

CAPÍTULO 9

ANÁLISIS DEL BIOGÁS OBTENIDO Y BALANCE ENERGÉTICO

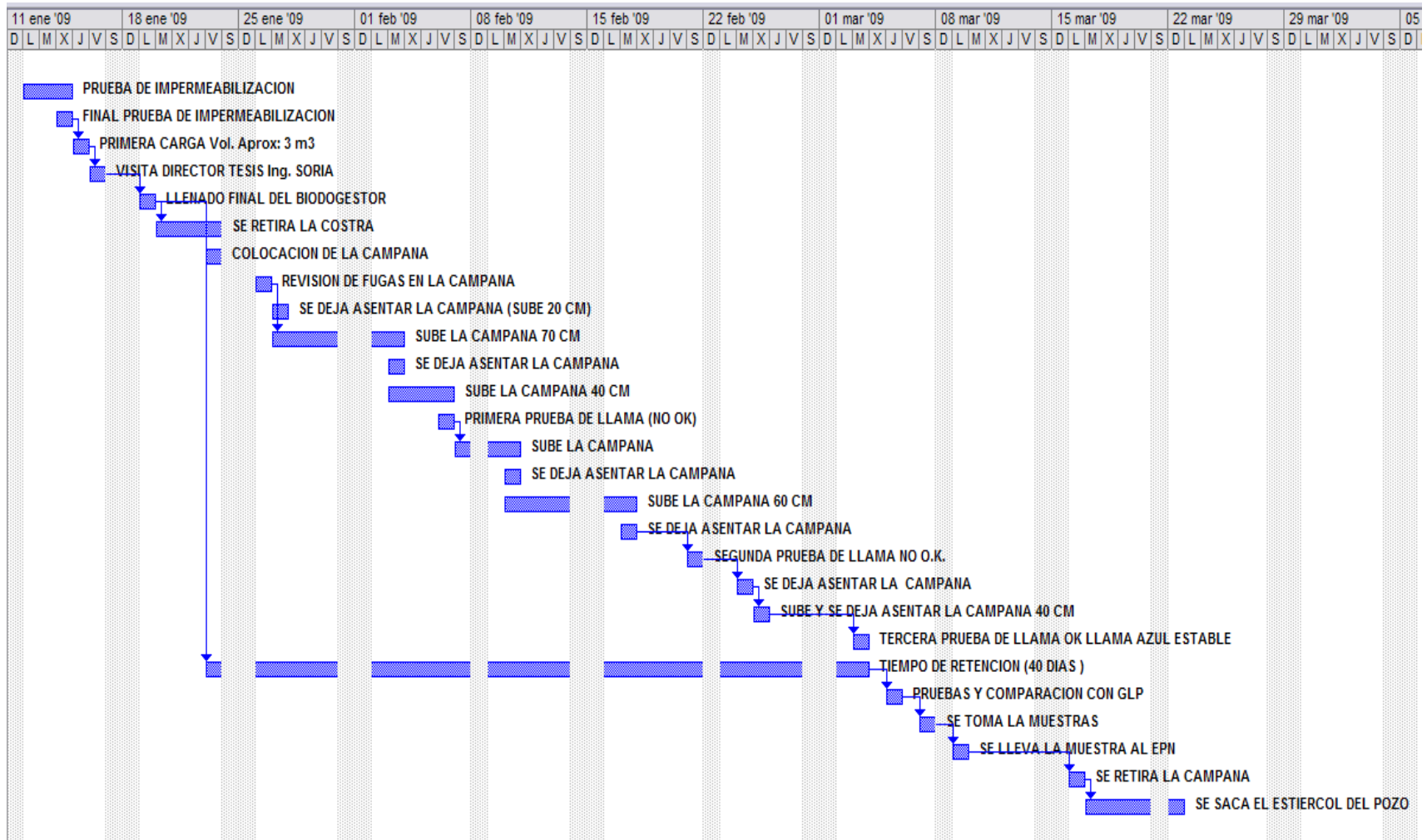
9.1. COMPARACIÓN DEL BIOGÁS PRODUCIDO CON MATERIA ORGANICA DE GANADO PORCINO Y GANADO VACUNO

El siguiente capítulo, trata sobre el estudio minucioso que se realizo tanto para estiércol de ganado porcino como para estiércol de ganado vacuno.

Primeramente se realizo la carga del biodigestor con el estiércol de ganado vacuno, se obtuvo gas en el tiempo de retención determinado y finalmente se realizaron pruebas prácticas y químicas del gas, posteriormente se retiro la campana del biodigestor así como la materia orgánica, para seguidamente cargarlo con estiércol de ganado porcino, el cual va a ser la materia de carga permanente de aquí en adelante, ya que es una granja dedicada al crecimiento y desarrollo de dichos animales.

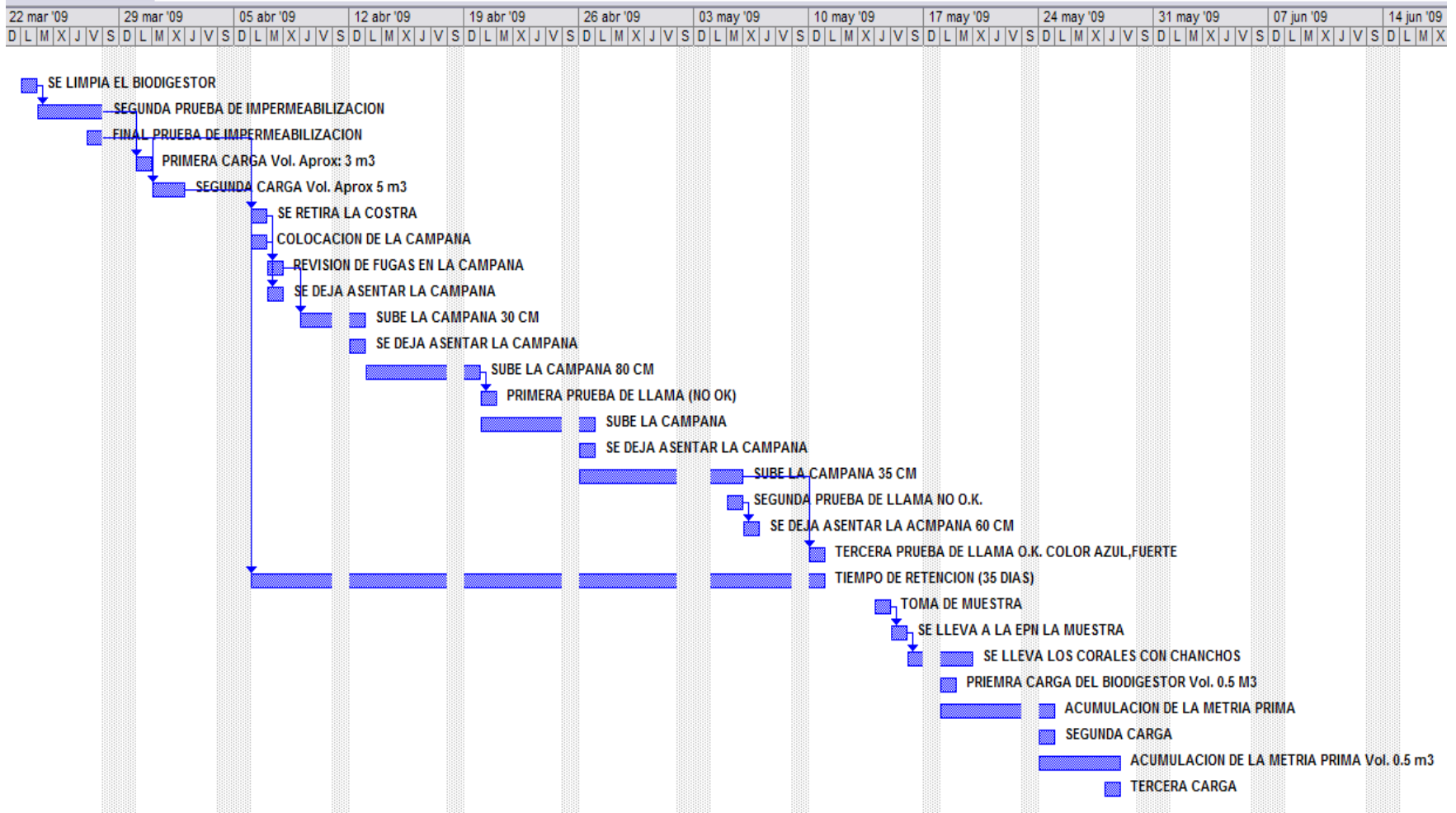
A continuación desarrollamos cada una de las actividades con su respectiva fecha, con el objetivo de comprender todo y cada uno de los pasos que se siguieron con el fin de cumplir con el alcance propuesto y a la vez desarrollar el presente capítulo.

DIAGRAMA DE GANTT PARA LA CARGA DEL BIODIGESTOR CON ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO



Cronograma de Actividades 9.1 Cronograma de los Pasos Realizados para La Obtención de Biogás con EstiérCOL de Ganado Vacuno

DIAGRAMA DE GANTT PARA LA CARGA DEL BIODIGESTOR CON ESTIÉRCOL DE GANADO PORCINO



Cronograma de Actividades 9.2 Cronograma de los Pasos Realizados para La Obtención de Biogás con Estiércol de Ganado Vacuno

9.2. PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR CON ESTIERCOL DE GANADO VACUNO.

Para la puesta en marcha de la planta es necesaria una aportación inicial de estiércol muy elevada, puesto que se precisa de una primera llenada completa del digestor. La primera carga es hecha por la boca del digestor, por lo tanto, sin el gasómetro; colocamos el estiércol de ganado vacuno a ambos lados de la pared divisora para evitar posibles problemas de fisuras en las paredes del digestor por causa de la presión hidrostática. La edad del digerido tiene un factor clave para la fermentación. La mejor manera de disponer de este volumen es ir almacenando el estiércol desde el inicio de la construcción del digestor, para disponer así de la cantidad suficiente para la puesta en marcha, pero para nuestro caso no fue un problema este factor ya que disponíamos de la materia orgánica necesaria para la primera carga ya que la obtuvimos del camal del norte ubicado en el sector de Llano Grande (Quito) Fotografía 9.1.



Fotografía 9.1 Recolección de Materia Orgánica (Estiércol De Ganado Vacuno)

Para garantizar el llenado de la planta se puede diluir más de lo que se hará en condiciones estacionarias.

Cuando se llena la planta, el sustrato debe ser diluido al 33%, es decir aproximadamente con el 1/3 de la misma cantidad de agua que de estiércol, usando cuando sea posible la orina, pero como no disponíamos de animales estabulados solo hicimos la dilución con agua.

La transportación de la materia orgánica se realizó utilizando como medio de transporte de la propiedad de la granja para lo cual se hizo necesario dos viajes en el cual el primero se realizó de 3 m³ y el segundo de 5m³ para así completar los 12 m³ con las 4m³ de agua que se dejó dentro del pozo luego de realizar la prueba de impermeabilización. Fotografía 10.2



Fotografía 9.2 Transportación de la Materia Orgánica (Estiércol de Ganado Vacuno)

9.2.1 LLENADO DEL BIODIGESTOR CON LA MATERIA PRIMA

Una vez que se transportado la materia orgánica desde el camal del norte ubicado en Llano Grande en la ciudad del Quito hacia la granja ubicada en Calacalí donde

se encuentra la planta de biogás, se procede a su llenado por la boca del pozo como se menciona anteriormente. Fotografía 10.3



Fotografía 9.3 Primera Carga con la Materia Orgánica (Estiércol de Ganado Vacuno)

9.2.2 COLOCACION DE LA CAMPANA

En el capítulo 7 se detalla algunas recomendaciones a tener en cuenta al momento de colocar la campana, en este caso se utilizó un tecele colgado de un pórtico con el fin de ayudar a la colocación de la misma. Fotografía 9.4



Fotografía 9.4 Colocación de la Campana

9.2.3 TIEMPO DE RETENCION

El estiércol de ganado vacuno va a empezar a producir una cantidad razonable de gas en uno o dos días. Las características de este período de arrancada serán:

- Una calidad baja del gas, con un contenido de CO₂ superior al 60%
- Un gas de olor muy fuerte
- Ph bajos
- Producción de gas fluctuante

Para que se estabilice antes el proceso se debe remover periódicamente y de forma intensiva el contenido, introduciendo dos émbolos a través de la entrada y la salida y efectuando un movimiento alterno para provocar la circulación y completa mezcla del sustrato en digestión. Si el proceso presenta una cierta resistencia a la estabilización se podrá añadir cal o estiércol fresco, sin añadir más sustrato fresco hasta que se inicie la producción de gas.

Si se desea que la producción de gas se acelere, puede introducirse junto con el sustrato rumen de vacuno, que contiene bacterias metanogénicas que se encargan de la producción del biogás. Existen otras sustancias e inoculantes que pueden introducirse para acelerar el proceso de arranque, pero el funcionamiento en modo estacionario no se verá afectado por este hecho.

El tiempo de retención para el caso en que se lleno el biodigestor con estiércol de ganado vacuno, fue de 40 días como se puede ver en el Cronograma de Actividades 9.1

9.2.4 ANALISIS COMPARATIVO DE RESULTADO DE LOS PARAMETROS PARA LA OBTENCION DE BIOGAS

Al igual que cualquier gas, las propiedades características dependen de la presión y la temperatura. Así mismo se ve afectado también por el contenido de humedad.

Los principales factores de interés son:

- El volumen varía en función de la presión y la temperatura.
- El poder calorífico varía en función de la temperatura, la presión y el contenido en vapor de agua.
- Cambia el contenido de vapor de agua como función de la temperatura y la presión.

El poder calorífico del biogás es aproximadamente de 6 kWh/m^3 , siendo un combustible potencial. El poder calorífico neto dependerá del porcentaje de metano, de la aplicación que le demos y del sistema de aprovechamiento.

Los datos de interés para los parámetros de desempeño diario del biodigestor son tomados a las 12:00, todos los días, durante el periodo de retención y 2 veces por semana después de este periodo, ver Anexo 10.

9.2.5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Cuando el volumen del gas almacenado ya es suficiente (el normal de diseño), este desplaza, por vasos comunicantes, el estiércol líquido a la cámara de expansión. Una vez que esto sucede, se puede empezar a alimentar el reactor con la regularidad programada o de diseño. Las primeras producciones de biogás

deberán de eliminarse sin usarse, puesto que las cantidades residuales de oxígeno remanente pueden provocar problemas de explosión del gas.

Una vez comenzado a generar biogás y a quemar llama azul, no se continuo con la alimentación del reactor por el tanque de carga ya que la finalidad de cargar con estiércol de ganado vacuno era únicamente obtener biogás para posteriormente realizar las pruebas respectivas y análisis químico del mismo para finalmente compararlo tanto con GPL y con el biogás generado con estiércol de ganado porcino.

9.3. PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR CON ESTIERCOL DE GANADO PORCINO

Una vez realizado todas las pruebas del biogás obtenido de la carga del biodigestor con el estiércol de ganado vacuno, se procedió a retirar el mismo con la ayuda de una bomba de 5 HP la cual facilito la descarga del pozo, seguidamente se procedió a la limpieza total del biodigestor, para seguidamente cargarlo con estiércol de ganado porcino el cual es obtenido igual que la materia orgánica de ganado vacuno, es decir, se recolecto del camal del norte ubicado en Llano Grande en la ciudad de Quito y fue transportado a Calacalí, con la ayuda de tanque de 0.5 m³ cada uno, ya que este tiene un porcentaje de humedad mayor al estiércol de ganado vacuno, en las fechas indicadas en el Cronograma de Actividades 9.2.

9.3.1 LLENADO DEL BIODIGESTOR CON LA MATERIA PRIMA Y COLOCACION DEL GASOMETRO

Este punto está desarrollado en el Capitulo 7 donde se explica cómo se realizó el llenado del pozo para el caso de la materia orgánica de ganado porcino.

9.3.2 TIEMPO DE RETENCION

Como podemos ver en Cronograma de Actividades 9.2 para el caso de la carga del biodigestor con estiércol de ganado porcino fue de 35 días a diferencia de la primera carga realizada en el biodigestor con el estiércol de ganado vacuno que fue de 40 días, esto pudo haber ocurrido posiblemente a factores ambientales en la zona y especialmente las características de cada materia orgánica

9.3.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Una vez que ha concluido el tiempo de retención y se ha obtenido las primeras señales de biogás, se procede a realizar la prueba de llama, una vez que esta es óptima y de buena calidad se procede a hacer las pruebas de funcionamiento y comparación del mismo con GLP y con el biogás obtenido del estiércol de ganado vacuno, y se continúa alimentando el biodigestor con la regularidad programada o de diseño, y se procede a la instalación definitiva de los equipos (cocina y calentadores) que funcionaran de aquí en adelante con el biogás.

9.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo al reporte de análisis por cromatografía LAII 019-09 entregado por el Laboratorio de Análisis Instrumental del Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional el día 25 de mayo del 2009 se obtuvo los siguientes resultados

Tabla 9.1 Propiedades de La Muestra de Biogás de Ganado Vacuno

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| Muestra | Biogás de Ganado Vacuno |
| Presión [psi] | Atmosférica |
| Temperatura [°C] | 22 °C |
| Fecha de muestreo | 14/05/2009 |

La muestra se analizó a 50 °C. se obtuvo los siguientes resultados. Tabla 9.2 y 9.3

Tabla 9.2 Resultados de los Componentes Encontrados en la Muestra de Biogás de Ganado Vacuno

| Componente | Biogás de Ganado Vacuno | |
|-----------------|-------------------------|---------|
| | % Peso | % Moles |
| Nitrógeno | 17.90 | 17.08 |
| Metano | 29.79 | 49.75 |
| CO ₂ | 50.71 | 30.79 |
| agua | 1.60 | 2.38 |

Tabla 9.3 Propiedades del Biogás de Ganado Vacuno Analizado

| | Biogás de Ganado Vacuno |
|---|-------------------------|
| Densidad relativa | 1.60 |
| Peso molecular promedio [g/mol] | 26.72 |
| Poder calorífico del gas [BTU/pe ³] | 503.65 |
| [KWh/m ³] | 5.2 |

A continuación se presenta una comparación de los 2 tipos de biogás obtenidos

Tabla 9.4 Propiedades de las Muestras de Biogás Obtenidos

| Muestra | Biogás de Ganado Vacuno | Biogás de Ganado Porcino |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| Presión [psi] | Atmosférica | Atmosférica |
| Temperatura [°C] | 22 °C | 28°C |
| Fecha de muestreo | 14/05/2009 | 07/03/2009 |

Tabla 9.5 Resultados de los Componentes Encontrados en Cada Muestra

| Componente | Biogás de Ganado Vacuno | | Biogás de Ganado porcino | |
|------------|-------------------------|---------|--------------------------|---------|
| | % Peso | % Moles | % Peso | % Moles |
| Nitrógeno | 17.90 | 17.08 | 20.32 | 17.02 |
| Metano | 29.79 | 49.75 | 41.62 | 61.01 |
| CO2 | 50.71 | 30.79 | 35.89 | 19.13 |
| agua | 1.60 | 2.38 | 2.18 | 2.84 |

Tabla 9.6 Propiedades del Biogás Obtenido de cada Muestra

| | Biogás de Ganado Vacuno | Biogás de Ganado Porcino |
|---|-------------------------|--------------------------|
| Densidad relativa | 1.60 | 0.81 |
| Peso molecular promedio [g/mol] | 26.72 | 23,46 |
| Poder calorífico del gas [BTU/pie ³] [KWh/m ³] | 503.65 5.2 | 617.62 6.4 |

9.4.1 COMPARACIÓN DEL CONSUMO DE BIOGAS OBTENIDO CON ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO CON RELACIÓN AL GLP

DETERMINACION DEL CONSUMO DE BIOGAS

Para determinar el consumo de biogás utilizado para calentar 2 galones de agua a 80°C se utilizo una funda la cual se la peso vacía, y posteriormente se la lleno en el tiempo que se demora en calentar los 2 galones de agua. Fotografía 9.5, 9.6 y 9.7



Fotografia 9.5 Peso del Recipiente Vacio para la Recolección del Biogás



Fotografia 9.6 Recolección del Biogás en el Recipiente



Fotografía 9.7 Peso del Recipiente Lleno de Biogás

Los datos que se obtuvieron fueron los siguientes:

Peso inicial del recipiente de prueba = 0.60 Kg.

Tiempo en calentar 2 galones de agua a 80 °C = 26 .48 min.

Peso final del recipiente de prueba = 0.10 Kg.

Consumo = 0.5 Kg. / 0,44 h

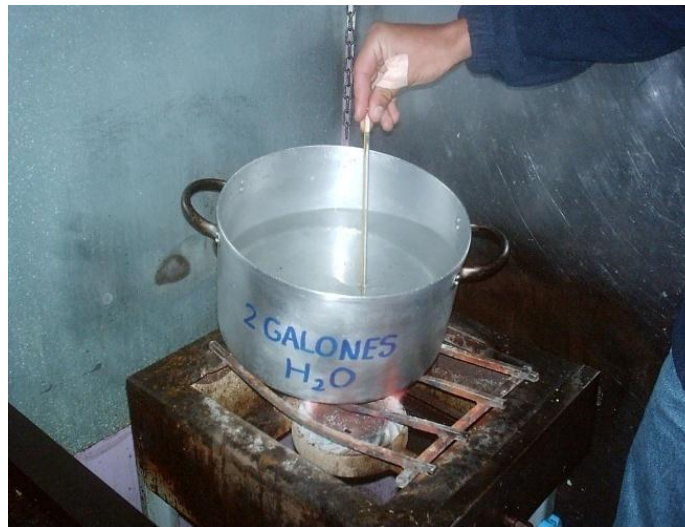
Consumo = 1.14 Kg / hora (Biogás)

DETERMINACION DEL CONSUMO DE GPL

Para determinar el volumen de gas de uso domestico, se procedió a pesar el tanque de GLP, luego de calentar los 2 galones de agua a 80°C se volvió a pesar el tanque y así determinamos el consumo de gas en kg/h. Fotografía 9.8 y 9.9



Fotografía 9.8 Peso del tanque de GLP



Fotografía 9.9 Medición de la temperatura utilizando GLP

Obteniendo los siguientes datos:

Temperatura ambiente = 22 °C

Peso inicial del tanque de GLP = 55 lb

Tiempo en calentar 2 galones a 80°C = 17 min 38 seg

Peso final del tanque de GLP = 53 lb

Consumo de GLP = 2 lb/17.38min

Consumo de GLP = 0.9 kg/0.29h

Consumo de GLP = 3.10 kg/h

Relación de consumo= 3.10/ 1.14 = 2.7 / 1

9.4.2 COMPARACION DEL CONSUMO DE BIOGAS OBTENIDO CON ESTIERCOL DE GANADO PORCINO Y EL GAS DE USO DOMESTICO (GLP)

Como se realizo las pruebas en el Capitulo 8, no es necesario detallarle muy claramente, por esta razón solo anotaremos los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con este tipo de biogás

DETERMINACION DEL CONSUMO DE BIOGAS

Peso inicial del recipiente de prueba = 0.80 Kg.

Tiempo en calentar 2 galones de agua a 80 °C = 22 .68 min.

Peso final del recipiente de prueba = 0.20 Kg.

Consumo = 0.6 Kg. / 0,378 h

Consumo = 1.59 Kg / hora (Biogás)

DETERMINACION DEL CONSUMO DE GLP

Temperatura ambiente = 22 °C

Peso inicial del tanque de GLP = 42 lb

Tiempo en calentar 2 galones a 80°C = 17 min 38 seg

Peso final del tanque de GLP = 40 lb

Consumo de GLP = 2 lb/17.38min

Consumo de GLP = 0.9 kg/0.29h

Consumo de GLP = 3.10 kg/h

Relación de consumo= 3.10/ 1.59 = 1.9 / 1

Tabla 9.7 Tabla de Comparación de las Principales Pruebas Realizadas a Cada Gas

| Tipo de gas | Biogás de Estiércol de ganado Vacuno | Biogás de Estiércol de ganado porcino | Gas Licuado de Petróleo (GLP) |
|---|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Poder Calorífico (BTU/pe³) (KWh/m³) | 503.65 5.2 | 617.62 6.4 | 997 10.3 |
| Consumo de gas (al calentar 2 Galones de H₂O a 80°C) (kg/h) | 1.14 | 1.59 | 3.10 |
| Densidad Relativa | 0.92 | 0.81 | 1.56 |
| Relación de Consumo de gas con respecto al GLP (al calentar 2 Galones de H₂O a 80°C) (kg/h) | 2.7 : 1 | 1.9 : 1 | 1 : 1 |
| Eficiencia en la prueba de consumo (%) | 36.77 | 52.29 | 100 |

9.5. ANALISIS TÉRMICO Y PERDIDAS DE CALOR

La cantidad de energía térmica y mecánica que ingresa en un volumen de control, más la cantidad de energía térmica que se genera dentro del volumen de control, menos la cantidad de energía térmica y mecánica que sale del volumen de control debe ser igual al incremento en la cantidad de energía almacenada en el volumen de control.

La relación de energía a medida que una masa de control MC pasa por un volumen de control se representa así:

$$\delta Q - \delta W = dE_{MC} \quad (9.1)$$

Donde:

Q: flujo de entrada de calor

W: cantidad de trabajo o flujo saliente de energía

E_{MC} : energía presente (masa de control)

Esta misma relación desarrollada, proporciona el transporte de energía interna, cinética y potencial hacia dentro y fuera del sistema y se representa de la siguiente forma:

$$\delta Q - \delta W = \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_i - \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_o + (U_2 - U_1)_{VC} \quad (9.2)$$

La cual representa a la ecuación de la primera ley de la termodinámica.

Donde:

h: entalpía

V: velocidad de flujo de masa

g: gravedad

z: altura respecto al nivel

U: energía interna

Integrando la ecuación 9.2, y aplicando para un estado de flujo estable en el balance térmico de un biodigestor como se analiza en la figura 9.1. se tiene la siguiente ecuación:

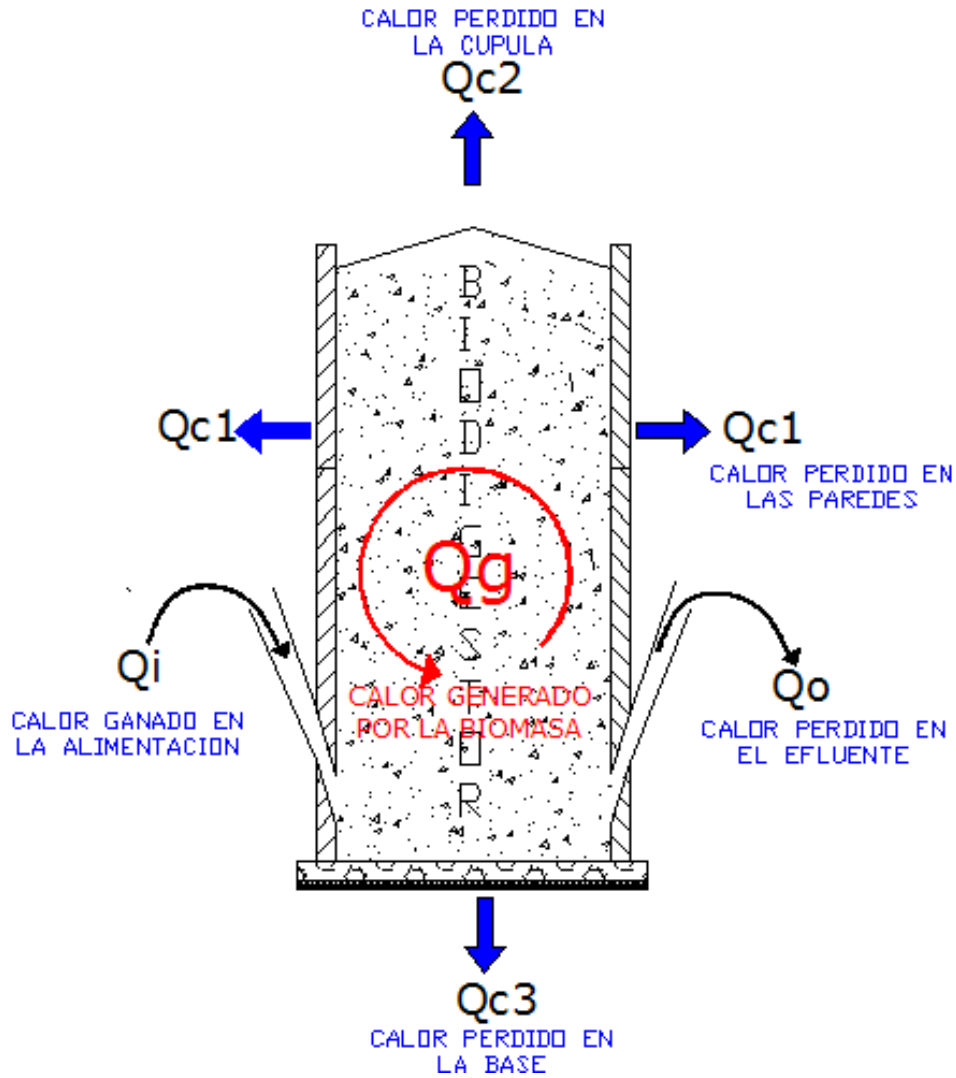


Figura 9.1: Balance Térmico de un Biodigestor

$$\sum E_i = \sum E_{Almacenada} + \sum E_e \quad (9.3)$$

Donde:

E Energía ingresada

$E_{Almacenada}$: Energía almacena dentro del recinto fermentador

E_e : Energía perdida

Aplicando lo anterior para el balance energético dentro del biodigestor tenemos:

$$(Q_i + Q_g) = (Q_{Almacenado}) + (Q_o - Q_{c1} - Q_{c2} - Q_{c3}) \quad (9.4)$$

Donde:

Q_i : calor de entrada en la alimentación

Q_g : calor que generada la biomasa por descomposición de los desechos

Q_o : calor de salida en el efluente

Q_{c1} : calor perdido a través de las paredes

Q_{c2} : calor perdido en la cúpula del digestor

Q_{c3} : calor cedido al exterior del piso.

$Q_{Almacenado}$: calor almacenado dentro del biodigestor

A continuación desarrollamos cada uno de los términos enunciados para realizar el balance térmico.

a) Cálculo del calor generado Q_g .

El calor que genera la estruvita del estiércol de ganado porcino en descomposición anaeróbica es igual a:

$$Q_g = 19 \cdot n \text{ [cal]} \quad (9.5)$$

Donde:

n: numero de [gramos/mol] del sustrato

Se asume que la estruvita va a ser igual a la glucosa, y tiene la siguiente ecuación:



De donde el Peso Molecular de la glucosa es, 180 gramos/mol, y calculamos el número de moles con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{MS}{\text{Peso Molecular}} \quad (9.7)$$

Donde

Ms: cantidad de masa seca, y esta se considera el 25% del volumen total del biodigestor

$$Ms = (\rho_{H_2O} * V) * 0.25 \quad (9.8)$$

Donde:

ρ_{H_2O} : densidad del agua

V: volumen del digestor

$$Ms = (\rho_{H_2O} * V) * 0.25 = 3\,000.000 \text{ gr}$$

Entonces $n = 16.666,66$ gramos

Por lo tanto el calor generado por la biomasa será:

$$Q_g = 19 * 16.666,66 = 316.666,66 \text{ [cal]} \text{ transformando a Joule tenemos:}$$

$Q_g = 1\,325.566,6 \text{ [J]}$ asumimos que este calor se generara cada hora por lo tanto:

$$Q_g = \frac{1\,325.566,6}{3600 \text{ s}} = 368.2 \text{ [W]} \text{ en una hora.}$$

Si consideramos doce horas que se toma como las horas más críticas de temperaturas bajas tendríamos un calor generado por la biomasa de:

$$Q_g = 4418,4 \text{ [W]}$$

b) Cálculo del calor en la entrada de alimentación Q_i .

El calor en la alimentación tiene la siguiente forma:

$$Q_i = m_i C_p T_i \quad (9.9)$$

Donde:

m_i : flujo de masa de sustrato que ingresa al biodigestor y es igual a

$$134.2 \left[\frac{Kg_est}{día} \right]$$

C_p : $4.196 \left[\frac{KJ}{Kg} \text{ } ^\circ\text{C} \right]$ en la temperatura de entrada

T_i : temperatura del sustrato a la entrada (caja de carga) $8 \text{ } [^\circ\text{C}]$

Aplicando los valores tomados anteriormente y conociendo que el tiempo que se demora en ingresar la materia orgánica al digestor es de 1820 segundos, reemplazando en la ecuación 9.5 tenemos:

$$Q_i = \frac{134.2}{1820} \left[\frac{Kg}{s} \right] * 4179 \left[\frac{W*s}{Kg*^\circ\text{C}} \right] * 8 [^\circ\text{C}]$$

$$Q_i = 2465.15 [W]$$

c) Cálculo del calor perdido en la salida del efluente Q_o .

Para conocer la cantidad de calor que pierde el digestor debido a la salida del bioabono, se debe tomar en cuenta que aproximadamente el 30% parte del sustrato se convierte en bioabono (la fracción restante se convertirá en biogás), y para calcular la materia seca que permanece en el biodigestor realizamos un balance de masa asumiendo que el fenómeno de la biodigestión se da en un estado estable, en el mismo que la masa es constante a lo largo de todo el proceso de biodigestión, para esto necesitamos realizar un balance de masa,

empleamos las formulas que regulan el comportamiento del sustrato de alimentación, tomamos en cuenta para este análisis el porcentaje de peso que tiene la materia seca MSO que se estima en un 25% como se ve en la Tabla 9.5 y la producción diaria generada de estiércol calculada anteriormente que fue de 134.2 (Kg).

Tabla 9.8 Sólidos Totales suspendidos en la lechada de alimentación para distintas cargas del biodigestor

| Tipo de carga Relación 1:1 | Cd Carga diaria [Kg/día] | MSO % | Mo [Kg/día] | P_{pb} [m³/kg] | X_t^0 [g/m³] |
|---------------------------------------|---|------------------|------------------------|---|---|
| Estiércol porcino o vacuno | 173.14 | 19.91 | 17.235 | 0.035 | 99540 |
| Estiércol aves | 140.93 | 14 | 9.865 | 0.043 | 70000 |
| Estiércol bovino | 159,47 | 19 | 15.150 | 0.038 | 95000 |
| Vegetales | 66 | 25 | 8.25 | 0.045 | 125000 |
| Heces humanas (12p) | 4.3 | 30 | 0.65 | 0.033 | 151163 |
| Orina | 13.7 | 6 | 0.82 | 0.033 | 59420 |

Aplicando la fórmula para la materia sólida por día, será:

$$X_t^0 = Ecd * MSO \quad (9.10)$$

$$X_t^0 = 33.55 [Kg]$$

Para el cálculo de los sólidos inorgánicos suspendidos en la lechada de alimentación en [g/m³] es:

$$X_{in}^0 = (1 - f_v) * X_t^0 \quad (9.11)$$

Donde:

f_v : factor volátil de sólidos suspendidos (0.86 para estiércol porcino y 0.78 para ganado vacuno)

$$X_{in}^0 = 4.7[kg] \quad \text{Para ganado porcino}$$

$$X_{in}^0 = 7.4[kg] \quad \text{Para ganado vacuno}$$

Para el cálculo de sólidos biodegradables, se aplica la ecuación:

$$X_d^0 = f_d * f_v * X_t^0 \quad (9.12)$$

Donde:

fd: fracción biodegradables de sólidos orgánicos en la lechada de alimentación

igual a 0.6 (vacuno) y 0.7 (porcino)

$$X_d^0 = 0.7 * 0.86 * 33.55$$

$$X_d^0 = 18.8 [Kg] \quad \text{Para ganado porcino}$$

$$X_d^0 = 17.3 [Kg] \quad \text{Para ganado vacuno}$$

Para el cálculo de sólidos refractarios volátiles, se aplica la siguiente ecuación:

$$X_r^0 = (1 - f_d) * f_v * X_t^0 \quad (9.13)$$

$$X_r^0 = (1 - 0.7) * 0.86 * 33.55$$

$$X_r^0 = 8.65 [Kg] \quad \text{Para ganado porcino}$$

$$X_r^0 = 10.46 [Kg] \quad \text{Para ganado vacuno}$$

El material volátil se calcula utilizando la ecuación:

$$X_t = X_d^0 + X_r^0 \quad (9.14)$$

$$X_t = 18.8[Kg] + 8.65[Kg]$$

$$X_t = 27.45 [Kg] \quad \text{Para ganado porcino}$$

$$X_t = 27.76 [Kg] \quad \text{Para ganado vacuno}$$

Ya que también sabemos y consideramos la materia sólida como constante, entonces:

$$X_t^0 = X_t$$

Además nos damos cuenta que el X_t de ganado porcino como el de ganado vacuno son iguales, por lo que de aquí en adelante solo realizaremos un cálculo para llegar a analizar la cantidad de material que permanece en el reactor.

Se deduce que aproximadamente según el cálculo el 86.2% del material se degrada, por ende se asume el mismo porcentaje en el material volátil, obteniendo así la cantidad de sólidos volátiles biodegradables suspendidos en la lechada de alimentación que lo denominamos X_d así:

$$X_d = X_t * (\% \text{ de material degradado}) \quad (9.15)$$

$$X_d = 27.45 * 0.862$$

Por consiguiente el material remanente tomando en cuenta la concentración de organismos activos X_a , la concentración de organismos fermentados X_{ar} , los sólidos volátiles refractarios X_r , y el valor obtenido de los sólidos volátiles biodegradables suspendidos en la lechada de alimentación X_d será:

$$X_a'' + X_{ar}'' + X_r'' = 27.45 - X_d$$

$$X_a'' + X_{ar}'' + X_r'' = 27.45 - 23.7$$

$$X_a'' + X_{ar}'' + X_r'' = 3.75 [Kg]$$

Y por tanto la cantidad de material que permanece en el reactor será:

$$X_{re}'' = X_{ar}'' + X_a'' + X_r'' + X_{in} \quad (9.16)$$

$$X_{re}'' = 3.75 + 4.7$$

$$X_{re}'' = 8.45 [Kg]$$

Una vez calculada la cantidad de material que permanece en el reactor, continuamos con el análisis para calcular la cantidad de calor, para lo cual utilizamos la siguiente fórmula:

$$Q_o = m_o C_p T_o \quad (9.17)$$

Donde:

m_o : flujo de masa de sustrato que sale del biodigestor

C_p : $4.186 \left[\frac{KJ}{Kg} \right] ^\circ C$ en la temperatura de salida

T_o : temperatura a la que sale el sustrato (caja de descarga) $35 [^\circ C]$

$$m_o = (134.2 * 0.30) - 8.45$$

$$m_o = 31.81 [Kg]$$

Como ya conocemos el tiempo que se demora en ingresar la materia orgánica al digestor, será el mismo tiempo que se demorara en salir la misma lo que nos da:

$$Q_o = \frac{31.81}{1820} \left[\frac{Kg}{s} \right] * 4186 \left[\frac{W*s}{Kg*^\circ C} \right] * 35 [^\circ C]$$

$$Q_o = 2560 [W]$$

CALCULO DE LAS PERDIDAS DE CALOR EN EL BIODIGESTOR

Contamos con una pared que se adapta a la forma de la pared del dique, lo que nos permite considerarla como una pared plana. Por lo tanto podemos considerar que existe transferencia de calor por conducción y convección, cuya fórmula general es:

$$Q = U * A [T_a - T_b] \quad (9.18)$$

Donde:

U: Coeficiente total de transferencia de calor de A hacia B

A: área de transferencia de calor [m^2]

T_a : Temperatura del sustrato [$^\circ C$]

T_b : Temperatura ambiente [$^\circ C$]

Y el valor de U viene dado por la siguiente relación:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_a} + \frac{X_1}{K_1} + \frac{X_2}{K_2} + \dots \dots \dots + \frac{X_n}{k_n} + \frac{1}{h_b} \quad (9.19)$$

En el biodigestor existen pérdidas por conducción y convección en los siguientes puntos, como se puede ver a continuación:

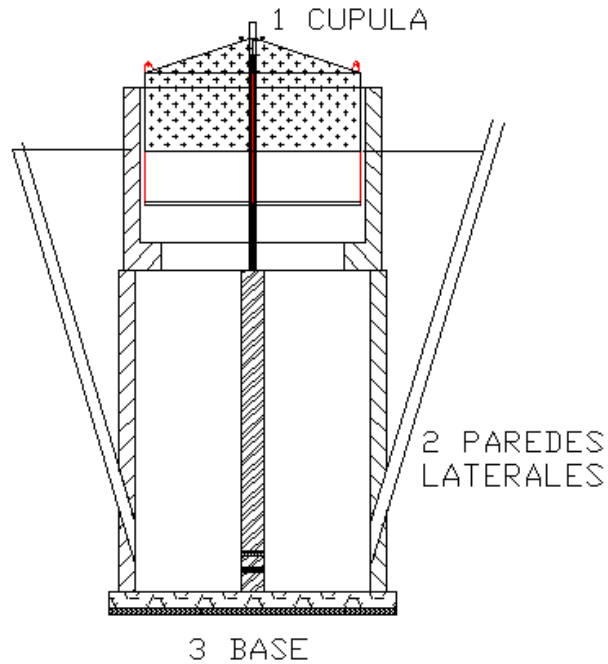


Figura 9.2: Puntos de Posibles Pérdidas de Calor por Conducción

Por lo tanto, las pérdidas de calor en el biodigestor se presentan principalmente en las paredes perimetrales del reactor, techo y base.

d) Pérdidas de calor a través de la paredes Q_{c1} :

Las paredes del reactor se componen de la siguiente manera: ladrillo de 15 cm de espesor, enlucido interior de 2 cm de espesor, acabado interior con cemento gris

de 0.1 cm de espesor. La transferencia unidimensional de calor para este sistema se expresa de la siguiente manera:

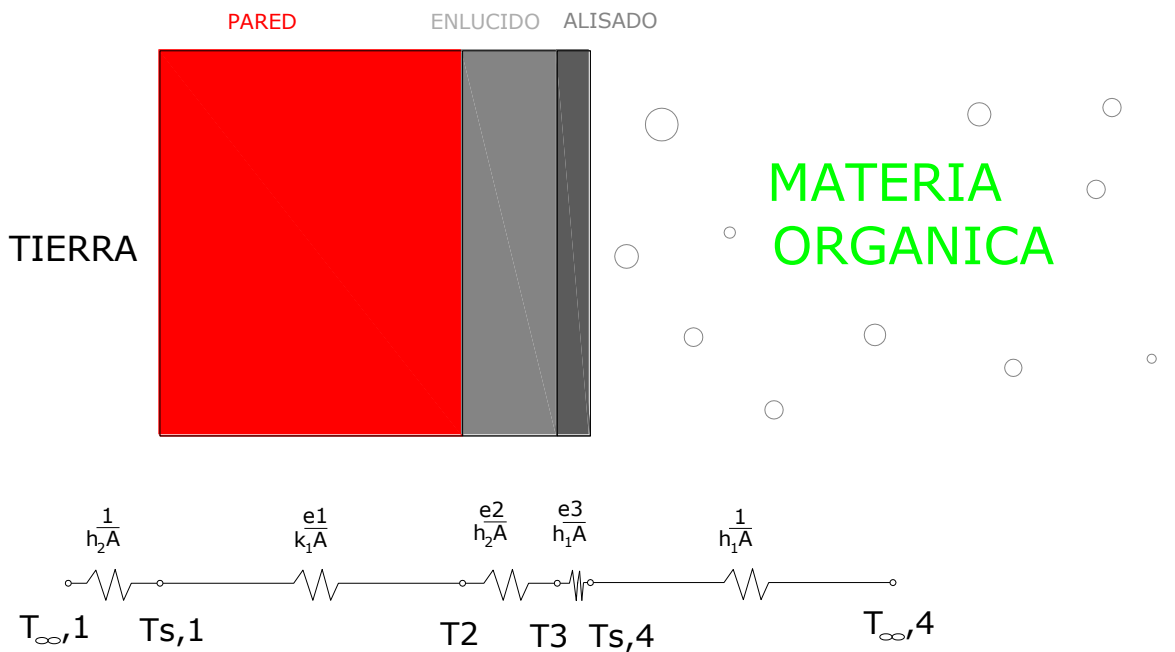


Figura 9.3: Circuito Térmico Equivalente para la Pared del Biodigestor

Aplicando la ecuación para calcular las pérdidas de calor en la pared del biodigestor y relacionándolo con el coeficiente global de transferencia de calor tenemos:

$$Q_{c1} = U * A * (Ti - Te) \tag{9.20}$$

Donde:

U: Coeficiente total de transferencia de calor

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{e1}{k1} + \frac{e2}{k2} + \frac{e3}{k3} \tag{9.21}$$

Donde:

h1: coeficiente de convección interno para mezcla con agua

h2: coeficiente de convección externo

$h_1=350 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ para agua mezclada con estiércol

$h_2=34,0698 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ para exterior del biodigestor enterrado

$e_1=15 \text{ cm}$ de pared

$e_2= 2 \text{ cm}$ de capa de friso

$e_3=0.1 \text{ cm}$ de capa de acabado con cemento gris

$K_1=0,69212 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ conductividad térmica (pared)

$K_2=1,1593 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ conductividad térmica (capa de friso con cemento gris)

$K_3=0,2942 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ conductividad térmica (para capa de cemento gris).

Tabla 9.9 Conductividad Térmica de los materiales usados en la construcción del Biodigestor.⁸⁹

| Material | K(w/m°C) |
|--------------------------|----------|
| Ladrillo de construcción | 0,692120 |
| Bloque de fachada | 1,315028 |
| Cemento y arena | 1,159301 |
| Concreto | 1,366937 |
| Cemento blanco | 0,294150 |
| Tierra | 0,346060 |

Tabla 9.10 Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección⁹⁰

| Coeficiente de calor por convección | [W/m ² K] |
|--|----------------------|
| h_i (para aire tranquilo interior del biodigestor) | 9,3692 |
| h_e (para aire en movimiento exterior) | 34,0698 |

Reemplazando los valores expuestos anteriormente tenemos:

⁸⁹ Según Pitts Donald R. y Sismo Leighton E. Transferencia de calor, McGrawHill, 1ª.Edición 1.979. Citado por Moreno Luis, 1987.

⁹⁰ Handbook of air conditioning system design. Carrier air conditioning company U.S.A, citado por Moreno Luis, 1987.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{350} + \frac{1}{34.0698} + \frac{0.02}{1,1593} + \frac{0.15}{0.69212} + \frac{0.1}{0.2942}$$

Donde:

$$\frac{1}{U} = 0.6065$$

Por lo tanto

$$U = 1.6488 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

$$A = 4.20[m] * 2 * \pi[m]$$

$$A = 26.4 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Q_{c1} = 1.6488 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 26.4 \text{ [m}^2\text{]} * (35 - 8)$$

$$Q_{c1} = 1175.26 \text{ [W]}$$

e) Pérdidas de calor por el techo del Digestor Q_{c2} :

La cúpula del biodigestor está construida por una plancha de acero de 2 mm de espesor, analizamos esta según la siguiente analogía:

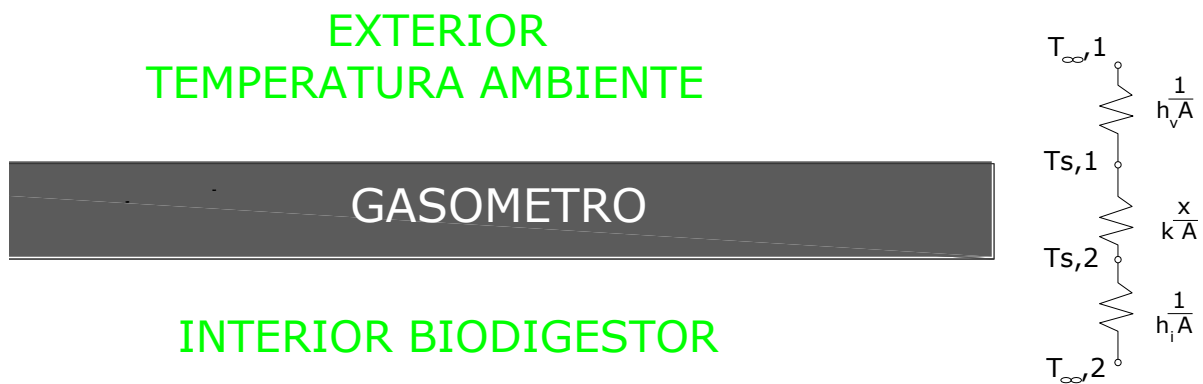


Figura 9.4: Circuito Térmico Equivalente para la Cúpula del Biodigestor

Aplicando la ecuación [9.20], de donde U es el valor del coeficiente total de transferencia de calor y viene dada por la ecuación [9.21] así:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_v} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_i} \quad (9.22)$$

Donde:

h_v : coeficiente de convección debido al viento, $1.37 [W/m^2C^\circ]$

h_i : coeficiente de convección para aire dentro del digestor, $9.36 [W/m^2C^\circ]$

k : coeficiente de conductividad térmica, del hierro, $80 [W/mC^\circ]$

x : Espesor de la pared de acero, $0.002 [m]$

El coeficiente total de transferencia de calor será:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{1.37} + \frac{0.002}{80} + \frac{1}{9.36}$$

$$U = 1.195 [W/m^2C]$$

El área de transferencia de calor del cono será igual a:

$$A = (\pi * r * hipotenusa) + 0.5 * \pi * 2 \quad (9.23)$$

$$A = (\pi * 1 * 1.5) + 3.14$$

$$A = 7.85 [m^2]$$

Por consiguiente las pérdidas de calor en la cúpula serán:

$$Q_{c2} = 1.195 [W/m^2C] * 7.85 [m^2] * (35 - 8) [^\circ C]$$

$$Q_{c2} = 253.280 [W]$$

f) Calor cedido por conducción y convección a Través del Piso Q_{c3} :

La base del biodigestor está construida con concreto de 10 cm de espesor, y es analizada según la siguiente analogía:

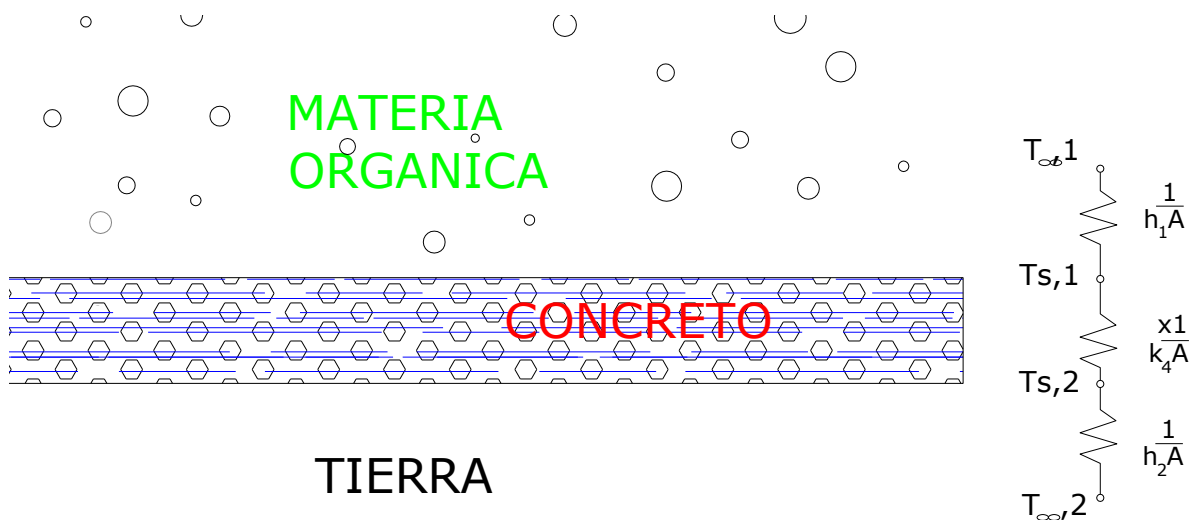


Figura 9.5: Circuito Térmico Equivalente para la Base del Biodigestor

Aplicando la ecuación para calcular las pérdidas de calor en la base del biodigestor y relacionándolo con el coeficiente global de transferencia de calor tenemos:

$$Q_{c3} = U3 * A3 * (Ti - Te) \quad (9.24)$$

Donde:

U3: Coeficiente total de transferencia de calor

$$\frac{1}{U3} = \frac{1}{h1} + \frac{1}{h2} + \frac{X1}{k4} \quad (9.25)$$

Donde:

h1: coeficiente de convección interno para mezcla con agua

h2: coeficiente de convección externo

h1=350 [W/m²K] para agua mezclada con estiércol

h2=34,0698 [W/m²K] para exterior del biodigestor enterrado

X1=10 cm de espesor del concreto

$K_4=1.366937 [W/m^2K]$ conductividad térmica del concreto

Remplazando los valores, el coeficiente total de transferencia de calor será igual a:

$$U_3= 9.491 [W/m^2K]$$

El área de transferencia de calor para la base es:

$$A_3 = (\pi * r^2) \tag{9.26}$$

$$A_3 = (\pi * 2.1^2)$$

$$A_3 = 13.85 [m^2]$$

Y finalmente calculamos las pérdidas de calor que se producen en la base así:

$$Q_{c3} = 9.491[W/m^2K] * 13.85 [m^2] * (35 - 8)[^\circ C]$$

$$Q_{c3} = 3549.09 [W]$$

PERDIDAS POR RADIACIÓN

Al diseñar nuestro biodigestor, se considero que se va a trabajar en zonas con temperaturas ambientales entre 20°C y 30°C. En estas condiciones del proyecto las perdidas por radiación representan un valor despreciable con respecto a las perdidas presentes debido a la conducción y convección.

OTRAS POSIBLES PÉRDIDAS

Nuestro balance térmico no ha considerado otros factores que se pueden presentar, a continuación lo mencionaremos, pero no nos representan valores de importancia:

- La liberación de calor por la descomposición de materiales celulósicos como el CH₄ y el CO₂, este valor lo asumen algunos investigadores, que alcanza entre 4 a 5 % de la energía total.
- Las pérdidas de calor por la evaporación del contenido de agua en el gas, cuyo valor se lo considera mínimo y está en el orden del 1%
-

CALCULO DEL REQUERIMIENTO TOTAL DE CALOR DENTRO DEL BIODIGESTOR

La ecuación del balance energético nos permite calcular el requerimiento de energía y esta es:

$$Q_{Almacenado} = (\sum Q_{Co}) - (\sum Q_{ci}) \quad (9.27)$$

Donde:

Q_{co}: calor ganado (W)

Q_{ci}: calor cedido (W)

Q_{Almacenado}: calor equerido total (W)

Remplazando la sumatoria del calor ganado y calor perdido tenemos:

$$(Q_{Almacenado}) = (Q_o - Q_{c1} - Q_{c2} - Q_{c3}) - (Q_i + Q_g) \quad (9.28)$$

Calculando cada una de las sumatorias, tanto para el calor ganado como para el calor perdido, que calculamos anteriormente tenemos lo siguiente:

$$\sum Q_{ci} = Q_{c1} + Q_{c2} + Q_{c3} + Q_o \quad (9.29)$$

$$\sum Q_{ci} = 4977.63 \text{ [W]}$$

$$\sum Q_{co} = Q_i + Q_g \quad (9.30)$$

$$\sum Q_{ci} = 6883.55 \text{ [W]}$$

Si lo aplicamos en nuestro balance térmico, hallamos el calor requerido total, restando las pérdidas al calor de entrada y generación que se produce dentro del biodigestor. Obtenemos que el valor de $Q_{Almacenado}$, es decir que el calor que deberá ingresar en el digestor en caso de ser necesario para mantener los 35°C en su interior en condiciones ambientales extremas será de:

$$Q_{Almacenado} = 6883.55 - 4977.63$$

$$Q_{Almacenado} = 1905.92 \text{ [W]}$$

Que es equivalente a tener 19 focos de 100 [w] en funcionamiento durante 12 horas, que son consideradas las de más baja temperatura ambiental en la zona.