

el abasto energético de la planta. Al mismo tiempo, la otra parte del metano es llevado a una etapa de compresión (200 bar) para ser despachado y utilizado como un combustible vehicular, de ahí el nombre de gas natural comprimido.

CAPÍTULO 4

DIMENSIONAMIENTO DE LOS PROCESOS

A continuación se describe el dimensionamiento de los principales equipos y procesos y los cálculos realizados.

4.1 Selección y separación de inorgánicos

De acuerdo a lo revisado en el punto 2.5, el dimensionamiento de esta etapa se realizó mediante cotización directa con la empresa Fluídica S.A. con oficinas en Zumpango, estado de México, para una capacidad será de 150 ton/día \pm 10 ton/día.

La densidad aproximada medida en los residuos es de $\delta = 0.8 \text{ ton/m}^3$ (Ramos, 2003)

$$\text{Volúmen diario} = \frac{\text{Masa diaria}}{\delta} \quad (4-1)$$

$$\text{Volúmen diario} = \frac{150 \frac{\text{ton}}{\text{día}}}{0.8 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}} = 187.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 23.5 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}$$

El sistema con capacidad para 50 m³/hora consiste en una banda transportadora de alimentación de 0.7 X 10 metros de longitud, que se mueve a una velocidad de 8 m/min, un Trommel de cernido de 0.7 m de diámetro 1.4 m de longitud a 5 HP y una banda transportadora de selección con 4 ductos de salida de 0.7 m de ancho x 10m de longitud.

4.2 Trituración de orgánicos

La potencia que se determinó es de 30 HP y se puede utilizar un modelo por lotes para cubrir la demanda de 200 m³/día en 8 horas. Mientras más pequeño sea el tamaño de partícula se obtendrá una mejor degradación.

4.3 Dilución

Antes de comenzar la digestión es muy recomendable diluir la mezcla de residuos para que alcancen un porcentaje de humedad de 90%, o dicho de otro modo la masa seca deberá ser el 10% en la mezcla (Fricke y col, 2005).

Los parámetros que se determinaron para los residuos de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 2.6, para la fila de desechos domiciliarios o de cocina, son:

$$\% \text{masa seca (MS)} = 18\%$$

$$\% \text{masa volátil (MV)} = 75\%$$

Los modelos matemáticos y cálculos que se muestran en adelante, se realizaron con base en las recomendaciones del manual para el diseño, dimensionamiento y construcción de digestores (Moncayo, 2005), y a menos que se especifique lo contrario debe considerarse ésta fuente.

$$\text{Masa seca entrante} = (\text{Masa total}) (MS) \quad (4-2)$$

$$\text{Masa seca entrante} = (150 \frac{\text{ton}}{\text{día}}) (18\%) = 27 \frac{\text{ton}}{\text{día}} = 33.75 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Masa volátil entrante} = \text{Masa Seca entrante} \circ MV \quad (4-3)$$

$$\text{Masa volátil entrante} = (27 \frac{\text{ton}}{\text{día}}) (75\%) = 20.25 \frac{\text{ton}}{\text{día}} = 25.31 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

El volumen total de alimentación se calcula en función del porcentaje de dilución recomendado de la siguiente manera:

$$\text{Volumen de alimentación} = \frac{\text{Masa Seca entrante}}{1 - \% \text{Dilución}} \quad (4-4)$$

$$\text{Volumen de alimentación} = \frac{33.75 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{1 - 90\%} = 337.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Por lo tanto, el agua necesaria para la dilución se calcula:

$$\text{Agua dilución} = \text{influyente} (\% \text{dilución}) - (\text{Volumen diario} - \text{Masa seca}) \quad (4-5)$$

$$\text{Agua para dilución} = 337.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} (90\%) - (187.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} - 33.75 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}) = 150 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Para este trabajo se propone que el tanque de almacenamiento, conserve tres días de producción para tener dos días de seguridad, que es el tiempo en el que puede faltar la materia prima, debido a que la recolección se realiza cada tercer día y previendo una contingencia de un día. Es por eso que el dimensionamiento se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Vol tanque de alimentación} = \text{influyente} \times \text{días de almacenamien} \quad (4-6)$$

$$\text{Vol tanque de alimentación} = (337.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}) \times 3 \text{ día} = 1012.5 \text{m}^3$$

La forma de tanque que usualmente se utiliza es la cilíndrica y lo que se busca a continuación es reducir el material que se utilizará por lo que se realiza el siguiente procedimiento, en el que se minimiza el área, dado un volumen definido, para encontrar el diámetro y altura que cumplen con esta restricción:

$$\text{Volumen de tanque cilíndrico} = \frac{\pi D^2}{4} \circ h = \frac{K}{n} \quad (4-7)$$

Donde:

D: Diámetro

h: Altura

n: Número de tanques

K: Volumen de tanque definido

$$\rightarrow \text{Restricción: } h = \frac{4K}{\pi n D^2} \quad (4-8)$$

Además se considera sólo un tanque (n=1).

Función objetivo: Área del tanque.

$$\text{Área tanque} = 2(\text{Área base}) + \text{Área lateral}$$

$$\text{Área tanque} = 2\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) + \pi Dh$$

$$\text{Área tanque} = \frac{\pi D^2}{2} + \pi Dh$$

Sustituyendo la restricción:

$$\text{Área tanque} = \frac{\pi D^2}{2} + \frac{4K}{D}$$

Derivando e igualando a cero:

$$\frac{\partial A}{\partial D} = \frac{\pi}{2}(2D) - \frac{4K}{D^2}$$

$$\frac{\partial A}{\partial D} = \pi D - \frac{4K}{D^2}$$

Igualando a cero y multiplicando por D^2

$$\pi D^3 - 4K = 0$$

Despejando D:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4K}{\pi}} \quad (4-9)$$

Por lo tanto sustituyendo el volumen del tanque en la ecuación de la altura (4-8) y diámetro (4-9) se tiene:

$$\text{Diámetro del tanque} = \sqrt[3]{\frac{4(1012.5m^3)}{\pi}} = 10.88m$$

$$\text{Altura del tanque} = \left(\frac{4(1012.5m^3)}{\pi}\right)\left(\frac{1}{(10.89)^2}\right) = 10.89m$$

Por consideraciones prácticas de construcción y para que los gases que se están liberando puedan captarse y lograr presión, se dejará un 30% más de volumen en el tanque, por lo que las dimensiones de seguridad son:

$$\text{Volumen de seguridad} = 1316.25m$$

Por otro lado, los tanques **nunca** se construyen a más de 5 m de altura por lo que el modelo teórico que obtuvimos para minimizar el material de construcción no podrá ser tomado en cuenta y una nueva restricción para la función objetivo es:

$$\text{altura} \leq 5m$$

Si la altura y el volumen están definidos lo único que se puede variar en la ecuación es el diámetro y el número de tanques. Entonces, volviendo a la función objetivo.

Función objetivo a minimizar: Área de los tanques.

Despejando de la ecuación (4-7) el diámetro, se tiene:

$$D = \sqrt[2]{\frac{4K}{\pi \times n \times h}} \quad (4-10)$$

$$\text{Área tanque} = 2(\text{Área base}) + \text{Área lateral}$$

$$\text{Área tanque} = 2\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) + \pi D h$$

$$\text{Área tanque} = \frac{\pi D^2}{2} + \pi D h$$

Sustituyendo la restricción:

$$\text{Área tanque} = \frac{\pi \left(\frac{4K}{\pi \times n \times h}\right)}{2} + \pi \times \sqrt[2]{\frac{4K}{\pi \times n \times h}} \times h$$

Sin dejar de tener en cuenta que la altura y K son constantes, lo siguiente será derivar esta función con respecto al número de tanques de la siguiente manera:

$$\text{Área tanque} = \frac{4K}{2h}n + \pi h \sqrt[2]{\frac{4K}{\pi h}}n^{-1/2} = A$$

$$\frac{\partial A}{\partial n} = \frac{4K}{2h} + \pi h \sqrt[2]{\frac{4K}{\pi h}} \left(-\frac{1}{2}n^{-3/2}\right)$$

Igualando a cero:

$$\frac{4K}{2h} - \frac{\pi h}{2} \sqrt[2]{\frac{4K}{\pi h}} \left(n^{-3/2}\right) = 0$$

Sustituyendo K y h:

$$\frac{4(1316.25)}{2(5)} - \frac{\pi(5)}{2} \sqrt[2]{\frac{4(1316.25)}{\pi(5)}} \left(\frac{1}{\sqrt[2]{n^3}}\right) = 0$$

$$526.5 - 180.214 * \left(\frac{1}{\sqrt[2]{n^3}}\right) = 0$$

Despejando n:

$$n = \sqrt[3]{\left(\frac{180.214}{526.5}\right)^2}$$

Diámetro del tanque = 11.06m

Altura del tanque = 11.06m

4.4 Parámetros de digestión

Éste es el proceso central de la planta y en donde se ven involucradas más variables. Algunos de los parámetros que se consideran son los siguientes:

Proceso Termofílico: Temperatura 55°C (Hartmann y Ahring, 2006)

Tiempo de Retención Hidráulica: 15 días.

Carga Orgánica Volumétrica (COV) = 2.75kgMV/m³ (Hartmann y Ahring, 2006)

El diámetro debe ser dos veces la altura para facilitar la construcción del digestor y evitar que la presión afecte al proceso (Nopharatana y col. 2007).

El procedimiento para dimensionar los tanques cilíndricos de esta etapa se explican a continuación:

$$\text{Demanda de volumen en el digestor} = \text{influyente diario} \times \text{TRH} \quad (4-11)$$

$$\text{Demanda de volumen en el digestor} = 337.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 15 \text{ día} = 5,062.5 \text{ m}^3$$

La carga orgánica volumétrica es un parámetro de carga que se obtiene experimentalmente. Brinda información acerca de la cantidad de masa orgánica que puede entrar a un volumen determinado de digestión por unidad de tiempo. Ayudará a fijar el volumen real que debe tener el digestor:

$$\text{COV} = \frac{\text{Masa seca entrante}}{\text{Volumen de digestión}} \quad (4-12)$$

Lo que se hace es despejar el volumen del digestor de esta relación y se calcula.

$$\text{Volumen de digestión} = \frac{\text{Masa Seca entrante}}{\text{COV}} \quad (4-13)$$

$$\text{Volumen de digestión} = \frac{20,250 \frac{\text{kg MV}}{\text{día}}}{2.75 \frac{\text{kg MV}}{\text{día} \cdot \text{m}^3}} = 7,363.64 \text{ m}^3$$

Tomando en cuenta la proporción entre diámetro y altura (2h=1D), conservando la geometría cilíndrica y con el volumen de digestión definido anteriormente, seguimos con el dimensionamiento a continuación:

$$\text{Volumen de digestión} = \frac{\pi D^2 h}{4}; D = 2h$$

$$\text{Volumen de digestión} = \frac{\pi (2h)^2 h}{4} = \pi h^3$$

$$h_{tanque} = \sqrt[3]{\frac{\text{Volumen de digestión}}{\pi}} \quad (4-14)$$

Entonces con el modelo (3-16) y el volumen antes definido se obtiene automáticamente:

$$\begin{aligned} h_{tanque} &= 13.50 \text{ m} \\ D_{tanque} &= 27.00 \text{ m} \end{aligned}$$

Pero por cuestiones de operatividad se construirán, en vez de uno, dos digestores de las siguientes dimensiones:

$$\begin{aligned} h_{tanque} &= 10.72 \text{ m} \\ D_{tanque} &= 21.43 \text{ m} \end{aligned}$$

Estas medidas ya contemplan un 5% extra por cuestiones de seguridad y para el sistema de captación de biogás.

4.5 Generación y adecuación del biogás

Debido al tipo de sustrato que se va a emplear y a los parámetros definidos en el proceso de digestión se pueden utilizar los siguientes factores para caracterizar la producción y definir las características del biogás (Tabla 2.6):

$$\text{Factor producción de biogás} = 400 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{ton MV}}$$

Composición de biogás:

Metano (CH ₄):	60%
Dióxido de carbono (CO ₂):	30%
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S):	5%
Vapor de agua:	5%

La capacidad calorífica del biogás con estas condiciones será aproximadamente de: 5,400.00 Kcal/m³

$$\text{Producción biogás} = \text{Factor producción de biogás} \times \text{MV entrante} \quad (4-15)$$

$$\text{Producción biogás} = \left(400 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{ton MV}} \right) \left(20.25 \frac{\text{ton MV}}{\text{día}} \right) = 8,100 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$$

$$\text{Producción de biogás} = 337.54 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ biogás}$$

Para utilizar el biogás en equipos convencionales sin la necesidad de realizar adecuaciones es necesario realizar un proceso de filtración o purificación, en donde el CO₂ y el H₂S son removidos para dejar libre al metano que es la base del biocombustible.

Después de la purificación la producción de metano sería de:

$$\text{Producción CH}_4 = \text{Producción biogás} \times \eta \text{ purificación} \times \% \text{CH}_4 \quad (4-16)$$

Donde:

$$\eta \text{ purificación} = \text{eficiencia del purificador}$$

El sistema de purificación que utilizará es el modelo RIMU de la empresa GreenLane® del grupo internacional Flotech, que a través de tanques scrubber alcanzan eficiencias de más de 90%, en la purificación de metano contenido en biogás.

$$\text{Producción } CH_4 = 8,100 \frac{m^3}{\text{día}} \times 90\% \times 60\% = 4,374 \frac{m^3 \text{ metano}}{\text{día}} = 182.25 \frac{m^3 CH_4}{\text{hora}}$$

Para el almacenamiento del biogás antes de su purificación, se tienen considerados dos tanques de acero con recubrimiento epóxico catalizado de altos sólidos (Goover, 1997), de las siguientes dimensiones:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4(\text{Volumen tanque})}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4\left(\frac{8,100 \times 1.05}{2 \text{ tanques}} m^3\right)}{\pi}} = 17.56m$$

$$h = 17.56m$$

Estas dimensiones ya incluyen el sobredimensionamiento del 5% de seguridad y para los sistemas auxiliares.

Para este proyecto se han definido tres usos del biogás con la calidad de 90% (contenido de metano): Alimentación de una caldera para la calefacción del sistema de digestión, arranque y operación de un motogenerador para abasto eléctrico de la planta y su uso como GMCV (Gas Metano Comprimido Vehicular) en automotores de la planta, los cuales se explican con más detalle a continuación:

4.6 Sistema de calefacción

Para este proceso es necesario obtener la energía y potencia requeridas para mantener la biomasa dentro del proceso de digestión en una temperatura media de 55°C, el tipo de aislante térmico que se utilizará para tener las menores pérdidas energéticas a través de las paredes del reactor y la caldera o generador de vapor necesario para entregar la energía térmica al proceso.

$$Q_a = m_a \times C_{pa} \times \Delta T \quad (4-17)$$

Donde:

Q_a =Energía necesaria para calentar el influente

m_a =masa total del influente

C_{pa} =capacidad calorífica del influente

ΔT =diferencia entre la temperatura deseada y la de entrada

$$Q_a = m_a \times C_p \times \Delta T = 330750 \frac{kg}{\text{día}} \times 4.186 \frac{kJ}{kgK} \times (55 - 25.3)K = 41.12 \frac{GJ}{\text{día}}$$

$$Q_a = 475.93 kW$$

El siguiente paso es modelar la transferencia de energía a través de las paredes del sistema de digestión, después de seleccionar el aislante térmico para obtener la otra parte de la potencia necesaria en el sistema de calefacción.

La transferencia de energía a través de una pared que separa dos medio sólidos se puede modelar como se describe en la Figura 4.1:

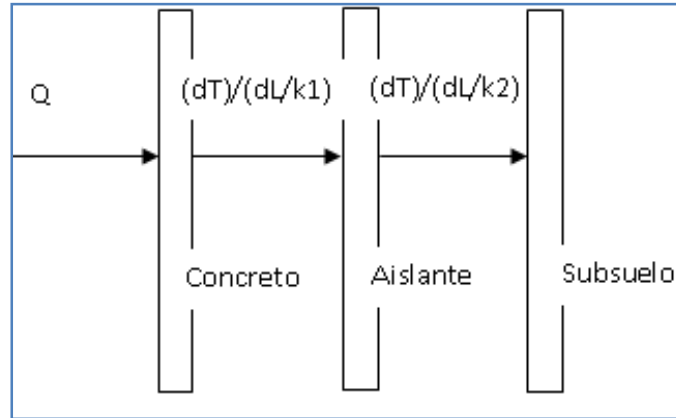


Figura 4.1 Modelo de aislamiento térmico de digestor (Incropera y De Witt, 1999)

$$q_b'' = k \frac{dT}{dL} \quad (4-18)$$

q_b = calor por conducción

k = coeficiente de conductividad térmica

dT = diferencia de temperaturas

dL = longitud entre los puntos de interés o espesor del material aislante

En el modelo de construcción que se utilizará, la conducción de energía se lleva a cabo a través de tres sólidos principales: concreto para la geometría del digestor (hormigón), una capa aislante (espuma de poliuretano) y la capa de subsuelo en el que se enterrará el digestor.

Los coeficientes de conductividad térmica de algunos materiales se puede observar en la Tabla 4.1; luego entonces, el modelo para encontrar la pérdida de energía a través de los tres materiales es:

$$q_b'' = \text{pérdidas de calor } P/\text{área} = \frac{T_d - T_\infty}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}} = \frac{(55 - 25.3)K}{\frac{0.4m}{0.9 \frac{W}{mK}} + \frac{0.15m}{0.02 \frac{W}{mK}}} = 3.74 \frac{W}{m^2}$$

$$\text{Área de contacto } P/\text{digestor} = \pi \times D \times h + \frac{\pi D^2}{4}$$

$$\text{Área de contacto } P/\text{digestor} = 1,082.28 \text{ m}^2$$

$$\frac{\text{Pérdidas calor}}{\text{digestor}} = q_a'' \times \text{Área de contacto } P/\text{digestor} = q_a/\text{dig} \quad (4-19)$$

$$q_a/\text{digestor} = 4,046.05 \text{ W}$$

Entonces la demanda de energía térmica debido al flujo a través de las paredes de los digestores es de:

$$Q_b = q_a / \text{digestor} \times \text{No. de digestores} \quad (4-20)$$

$$Q_b = 4,046.05 \frac{W}{\text{digestor}} \times 2 \text{digestor}$$

$$Q_b = 8092.1 W = 0.7 \frac{GJ}{\text{día}}$$

La potencia total requerida por la caldera está dada por el total de la demanda térmica $Q_a + Q_b$.

$$Q_t = 484.02 kW$$

Según la ficha técnica de una caldera de agua caliente en circuito cerrado, la capacidad de salida de un modelo de 50 C.C. (Caballos caldera) es de 490.5 kW lo que sería suficiente para satisfacer nuestras necesidades energéticas, sin embargo, en los casos en que la temperatura ambiente sea demasiado baja este equipo puede no entregar la energía suficiente y debido a que el proceso trabaja con bacterias termofílicas (muy sensibles a cambios de temperatura) la caldera recomendada será la de 60 C.C. que entrega una potencia de hasta 588.6 kW.

Una de las características deseables en estos equipos es su capacidad para trabajar con gas natural para aprovechar el biogás producido en planta.

$$\text{Consumo nominal de la caldera} = 70.14 \frac{m^3}{\text{hora}} \text{ biogás}$$

$$\text{Consumo real de la caldera} = \frac{\text{Consumo nominal}}{\eta} \times \frac{\text{horas}}{\text{día}} \quad (4-21)$$

donde:

$$\eta \text{ eficiencia} = 85\%$$

$$\text{Consumo real caldera} = \frac{70.14 \frac{m^3}{\text{hora}}}{0.85} \times 24 \frac{\text{horas}}{\text{día}} = 1,980.42 \frac{m^3}{\text{día}}$$

Tabla 4.1 Algunos valores típicos de conductividad térmica (k)
(Incropera y De Witt , 1999)

Material	Conductividad Térmica $\frac{W}{mk}$
Aire	0.01
Corcho	0.04-0.30
Fibra de vidrio	0.03-0.07
Madera	0.13
Poliestireno expandido	0.025-0.045
Poliuretano	0.018-0.025
Hormigón	0.9

4.7 Sistema de generación de energía

Otro de los usos más comunes del metano es la generación de energía eléctrica. Después de la remoción del ácido sulfhídrico (H₂S) y el CO₂ se obtiene un producto que puede ser utilizado en motores de combustión interna, diseñados para otro tipo de combustibles con pequeñas adecuaciones o fabricados especialmente para biometano, por lo que puede alimentarse un motogenerador. Para dimensionar el equipo es necesario conocer la demanda de potencia eléctrica en la planta.

La Tabla 4.2 muestra un recuento de las potencias que solicitan algunos de los equipos de los que ya se hablaron y otros que se detallarán más adelante.

Tabla 4.2 Requerimientos energéticos de equipos necesarios para la planta (Cotizaciones de la empresa Fluidica S.A.)

Equipo	Potencia	Ciclo de trabajo[h/día]	Consumo eléctrico [kWh/día]
Trituradora	150.0 kW	8h	240 kWh
Tornillo sin Fin	30.0 kW	24h	720 kWh
Banda Transportadora	7.4 kW	8h	59.68 kWh
Trommel	3.7 kW	8h	29.84 kWh
Secado	30.0 kW	10h	300 kWh
Estación Compresión	150.0 kW	8h	1.44 MWh
Potencia simultánea	371.19 kW		TOTAL: 2,790MWh

Otro de los factores que se debe considerar es el poder calorífico del metano resultante para saber cuánta energía es capaz de transmitir en combustión.

$$\text{Poder calorífico metano} = \text{Poder calorífico metano} \times \% \frac{\text{Metano}}{\text{biogás}} \quad (4-22)$$

Se toma en cuenta que el metano después de la purificación tiene un 90% de pureza, por seguridad.

$$PC_{CH_4} = PC_m \times \% \text{Metano} = 9,000 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \times 90\% = 8,100 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$$

En la Tabla 4.3 se observa la potencia eléctrica que suministrará el equipo de generación en la columna 3 y en la última columna se ve la potencia que se debe entregar a través de la combustión del metano. Estas consideraciones ya han tomado en cuenta la eficiencia del equipo, y es posible corroborar cómo la energía que entrega es alrededor del 35% de lo que se le debe suministrar a través del combustible.

Tabla 4.3 Módulos de cogeneración con motor PASCH a biogás (Moncayo, 2005)

Modelo	Motor	Potencia Eléctrica kW	Potencia térmica kW	Combustible necesario kW
HPC 150 B	E2876-LE 302	150	175	389
HCP 200 B	E2876-LE 302	190	225	493
HCP 250 B	E2848-LE 322	252	301	657
HCP 400 B	E2842-LE 322	404	526	1,072

La cantidad de metano que se consumirá se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Gasto en generación}_{\text{metano}} = \frac{\text{Potencia}_{\text{necesaria}}}{\text{Poder Calorífico del metano}} \quad (4-23)$$

Si la potencia eléctrica necesaria para la planta es de aproximadamente 400 kW, proporcionada por el equipo HCP 400 B con el motor MAN E2842-LE322 (Ver Tabla 3.4) entonces la demanda energética en combustible que necesita es de 1,072 kW.

$$\text{Gasto en generación}_{\text{biometano}} = \frac{1,072 \text{ kW} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right) \left(\frac{3600\text{s}}{1\text{hora}} \right)}{8,100 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \left(\frac{4.186 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} \right)} = 113.82 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}$$

Como se esperaba, el consumo de metano por este equipo es excesivo por la baja eficiencia de producción de energía eléctrica. Sin embargo, puede ser acondicionado para aprovechar la potencia térmica que se genera, en este caso, la eficiencia ronda el 50% y la eficiencia global del ciclo se incrementa considerablemente. Si no existiera la posibilidad de utilizar cogeneración, entre el motogenerador y la caldera agotarían el metano disponible, teniendo que desechar la posibilidad de acondicionarlo para su utilización como combustible vehicular, afortunadamente la potencia térmica proporcionada por el CHP es suficiente para la calefacción o mantenimiento de la temperatura del sistema de digestión y **es posible desechar el uso de la caldera.**

4.8 Utilización del biogás como combustible vehicular

La intención es aprovechar las ventajas que posee el metano comprimido en comparación con la gasolina como combustible vehicular.

Para introducir el gas metano comprimido en vehículos, es necesario dimensionar los siguientes procesos que constituyen la estación de servicio.

- a. Compresión: Los compresores se dimensionan con dos parámetros, el caudal a comprimir y las etapas de compresión, que están relacionadas directamente con la presión de aspiración. La cantidad de gas a comprimir será el remanente de la cantidad producida y la utilizada en el sistema de cogeneración.

$$\text{Caudal metano a comprimir} = \text{Producción total} - \text{Gasto en cogeneración} \quad (4-24)$$

$$\text{Caudal a comprimir} = 182.25 \frac{\text{m}^3 \text{ metano}}{\text{hora}} - 113.82 \frac{\text{m}^3 \text{ metano}}{\text{hora}} = 68.43 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}$$

La presión de aspiración es equiparada con la presión de salida del sistema de purificación. Un compresor para gas natural vehicular funciona en varias etapas para lograr los 250 bar necesarios en el sistema de conversión del automóvil. Entre menor sea la presión de aspiración del gas mayor será el número de etapas del equipo y mayor será el consumo eléctrico y la inversión inicial.

En la Tabla 4.4 se muestran los consumos eléctricos y las dimensiones de la serie 115 (por la carrera de 115 mm) de compresión de la marca Aspro®, con fábricas en Argentina y Brasil, pero con representantes en México.

**Tabla 4.4 Características técnicas de equipos de compresión para gas natural
(ASPRO, 2010)**

Modelo	115-2-30	115-3-12	115-3-19	115-4	115-4R	115-4RR	115-5-3-12	115-5-4R
Número de etapas	2	3	3	4	4	4	4	5
Presión máxima de aspiración [bar]	45	14	19	8	6	3	3.25	1.1
Presión mínima de aspiración	19	7	12	4	2	1.4	1.75	0.2
Presión de descarga	250							
Carrera [mm]	115							
Potencia del motor principal [kW]	90-160	110-160					132-160	
Potencia del pre-compresor [kW]	No necesita						55	
Potencia aero-enfriador	11						5.5-11	
Tensión-frecuencia	380-440 VCA / 50-60 Hz							
Velocidad	800-1000 rpm							
Peso	Aproximadamente 4, 600 kg						Aprox. 8, 000 kg	
En cualquiera de estos modelos puede adaptarse una cabina acústica								

En este proyecto la presión máxima de aspiración que se puede esperar es de 15 bar, por lo que un equipo de 3 etapas convencional es la mejor opción, pues tendría los consumos más bajos y la inversión inicial adecuada, además de que cumple con el caudal necesario ya que ésta serie maneja caudales de 60-1200 m³/hora.

- b. Almacenamiento. La siguiente operación en la estación de servicio del gas es el almacenamiento. Los tanques son de acero de alta resistencia y se comercializan en módulos. Cada tanque tiene una capacidad de 125 L. y se disponen en paquetes de 10, sin embargo pueden ser adecuados a las características que se requieran en planta. Los tanques adecuados para esta operación se pueden ver en la Figura 4.2.



Figura 4.2 Módulos de almacenamiento de gas natural (ASPRO, 2010)

Para conocer el número de tanques de almacenamiento se tiene que calcular el volumen que tendría un día de producción manteniendo la presión necesaria.

El modelo que se utilizará para calcular el volumen resultante después de la compresión a 250 bar es el siguiente:

$$\mathbf{Volumen}_{comprimido} = \frac{n \times T \times R}{P_{salida}} \quad (4-25)$$

Donde:

n= No. total de moles del gas a comprimir

T= Temperatura de la compresión

R= Constante universal de los gases ($8.314472 \frac{Pa}{mol K}$)

P_{salida} = Presión de compresión

Para calcular el número total de moléculas de metano que se tendrían en el metano purificado se seguirán los siguientes cálculos:

$$\mathbf{n} = \frac{m_{metano\ producido}}{día} \times \frac{1}{m_{molar\ metano}} \quad (4-26)$$

$$\mathbf{m}_{molar\ metano} = m_{carbono} + 4m_{hidrógeno} \quad (4-27)$$

$$\mathbf{m}_{molar\ metano} = 0.016 \frac{kg}{mol}$$

$$\mathbf{m}_{metano\ producida} = V_{producido} \times \delta_{metano} \quad (4-28)$$

$$\mathbf{m}_{metano\ producida} = 1,642.35 \frac{m^3}{día} \times 0.717 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mathbf{m}_{metano\ producida} = 1,177.57 \frac{kg}{día}$$

Entonces el número de moles es:

$$\mathbf{n} = \frac{1,177.57 \frac{kg}{día}}{0.016 \frac{kg}{mol}}$$

$$\mathbf{n} = 73,597.8 \text{ moles}$$

Para utilizar la ecuación (4-24) se toma una temperatura de 25.3°C correspondiente a la temperatura media anual del Puerto de Veracruz.

$$\mathbf{Volumen}_{comprimido} = \frac{73,597.8 \text{ mol} (25 + 273.15) K \times 8.314 \frac{Pam^3}{mol^{\circ}K}}{250bar \frac{100,000Pa}{1bar}}$$

$$\mathbf{Volumen}_{comprimido} = 7.3 \frac{m^3}{día} = 7,297.86 \frac{L}{día}$$

Para conocer el número de módulos que se necesitarían se realiza la siguiente operación:

$$\text{No. de módulos de compresión} = \frac{\text{Volumen comprimido}}{\text{Capacidad módulos}} \quad (4-29)$$

$$\text{No. de módulos de compresión} = \frac{7,297.86 \frac{\text{L}}{\text{día}}}{1,250\text{L}}$$

$$\text{No de módulos de compresión} = 5.83 \text{ módulos} \approx 6 \text{ módulos}$$

Entonces se necesitan 6 módulos de 10 tanques para almacenar la producción de un día.

- c. Surtidores. El siguiente sistema de la estación de servicio que hay que seleccionar es el módulo surtidor de GNC que se encarga de abastecer directamente a los automóviles con GNC como los módulos convencionales de gasolina.

Un surtidor como el de la Figura 4.3 puede abastecer un caudal de 10Nm³/min por lo que uno es suficiente para abastecer el metano en un turno de 10 horas. Puede atender dos automóviles simultáneamente y el tiempo estimado de carga es de:

$$\text{Tiempo de servicio} = \frac{\text{capacidad del tanque vehicular}}{\text{Caudal}} \quad (4-30)$$

$$\text{Tiempo de servicio} = \frac{20 \text{ m}^3}{10 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}} = 2 \text{ min}$$

4.9 Uso de lodos digeridos como mejoradores de suelo

De realizar un balance de masa, la biomasa y el agua que entran al tratamiento deben representar la misma materia que los lodos efluentes y la masa convertida en biogás.

También se puede definir la mezcla efluente en términos de la masa seca suspendida para lo cual se utiliza el siguiente parámetro:

$$\text{Lodos}_{\text{base seca}} = \text{Masa seca}[\text{ton}] - 75\% \times \text{masa volátil}[\text{ton}] \quad (4-31)$$

$$\text{Lodos}_{\text{Base seca}} = 27\text{ton} - (0.75)20.25$$

$$\text{Lodos}_{\text{base seca}} = 11.81\text{ton}$$

Lo que se planteó en la ecuación anterior es que el 75% de la masa volátil se ha transformado en biogás al final del tiempo de retención.

Ahora se define el efluente en términos porcentuales:

$$\%_{\text{sólidos}} = \frac{\text{Lodos}_{\text{base seca}}}{\text{Masa total del efluente}} \quad (4-32)$$

$$\%_{\text{sólidos}} = \frac{11.81\text{ton}}{\text{Masa influete} - \text{Masa degradada}}$$

$$\%_{\text{sólidos}} = \frac{11.81\text{ton}}{330.75\text{ton} - 20.75 * 75\%\text{ton}}$$

$$\%_{\text{sólidos}} = \frac{11.81 \text{ ton}}{315.56\text{ton}} = 3.74\%$$

$$\%agua = 100 - \%sólidos$$

$$\%agua = 96.26\%$$



**Figura 4.3 Surtidor de gas natural
(ASPRO, 2010)**

Para estimar la densidad de los lodos se utiliza la siguiente ecuación (Gray, 2005):

$$\varphi_{lodos} = \frac{100}{\frac{\%sólidos}{\varphi_{sólidos}} + \frac{\%agua}{1}} \quad (4-33)$$

La densidad estimada para los lodos activados en base seca es de 1.35 ton/m³ (Ramalho, 1996) entonces:

$$\varphi_{lodos} = \frac{100}{\frac{3.74}{1.35} + \frac{96.26}{1}}$$

$$\varphi_{lodos} = 1.009 \frac{ton}{m^3}$$

Ahora se estimará el volumen que ocuparían los lodos:

$$Volumen\ lodos_{base\ húmeda} = \frac{Masa\ del\ efluente}{\varphi_{lodos}} \quad (4-34)$$

$$Volumen\ lodos_{base\ húmeda} = \frac{315.56ton}{1.009 \frac{ton}{m^3}}$$

$$Volumen\ lodos_{base\ húmeda} = 312.5m^3$$

$$Volumen\ lodos_{base\ seca} = \frac{Masa\ efluente_{sólidos}}{\varphi_{sólidos}}$$

$$Volumen\ lodos_{base\ seca} = \frac{11.81ton}{1.35 \frac{ton}{m^3}}$$

$$\text{Volumen lodos}_{base\ seca} = 8.75 \text{ m}^3$$

A continuación se dimensionará el espesador de lodos. Primero se debe escoger una tasa de aplicación y aunque se podría generar una a través de una prueba de columnas, para los alcances del presente trabajo es posible basarnos en parámetros empíricos. Lothar (1985) propone una tasa de aplicación de 60 kg/m²/d para lodos primarios en combinación con excesos de lodos activados.

Entonces el área necesaria para el sedimentador estará dada por:

$$\text{Área del espesador} = \frac{\text{Lodos}_{base\ seca}}{\text{Tasa de aplicación}} \quad (\text{Lothar, 1985}) \quad (4-35)$$

$$\text{Área del espesador} = \frac{11,810 \frac{kg}{d}}{60 \frac{kg}{m^2(d)}} = 196.83 \text{ m}^2$$

Por criterios de operación y mantenimiento es recomendable construir al menos dos equipos, en realidad la razón principal es hacer mantenimiento sin la necesidad de detener por completo la operación. Por lo que el diámetro será:

$$\text{Diámetro de espesador} = \sqrt{\frac{4(\text{Área})}{\pi}} \quad (4-36)$$

$$\text{Diámetro de espesador} = \sqrt{\frac{4(196.83 \text{ m}^2)}{\pi}} = 15.83 \text{ m}$$

La compactación de lodos que se espera se basa en los datos de la Tabla 4.5, que contiene información para diversas fuentes de lodos. En este caso se tendría una suspensión que ha salido de un proceso anaerobio y se considera de tratamiento secundario por lo que es posible alcanzar un 9% de concentración de sólidos a la salida de esta etapa.

Tabla 4.5 Concentraciones máximas permisibles en espesadores de diferentes tipos de lodos (Lothar, 1985)

Tipo de Lodo	Máxima concentración de sólidos posible sin el uso de acondicionadores
Primario con lodo industrial pesado	10-30%
Primario:	
a) más de 65% volátiles	5-7%
b) menos de 65% volátiles	7-12%
Primario + exceso de secundario:	
a) con índice > 100ml/g	4-6%
b) con índice < 100ml/g	6-11%
Aireación extendida	3-5%
Primario digerido anaeróbicamente	8-14%
Lodo activado digerido anaeróbicamente	6-9%
Lodo activado con tratamiento térmico	10-15%

La masa de los lodos compactados será de:

$$\mathbf{Lodos\ espesados}_{masa} = \frac{\mathbf{Lodos\ base\ seca}}{\% \text{ sólidos deseado}} \quad (\text{Lothar, 1985}) \quad (4-37)$$

$$\mathbf{Lodos\ Espesados}_{masa} = \frac{11.81 \frac{\text{ton}}{d}}{9\%} = 131.25 \frac{\text{ton}}{d}$$

La densidad de estos lodos, con base en la ecuación (4-33):

$$\varphi_{\text{lodos}} = \frac{100}{\frac{9\%}{1.35} + \frac{91\%}{1}} = 1.02 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

El volumen de los lodos espesados será de:

$$\mathbf{Volumen\ lodos\ compactados} = \frac{\mathbf{Lodos\ Espesados}_{masa}}{\varphi_{\text{lodos}}} \quad (\text{Lothar, 1985}) \quad (4-38)$$

$$\mathbf{Volumen\ lodos\ compactados} = \frac{131.25 \frac{\text{ton}}{d}}{1.02 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}} = 128.19 \frac{\text{m}^3}{d}$$

El volumen sobrenadante estará dado por la ecuación (4-38) del manual de Lothar (1985):

$$\mathbf{Volumen\ sobrenadante} = \mathbf{Lodos}_{base\ húmeda} - \mathbf{Volumen\ lodos\ compactados} \quad (4-39)$$

$$\mathbf{Volumen\ del\ sobrenadante} = 327.8 - 128.19 = 199.61 \frac{\text{m}^3}{d}$$

Concentración promedio de la zona de lodo (considerada el 75% del lodo compactado)

$$\mathbf{Concentración\ media\ en\ la\ zona\ de\ compactación} = 9\% \times 0.75 = 6.75\%$$

Para calcular la altura del tanque se consideran 3 partes:

$$\mathbf{Altura\ de\ la\ sedimentación\ libre:} H_1 = 1.00\text{m} \quad (\text{experimental}) \quad (4-40)$$

$$\mathbf{Altura\ de\ la\ zona\ de\ compresión:} \quad (\text{tiempo de retención 36horas, experimental})$$

$$\mathbf{H}_2 = \frac{\mathbf{Tiempo\ de\ retención} \times \mathbf{Volumen\ lodos\ compactados}}{\mathbf{Área\ espesador}} \quad (\text{Lothar, 1985}) \quad (4-41)$$

$$H_2 = \frac{36 \text{ horas} \times 128.19 \frac{\text{m}^3}{d}}{196.83\text{m}^2} = 0.977\text{m}$$

$$\mathbf{Altura\ de\ la\ zona\ de\ remoción:} H_3 = 0.4\text{m} \quad (\text{Experimental})$$

$$\mathbf{Altura\ total\ espesador} = 2.5\text{m}$$

- Volumen del Espesador:

$$\mathbf{Volumen\ del\ espesador} = \mathbf{Área\ espesador} \times \mathbf{Altura\ total}$$

$$\text{Volumen del espesador} = 196.83 \times 2.5 = 492.75 \text{m}^3$$

Filtro Prensa: Para calcular el número de filtros que se necesitan para el proyecto se realizan las siguientes operaciones, tomando en cuenta que se tiene una disponibilidad de 3 ciclos/día:

$$\text{Carga volumétrica}_{\text{Ciclo}} = \frac{\text{Volumen lodos a la salida del filtro}}{\frac{\# \text{ciclos}}{d}} \quad (\text{CEPIS, 2005. b}) \quad (4-42)$$

Para calcular la densidad que tendrían los lodos en la salida del filtro es posible aplicar la siguiente ecuación (4-43):

$$\varphi_{\text{lodos}} = \frac{100}{\frac{65\%}{1.35} + \frac{35\%}{1}} = 1.2 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa lodos}_{\text{salida filtro prensa}} = \frac{\text{Lodos}_{\text{base seca}}}{\% \text{sólidos deseado}} \quad (4-43)$$

$$\text{Masa lodos}_{\text{salida filtro prensa}} = \frac{11.81 \frac{\text{ton}}{d}}{35\%} = 18.17 \frac{\text{ton}}{d}$$

$$\text{Volumen lodos}_{\text{filtro prensa}} = \frac{\text{Masa lodos}_{\text{salida filtro prensa}}}{\varphi_{\text{lodos}_{\text{filtro prensa}}}} \quad (4-44)$$

$$\text{Masa lodos}_{\text{salida filtro prensa}} = \frac{18.17 \frac{\text{ton}}{d}}{1.2 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}} = 15.11 \frac{\text{m}^3}{d}$$

Entonces se calcula la carga volumétrica por ciclo, al considerar el volumen en la salida del filtro prensa como la carga volumétrica total:

$$\text{Carga volumétrica}_{\text{ciclo}} = \frac{15.11 \frac{\text{m}^3}{d}}{2 \frac{\text{ciclos}}{d}} = 7.55 \frac{\text{m}^3}{\text{ciclo}}$$

Para ayudar en los cálculos se presenta la Tabla 4.6, que proporciona las dimensiones de filtros-prensa, con diferentes tamaños de placa filtrante y volúmenes de torta para diferentes espesores; tomando en cuenta un total de 80 placas filtrantes. Como la carga volumétrica en la salida del espesador es muy importante aún, se tomará para el cálculo el filtro más grande (Placas de 1.5m x 1.5m, espesor de 25mm y volumen por torta de 3.2m³).

$$\text{Filtros prensa necesarios} = \frac{\text{Carga volumétrica}_{\text{ciclo}}}{\text{Capacidad máxima filtro}} \quad (4-45)$$

$$\text{Filtros prensa necesarios} = \frac{7.55 \frac{\text{m}^3}{\text{ciclo}}}{3.2 \text{m}^3} = 2.36$$

Para el resultado obtenido lo recomendable sería adquirir un equipo más, es decir, tener tres líneas de filtrado a presión, sin embargo ya se ha comentado que la inversión inicial para estos equipos es alta por lo que es posible aumentar el horario de trabajo a 10 horas/día y así cumplir 3 ciclos de 3 horas:

$$Carga\ Volumétrica_{Ciclo} = \frac{15.11 \frac{m^3}{d}}{3 \frac{ciclos}{d}} = 5.04 \frac{m^3}{ciclo}$$

Por lo que:

$$Filtros\ prensa\ necesarios = \frac{5.04 \frac{m^3}{ciclo}}{3.2m^3} = 1.575$$

Tabla 4.6 Dimensiones filtros-prensa más comunes (CEPIS, 2005. b)

Dimensión de la placa	Área filtrante por placa (m ²)	Volumen de la torta por placa		
		Espesores [mm] y Vol [l]		
		20 mm	25mm	30mm
0.80 m x 0.80 m	1.4	13	16	19
1.20 m x 1.20 m	3.0	29	36	40
1.50 m x 1.50 m	4.0	36	40	54

Sin embargo, la carga de trabajo asociada con la capacidad instalada sería de tan sólo del 80%. Es posible entonces, adquirir equipos de menor capacidad, algunas de las opciones pueden ser las siguientes: Un equipo con menor área filtrante, el mismo espesor de placa y las mismas placas; un equipo con la misma área filtrante, pero con menor espesor de placa y las mismas placas; un equipo con mayor cantidad de placas, el mismo espesor y un área filtrante menor. Existen muchas combinaciones posibles y mediante un análisis de evaluación de proyectos de inversión, como el método de la TIR (tasa interna de retorno), se podría encontrar la combinación más adecuada, sin embargo la falta de información financiera que brindan los ofertantes, lleva este análisis fuera de los alcances de este estudio de prefactibilidad. Se probará con un equipo con la misma área filtrante pero menor espesor de placa (20mm) que ofrece 2.88m³ para 80 placas:

$$Filtros\ prensa\ necesarios = \frac{5.04 \frac{m^3}{ciclo}}{2.88 \frac{m^3}{filtro}} = 1.75 \approx 2\ filtros$$

Con un % de utilización de 87.5%.

Filtros banda. - Para el caso particular de la planta que se está dimensionando, los lodos ya han pasado por un proceso de espesamiento secundario y la concentración de sólidos se puede estimar en 9%. Como se puede observar en la Tabla 4.7 la alimentación, en galones por hora, es una función del ancho de la banda de compresión.

Tabla 4.7 Dimensiones generales de filtros banda para diferentes lodos (OR-TEC, 2010)

Tipo de lodo	% sólidos en los lodos	Tasa de alimentación de lodos (gph)	Tasa de alimentación en base seca (lb/h)	Tasa de consumo polímero lb/tonb.s.	% sólidos en la torta
Lodos municipales activados provenientes de	1.5	5995 (1.0m) 8912 (1.5m)	750 (1.0m) 1115 (1.5m)	8-10	Más de

plantas de tratamiento		11990 (2.0m)	1500 (2.0m)		18
Lodos provenientes de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas	3.6	3230 (0.5m) 4796 (1.0m) 6461 (1.5m)	970 (1.0m) 1440 (1.5m) 1940 (2.0m)	8-12	Más de 22
Lodos municipales activados primarios y secundarios de una planta de tratamiento	3.25	4150 (0.5m) 6161 (1.0m) 8300 (2.0m)	1125 (1.0m) 1670 (1.5m) 2250 (2.0m)	8-10	Más de 25
Espumas de flotación	8.2	2120 (1.0m) 3180 (1.5m) 4240 (2.0m)	1450 (1.0m) 2175 (1.5m) 2900 (2.0m)	10-12	Más de 30

También se puede dimensionar con la tasa de entrada en sólidos de base seca en libras por hora. En la misma tabla se pueden observar los requerimientos de polielectrolito y el porcentaje final de sólidos que se puede alcanzar.

$$Tasa\ de\ entrada_{base\ seca} \left[\frac{lb}{hora} \right] = 11,810 \frac{kg}{d} \left(\frac{2.2046\ lb}{1\ kg} \right) \left(\frac{1\ d}{10\ horas} \right)$$

$$Tasa\ de\ entrada_{base\ seca} = 2,603.63 \frac{lb}{hora}$$

Para introducir uno sólo de estos equipos en la planta, es necesario aumentar el horario de trabajo de este equipo a 10 horas por turno, con lo que el ancho de la banda sería de 2.0m. Sin embargo, lo recomendable es tener dos líneas por si alguna de ellas necesita mantenimiento o tiene una falla inesperada, entonces:

$$Tasa\ de\ entrada \frac{p}{BP}_{base\ seca} = 11,810 \frac{kg}{d} \left(\frac{2.2046\ lb}{1\ kg} \right) \left(\frac{1\ d}{6\ horas} \right) \left(\frac{1}{2\ BP} \right)$$

$$Tasa\ de\ entrada_{base\ seca} = 2,169.69 \frac{lb}{hora}$$

Es decir, serán necesarios dos equipos con una banda de 1.5 m de ancho, funcionando 6 horas y es posible esperar un contenido de humedad de 35% con el uso de floculante.

Tamizado y empacado.- Una envasadora como la que se muestra en la Figura 4.4 puede envasar hasta 8 sacos de 60 kg en un minuto. Para determinar la capacidad del equipo se emplea el siguiente modelo:

$$\# \text{ de sacos a envasar por minuto} = \frac{Masa\ lodos_{salida\ filtro\ prensa}}{Capacidad\ del\ saco} \quad (4-46)$$

$$\# \text{ de sacos a envasar} = \frac{18,170 \frac{kg}{d} \left(\frac{1d}{8h} \right) \left(\frac{1h}{60min} \right)}{50 \frac{kg}{saco}} = 0.75 \frac{sacos}{min} \approx 1 \frac{saco}{min}$$

Por lo tanto el equipo es más que adecuado para satisfacer nuestras necesidades de producción. Además cuenta con una precisión de $\pm 40g$ que significa el 0.08%, por lo que permitiría satisfacer las necesidades de calidad de los clientes.



Figura 4.4 Envasadora electrónica para granulados (Comaiz, 2010)

4.10 Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

Para calcular el beneficio ecológico que generaría la implementación de este proyecto, primero se determinará el daño que provocaría la liberación de biogás, de las 150 toneladas de residuos orgánicos que no recibirían tratamiento.

De la ecuación (4-16):

$$\text{Producción biogás} = \left(400 \frac{\text{m}^3}{\text{ton MV}} \right) \left(20.25 \frac{\text{ton MV}}{\text{día}} \right) = 8,100 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Este biogás contiene 60% de CH₄ y 30% de CO₂, así que lo siguiente es calcular las toneladas de CO₂ equivalentes que se liberarían a la atmósfera.

El CO₂ que se generaría por la descomposición de los residuos estará dado por la siguiente ecuación (3-48):

$$\text{Generación CO}_2 = \text{caudal biogás} \times \% \text{CO}_2 \text{ en el biogás} \times \text{densidad}_{\text{CO}_2} \quad (4-47)$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ descomposición} = 8,100 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 30\% \times 0.00156 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ descomposición} = 3.79 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e}$$

Ahora para el daño que generaría el metano en tonCO₂equivalente, se usará un procedimiento similar, sólo que ahora se aplicará un factor de conversión de 21, pues como se mencionó en los antecedentes, el metano es 21 veces más nocivo para el efecto invernadero que el dióxido de carbono.

$$\text{Generación CO}_2 \text{ por conversión de CH}_4 = \text{caudal biogás} \times \% \text{CH}_4 \times \text{densidad}_{\text{CH}_4} \times 21$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ por conversión de CH}_4 = 8,100 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 60\% \times 0.000714 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \times 21$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ por conversión de CH}_4 = 72.87 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e}$$

El daño total producido al ambiente es la suma de estas dos cantidades:

$$\text{Generación } CO_2e \text{ total} = 72.87 \frac{\text{ton}}{d} CO_2e + 3.79 \frac{\text{ton}}{d} CO_2e$$

$$\text{Generación } CO_2e \text{ total por degradación} = 76.66 \frac{\text{ton}}{d} CO_2e$$

Como para este proyecto se considera sustituir un combustible convencional como lo es la gasolina, por una más limpio como lo es el metano. Existe un daño al medio ambiente que puede ser medido en emisiones de CO₂ debido a la combustión sucia de la gasolina.

Para encontrar el daño actual que se mitigaría con el desarrollo de este proyecto se debe encontrar la cantidad de litros de gasolina magna que serían sustituidos y lo que contaminarían estos automóviles usándolos. La equivalencia entre un m³ de CH₄ y un litro de gasolina magna es de 1.13 (Ferré y Fuchs, 2009). Y el factor de emisión de contaminantes para un litro de gasolina se obtiene del promedio de la Tabla 4.8. La última columna se obtiene multiplicando la emisión en g/L por el rendimiento medio del vehículo y convirtiendo a kg/L.

Tabla 4.8 Emisión de CO₂ por tipo de vehículo (CONUEE, 2010)

Marca/modelo	Rendimiento (km/L)	Emisión CO ₂ (g/km)	Emisión CO ₂ (kg/L)
SENTRA/2008	10.20	205	2.09
TSURU/2008	12.70	156	1.98
PLATINA/2008	12.8	156	2.00
CHEVY/2008	13.18	148	1.95
POINTER/2008	10.93	174	1.90
JETTA/2008	9.87	230	2.27
PROMEDIO			2.03

$$\text{Emisión de } CO_2 \text{ por quema gasolina} = \text{litros a sustituirse} \times \text{emisión promedio} \quad (4-48)$$

$$\text{Litros de magna a sustituirse} = \text{Caudal metano destinado a GNV} \times 1.13$$

$$\text{Litros de magna a sustituirse} = 2,128.35 \frac{m^3}{d} \times 1.13 \frac{L \text{ gasolina}}{m^3 GNV}$$

$$\text{Litros de magna a sustituirse} = 2,405.04 \frac{L \text{ magna}}{d}$$

$$\text{Emisión de } CO_2 \text{ por quema gasolina} = 2,405.04 \frac{L \text{ magna}}{d} \times 2.032 \frac{kg CO_2}{L \text{ magna}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1,000 kg}$$

$$\text{Emisión de } CO_2 \text{ por quema gasolina} = 4.89 \frac{\text{ton} CO_2e}{d}$$

Entonces la contaminación total que el proyecto podría disminuir es:

$$\text{Emisión total de } CO_2 \text{ sin proyecto} = 81.55 \frac{\text{ton} CO_2e}{d}$$

Ahora bien, la implantación de este proyecto generaría dos importantes disminuciones en la cantidad de CO₂e que se determinó. La primera se produce en la quema del CH₄ en el sistema de generación de energía, ya que al transformar el CH₄ en CO₂ el daño es 21 veces menor y la segunda se produce al sustituir la gasolina magna en los vehículos, pues como ya se ha revisado en este capítulo, es un hecho que la combustión de metano es mucho más limpia.

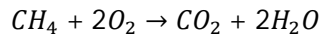
Primero se calculará el daño que se generaría de la implementación del proyecto y la diferencia entre éste y el daño sin la implementación del mismo, será el beneficio ambiental del proyecto.

Se empezará por el daño generado por la combustión del metano en el sistema de cogeneración.

De la ecuación (4-24) se obtuvo que:

$$\text{Gasto en generación}_{\text{biometano}} = \frac{1,072 \text{ kW} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right) \left(\frac{3600\text{s}}{1\text{hora}} \right)}{8,100 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \left(\frac{4.186 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} \right)} = 113.82 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}$$

Ahora, la ecuación para la oxidación del metano es:



Entonces el factor de estequiometría (R_e) es 1, pues al quemarse una molécula de CH₄ se produce exactamente una molécula de CO₂.

Para determinar cuántas moléculas de CH₄ están quemándose en el sistema de cogeneración basta con aplicar la siguiente ecuación:

$$\text{Moles de CH}_4 \text{ quemadas} = \frac{\text{caudal de metano}}{\text{masa molar CH}_4} \quad (4-49)$$

$$\text{Moles de CH}_4 \text{ quemadas en cogeneración} = \frac{1.95 \frac{\text{ton}}{\text{d}}}{16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{1\text{ton}}{10^6\text{g}}}$$

$$\text{Moles de CH}_4 \text{ quemadas en cogeneración} = 121,899.67 \frac{\text{moles CH}_4}{\text{dia}}$$

Para calcular las toneladas de CO₂ equivalentes que se generarían de la combustión de esta cantidad de moléculas de CH₄ se aplicará la siguiente ecuación (4-50):

$$\text{Generación CO}_2 \text{ quema de CH}_4 = \text{moles CH}_4 \text{ quemadas} \times R_e \times \text{masa molar CO}_2$$

$$\begin{aligned} \text{Generación CO}_2 \text{ quema CH}_4 \\ = 121,899.67 \frac{\text{moles CH}_4}{\text{dia}} \times 1 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol CH}_4} \times 44 \frac{\text{g}}{\text{mol CO}_2} \times \frac{1\text{ton}}{10^6\text{g}} \end{aligned}$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ quema de CH}_4 \text{ en cogeneración} = 5.36 \frac{\text{ton CO}_2\text{e}}{\text{dia}}$$

Ahora, de las moléculas que se queman en los coches por la utilización del metano como combustible vehicular se genera otra cantidad de CO₂ que se calcula de la misma forma, obteniendo la cantidad de moléculas a quemar en los coches con la ecuación (4-49) y calculando la generación de CO₂ en la combustión, con la ecuación (4-50). Cabe resaltar que estos cálculos son teóricos pues no está incluido un factor por la eficiencia en la combustión de ambos sistemas: El sistema de cogeneración y los motores automotrices.

$$\text{Moles de CH}_4 \text{ quemadas en coches} = \frac{1.52 \frac{\text{ton}}{\text{d}}}{16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{1\text{ton}}{10^6\text{g}}}$$

$$\text{Moles de CH}_4 \text{ quemadas en cogeneración} = 94,977.83 \frac{\text{moles CH}_4}{\text{dia}}$$

$$\begin{aligned} \text{Generación CO}_2 \text{ quema CH}_4 \\ = 94,977.83 \frac{\text{moles CH}_4}{\text{dia}} \times 1 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol CH}_4} \times 44 \frac{\text{g}}{\text{mol CO}_2} \times \frac{1\text{ton}}{10^6\text{g}} \end{aligned}$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ quema de CH}_4 \text{ en cogeneración} = 4.18 \frac{\text{ton CO}_2\text{e}}{\text{dia}}$$

El daño total en emisiones de CO₂ generado por el proyecto es la suma de las emisiones de las combustiones en los dos tipos de motor.

$$\text{Generación CO}_2\text{e total} = 5.36 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2\text{e} + 4.18 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2\text{e}$$

$$\text{Generación CO}_2\text{e total con proyecto} = 9.54 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2\text{e}$$

Por último, el ahorro en emisiones será la diferencia entre la emisión de CO₂ sin el proyecto y la emisión de CO₂ resultante de su implementación, es decir:

$$\text{Disminución total de emisiones} = 81.55 \frac{\text{ton CO}_2\text{e}}{\text{d}} - 9.54 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2\text{e}$$

$$\text{Disminución total de emisiones} = 72.01 \frac{\text{ton CO}_2\text{e}}{\text{d}}$$

4.11 Diseño y distribución de planta

Para finalizar la propuesta técnica se realizará un diagrama de distribución de planta retomando los procesos que se han dimensionado hasta el momento sobre el terreno propuesto y tomando en cuenta las instalaciones auxiliares, que se lista a continuación:

- a. Oficinas administrativas: La estructura administrativa del sistema tendrá una gerencia general que coordinará los esfuerzos del personal de toda la planta, en especial se dirigirá a los gerentes de las cuatro áreas principales: Biodigestión, Recuperación de materiales, Fertilizante y Gas Metano Comprimido.

Para evitar que la estructura administrativa de las plantas se vuelva demasiado robusta, incurriendo innecesariamente en gastos fijos y enfocándose de forma más productiva en la cadena de valor propia del sistema, se recurrirá a subcontratación de los siguientes servicios:

- i. Contabilidad fiscal y asistencia legal
- ii. Mantenimiento, seguridad privada y limpieza
- iii. Planeación
- iv. Servicios de informática
- v. Mercadotecnia y promoción

Aún así el gerente general de la planta debe tener sólidos conocimientos de finanzas, que contrastados con los perfiles técnicos de los gerentes de área, deben resultar en la toma de las mejores decisiones enfocadas en la rentabilidad del sistema.

Se contará con una gerencia de contabilidad general administrativa para tener el control de la información de los recursos de la planta dentro de ella y con el objetivo de elaborar los informes financieros al final de cada periodo.

La fuerza de ventas estará constituida de un gerente comercial, un Vendedor Sr y una pareja de Vendedores Jr para el fertilizante y materiales reciclables.

b. Almacenes de materia prima y producto terminado

Existen, dentro de la teoría de investigación de operaciones tradicional, varios modelos matemáticos para el cálculo de la cantidad óptima a producir. La mecánica que utilizan es encontrar el punto en el cual el costo asociado al almacenamiento y el costo de no almacenar y perder una venta por una demanda inesperada, son iguales.

No está dentro de los alcances de este trabajo la determinación de un lote óptimo de producción debido a que no se han realizado los estudios de mercado para fertilizante y materiales reciclables que brinden más información sobre la demanda, como por ejemplo, si la misma se puede considerar lineal o no, el tiempo de entrega necesario y la distribución de probabilidad que se asemeja a las cantidades requeridas con respecto al precio.

Además, los modelos antes mencionados se enfocan en los "sistemas pull" (los sistemas pull o jalar son sistemas controlados por el mercado, es decir se produce lo que el mercado exige) y en este caso la planta cubre cabalmente con una demanda bien identificada que es la de tratamiento de los residuos y gracias a esta transformación es que se obtienen las cantidades de productos que se han dimensionado. Lo mejor que se hace es calcular el área en el cual se podría almacenar la producción de 6 meses, que es el tiempo de espera entre cosecha y cosecha, de la siguiente manera:

Dimensiones de un costal lleno: 60 cm largo, 40 cm ancho, 25 cm de alto.

$$\#Sacos\ producidos_{6\ meses} = 0.75 \frac{saco}{min} \left(\frac{60min}{h} \right) \left(\frac{8h}{d} \right) \left(\frac{180d}{periodo} \right) \quad (4-51)$$

$$\#Sacos\ producidos_{6\ meses} = 64,800 \frac{sacos}{periodo}$$

Si es posible estibar 10 sacos entonces el área a ocupar será de:

$$\text{Área de almacén} = \text{Área sacco} \left(\frac{\#Sacos\ producidos_{6\ meses}}{\#Sacos\ a\ estibar} \right) \quad (4-52)$$

$$\text{Área de almacén} = (0.6 \times 0.4) \times \frac{64,800}{10} = 1,555.2m^2$$

Si no se contara con el espacio suficiente se puede recurrir a sistemas de almacenaje más avanzados como la paletización y las diferentes opciones de racks en el mercado. La idea es estibar una cantidad adecuada para que los empaques sufran el menor daño posible durante el periodo de almacenamiento, acomodándolos en tarimas que a su vez se apilan en una estructura semi mecanizada para que al final la altura que pueda ser aprovechable sea máxima y el área la mínima. Ésto requiere de la implementación de algunos equipos para el manejo de estos pallets tales como montacargas y elevadores.

- c. Sanitarios y Vestidores: Es este caso es necesario incluir regaderas por el tipo de materiales con el que se trabajará a diario.
- d. Comedor: Debe ser un área limpia y adecuada para que el personal consuma los alimentos y recupere las energías y el ánimo para que pueda seguir desempeñando su función sin mermar la productividad.
- e. Áreas libres, de descarga y maniobras: Son espacios destinados a facilitar el flujo de personal y equipo en caso de emergencia. Se debe tener en cuenta que es necesario cumplir con las normas de seguridad industrial dejando espacio para las rutas de personas entre los diferentes equipos de proceso y accesibilidad para el mantenimiento. Se debe calcular el área mínima necesaria para que los vehículos puedan maniobrar sin peligro de accidentes y retraso de tiempos por atascos.

En la Figura 4.5 se presenta una propuesta de distribución de planta enfocada a minimizar el movimiento de materiales, debido a que la mayoría de los equipos son semi-automáticos y hay tiempo suficiente para que los operarios se desplacen, mientras que cada metro que el material se deba mover implica un costo adicional para el sistema reduciendo la rentabilidad e incluso volviendo necesaria la utilización de más equipos.

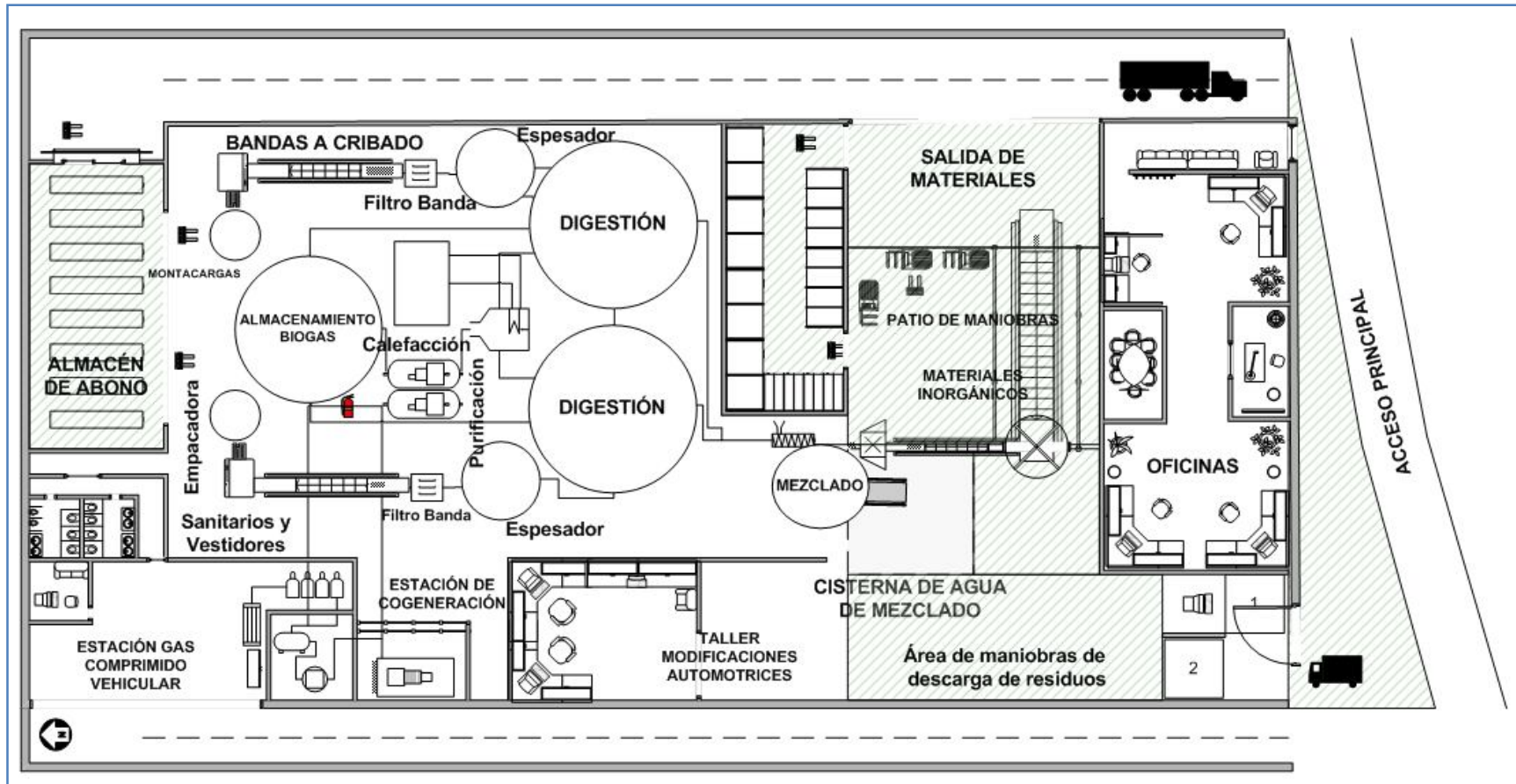


Figura 4.5 Propuesta para la distribución de la planta de biogás