacteriano	Mejor crecimiento bacteriano
9	Mezclas de tipo empírico	Mejor dosificación de materia prima
10	Menor producción de biogás	Mejor producción de biogás

7.4.5 FODA

Tabla 7.3 Análisis FODA para el nuevo proceso de obtención de biogás

	CARACTERÍSTICAS
Fortalezas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tiempos reducidos para la obtención de biogás, aproximadamente a partir del 12^º día de carga 2. Abundancia de biomasa residual 3. Mejor combustión del biogás obtenido 4. Llama oxidante con alto desprendimiento energético 5. Menor emisión de contaminantes 6. Obtener subproductos para mejorar la calidad de suelos agrícolas 7. Aprovecha energías alternativas: solar, biomasa
Oportunidades	<ol style="list-style-type: none"> 1. Combustibles convencionales causan impacto ambiental 2. Para aplicación en zonas agrícolas que tengan deficiencia en abastecimiento energético 3. Gas de uso doméstico deficitario 4. Satisfacer los requerimientos emanados en el protocolo de KYOTO 5. Aprovechar de manera eficiente la biomasa residual que en la mayoría de casos se desperdicia. 6. Costo de abastecimiento de la energía
Debilidades	<ol style="list-style-type: none"> 1. No existe difusión adecuada sobre las ventajas de utilizar biogás y BIOL 2. Aplicaciones en gran escala afectarían a las áreas protegidas de bosques 3. Generación de olores e impacto ambiental en su proceso de producción
Amenazas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metano es uno de los gases de efecto invernadero 2. Costo real de procesamiento de la materia prima vegetal 3. Poca concientización en el uso de energías renovables 4. Los combustibles fósiles inundan el mercado energético

7.4.6 Resultados obtenidos y discusión

En el Anexo 7.3 se encuentran los resultados del reporte por cromatografía de gases de los recipientes M5 de 55 PSI y M4 de 45 PSI.

De acuerdo con los datos y resultados obtenidos en esta investigación se puede afirmar que existe una mejora sustancial en los tiempos de obtención del gas, así como también en la calidad de llama obtenida.

CAPITULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

1. Los parámetros de funcionamiento para una eficiente producción de biogás son: Presión interna de 0.7 a 1.4 Kg/cm², Temperatura del sustrato de 35 a 38 °C, Tiempo medio de generación de metano, 12 a 14 días, PH de 6.5 a 6.7
2. Se partió de un estudio preliminar donde se realizaron cargas con mayor proporción de estiércol de vacuno, alrededor del 60% que produjo una cantidad de biogás con un contenido de CH₄ del 24%, CO₂ alrededor del 76% luego de 60 días de haber realizado las cargas, la llama disipada en la combustión es amarillenta y de bajo rendimiento calorífico.
3. Las mezclas más representativas compuestas por vegetal/estiércol, están entre el 60% al 70%, y se pueden utilizar vacuno, equino o gallinaza, complementada con una proporción inferior al 1% de urea, en lo que tiene que ver con la relación C/N entre 25/1 a 30/1, la cantidad de agua añadida

es del 50% con respecto al peso de la materia orgánica, para definir el tamaño de la harina vegetal se toma como referencia el tamiz N° 80.

4. Con el propósito de mejorar el modelo tradicional de obtención de biogás, se utilizaron los siguientes procedimientos: cargas orgánicas con mayor contenido de desechos vegetales, materia prima debidamente preparada, secada y molida, relación carbono nitrógeno adecuada, mejor dosificación de mezclas, selección adecuada de la materia prima.

5. En el análisis de gases se indican los siguientes valores: Presión del biogás 55 PSI, composición 23,80% de CH₄, 75,03% CO₂, 1.11 % de agua, la llama disipada en la combustión es oxidante de color azul, tiene un desprendimiento energético superior a la llama del primer estudio, la combustión es completa y no existen gases no quemados ni tampoco olores característicos del biogás.

6. Tomando en cuenta los resultados alcanzados en este trabajo y de acuerdo con la tabla 7.3, se puede indicar que el proceso de fermentación anaeróbica utilizando mezclas con mayor incidencia de desechos vegetales pulverizados, permite obtener biogás en menor tiempo que el método tradicional y además se logra conseguir una llama de combustión casi similar a la llama oxiacetilénica, la misma que arde a 3200°C, creando muchas posibilidades para aplicaciones en el ámbito agrícola e industrial.

8.2 Recomendaciones

- Como un proyecto complementario a este trabajo se puede indicar la necesidad de analizar los tipos de bacterias fermentativas que mejor se adapten al proceso de degradación de los desechos vegetales, así como también la clasificación de la materia orgánica que permita los mejores rendimientos en la obtención del CH₄.
- Analizar las posibilidades de utilización del CO₂ que se presenta en mayor porcentaje en este proceso.
- Desarrollar nuevos estudios relacionados con la generación eficiente de biogás, utilizando en las mezclas determinados tipos de catalizadores que aceleren el proceso de fermentación anaeróbica, y que permitan aplicarse en procesos continuos de aprovechamiento de la energía.
- Difundir el presente trabajo, en los sectores productivos, especialmente a los que se dedican a labores agrícolas, que disponen de los recursos vegetales residuales, a los cuales se les daría un valor agregado transformándolo en biogás para aplicaciones de cocción, calentamiento de leche, secado de frutas o granos, obtención de agua caliente sanitaria.
- Fortalecer el área de investigación científica y tecnológica para obtener combustibles alternativos basados en la conversión energética de la biomasa, utilizando procesos eficientes y compatibles con nuestro entorno natural.
- Aprovechar con mayor amplitud y eficacia, los recursos energéticos renovables, con el propósito de reducir el uso indiscriminado de los combustibles fósiles, que son deficitarios, y causan el efecto invernadero.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Bent, Sorensen, Renewable Energy, its physics, engineering use environmental impacts, economic and planning aspects, second edition, academic press, 2000, London
2. Ortega, Mario, Energías Renovables, Editorial Paraninfo, 2da. Edición, Madrid España, 2000
3. Hollands, K.G.T. et al., Correlation Equations for Free Convection Heat Transfer in horizontal Layers of air and Water, Int. J. Heat and Mass Transfer 18, 879(1975)
4. Curso de Cálculo, Diseño, Montaje y Mantenimiento de Instalaciones de Energía Solar Térmica
5. Colmenar, Castro, Energía Solar Térmica de Baja Temperatura, Progensa, Sevilla, 2000
6. Castillo, Vega, Cárdenas, La Bioconversión de la energía, ediciones pirámide, Madrid, 1983
7. Michelena, Manuel, los Biocombustibles, ediciones mundi prensa, Madrid, 2002
8. Itintec, Como Construir un Biodigestor, Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas, Lima, 1983
9. Mills, A., Transferencia de calor, Universidad de California, Madrid, 1995
10. Incropera, Fundamentals of heat and mass transfer, Fourth edition, Wiley, 1996

ANEXOS 2

DETERMINACION DE LAS ESPECIFICACIONES FUNCIONALES DEL BIORREACTOR

ANEXOS	CONTENIDO
2.1	Informe de resultados gases de fermentación anaeróbica
2.2	Energía promedio anual disponible en Sangolquí.
2.3	Temperatura ambiente promedio anual
2.4	Temperatura promedio anual del agua de la red.
2.5	Porcentaje de la demanda de A.C.S. que cubre el sol

Anexo 2.1 Informe de resultados de gases de fermentación anaeróbica
obtenidos con cargas de mayor incidencia de estiércol

Fecha de Análisis: Tanque Nº 4 2005 – 12 – 21

Biodigestor 2005 – 12 – 20

Tipo de muestreo: gases de descomposición anaeróbica.

Referencia interna a la orden interna de trabajo: ALQ – 076 – 05

Localización: Sangolquí

1.- Resultados

Tanque Nº 4

Equipo %

Medición 1		
CH4	65,8	54,34
CO2	53,3	44,01

Medición 2		
CH4	63,7	53,8
CO2	52,7	44,51

Medición 3		
CH4	61,5	53,25
CO2	52	45,02

Promedio		
CH4	63,66	53,8
CO2	52,66	44,51
H2S	<2	<2
O2	0	0

Biodigestor

Equipo %

Medición 1		
CH4	24,9	21,71
CO2	87,8	76,55

Medición 2		
CH4	23,9	21,21
CO2	86,8	77,02

Medición 3		
CH4	23,8	20,95
CO2	87,8	77,29

Promedio		
CH4	24,2	21,29
CO2	87,47	76,95
H2S	<2	<2
O2	0	0

2.- Responsables

Análisis: Ing. Andrés Tobar

Nota:

Los análisis de biogás fueron realizados con el siguiente equipo:

GEOTECHNICAL INSTRUMENTS (UK) Ltd.

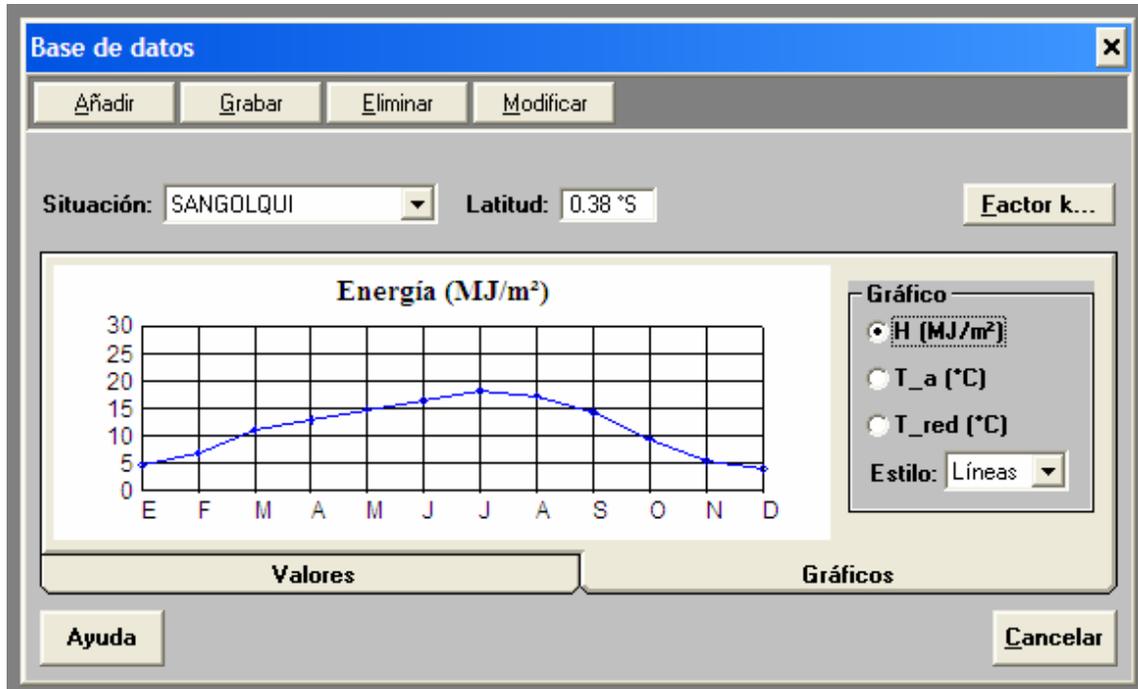
Queenway, Leamington Spa, CV31 -JR

LANDFILL GAS and BIOGAS ANALYSER MODEL GA94A

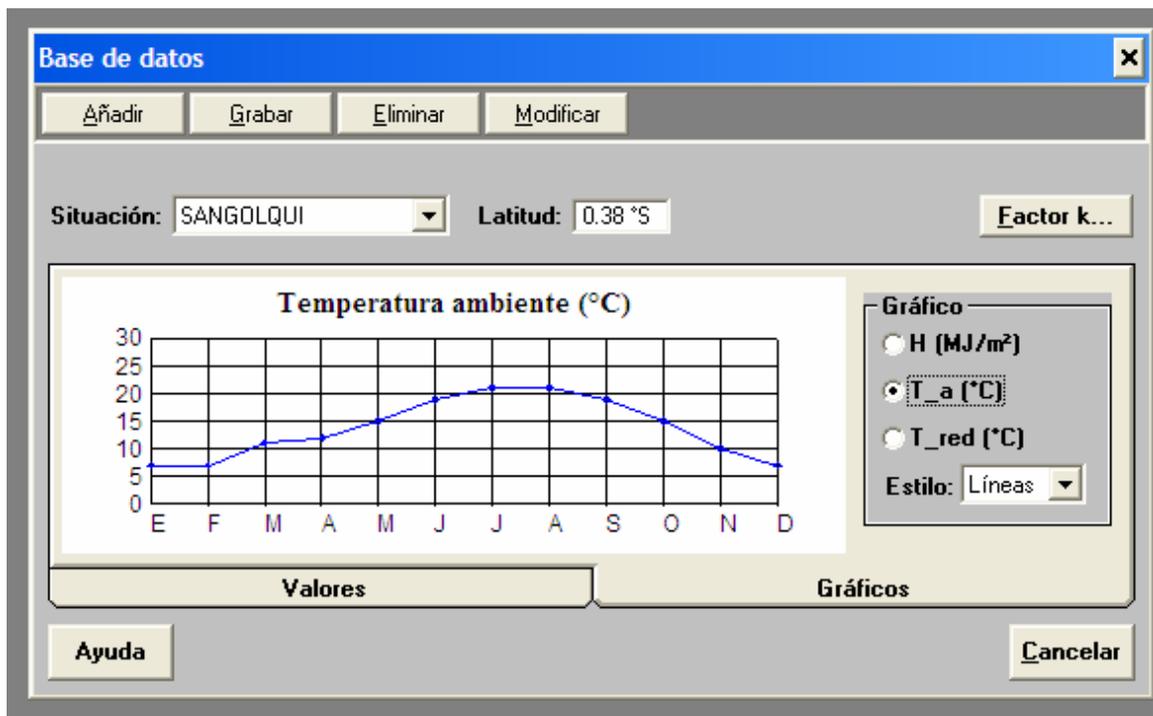
Margen de error: 1.5%

Modelo utilizado por la empresa G.A.S GmbH en más de 400 proyectos relacionados a la utilización de biogás.

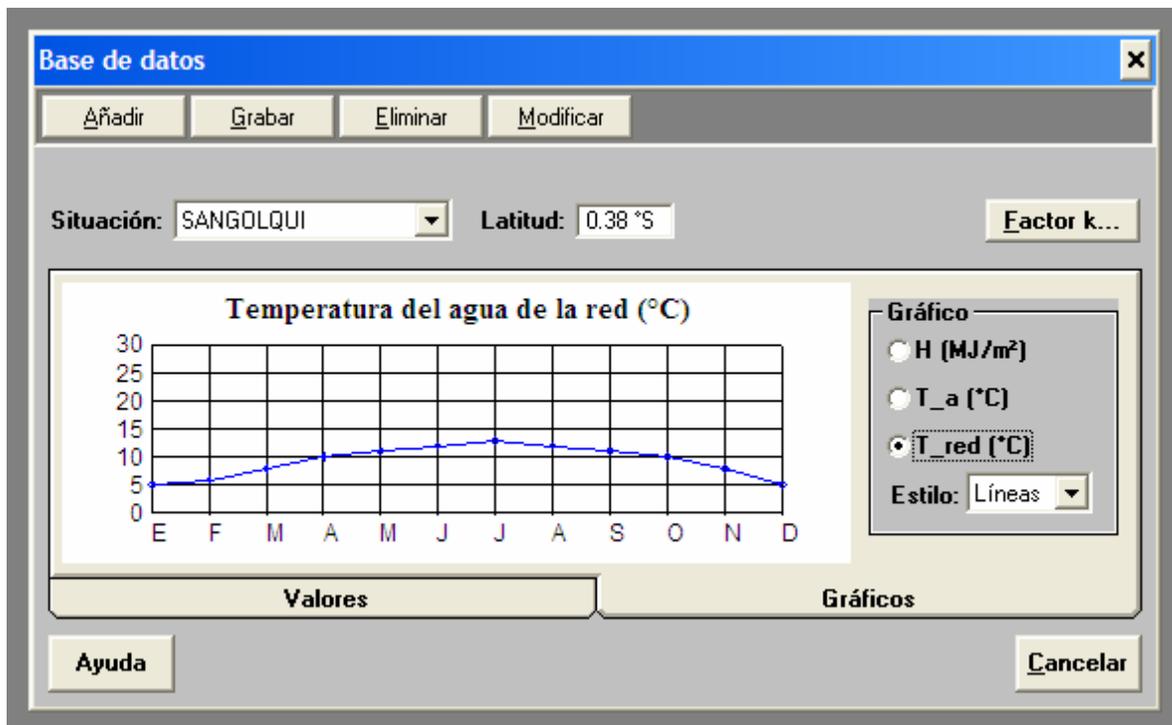
Anexo 2.2 Energía solar promedio anual disponible en Sangolquí.



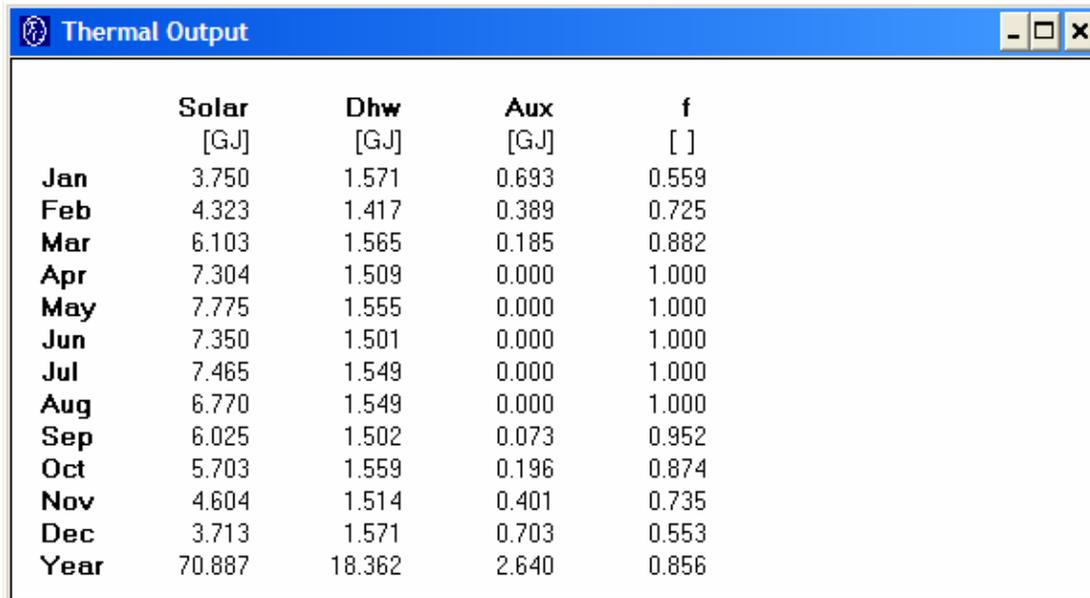
Anexo 2.3 Temperatura ambiente promedio anual



Anexo 2.4 Temperatura promedio anual del agua de la red



Anexo 2.5 Porcentaje de la demanda de A.C.S que cubre el sol



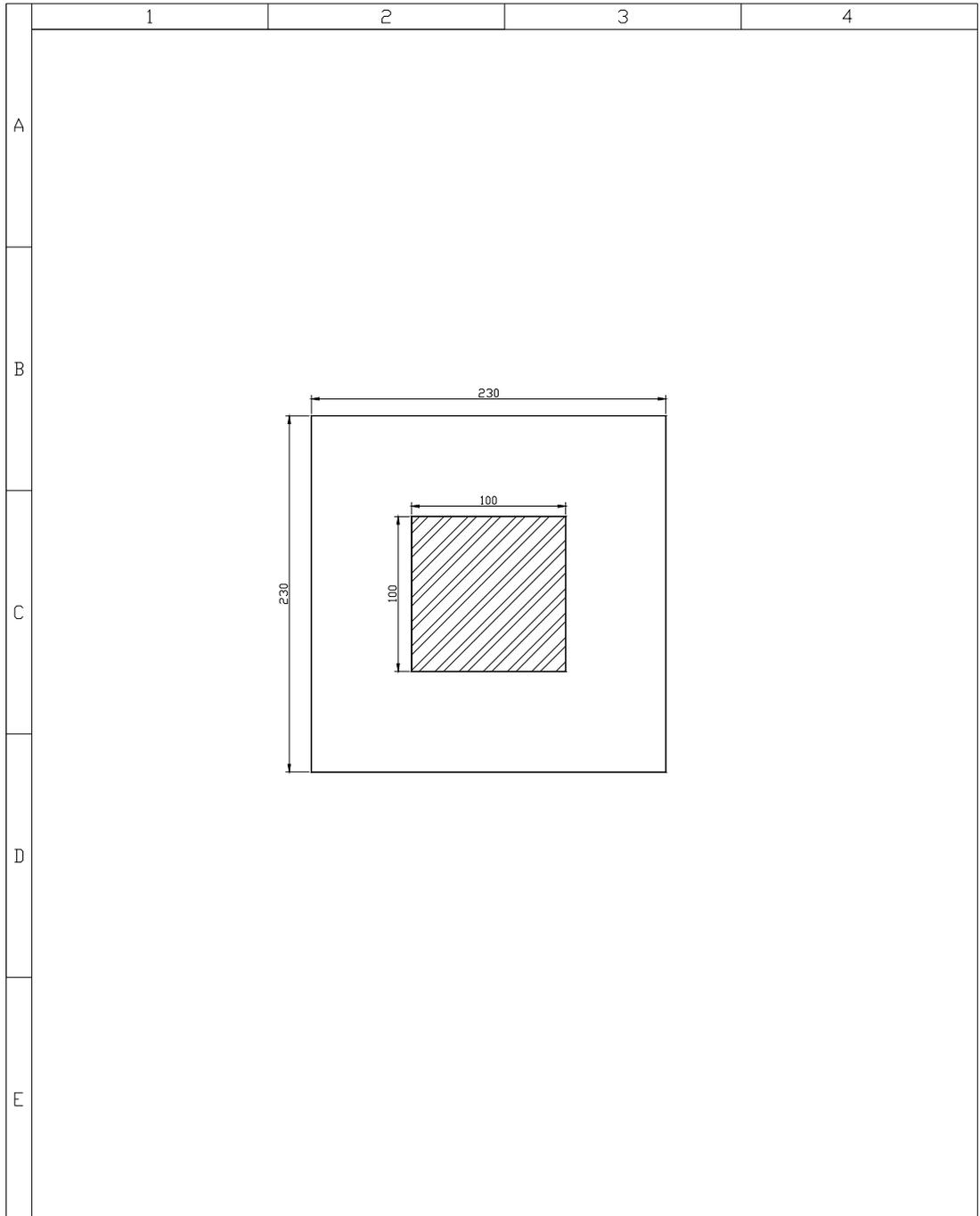
	Solar [GJ]	Dhw [GJ]	Aux [GJ]	f []
Jan	3.750	1.571	0.693	0.559
Feb	4.323	1.417	0.389	0.725
Mar	6.103	1.565	0.185	0.882
Apr	7.304	1.509	0.000	1.000
May	7.775	1.555	0.000	1.000
Jun	7.350	1.501	0.000	1.000
Jul	7.465	1.549	0.000	1.000
Aug	6.770	1.549	0.000	1.000
Sep	6.025	1.502	0.073	0.952
Oct	5.703	1.559	0.196	0.874
Nov	4.604	1.514	0.401	0.735
Dec	3.713	1.571	0.703	0.553
Year	70.887	18.362	2.640	0.856

Fuente: Censolar, programa f-chart.

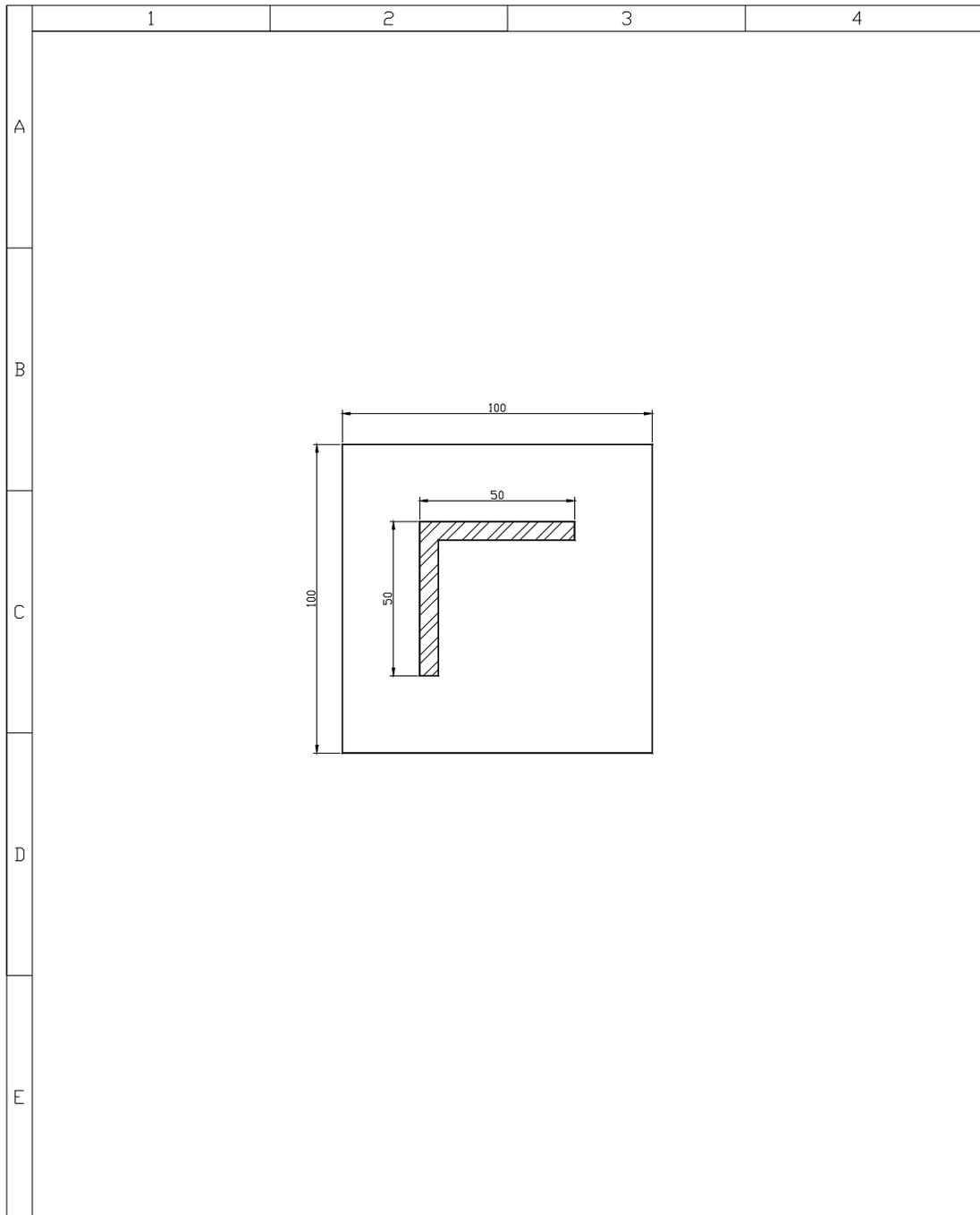
ANEXOS 3

PLANOS DE LA INSTALACION

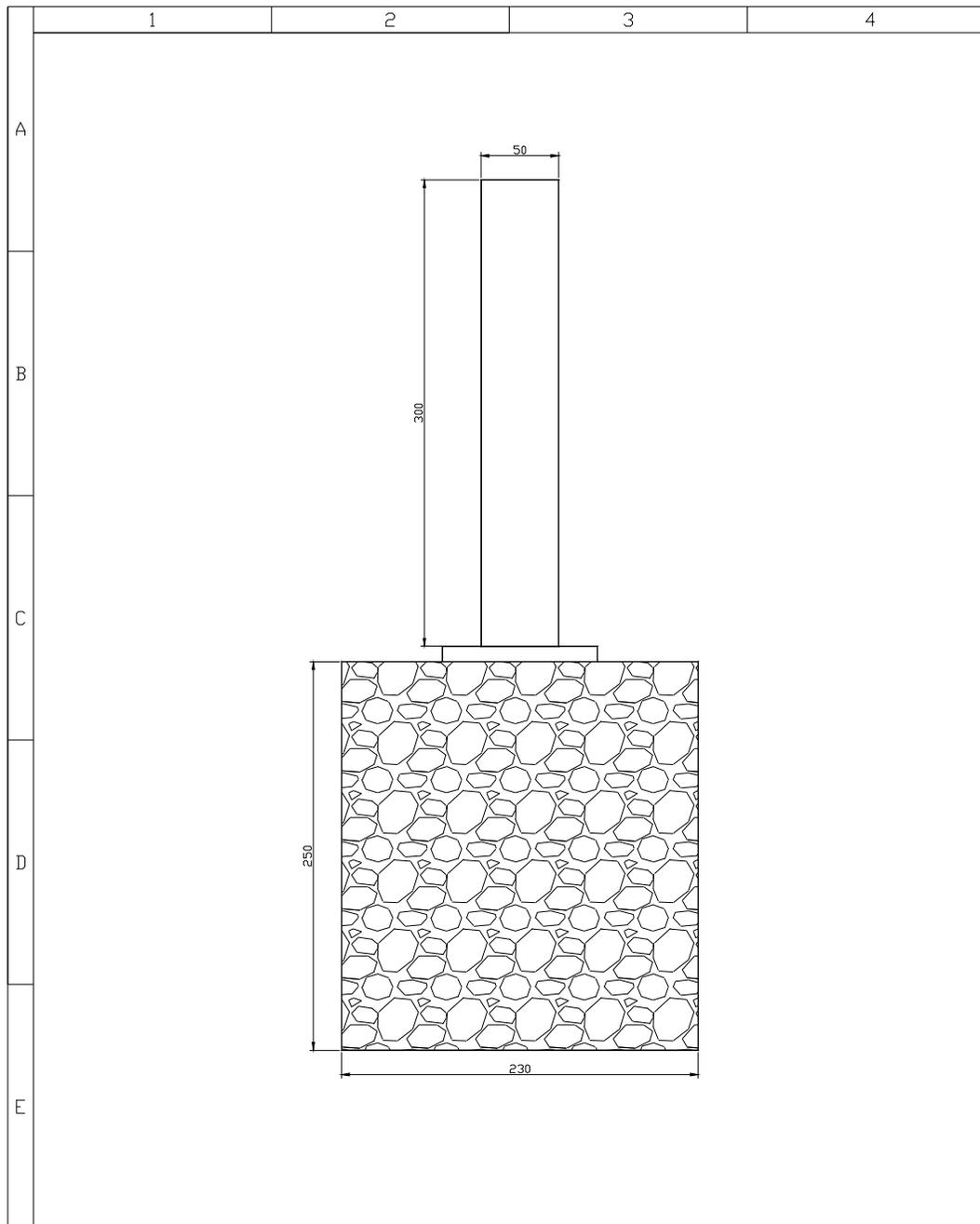
ANEXOS	CONTENIDO	CODIGO
3.1.	Zapata y plinto	CIM-01
3.2.	Zapata y base de columna	CIM-02
3.3.	Cimentación de hormigón y columna	CIM-03
3.4.	Bases del biorreactor	CIM-04
3.5.	Distribución en planta	CIM-05
3.6.	Acumulador	CIM-06
3.7.	Instalaciones de biogás	CIM-07



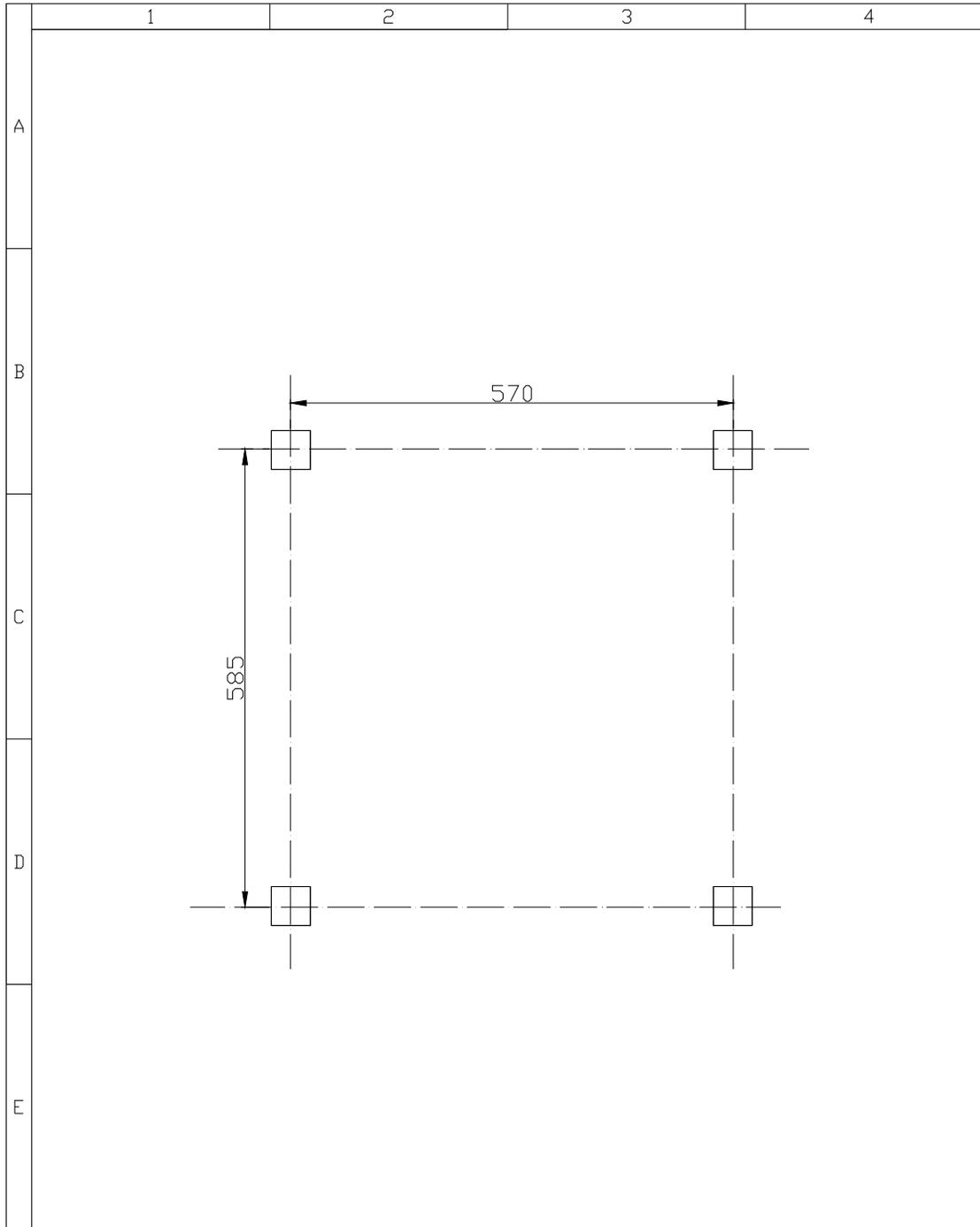
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIALES	CANTIDAD
Aprobado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		ACERO DE ESTRUCTURAL, HORMIGON	1
Revisado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		CONTIENE PLINTO DE HORMIGON	ESCALA INDICADA
Dibujado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
Proyectado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO CIM-01	
				SUSTITUYE A:	HOJA



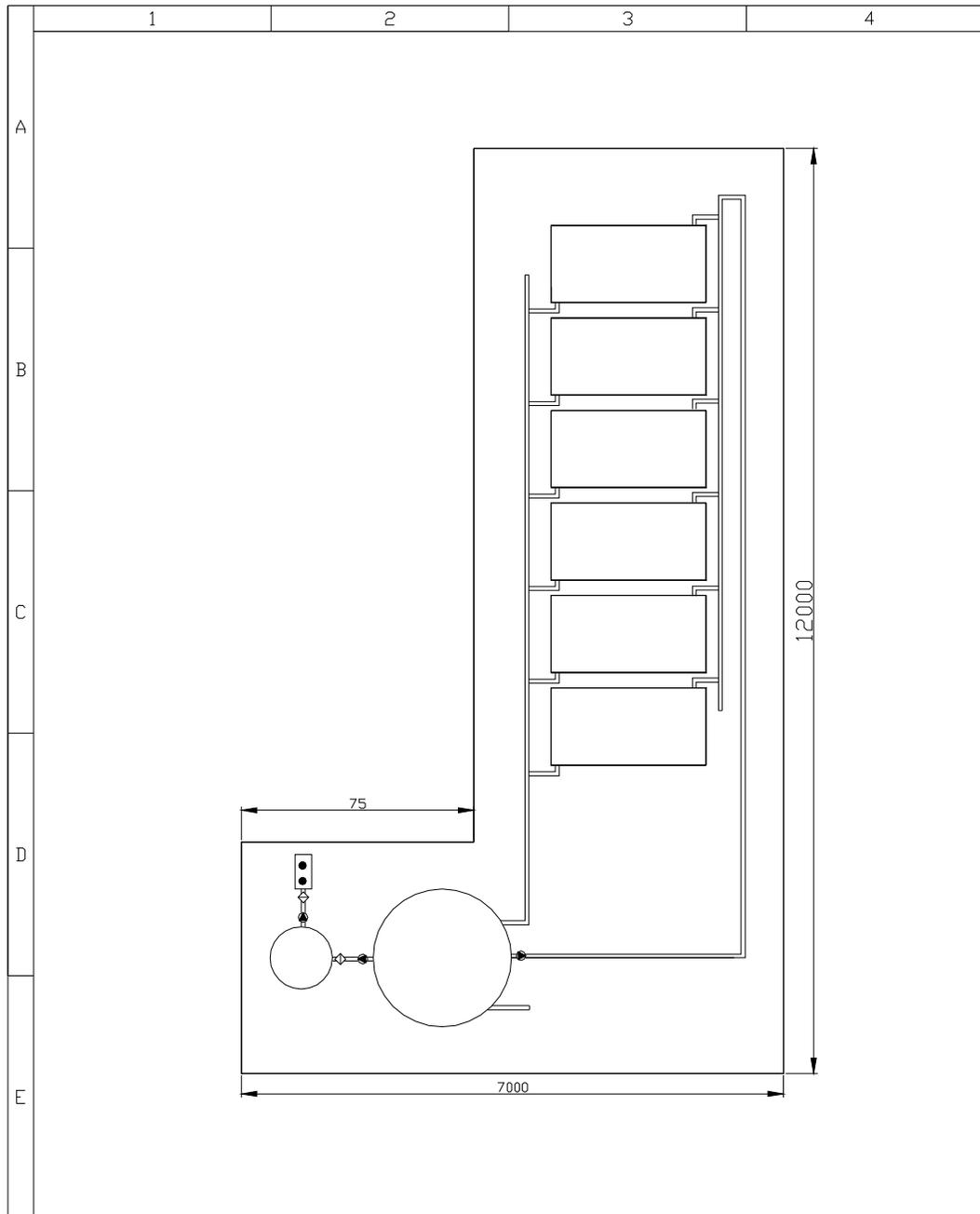
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIALES	CANTIDAD
Aprobado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		ACERO ESTRUCTURAL	1
Revisado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		CONTIENE BASE DE LA COLUMNA DE ACERO	ESCALA INDICADA
Dibujado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
Proyectado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO CIM-02	 HOJA
				SUSTITUYE A:	



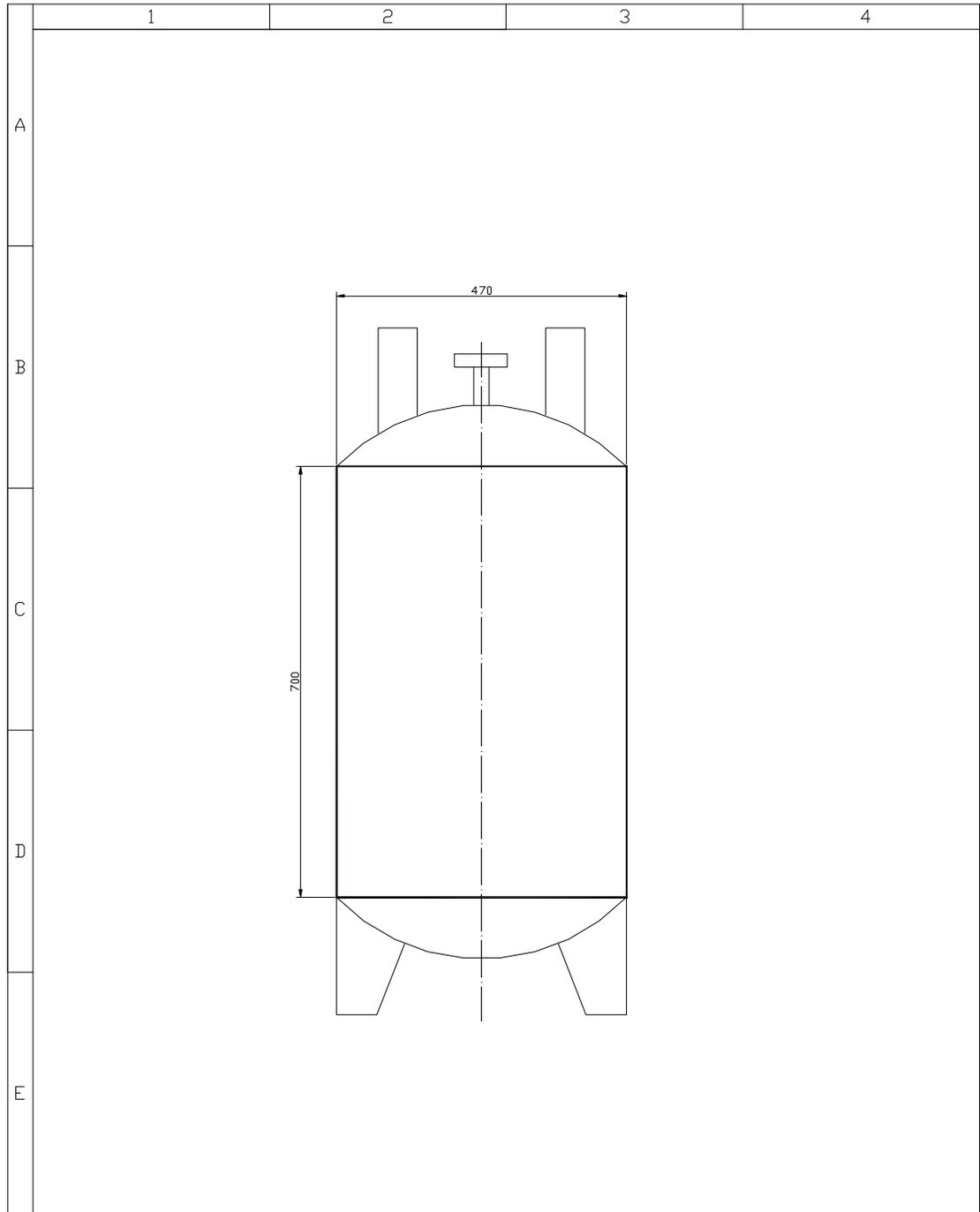
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIALES	CANTIDAD
Aprobado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		ACERO ESTRUCTURAL, HORMIGON	1
Revisado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		CONTIENE PLINTO Y ZAPATA DE ACERO	ESCALA INDICADA
Dibujado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
Proyectado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO	CIM-03
				SUSTITUYE A:	



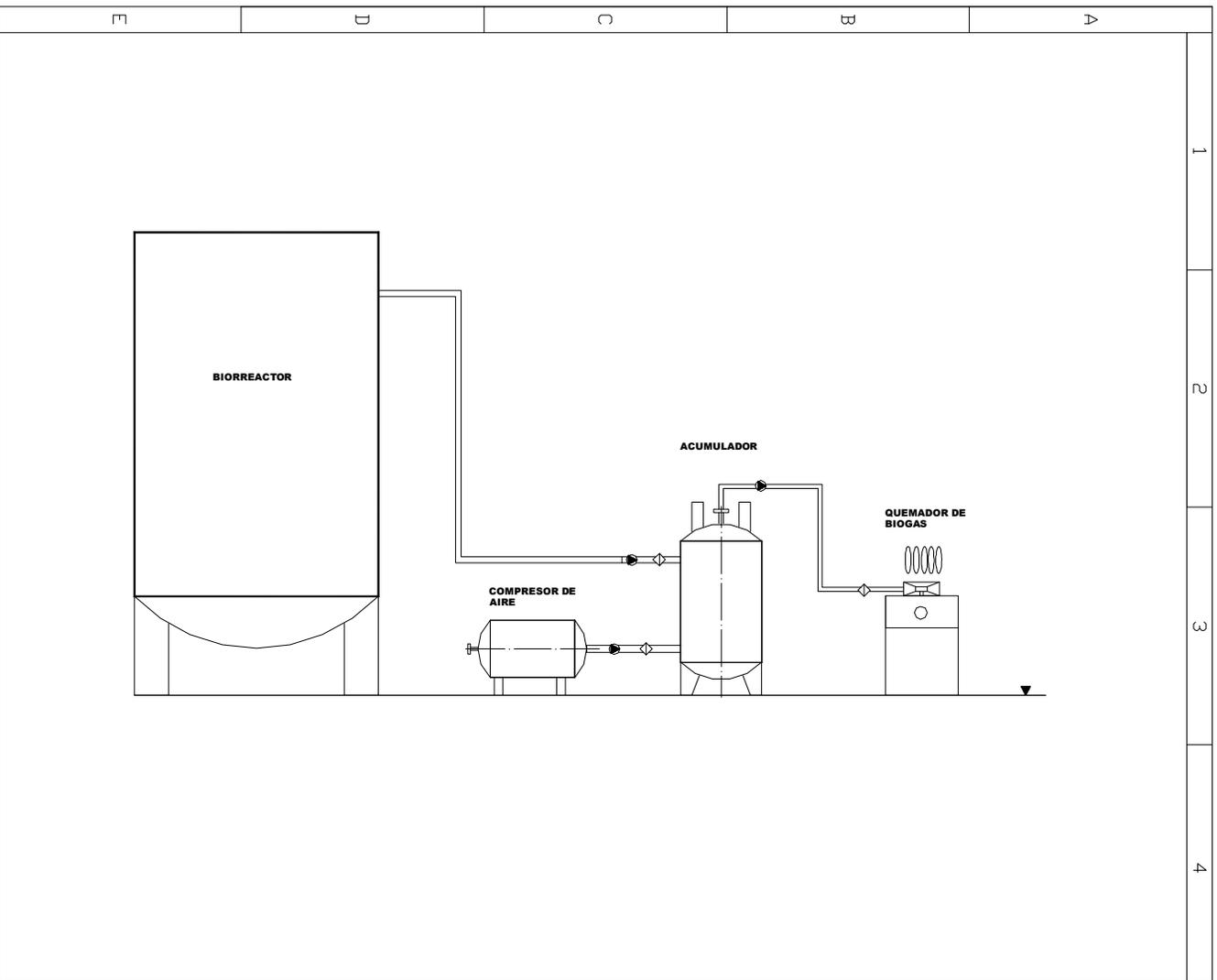
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIALES	CANTIDAD
Aprobado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		ACERO ESTRUCTURAL	1
Revisado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		CONTIENE DISTRIBUCION DE LAS ZAPATAS	ESCALA INDICADA
Dibujado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
Proyectado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO CIM-04	
				SUSTITUYE A:	HOJA



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIALES	CANTIDAD
Aprobado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		VARIOS MATERIALES	1
Revisado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		CONTIENE DISTRIBUCION EN PLANTA	ESCALA INDICADA
Dibujado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
Proyectado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA				CODIGO	CIM-05
				SUSTITUYE A:	
					HOJA



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIALES	CANTIDAD
Aprobado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		ACERO AL CARBONO	1
Revisado	2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		CONTIENE ACUMULADOR	ESCALA INDICADA
Dibujado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
Proyectado	2007-10-12	VACA SANTIAGO			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA					
				SUSTITUYE A:	



FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIALES	CANTIDAD
2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		VARIOS MATERIALES	1
2007-10-15	CARRERA/GUASUMBA		CONTIENE ESQUEMA DE LA INSTALACION DE BIOGAS	ESCALA INDICADA
2007-10-12	VACA SANTIAGO			
2007-10-12	VACA SANTIAGO			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO CARRERA DE INGENIERIA MECANICA			CODIGO CIM-07	 HDJA

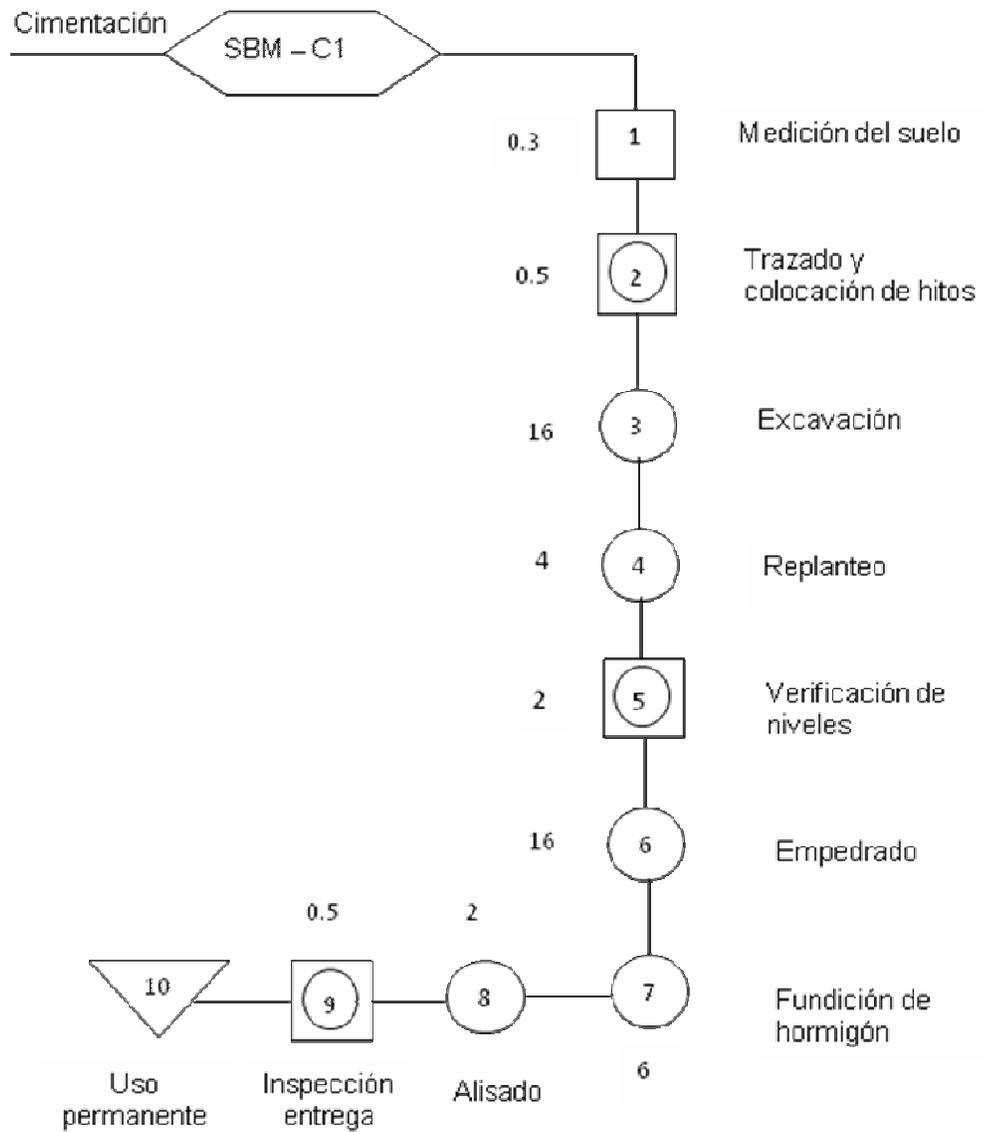
ANEXOS 4

DIAGRAMAS DE PROCESOS DE FABRICACION

ANEXOS	CONTENIDO
4.1	Diagrama de construcción de la cimentación
4.2	Fabricación de recipientes para experimentos
4.3	Fabricación del acumulador de biogás

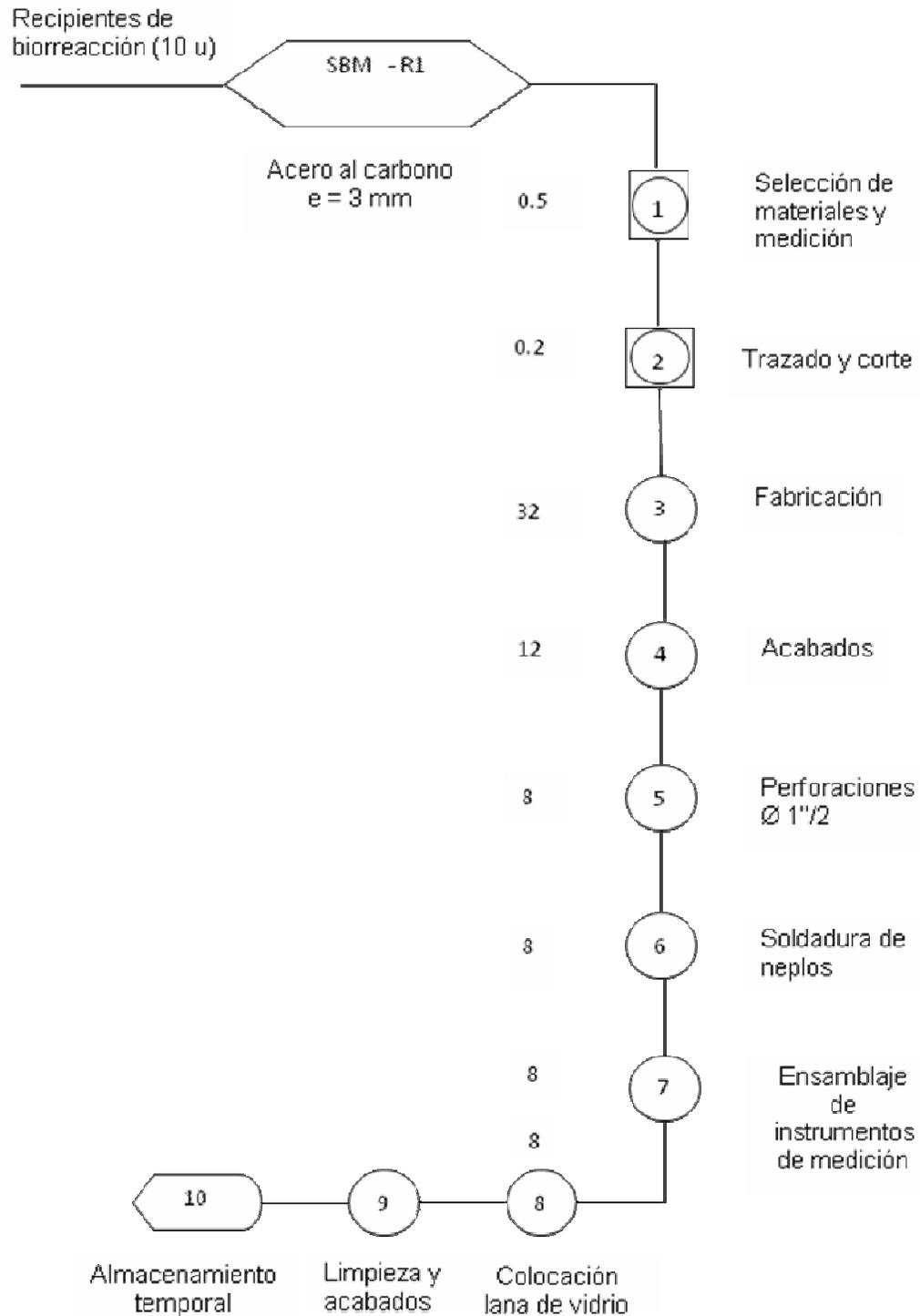
Anexo 5.1

Diagrama de construcción de la cimentación



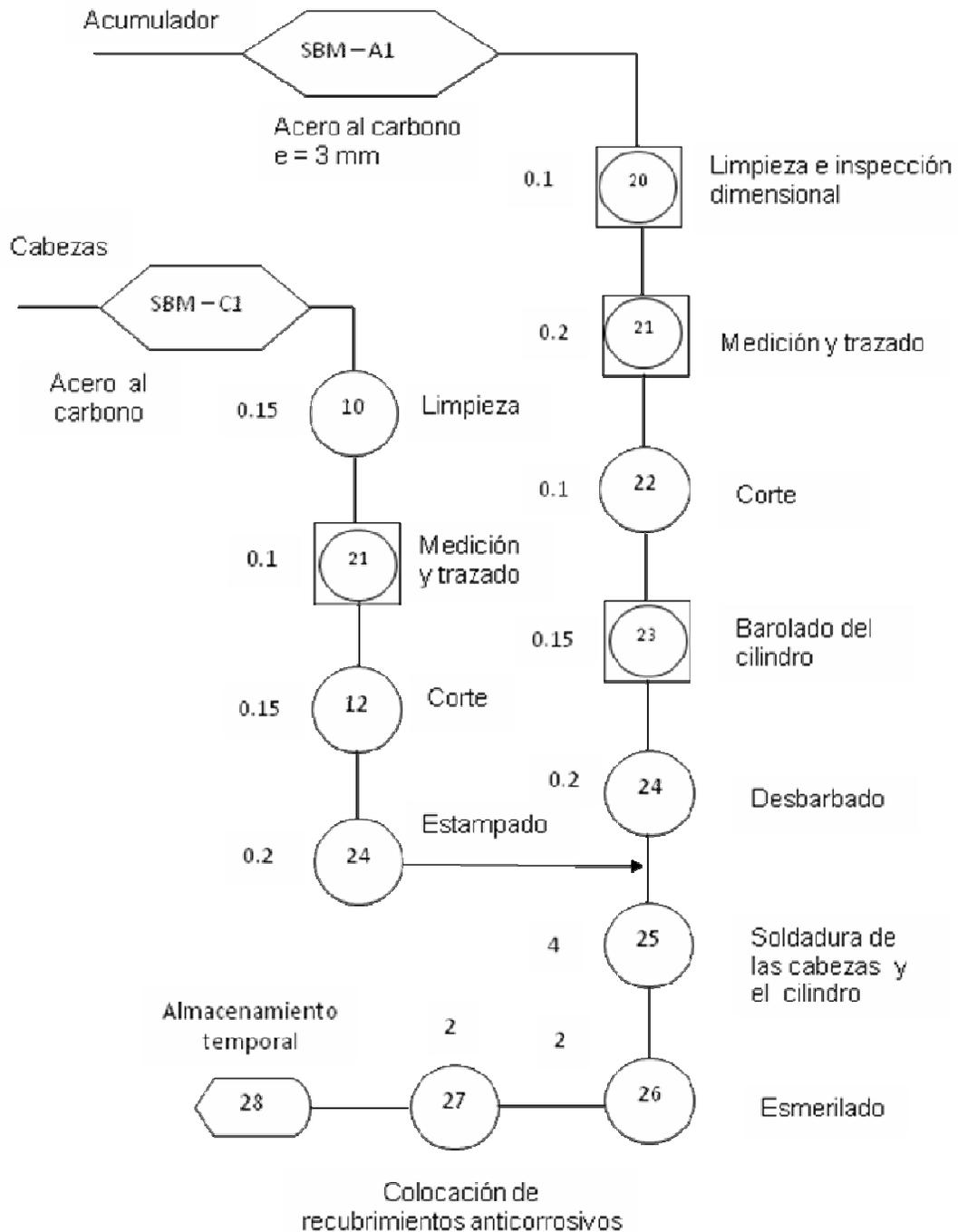
Anexo 5.2

Diagrama de fabricación de recipientes para experimentos



Anexo 5.3

Operaciones tecnológicas para la fabricación del acumulador de biogás



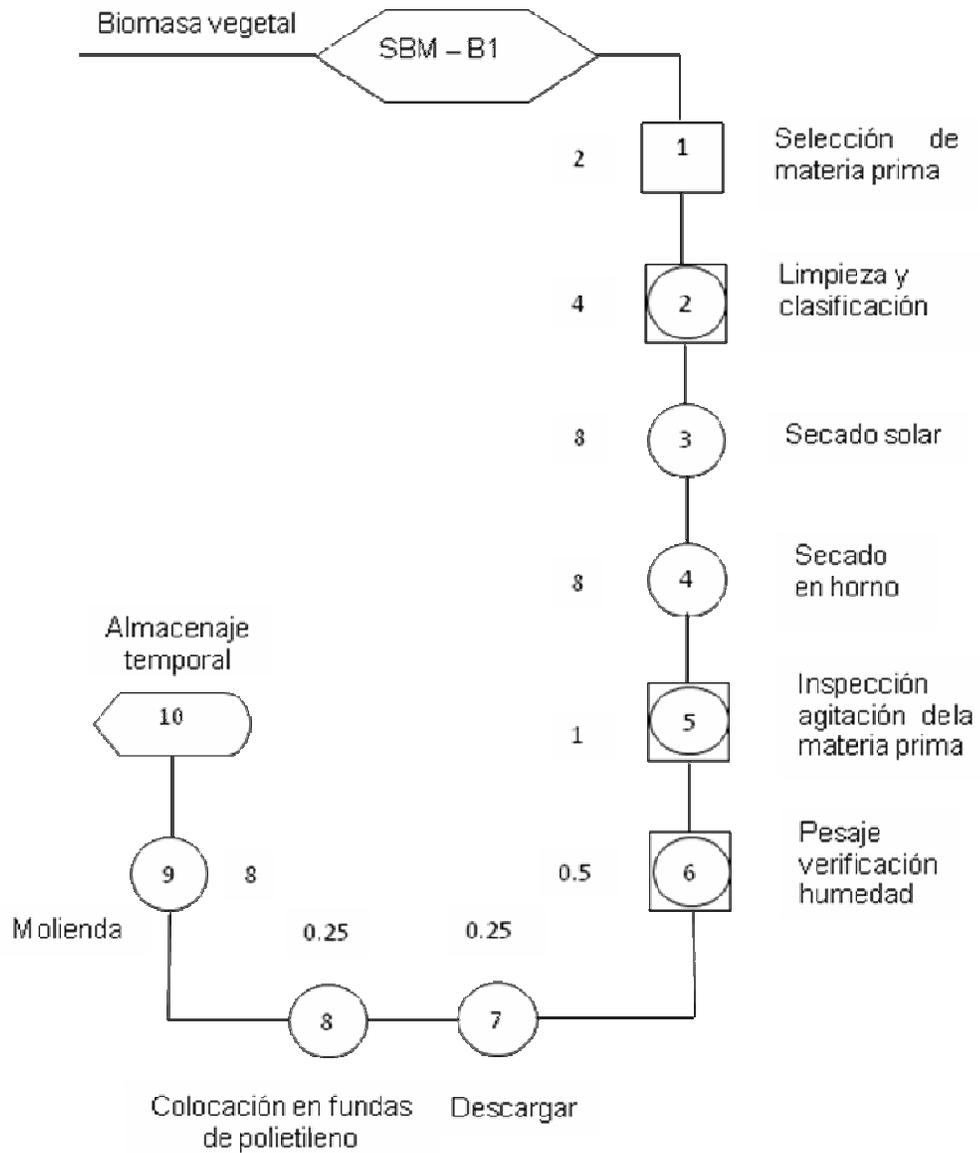
ANEXOS 5

DIAGRAMAS DE PREPARACIÓN DE BIOMASA VEGETAL

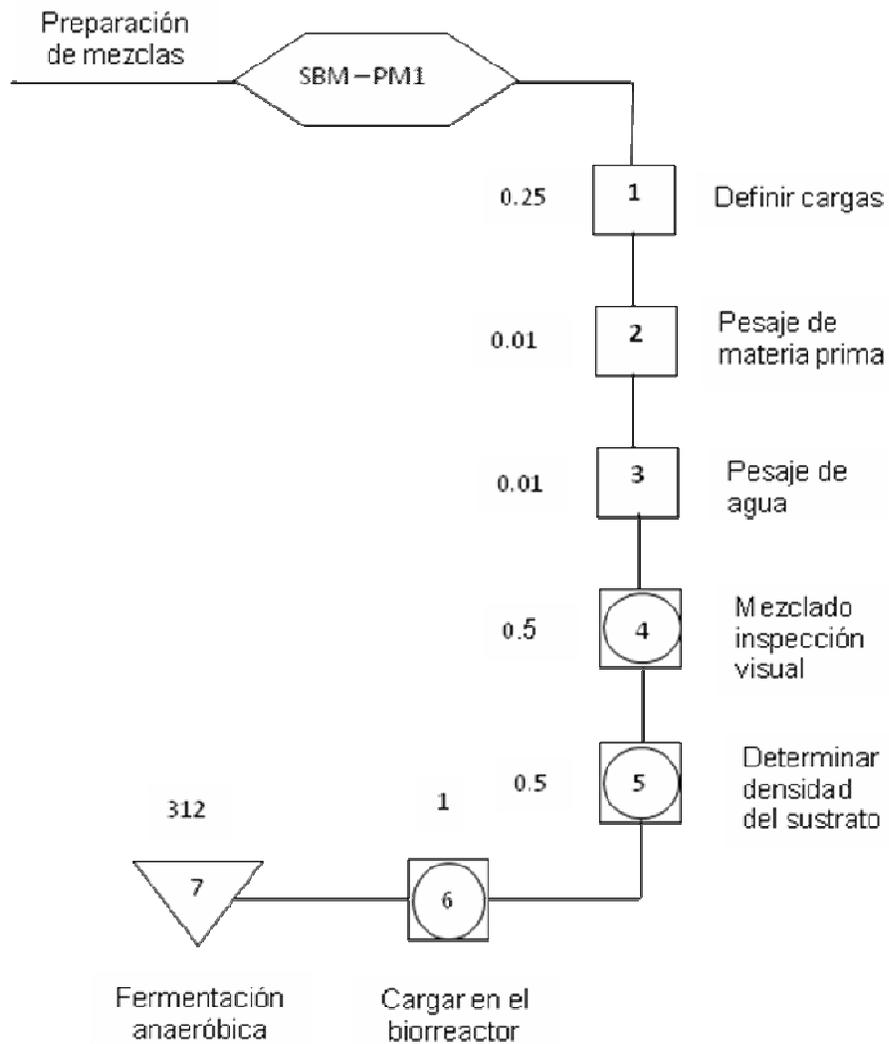
ANEXOS	CONTENIDO
5.1	Preparación de biomasa vegetal
5.2	Preparación de mezclas

Anexo 5.1

Preparación de biomasa vegetal



ANEXO 5.2 Preparación de mezclas

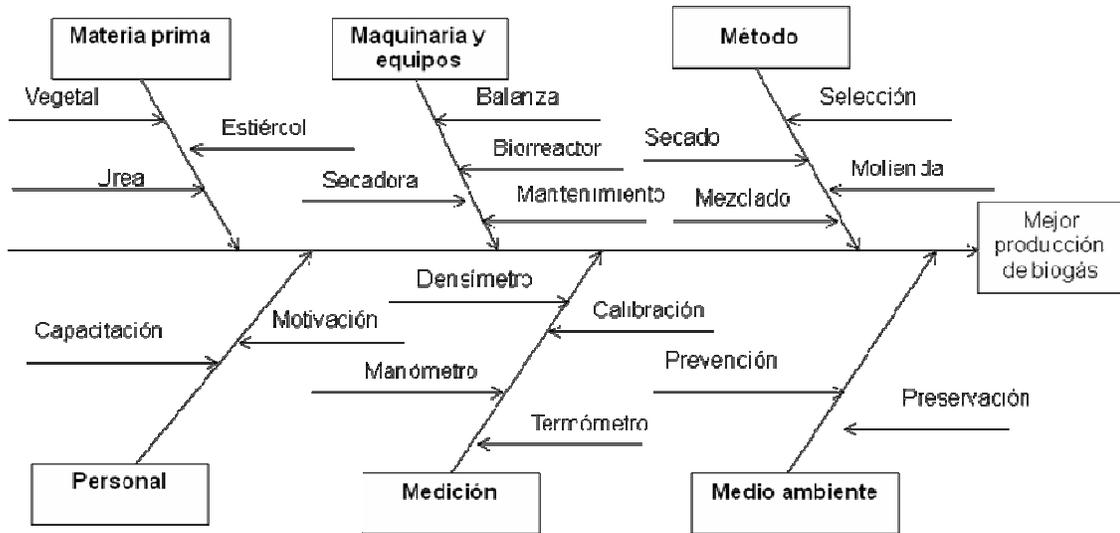


ANEXOS 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANEXOS	CONTENIDOS
6.1.	Diagrama de ISHIKAWA
6.2.	Valores de presión interna en los recipientes
6.3.	Reporte de análisis por cromatografía de gases

Anexo 6.1 Diagrama de ISHIKAWA sobre la producción eficiente de biogás



Anexo 6.2 Valores de presión interna en los recipientes

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0	0	2	2	2	0	1	2	0	0
Temperatura [°C]	18	17	17	17	17	15	18	17	20	17
Fecha	04/04/2007									
Hora	13:15									
T. ambiente [°C]	23									
Clima	soleado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0	0	3	2	2	0	1	2	0	0
Temperatura [°C]	18	17	17	17	17	15	18	17	20	17
Fecha	04/04/2007									
Hora	15:30									
T. ambiente [°C]	16									
Clima	nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0	0	3	3	2	0	1	2	0	0
Temperatura [°C]	18	18	17	18	17	15	19	17	20	18
Fecha	04/04/2007									
Hora	19:00									
T. ambiente [°C]	12									
Clima	lluvioso									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0	0	3	3	2	0	1	2	0	0
Temperatura [°C]	18	18	17	18	17	15	19	17	20	18
Fecha	04/04/2007									
Hora	20:30									
T. ambiente [°C]	10									
Clima	lluvioso									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0	0	3	3	2	0	1	2	0	0
Temperatura [°C]	18	17	16	18	17	14	18	16	19	16
Fecha	05/04/2007									
Hora	7:30									
T. ambiente [°C]	14									
Clima	despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0	0	3	3	2	0	2	2	0	0
Temperatura [°C]	18	17	17	18	16	14	18	17	19	17
Fecha	05/04/2007									
Hora	13:00									
T. ambiente [°C]	16									
Clima	nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0	2	2	1	0	0,5	1	0	0
Temperatura [°C]	18	17,5		18	16,5	14	19	17	19	18
Fecha	05/04/2007									
Hora	20:30									
T. ambiente [°C]	12									
Clima	Despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0	0	2	2	1	0	1	1	0	0
Temperatura [°C]	17	17		18	16	13	18	16	18	17
Fecha	06/04/2007									
Hora	8:36									
T. ambiente [°C]	17									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0,5	0	2	2	1	0	1	1	0	0
Temperatura [°C]	18	17		18	17	15	19	12	19	18
Fecha	06/04/2007									
Hora	13:00									
T. ambiente [°C]	21									
Clima	Soleado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0	2	2	1,1	1	1	1	0,5	0
Temperatura [°C]	17,5	17		18	17	14	18,5	17	19	17
Fecha	06/04/2007									
Hora	18:53									
T. ambiente [°C]	12									
Clima	Lluvioso									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	2	2	1,1	1	1	0,9	0,9	0
Temperatura [°C]	17	16		17	16	18	17,5	15	17	17
Fecha	07/04/2007									
Hora	10:00									
T. ambiente [°C]	18									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0,9	0,5	2,1	2	1,1	1	1	0,9	0,5	0
Temperatura [°C]	17	17		17,5	16	14	18	16	19	17
Fecha	07/04/2007									
Hora	13:56									
T. ambiente [°C]	19									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0,9	0	2,1	2	1,1	1	1	0,9	0,9	0
Temperatura [°C]	18	18		18	17	14	18	17	20	17,5
Fecha	07/04/2007									
Hora	18:20									
T. ambiente [°C]	13									
Clima	Lluvioso									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0,9	0	3	2	1,1	1	1	1	0,9	0
Temperatura [°C]	18	17		17,5	16	13	17,5	16	18,5	17
Fecha	08/04/2007									
Hora	7:05									
T. ambiente [°C]	12									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0,9	0	3	2	1,1	1	1	1	0,9	0
Temperatura [°C]	18	18		17,5	16	14	18	17	19,5	17,5
Fecha	08/04/2007									
Hora	13:30									
T. ambiente [°C]	17									
Clima	nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	0,9	0	3	3	1,1	1	2	1,5	0,9	0
Temperatura [°C]	18	17		18	16,5	13,5	18	17	19	17,5
Fecha	08/04/2007									
Hora	22:30									
T. ambiente [°C]	10									
Clima	nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	3	3	2,1	1	2	1,8	1	0
Temperatura [°C]	17,5	17		17,5	16	13	18	16	18	17,5
Fecha	09/04/2007									
Hora	9:30									
T. ambiente [°C]	15									
Clima	nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	3	3	2,2	1	2	1,8	1	0
Temperatura [°C]	18	17		17,5	16,5	13,5	18	16,5	19	17,5
Fecha	09/04/2007									
Hora	13:40									
T. ambiente [°C]	20									
Clima	seminublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	3	3	2	1	2	1,8	1	0
Temperatura [°C]	18	17		18	16,5	14	18,5	17	20	18
Fecha	09/04/2007									
Hora	18:35									
T. ambiente [°C]	14									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	3	3	2	1	2	1,8	1	0
Temperatura [°C]	18	18		18	16,5	14	18,5	17	20	18
Fecha	10/04/2007									
Hora	13:15									
T. ambiente [°C]	20									
Clima	Despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	3,1	3	2	1	2	1,8	1	0
Temperatura [°C]	18	18		18	17	14,5	19	18	20	18
Fecha	10/04/2007									
Hora	18:50									
T. ambiente [°C]	12									
Clima	Despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	3	3	2	1	2	1,8	1	0
Temperatura [°C]	18	18		18	16,5	14	18,5	17,5	20	18
Fecha	11/04/2007									
Hora	9:00									
T. ambiente [°C]	16									
Clima	Despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	3	3	2	1	2	1,8	1	0
Temperatura [°C]	18	18		18	17	15	19	17,5	20	18,5
Fecha	11/04/2007									
Hora	14:00									
T. ambiente [°C]	20									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	3	3	2	1	2	1,8	1	0
Temperatura [°C]	18,5	18		18	17	15	19	18	20	18,5
Fecha	11/04/2007									
Hora	18:30									
T. ambiente [°C]	15									
Clima	seminublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	5	3	3	2	1	2	1,8	1	0
Temperatura [°C]	18	17		17	16	13	18	16	17,5	17
Fecha	12/04/2007									
Hora	7:30									
T. ambiente [°C]	13									
Clima	semidespejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	3	3	2	1	2	1,8	1	0
Temperatura [°C]	18	17		17,5	16,5	13,5	18	17	19	17,5
Fecha	12/04/2007									
Hora	11:50									
T. ambiente [°C]	18									
Clima	despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,5	4	3	3	1	1,2	2	1	0
Temperatura [°C]	18	17		18	17	14	18	17	19,5	18
Fecha	12/04/2007									
Hora	18:30									
T. ambiente [°C]	11									
Clima	lluvioso									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,8	5	3,3	3,8	1	2,1	2,1	1	0
Temperatura [°C]	18	17		18	17	13,5	18	16	18	17
Fecha	13/04/2007									
Hora	9:30									
T. ambiente [°C]	15									
Clima	lluvioso									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,8	5,2	3,8	4,1	1	2,5	2,2	1	0
Temperatura [°C]	18	17,5		18	17	14	18,5	17	20	18
Fecha	13/04/2007									
Hora	14:30									
T. ambiente [°C]	20									
Clima	Despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,8	6	4	4,8	1	2,5	2,2	1	1
Temperatura [°C]	18,5	18		18	17	14	19	17	20	18
Fecha	13/04/2007									
Hora	18:30									
T. ambiente [°C]	15									
Clima	despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,8	7	4,3	5,5	1	2,5	2,5	1	1,9
Temperatura [°C]	18	17		18	17	13,5	18,5	16,5	18	18
Fecha	14/04/2007									
Hora	7:30									
T. ambiente [°C]	13									
Clima	nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	0,8	7	4,5	6	1	2,5	2,8	1	2
Temperatura [°C]	18,5	18		18	17	14	18,5	17	20	18
Fecha	14/04/2007									
Hora	12:30									
T. ambiente [°C]	20									
Clima	despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1	1	8	5	7	1	3	3	1	2
Temperatura [°C]	18	18		19	17	14	19	17	20	18
Fecha	14/04/2007									
Hora	20:23									
T. ambiente [°C]	15									
Clima	despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	1,5	1	9,5	5	7,5	1	1,8	5	1	3
Temperatura [°C]	18	17		18	17	19	18	17	19	18
Fecha	15/04/2007									
Hora	10:00									
T. ambiente [°C]	19									
Clima	SOLEADO									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	2	0	10,5	6	8,1	1	3	3,5	1	3
Temperatura [°C]	19	18,5		19	17	15	20	18	21	19
Fecha	15/04/2007									
Hora	14:50									
T. ambiente [°C]	21									
Clima	Soleado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	2	0,5	11	6	8,5	1	3	3,1	1	3
Temperatura [°C]	19	18		19	17	15	20	18	21	19
Fecha	15/04/2007									
Hora	19:36									
T. ambiente [°C]	16									
Clima	Despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	5	0,5	12	6,5	9,5	2	4	7,8	1	7,5
Temperatura [°C]	19	18		18	17	14,5	19	17,5	20	18
Fecha	16/04/2007									
Hora	8:40									
T. ambiente [°C]	16									
Clima	Seminublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	5	1	13	7	10	2	5	8	2	8
Temperatura [°C]	19	18		18,5	17	15	20	18	20	19
Fecha	16/04/2007									
Hora	13:45									
T. ambiente [°C]	23									
Clima	Seminublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	5	1	14	7,5	10,5	2	5,5	8,5	2	9
Temperatura [°C]	18,5	17,5		18,5	17	15	19	18	19	19
Fecha	16/04/2007									
Hora	21:00									
T. ambiente [°C]	11									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	6	2	15	8	11,2	2	6	9	2	10
Temperatura [°C]	19	18		19	17,5	15	19	17,5	20	18,5
Fecha	17/04/2007									
Hora	13:30									
T. ambiente [°C]	18									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	7	2	15,5	8,5	12	2	6	9,5	2	10,5
Temperatura [°C]	19	18		19	17,5	15	20	18	20	19
Fecha	17/04/2007									
Hora	18:30									
T. ambiente [°C]	15									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	7	2	17	9	13	2	5	10	2	10,5
Temperatura [°C]	19	18		18,5	17	14	19	17	19	18
Fecha	18/04/2007									
Hora	13:30									
T. ambiente [°C]	24									
Clima	Despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	8	2	18	10	14	2	4	10	2	11
Temperatura [°C]	18	18		18	17	14	18,5	17	19	18
Fecha	19/04/2007									
Hora	8:00									
T. ambiente [°C]	24									
Clima	despejado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	9	2	18	10,5	14	2	4	11	2	11
Temperatura [°C]	18	18		18	17	14	18,5	17	19	18
Fecha	19/04/2007									
Hora	8:00									
T. ambiente [°C]	14									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]	9	2	18	10,5	14	2	4	11	2	11
Temperatura [°C]	19	18		18	17	14	19	17	20	18
Fecha	19/04/2007									
Hora	13:30									
T. ambiente [°C]	20									
Clima	Nublado									

No. Tanque	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presión [psi]										
Temperatura [°C]										
Fecha										
Hora										
T. ambiente [°C]										
Clima										

Anexo 7.3 Reporte de análisis por cromatografía de gases



**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA APLICADA
LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL
REPORTE DE ANÁLISIS LAII -029-07**

PARA: ESPE
Escuela Politecnica del Ejercito

DE: Ing. Miguel Parreño C.
JEFE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL

ASUNTO: Reporte de análisis por cromatografía de gases de dos muestras de gases de pozos identificada como:

Muestra	M5	M4
Presión (psi)	55 psi	45 Psi
Temperatura (°F)	—	—
Fecha de muestreo		

FECHA: 16 de agosto de 2007

Componente	M5		M4	
	%Peso	%Moles	%Peso	%Moles
Nitrógeno	0.06	0.07	0.10	0.12
Metano	23.80	45.67	19.40	39.06
CO2	75.03	52.37	78.72	57.64
Agua	1.11	1.89	1.78	3.18

	M5	M4
Densidad Relativa:	1.06	30.71
Peso molecular promedio [g/gmol] :	30.71	32.22
Poder calórica del gas [Btu/pie3] :	462.23	396.13

Atentamente,

Ing. Miguel Parreño C.
JEFE DE LABORATORIO

**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
LABORATORIO DE INSTRUMENTACION
QUITO - ECUADOR**