

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
“INGENIERO MECÁNICO”**

**DISEÑO DE UN BIODIGESTOR TIPO CÚPULA FIJA PARA
GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS**

AUTORES:

**CYNTHIA TAMARA BONIFAZ RODRÍGUEZ
HENRY RODRIGO MORALES LOOR**

DIRECTOR:

ING. TOMÁS IBUJÉS VILLACÍS

QUITO, MARZO DE 2012

Certifico que el presente trabajo, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, ha sido realizado en su totalidad por la señorita Cynthia Tamara Bonifaz Rodríguez y por el señor Henry Rodrigo Morales Loo.

Los conceptos desarrollados, análisis, cálculos realizados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Atentamente

Ing. Tomás Ibujés Villacís

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACIÓN

Nosotros, Cynthia Tamara Bonifaz Rodríguez y Henry Rodrigo Morales Loor, declaramos bajo juramento que el trabajo realizado es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en el presente documento.

A través de la presente declaración, cedemos el derecho de propiedad intelectual correspondiente de este trabajo a la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad vigente.

(f) _____

Cynthia Tamara Bonifaz Rodríguez

(f) _____

Henry Rodrigo Morales Loor

*A quienes hace algunas lunas ya,
una cigüeña me entregó.*

Cynthia

Con agradecimiento, dedico este trabajo a Dios que día a día me guía con su divina voluntad, a mi hermana por su constante interés en mi superación, a mi papá, que siempre ha sido motivo para lograr mis objetivos y a mi mamá, quién con ejemplo y amor me apoyó e incentivó para la culminación de mi formación profesional.

Henry

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica Salesiana, por ser la Institución que nos impartió no solo los conocimientos científicos, sino también por su incesante objetivo de formarnos como buenos ciudadanos, enmarcados en valores y principios para desarrollar nuestra profesión en la ética.

Al Ingeniero Tomás Ibujés Villacís, Tutor de nuestra tesis, por su valiosa guía y acertados consejos, quien con originalidad y disposición, colaboró durante el proceso de elaboración de este trabajo.

A los docentes y personal administrativo, quienes durante estos años de estudio, han compartido y aportado significativamente en nuestro proceso de formación profesional.

RESUMEN

El presente trabajo está enfocado en brindar una solución integral al problema energético en zonas rurales donde las fuentes convencionales de energía no llegan con facilidad, pero donde se dispone de recursos que con la implementación de tecnologías como la propuesta, permiten no solo el abastecimiento energético, sino que contribuyen a la descontaminación y a la consecuente preservación del medio ambiente.

En el caso particular del sistema de biodigestión planteado en esta tesis, su implementación permitirá satisfacer la demanda energética requerida para la pasteurización de leche en el proceso de elaboración de quesos, que constituye desde hace 5 años, el sustento de una familia establecida en la comunidad de Shanshipamba, perteneciente a la Parroquia de Sigsipamba ubicada al nororiente de la Provincia de Imbabura.

El diseño del biodigestor se realizará en función de la demanda energética y de la disponibilidad de la materia orgánica existente. En cuanto al requerimiento energético se desea obtener biogás suficiente para la pasteurización de 200 litros diarios de leche, reemplazando así el uso de tanques domésticos de GLP. Con respecto a la disponibilidad de materia orgánica se aprovecharán los desechos orgánicos provenientes del ganado vacuno necesario para la obtención de la leche, aportando de esta manera no solo a la producción de combustible, sino también a la eliminación de los residuos y la obtención del bioabono, el cual es un excelente fertilizante.

ABSTRACT

This work is focused on providing a entire solution to the energy problem in rural areas, where conventional energy sources, do not come easily, but with available resources by implementing technologies like the proposal, allow not only the energy supply, but contribute to the decontamination and consequent environmental preservation.

In the particular case of biodigestion system proposed in this thesis, its performance will allow provide the energy demand required for pasteurization of milk in cheese develop process, which since 5 years ago, is the financial support of a family established in the community of Shanshipamba, that belongs to the Sigsipamba Parish, which is located in northeast of Imbabura Province.

Design digester shall be based on energy demand and availability of existing organic waste. Respect energy requirement, is desired the sufficient amount of biogas to pasteurize 200 liters of milk, replacing the use of domestic LPG tanks. About the availability of organic matter, will be used the organic waste from bovine cattle, used to get milk, providing not only fuel production, but also the elimination of waste and obtaining biofertilizer.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|-----------------------|------|
| AGRADECIMIENTOS | VI |
| RESUMEN..... | VII |
| ABSTRACT | VIII |

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

| | |
|------------------------------------|---|
| 1.1. ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN | 3 |
| 1.3. ALCANCE DEL TRABAJO | 4 |
| 1.4. OBJETIVOS | 5 |
| 1.4.1. OBJETIVO GENERAL..... | 5 |
| 1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS | 5 |
| 1.5. METODOLGÍA | 7 |

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

| | |
|----------------------------------|----|
| 2.1. Introducción | 9 |
| 2.2. Definición biomasa | 10 |
| 2.2.1. Biomasa primaria..... | 10 |
| 2.2.2. Biomasa residual..... | 10 |
| 2.2.3. Cultivos energéticos..... | 11 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.3. | Procesos de conversión de la biomasa en energía..... | 11 |
| 2.3.1. | Conversión Termoquímica | 11 |
| 2.3.1.1. | Combustión | 12 |
| 2.3.1.2. | Gasificación..... | 12 |
| 2.3.1.3. | Pirólisis..... | 12 |
| 2.3.2. | Conversión bioquímica | 13 |
| 2.3.2.1. | Procesos aeróbicos | 13 |
| 2.3.2.2. | Procesos anaeróbicos..... | 14 |
| 2.3.3. | Ventajas del uso de la biomasa | 14 |
| 2.4. | Etapas del proceso de fermentación anaeróbica..... | 15 |
| 2.4.1. | Etapa de hidrólisis | 16 |
| 2.4.2. | Etapa acidogénica | 17 |
| 2.4.3. | Etapa acetogénica | 17 |
| 2.4.4. | Etapa metanogénica | 18 |
| 2.5. | Factores que afectan el proceso de digestión anaeróbica..... | 18 |
| 2.5.1. | Nutrientes | 19 |
| 2.5.2. | Temperatura | 19 |
| 2.5.3. | Potencial de hidrógeno | 21 |
| 2.5.4. | Contenido en sólidos | 22 |
| 2.5.5. | Tiempo de retención | 22 |
| 2.5.6. | Compuestos inhibidores | 23 |
| 2.5.6.1. | Oxígeno | 24 |
| 2.5.6.2. | Ácidos volátiles | 24 |
| 2.5.6.3. | Hidrógeno | 24 |
| 2.5.6.4. | Nitrógeno amoniacal | 24 |
| 2.5.6.5. | Sulfatos y sulfuros | 25 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.5.7. | Agitación | 25 |
| 2.6. | Biogás..... | 27 |
| 2.6.1. | Composición del biogás..... | 27 |
| 2.6.2. | Características del biogás | 28 |
| 2.6.3. | Usos del biogás | 29 |
| 2.6.3.1. | Obtención de calor por combustión directa | 31 |
| 2.6.3.2. | Generación de electricidad | 31 |
| 2.6.3.3. | Integración en la red de gas natural | 34 |
| 2.6.3.4. | Utilización como combustible de vehículos | 34 |
| 2.6.3.5. | Aplicación en pilas de combustible | 35 |
| 2.6.4. | Métodos de depuración del biogás | 37 |
| 2.6.4.1. | Eliminación del dióxido de carbono | 37 |
| 2.6.4.2. | Eliminación del ácido sulfhídrico | 37 |
| 2.6.4.3. | Eliminación del agua..... | 37 |
| 2.7. | Efluente o Bioabono | 38 |
| 2.7.1. | Características del bioabono | 38 |
| 2.7.2. | Efecto del efluente sobre el suelo | 39 |
| 2.7.3. | Efecto sobre los cultivos..... | 39 |
| 2.7.4. | Aspecto sanitario..... | 39 |
| 2.7.5. | Aplicaciones del efluente | 40 |
| 2.8. | Metano | 40 |
| 2.8.1. | Propiedades del metano | 40 |
| 2.8.2. | Fuentes..... | 41 |
| 2.8.3. | Efectos del metano | 41 |
| 2.8.4. | Combustión del metano | 41 |
| 2.9. | Tecnología empleada en la digestión anaeróbica..... | 42 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 2.9.1. | Biodigestor | 42 |
| 2.9.2. | Clasificación de los biodigestores | 43 |
| 2.9.2.1. | Biodigestores tipo Batch | 43 |
| 2.9.2.2. | Biodigestores de carga continua..... | 44 |
| 2.9.2.3. | Biodigestores de carga semicontinua | 44 |
| 2.9.3. | Biodigestores tipo hindú o de campana flotante..... | 44 |
| 2.9.4. | Biodigestores tipo chino o de cúpula fija..... | 45 |
| 2.9.5. | Criterios del diseño | 47 |
| 2.9.6. | Partes principales de un biodigestor de cúpula fija..... | 47 |
| 2.9.6.1. | Tanque de digestión..... | 47 |
| 2.9.6.2. | Conducto de carga | 48 |
| 2.9.6.3. | Tanque de mezcla | 48 |
| 2.9.6.4. | Tanque de compensación | 48 |
| 2.9.6.5. | Trampa de agua | 48 |
| 2.10. | Pasteurización de la leche | 48 |
| 2.10.1. | Métodos de pasteurización..... | 49 |
| 2.10.1.1. | Pasteurización lenta..... | 49 |
| 2.10.1.2. | Pasteurización rápida..... | 50 |
| 2.11. | Bases teóricas de transferencia de calor | 50 |
| 2.11.1. | Transferencia de calor por conducción..... | 50 |
| 2.11.2. | Transferencia de calor por convección | 51 |
| 2.11.3. | Transferencia de calor por radiación | 52 |
| 2.11.3.1. | Emisividad..... | 52 |

CAPÍTULO III

CÁLCULOS DE DISEÑO DEL BIODIGESTOR

| | | |
|---------|---|----|
| 3.1. | Introducción | 53 |
| 3.2. | Cálculo de la cantidad de calor necesario para pasteurizar la leche | 54 |
| 3.2.1. | Cálculo del calor ideal para calentar 200Lt de leche | 55 |
| 3.2.2. | Cálculo del calor real requerido con un rendimiento del 50% | 56 |
| 3.3. | Cálculo del flujo de calor necesario para el calentamiento..... | 57 |
| 3.4. | Cálculo de la transferencia de calor por radiación de la llama a la base de la olla | 58 |
| 3.4.1. | Cálculo de la potencia emisiva del gas | 60 |
| 3.4.2. | Cálculo de la potencia emisiva de la base de la olla..... | 60 |
| 3.4.3. | Cálculo de la potencia emisiva de la superficie inferior..... | 61 |
| 3.4.4. | Cálculo de la longitud media equivalente | 62 |
| 3.4.5. | Productos de la combustión | 63 |
| 3.4.6. | Presión del gas a la salida de digestor | 63 |
| 3.4.7. | Cálculo de las presiones parciales del CO ₂ y H ₂ O a 1,01atm | 64 |
| 3.4.8. | Cálculo de la emisividad total de la mezcla..... | 65 |
| 3.4.9. | Cálculo de la absorbencia total en la base de la olla | 70 |
| 3.4.10. | Cálculo de la transmitividad desde la base de la olla | 75 |
| 3.4.11. | Cálculo de la absorbencia de la superficie inferior..... | 75 |
| 3.4.12. | Cálculo de la transmitividad desde la superficie inferior..... | 80 |
| 3.4.13. | Cálculo de la irradiación en la base de la olla..... | 81 |
| 3.4.14. | Cálculo de la irradiación en la superficie inferior..... | 81 |
| 3.4.15. | Ganancia de calor por superficie de área de la base de la olla..... | 82 |
| 3.4.16. | Ganancia de calor por superficie de área de la superficie inferior..... | 82 |
| 3.4.17. | Cálculo del calor que ingresa al recipiente por radiación..... | 83 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.5. | Cálculo de la transferencia de calor por convección del aire caliente a la base de la olla | 84 |
| 3.5.1. | Cálculo de la temperatura de película | 84 |
| 3.5.2. | Cálculo del número de Grashof | 86 |
| 3.5.3. | Cálculo del número de Rayleigh | 87 |
| 3.5.4. | Cálculo del número de Nusselt | 88 |
| 3.5.5. | Cálculo del coeficiente de convección | 88 |
| 3.5.6. | Cálculo de la transferencia de calor por convección del aire | 89 |
| 3.6. | Cálculo de la transferencia de calor total | 90 |
| 3.7. | Cálculo de pérdidas por radiación..... | 91 |
| 3.7.1. | Cálculo de la temperatura media | 91 |
| 3.7.2. | Cálculo del coeficiente de radiación..... | 91 |
| 3.7.3. | Cálculo del calor perdido por radiación..... | 92 |
| 3.8. | Cálculo de pérdidas por convección con el aire..... | 93 |
| 3.8.1. | Cálculo de la temperatura de película..... | 93 |
| 3.8.2. | Cálculo del número de Grashof..... | 95 |
| 3.8.3. | Cálculo del número de Rayleigh..... | 95 |
| 3.8.4. | Cálculo del número de Nusselt | 96 |
| 3.8.5. | Cálculo del coeficiente de convección..... | 96 |
| 3.8.6. | Cálculo del calor perdido por convección | 97 |
| 3.9. | Cálculo de las pérdidas totales | 98 |
| 3.10. | Cálculo de la cantidad de calor total requerido | 99 |
| 3.11. | Cálculo del volumen diario de biogás | 100 |
| 3.11.1. | Cálculo del flujo de biogás | 101 |
| 3.11.2. | Cálculo del volumen diario de biogás..... | 101 |
| 3.12. | Cálculo del volumen total del biodigestor..... | 102 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 3.12.1. | Cálculo de la cantidad diaria de desechos orgánicos | 102 |
| 3.12.2. | Cálculo de la cantidad de sólidos totales | 103 |
| 3.12.3. | Cálculo de la cantidad sólidos volátiles | 104 |
| 3.12.4. | Cantidad de agua por kilogramo de estiércol | 104 |
| 3.12.5. | Cálculo del volumen del líquido diario | 105 |
| 3.12.6. | Cálculo del tiempo de retención | 106 |
| 3.12.7. | Cálculo del volumen del líquido | 106 |
| 3.12.8. | Cálculo del volumen total del digestor | 107 |
| 3.13. | Cálculo de la cantidad de cabezas de ganado vacuno necesarias para la producción biogás | 108 |
| 3.13.1. | Estiércol recogido (semi-estabulado)..... | 108 |
| 3.13.2. | Estiércol producido por kilogramo de animal | 108 |
| 3.13.3. | Número de vacas | 109 |
| 3.14. | Dimensionamiento del biodigestor..... | 110 |
| 3.14.1. | Dimensionamiento de la cúpula, el cilindro contenedor y la base cónica del digestor | 111 |
| 3.14.1.1. | Volumen del cilindro | 115 |
| 3.14.1.2. | Volumen del segmento esférico | 116 |
| 3.14.1.3. | Volumen del cono base | 116 |
| 3.14.2. | Volumen del tanque de carga o mezcla | 117 |
| 3.14.3. | Volumen del tanque de compensación | 117 |
| 3.14.4. | Volumen del tanque de la trampa de agua | 118 |
| 3.14.5. | Longitud de la tubería de carga..... | 118 |
| 3.14.6. | Cuello | 118 |
| 3.15. | Nomenclatura de las variables de cálculo y resumen de fórmulas..... | 139 |

CAPÍTULO IV

ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DEL BIODIGESTOR TIPO CUPULA FIJA

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.1. | Introducción | 124 |
| 4.2. | Especificaciones de construcción..... | 125 |
| 4.2.1. | Ubicación del digestor | 125 |
| 4.2.2. | Excavación | 126 |
| 4.2.3. | Construcción de la losa de cimentación | 126 |
| 4.2.4. | Construcción del muro cilíndrico | 127 |
| 4.2.5. | Construcción de la viga de cerramiento o de apoyo | 127 |
| 4.2.6. | Construcción de la cúpula o domo esférico | 127 |
| 4.2.7. | Construcción de la viga de cierre..... | 127 |
| 4.2.8. | Construcción del cuello | 128 |
| 4.2.9. | Construcción de la tapa de hormigón | 128 |
| 4.2.10. | Herramientas empleadas para la construcción..... | 128 |
| 4.2.11. | Trabajos de acabado | 129 |
| 4.2.12. | Impermeabilización | 129 |
| 4.3. | Puesta en marcha del biodigestor | 130 |
| 4.4. | Mantenimiento del biodigestor | 131 |
| 4.5. | Medidas de seguridad | 132 |
| 4.6. | Seguridad industrial para la operación y mantenimiento del digestor | 133 |

CAPÍTULO V

ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DEL PROYECTO

| | | |
|------|--|-----|
| 5.1. | Introducción | 135 |
| 5.2. | Ventajas de la implementación del biodigestor propuesto..... | 136 |
| 5.3. | Costo del proyecto..... | 137 |
| 5.4. | Análisis comparativo..... | 138 |

CAPÍTULO VI

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE VERIFICACIÓN DEL PROYECTO

| | | |
|-----------------------|--|-----|
| 6.1. | Introducción | 140 |
| 6.2. | Esquema del modelo de verificación | 141 |
| 6.3. | Materiales utilizados en la construcción | 142 |
| 6.4. | Partes principales del modelo de verificación..... | 143 |
| 6.4.1. | Tanque digestor..... | 143 |
| 6.4.2. | Válvula de seguridad de agua | 145 |
| 6.4.3. | Acumulador de gas | 146 |
| 6.5. | Puesta en marcha..... | 147 |
| CONCLUSIONES | | 149 |
| RECOMENDACIONES | | 150 |
| GLOSARIO | | 152 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1: Intervalos de temperatura a las que trabajan las bacterias anaeróbicas | 20 |
| Tabla 2: Condiciones ideales para la digestión anaerobia en función de la fase | 26 |
| Tabla 3: Componentes del biogás en función del sustrato utilizado..... | 27 |
| Tabla 4: Características principales del biogás | 28 |
| Tabla 5: Composición de los principales nutrientes del bioabono..... | 38 |
| Tabla 6: Eficiencias de los sistemas que utilizan biogás..... | 54 |
| Tabla 7: Entalpía del agua..... | 55 |
| Tabla 8: Valores de emisividad para materiales comunes | 59 |
| Tabla 9: Longitud media equivalente para volúmenes de gas | 62 |
| Tabla 10: Propiedades del biogás..... | 100 |
| Tabla 11: Rendimiento del biogás en función del sustrato | 102 |
| Tabla 12: Proporciones para la mezcla | 105 |
| Tabla 13: Tiempos de retención..... | 106 |
| Tabla 14: Cantidad de estiércol producido por peso de animal | 108 |
| Tabla 15: Nomenclatura de las variables de cálculo y resumen de fórmulas | 119 |
| Tabla 16: Costo de la inversión del proyecto..... | 137 |
| Tabla 17: Equivalencia del biogás con otras fuentes de energía..... | 138 |
| Tabla 18: Lista de materiales empleados en la construcción del modelo de verificación..... | 142 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1: Fases de la fermentación anaeróbica | 16 |
| Figura 2: Opciones para la utilización del biogás | 29 |
| Figura 3: Necesidad de tratamiento del biogás en función del uso..... | 30 |
| Figura 4: Equivalencia del biogás con otras fuentes de energía | 36 |
| Figura 5: Esquema de un biodigestor tipo campana flotante | 45 |
| Figura 6: Esquema de un biodigestor tipo cúpula fija..... | 46 |
| Figura 7: Emisividad del dióxido de Carbono | 66 |
| Figura 8: Emisividad del vapor de agua..... | 67 |
| Figura 9: Factor de corrección para la emisividad del CO ₂ | 67 |
| Figura 10: Factor de corrección para la emisividad del H ₂ O | 68 |
| Figura 11: Factor de corrección cuando CO ₂ y H ₂ O, están simultáneamente | 69 |
| Figura 12: Emisividad prima del Dióxido de Carbono | 71 |
| Figura 13: Emisividad prima del Vapor de Agua | 72 |
| Figura 14: Factor de corrección para la absorbencia cuando CO ₂ y H ₂ O, están presentes simultáneamente..... | 73 |
| Figura 15: Emisividad dos prima del dióxido de carbono | 76 |
| Figura 16: Emisividad dos prima del vapor de agua..... | 77 |
| Figura 17: Factor de corrección prima para la absorbencia, cuando CO ₂ y H ₂ O, están presentes simultáneamente..... | 78 |
| Figura 18: Esquema del balance de energía..... | 99 |
| Figura 19: Esquema de las partes del biodigestor..... | 110 |
| Figura 20: Esquema de la forma de un biodigestor tipo cúpula fija | 111 |
| Figura 21: Modelo de verificación..... | 141 |
| Figura 22: Brida de sujeción..... | 158 |
| Figura 23: Tubo de salida de lodos | 144 |
| Figura 24: Válvula de salida de lodos..... | 144 |
| Figura 25: Válvula para salida del biogás | 145 |
| Figura 26: Lustre para depuración | 145 |
| Figura 27: Válvula de seguridad | 146 |
| Figura 28: Acumulador de gas | 146 |
| Figura 29: Elaboración de la mezcla..... | 147 |

| | |
|--|-----|
| Figura 30: Llenado del tanque..... | 147 |
| Figura 31: Combustión del biogás | 148 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| Planos anexos | 155 |
| Anexo 1: Constantes de Combustión..... | 156 |
| Anexo 2: Valores de propiedades del aire a presión atmosférica | 157 |
| Anexo 3: Especificaciones del tanque tipo botella de pie..... | 158 |
| Anexo 4: Lista de precios / Materiales de construcción (Revista “CONSTRUCCION” Cámara de la construcción de Quito 2012) | 159 |

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La posibilidad de implementar un sistema de generación de energía aprovechando los recursos disponibles, se origina principalmente en la dificultad de muchas de las zonas rurales de acceder a las fuentes de energía convencionales. Para el caso particular de esta tesis, se tiene como factor principal, el difícil traslado de los tanques de uso doméstico hasta el sitio requerido, debido a la ubicación de la propiedad, lo que incrementa el costo por cilindro de gas, añadido a este inconveniente están las nuevas regulaciones gubernamentales, que exigen mayor control en la venta de cilindros domésticos.

El biogás generado en el proceso de digestión anaeróbico, estaría destinado a la pasteurización de 200 litros de leche diarios dentro del proceso de elaboración de quesos frescos, por lo que al ser un negocio, se debería adquirir los tanques de GLP de uso industrial, los mismos que tienen un elevado costo en relación a los tanques de uso doméstico.

Las experiencias en cuanto a la implementación de biodigestores han sido muy beneficiosas, no solo por la generación de biocombustible, sino también por la descontaminación que implica el tratamiento de los residuos de animales y el bioabono que se produce en el proceso. Por ello, a partir de los primeros biodigestores, se han producido mejoras en los diseños, los cuales han permitido que el sistema sea más resistente y eficiente tanto a pequeña como a gran escala.

En el Ecuador la mayoría de los proyectos de biodigestión que se han implementado son de tipo artesanal, es decir enfocados a la quema de biogás en cocinas u hornillas domésticas. Algunas empresas privadas, han implementado biodigestores industriales de alta capacidad para producir biogás y generar electricidad.

Un ejemplo de implementación de biodigestores industriales en el Ecuador, se encuentra en la empresa PRONACA, que cuenta actualmente con un biodigestor para tratar los desechos porcino y aviar en las instalaciones ubicadas en la Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, este biodigestor de 1100m^3 de capacidad, produce aproximadamente 4000m^3 de biogás al año y su objetivo principal es disminuir la contaminación que representa la eliminación de los desechos en los alrededores. En un futuro la empresa planea generar electricidad con la implementación de otros 6 biodigestores.

Así mismo, en la Hacienda Zuleta, ubicada en la Provincia de Imbabura, se encuentran 3 biodigestores de 10m^3 de capacidad, que generan biogás a partir de los desechos orgánicos de ganado vacuno. La producción de biogás de estos biodigestores supera los 40m^3 diarios.

En general, el potencial de generación de desechos provenientes de ganado vacuno a nivel nacional, es de 373 Gwh/año, siendo una alternativa prometedora para generación de energía a gran escala.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La implementación de biodigestores para generación de biogás, se constituye en una solución integral, debido a que no solamente se obtiene combustible, sino que permite el tratamiento de los desechos de tal manera que sean aprovechados como fertilizante usando los recursos disponibles en el medio.

El biogás obtenido como fuente de energía ofrece enormes beneficios, principalmente a la disminución de la contaminación, el biogás, considerado uno de los gases que producen energía de forma más limpia, no tiene problemas de regulaciones ambientales en ninguna parte del mundo, constituyéndose así en una alternativa viable al agotamiento evidente de energías no renovables.

Al utilizar este tipo de tecnologías, las empresas reducen las emisiones de CO₂ al ambiente, obteniendo bonificaciones internacionales por cada tonelada de CO₂ que reduzcan de acuerdo con el protocolo de Kioto. Además, todas las tecnologías de producción de energía que provengan de fuentes renovables, están siendo favorecidas por una política interna, la cual dicta que las empresas que sustituyan la energía proveniente de combustibles fósiles empleada en sus procesos, por algún tipo de energía renovable, estén exentas de pagar impuestos hasta en un 100%.

1.3. ALCANCE DEL TRABAJO

El alcance del presente trabajo consiste en el diseño de un biodigestor de tipo cúpula fija, para generación de biogás a partir de desechos animales existentes en el lugar de instalación, para de esta manera aprovechar los recursos disponibles y abastecer la energía necesaria en la pasteurización de 200 litros de leche diario dentro del proceso de elaboración de quesos frescos. Se realizarán los planos del biodigestor, un instructivo para su correcto mantenimiento y se realizará un análisis de costo – beneficio.

El alcance también contempla la construcción de un modelo de verificación del proceso de biodigestión, que permitirá comprobar de forma experimental los cálculos realizados para el diseño y la eficiencia que tendrá el biodigestor propuesto.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un biodigestor anaeróbico tipo cúpula fija de 13m³ de volumen, para la generación diaria de 4,3m³ de biogás, que permitirá sustituir el uso de cilindros de GLP, para la pasteurización diaria de 200 litros de leche, dentro del proceso de elaboración de quesos.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar los cálculos para el diseño del biodigestor, los cuales permitirán determinar las dimensiones, materiales y demás características requeridas para generar la cantidad de biogás que demanda el proceso de pasteurización de la leche.
- Elaborar los planos que contengan todas las especificaciones y detalles constructivos, que permitan realizar la implementación de este sistema de producción de energía de forma sencilla y precisa.
- Fijar la relación costo – beneficio que se genera con la implementación del biodigestor tipo cúpula fija para generación de biogás, en relación con el consumo actual de tanques de uso doméstico de GLP.
- Realizar un modelo de verificación del proceso de biodigestión de 250 litros de capacidad, que permita comprobar de forma práctica, que el diseño propuesto es viable y funcional.

- Mejorar la calidad del ambiente tratando los desechos orgánicos de animales, disminuyendo las emisiones de CO₂ al ambiente y aprovechando además el fertilizante obtenido en el proceso de biodigestión, para enriquecer la calidad del suelo.
- Elaborar un instructivo que brinde una guía de mantenimiento y seguridad e higiene industrial para operar el biodigestor, con el fin asegurar un correcto funcionamiento, óptimos resultados en la obtención permanente de biogás y principalmente para salvaguardar la integridad de los trabajadores.

1.5. METODOLOGÍA

El presente trabajo se proyecta como un estudio de investigación de tipo inductivo complementado con el método hipotético deductivo, debido a que intervienen disciplinas que se relacionan estrechamente, integrándose entre sí para el logro de los objetivos planteados.

En una primera etapa se realizará una investigación de tipo inductivo, de esta forma se obtendrán los elementos particulares necesarios para realizar las interpretaciones y posteriormente el análisis de los resultados generales.

Este estudio es también de carácter hipotético deductivo, ya que contempla cada una de las fases de este método: la detección de un problema, la formulación de una hipótesis a partir de conocimientos previos, la deducción de las consecuencias y la experimentación del proceso.

Detección del problema: Actualmente, una pequeña empresa dedicada a la elaboración de quesos de forma artesanal, requiere implementar un sistema de generación de energía que le permita sustituir el uso de GLP utilizado en la pasteurización de 200 litros de leche diarios, debido a la dificultad de adquirir los cilindros de GLP de uso doméstico y al elevado costo que consistiría la compra de cilindros de uso industrial que le corresponde.

Formulación de una hipótesis: Debido a la disponibilidad de recursos existentes en la propiedad referida, la forma más viable de dar solución al problema de obtención de energía, es la implementación de un biodigestor que además de generar combustible utilizando los desechos animales propios del lugar, permite el manejo responsable de los desechos y contribuye a la preservación del medio ambiente.

Deducción de consecuencias: La cantidad de energía que se pueda obtener, depende de los requerimientos energéticos y de la cantidad de materia prima disponible.

Experimentación del proceso: El proyecto comprende la construcción de un modelo de verificación que permita la comprobación de forma experimental, de los resultados proyectados para el biodigestor de mayor magnitud, para la solución del problema planteado.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Introducción

En este capítulo se describe el concepto de biomasa, se indican los procesos de transformación de la materia y los métodos de obtención de energía, también se describe el proceso de digestión anaeróbica, las diferentes etapas con sus respectivas características, los factores de los cuales depende y los productos que se obtiene.

Se realiza una introducción sobre la tecnología utilizada para la obtención de biogás, una clasificación general de los tipos de biodigestores detallando con mayor profundidad los biodigestores de cúpula fija y móvil y una descripción de la pasteurización y sus métodos.

Finalmente se definen algunos conceptos de transferencia de calor y sus formas de transmisión, que se utilizarán para efectuar los cálculos de diseño del biodigestor propuesto.

2.2. Definición biomasa ¹

La biomasa es toda sustancia orgánica renovable de la cual se puede obtener energía a través de la transformación química de la materia. La energía que se puede obtener de la biomasa proviene de la luz solar, la cual gracias al proceso de fotosíntesis, es aprovechada por las plantas mediante reacciones químicas en las células, las que toman CO₂ del aire y lo transforman en sustancias orgánicas. En estos procesos de conversión, la energía solar se transforma en energía química que se acumula en diferentes compuestos orgánicos y que es incorporada y transformada por el reino animal, incluyendo al ser humano, el cual invierte la transformación para obtener bienes de consumo.

La biomasa se clasifica en: primaria, residual y en cultivos energéticos.

2.2.1. Biomasa primaria

La conforman los cultivos, árboles, pastos, plantas acuáticas, etc. Su aprovechamiento energético es muy ineficiente. Este tipo de biomasa es necesaria conservarla y protegerla por el alto impacto que tiene su explotación en los ecosistemas.

2.2.2. Biomasa residual

Está constituida por residuos agropecuarios, como: pulpa de café, cascarilla de arroz o por la biomasa primaria procesada por la limpieza de bosques, desechos orgánicos de animales y residuos de sacrificio o de procesamiento. Se considera también biomasa residual a la basura orgánica proveniente de botaderos municipales, mercados públicos y vertederos.

¹ *Energías Renovables*, 1^{era} Edición, Secretaría de energía, Buenos Aires – Argentina 2007. p. 5.

2.2.3. Cultivos energéticos

Se generan por la intervención del hombre con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible. Estos cultivos se pueden dividir en:

- **Cultivos ya existentes:** como los cereales y oleaginosas.
- **Lignocelulósicos forestales:** como el chopo y los sauces.
- **Lignocelulósicos herbáceos:** como el cardo.

Las tecnologías para aprovechar la biomasa están en función de la aplicación que se requiera y del tipo de energía que se desea obtener.

2.3. Procesos de conversión de la biomasa en energía

Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. Los procesos de conversión de la biomasa en energía son termoquímicos o bioquímicos.

2.3.1. Conversión termoquímica ²

La conversión termoquímica se basa en la descomposición de la biomasa por medio de calor. Este transforma a la biomasa en subproductos más convenientes y dependiendo de las condiciones del proceso, se obtienen diferentes proporciones de productos sólidos, líquidos y gaseosos. Existen tres tipos de conversión termoquímica:

² *Energías Renovables*, Op. Cit. p. 8, 9.

2.3.1.1. Combustión

Es el más sencillo y más ampliamente utilizado tanto en el pasado como en el presente. Permite obtener energía térmica, ya sea para usos domésticos o industriales. Las tecnologías utilizadas para la combustión directa de la biomasa abarcan un amplio espectro que va desde el sencillo fogón a fuego abierto hasta calderas de alto rendimiento utilizadas en la industria.

2.3.1.2. Gasificación

Consiste en la quema de biomasa en presencia de oxígeno en forma controlada, de tal manera que se produce un gas combustible denominado gas pobre por su bajo contenido calórico en relación, por ejemplo, al gas natural.

La gasificación se realiza en un recipiente cerrado, conocido como gasógeno, en el cual se introduce el combustible y una cantidad de aire menor a la que se requeriría para su combustión completa. El gas pobre obtenido puede quemarse luego en un quemador para obtener energía térmica, en una caldera para producir vapor, o bien ser enfriado y acondicionado para su uso en un motor de combustión interna que produzca a su vez, energía mecánica.

2.3.1.3. Pirólisis

Es un proceso similar a la gasificación por el cual se realiza una oxigenación parcial y controlada de la biomasa, para obtener como producto una combinación variable de combustibles sólidos (carbón vegetal), líquidos (efluentes piroleñosos) y gaseosos (gas pobre). Generalmente, el producto principal de la pirólisis es el carbón vegetal, considerándose a los líquidos y gases como subproductos del proceso.

La pirólisis con aprovechamiento pleno de subproductos tuvo su gran auge antes de la difusión masiva del petróleo, ya que constituía la única fuente de ciertas sustancias (ácido acético, metanol, etc.) que luego se produjeron por la vía petroquímica.

2.3.2. Conversión bioquímica ³

Los procesos bioquímicos se basan en la degradación de la biomasa por la acción de microorganismos, y pueden dividirse en dos grandes grupos: los que se producen en ausencia de aire (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de aire (aeróbicos).

Los métodos bioquímicos son más adecuados para biomásas con un alto contenido de humedad, debido a que tanto los microorganismos como las enzimas, pueden ejercer sus acciones en ambientes acuosos.

2.3.2.1. Procesos aeróbicos

La fermentación aeróbica de biomasa de alto contenido de azúcares o almidones, da origen a la formación de alcohol, que además de los usos ampliamente conocidos en medicina y licorería, es un combustible líquido de características similares a los que se obtienen por medio de la refinación del petróleo.

Las materias primas más comunes utilizadas para la producción de alcohol son la caña de azúcar, mandioca, sorgo dulce y maíz. El proceso incluye una etapa de trituración y molienda para obtener una pasta homogénea, una etapa de fermentación y una etapa de destilación y rectificación.

³ *Energías Renovables*, Op. Cit. p. 9, 10.

2.3.2.2. Procesos anaeróbicos

La fermentación anaeróbica, para la que se utiliza generalmente residuos animales o vegetales de baja relación carbono / nitrógeno, se realiza en un recipiente cerrado llamado digestor y da origen a la producción de un gas combustible denominado biogás. Adicionalmente, la biomasa degradada que queda como residuo del proceso de producción del biogás, constituye un excelente fertilizante para cultivos agrícolas.

Las tecnologías disponibles para su producción son muy variadas, pero todas ellas tienen como común denominador la simplicidad del diseño y el bajo costo de los materiales necesarios para su construcción. El biogás, constituido básicamente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), es un combustible que puede ser empleado de la misma forma que el gas natural. También puede comprimirse para su uso en vehículos de transporte, debiéndose eliminar su contenido de CO₂.

2.3.3. Ventajas del uso de la biomasa ⁴

El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, supone ventajas medioambientales de primer orden, como son:

- Disminución de las emisiones de azufre.
- Ciclo neutro de CO₂, sin contribución al efecto invernadero.
- Reducción del mantenimiento y de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles en las casas.
- Reducción de riesgos de incendios forestales y de plagas de insectos.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas, evitando su quema en el terreno.
- Independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles.
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales.

⁴ Rico, Javier, *Energía de la Biomasa*, 1^{era} Edición, Editorial IDAE, Madrid – España 2007, p. 8.

Estas ventajas convierten a la biomasa en una de las fuentes potenciales de empleo en el futuro, siendo un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales.

2.4. Etapas del proceso de fermentación anaeróbica⁵

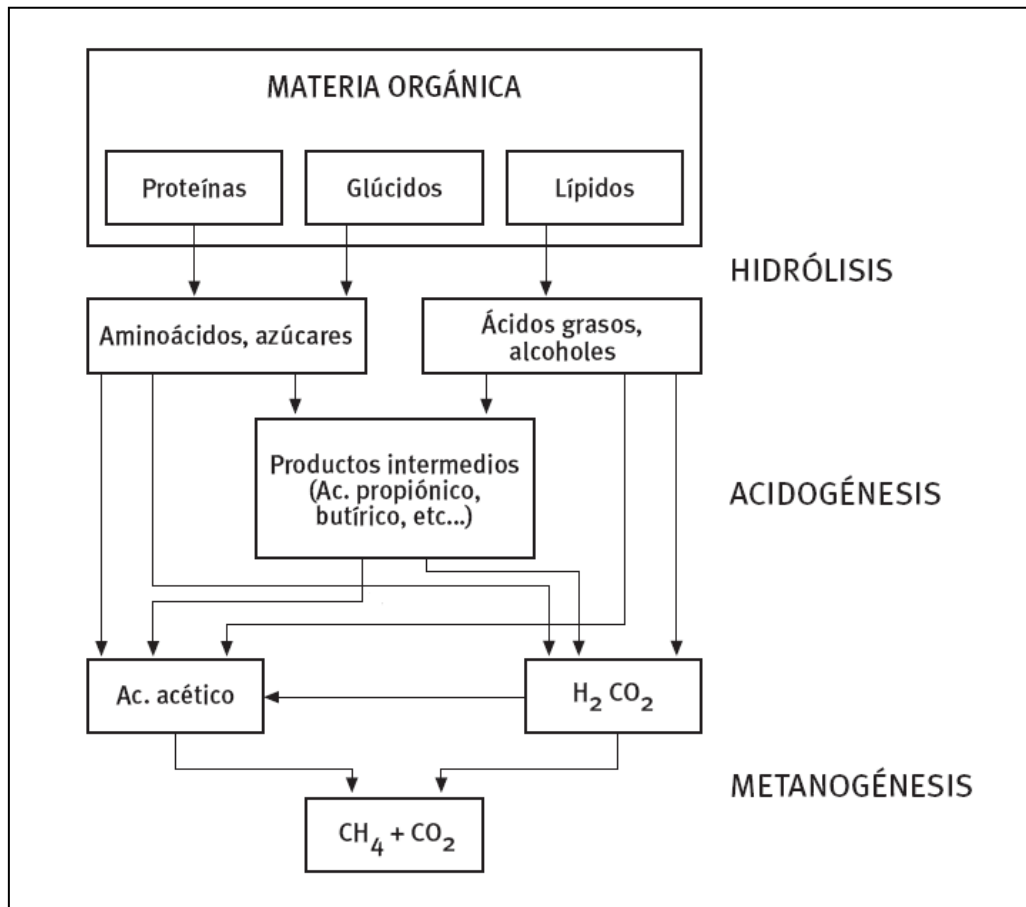
La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de varias fases consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato, interviniendo grandes poblaciones de microorganismos. Estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas por seres de diferentes velocidades de crecimiento y diferente sensibilidad a cada compuesto intermedio como inhibidor. Esto implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción según la composición del sustrato y que el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles.

Las bacterias productoras del biogás son estrictamente anaeróbicas y por lo tanto sólo podrán sobrevivir en ausencia total de oxígeno, otra característica que las identifica es la sensibilidad a los cambios ambientales debido a lo cual será necesario un mantenimiento casi constante de los parámetros básicos como la temperatura. Hoy en día gracias a estudios muy recientes es posible conocer mejor el mecanismo y funcionamiento de este complejo sistema microbiológico involucrado en la descomposición de la materia orgánica que la reduce a sus componentes básicos (CH_4 y CO_2).

El proceso de fermentación anaeróbica de la materia orgánica se lleva a cabo en cuatro etapas en las que intervienen diferentes tipos de bacterias, estas etapas se muestran en la figura 1 y son las siguientes: hidrólisis, acidogénica, acetogénica y metanogénica.

⁵ Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, *Biomasa: Digestores anaerobios*, 1^{era} Edición, Editorial IDAE, Madrid – España 2007, p. 11, 12.

Figura 1: Fases de la fermentación anaeróbica



Fuente: IDAE, *Biomasa: Digestores anaerobios*, 2007

2.4.1. Etapa de hidrólisis ⁶

La hidrólisis es la primera fase del proceso de digestión anaeróbica, en esta etapa se produce la disolución de los compuestos orgánicos que se encuentran en estado sólido o que poseen un alto peso molecular, obteniendo productos de cadena más corta y fácilmente solubles. Las bacterias hidrolíticas actúan sobre las macromoléculas orgánicas despolimerizándolas enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos.

⁶ SAINZ, Juan Antonio, *Tecnologías para la sostenibilidad*, 1^{era} Edición, Editorial Fundación EOI, Madrid – España 2005, p. 287.

Esta etapa es muy importante y condiciona a las siguientes debido a que el resto del proceso se realiza únicamente sobre compuestos disueltos. La rapidez con la que ocurra esta fase dependerá principalmente del tamaño de los sólidos en suspensión y de la naturaleza de la materia orgánica.

2.4.2. Etapa acidogénica ⁷

En esta etapa los compuestos solubles obtenidos en la etapa anterior son transformados por las bacterias acidogénicas en dióxido de carbono, hidrógeno y una mezcla de ácidos grasos volátiles de cadena corta como el ácido acético, propiónico, butírico y valérico, dependiendo la producción de unos u otros de la concentración de hidrógeno en el sistema.

Esta fase es desarrollada por microorganismos de rápido crecimiento, muy resistentes al medio, llevando a cabo su máxima actividad a valores de pH ligeramente ácidos. En esta etapa se debe controlar la cantidad de hidrógeno, porque el metabolismo de las bacterias acidogénicas depende de él.

2.4.3. Etapa acetogénica ⁸

En esta etapa los productos intermedios como el ácido propiónico, butírico y valérico que no pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos necesitan ser transformados en productos más sencillos, a través de las bacterias acetogénicas. Como principales productos se obtienen ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono que, posteriormente, pueden ser aprovechados por las bacterias metanogénicas.

⁷ SAINZ, Juan Antonio. Op. Cit. p. 287.

⁸ Idem. p. 288.

Las bacterias acetogénicas también necesitan un control exhaustivo de la concentración de hidrógeno, ya que con una elevada cantidad se reduce la formación de acetato, produciendo ácido propiónico, butírico o etanol en lugar de metano.

2.4.4. Etapa metanogénica ⁹

En esta etapa final del proceso, las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono. Las bacterias responsables de este proceso son anaeróbicas estrictas distinguiéndose dos tipos de microorganismos: los que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono y los que reducen el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua. La principal vía de producción de metano es la primera, con alrededor del 70% del metano producido. Este es un proceso lento y constituye la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica.

El proceso de digestión anaeróbica se completa con la integración de las 4 etapas, lo que implica que el rendimiento y eficacia de cada una depende de la anterior. Es importante considerar que los productos finales de una etapa son los sustratos de la siguiente, por lo que la acumulación de productos intermedios debido a alguna anomalía, puede conllevar a la inhibición de los microorganismos.

2.5. Factores que afectan el proceso de digestión anaeróbica

La actividad biológica involucrada en el proceso de digestión anaeróbica se ve afectada por diversos factores, debido a que cada grupo de bacterias que intervienen en las distintas etapas del proceso responde en forma diferente. Entre los factores más importantes cabe destacar los siguientes:

⁹ SAINZ, Juan Antonio. Op. Cit. p. 288.

2.5.1. Nutrientes ¹⁰

El desarrollo de cualquier organismo requiere de especies nutritivas que le permitan satisfacer sus necesidades metabólicas y la producción de células nuevas. Para un óptimo desarrollo del proceso de digestión anaeróbica se necesita la presencia de una serie de nutrientes y minerales como nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio y magnesio.

En el medio a digerir debe existir una relación adecuada entre los nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana, una ventaja de los residuos ganaderos y los fangos de depuración de aguas residuales es que presentan nutrientes en las proporciones adecuadas a diferencia de residuos industriales en los que puede ser necesaria la adición de dichos elementos. Sin embargo resulta fundamental para la estabilización del proceso que la relación C/N (Carbono/Nitrógeno) se mantenga entre 20/1 y 30/1 y la relación N/P (Nitrógeno/Fósforo) esté entre 1/5 y 1/7.

2.5.2. Temperatura ¹¹

En el procesos de digestión anaeróbica la velocidad de reacción está en función de la temperatura, por lo que a mayor temperatura, mayor es la velocidad de reacción, dependiendo del tipo de microorganismos presentes.

En función de la temperatura óptima de crecimiento, los microorganismos se clasifican en bacterias psicrófilas, mesófilas y termófilas, y sus respectivos rangos de temperatura se muestran en la tabla 1:

¹⁰ CUESTA, María José, *Situación actual de la producción de biogás*, 1^{era} Edición, Editorial Fundación Madrid para el conocimiento, Madrid – España 2008, p. 23.

¹¹ SAINZ, Juan Antonio. Op. Cit. p. 290.

Tabla 1: Intervalos de temperatura a las que trabajan las bacterias anaeróbicas

| <i>Bacterias</i> | <i>Rango de temperaturas</i> |
|------------------|------------------------------|
| Psicrofílicas | Menos de 20°C |
| Mesofílicas | Entre 20°C y 40°C |
| Termofílicas | Más de 40°C |

Fuente: CUESTA, María José, Situación actual de la producción de biogás, 2008

Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación.

El rango psicrófilico es el que presenta menores problemas de estabilidad que los otros rangos de operación, el régimen mesófilico es el más utilizado a pesar de que en la actualidad se ha descubierto que el rango termófilico es el que permite establecer la velocidad del proceso y una mejor eliminación de organismos patógenos. Sin embargo este último es el más inestable ante cualquier cambio en las condiciones de operación.

La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad del proceso de digestión. Variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden provocar la desestabilización del proceso, por ello para garantizar una temperatura homogénea, es imprescindible un sistema adecuado de control de temperatura.

La temperatura del proceso actúa también sobre aspectos físico – químicos, la solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura,

favoreciendo la transferencia líquido – gas, esto supone un efecto positivo para el caso de gases como el hidrógeno o el azufre, dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaerobios, finalmente, la viscosidad de sólidos y semisólidos disminuye al aumentar la temperatura, lo que implica menores necesidades de agitación.

2.5.3. Potencial de hidrógeno (pH) ¹²

El pH es uno de los parámetros de control más habituales de la digestión anaeróbica, en un digestor estabilizado, las diferentes etapas de digestión se producen de forma simultánea en el tiempo, por lo que debe mantenerse un pH en un rango comprendido entre 6,8 y 7,6. Si el valor del pH se encuentra por debajo del límite inferior, se producirá una disminución en la velocidad de la metanogénesis o incluso su inhibición, por lo que es imprescindible mantener el pH dentro del rango establecido.

El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6,8 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. Por otra parte, el pH afecta a los diferentes equilibrios químicos existentes en el medio, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Este es el caso de los equilibrios ácido – base del amoníaco y del ácido acético, al aumentar el pH se favorece la formación de amoníaco que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano y a pH bajo se genera mayoritariamente la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato.

En muchas ocasiones la capacidad natural del sistema para mantener el pH en las condiciones adecuadas es sobrepasada, por lo que es necesario controlar este

¹² SAINZ, Juan Antonio. Op. Cit. p. 170.

parámetro de modo artificial, mediante la adición de sustancias básicas como: hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de sodio o hidróxido de calcio. En el caso de algunas descargas industriales, la formación de grandes cantidades de amoníaco contribuye muy bien al control del pH; sin embargo, en otros casos de aguas residuales industriales la ausencia de nitrógeno es notable y el control del pH tiene que ser artificial.

El control del pH es una operación que debe ser llevada con mucho rigor, debido a que tanto el aumento como la disminución del mismo, detiene el funcionamiento metabólico de las bacterias, con el consecuente fallo del proceso.

2.5.4. Contenido en sólidos ¹³

El contenido de sólidos totales es un factor determinante, ya que la movilidad de las bacterias metanogénicas se ve limitada a medida que aumenta el contenido de sólidos, por lo que pueden verse afectadas la eficiencia y la producción de biogás.

2.5.5. Tiempo de retención ¹⁴

El tiempo de retención se define como el tiempo en que la mezcla de agua y desechos orgánicos está sometida a la acción de los microorganismos en el digestor. Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los sistemas discontinuos, donde el tiempo de retención coincide con el tiempo de permanencia de la mezcla dentro del digestor. En los digestores continuos y semi – continuos, la variable de tiempo definida en el reactor discontinuo se reemplaza por el tiempo de residencia, que se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria.

El tiempo de residencia indica por tanto, el tiempo que la mezcla permanece por término medio en el digestor. Este parámetro está íntimamente ligado con el tipo de

¹³ CUESTA, María José. Op. Cit. p. 24.

¹⁴ Idem. p. 24.

materia orgánica y la temperatura, la selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y, consecuentemente, serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de materia.

Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes, como la celulosa, demandarán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos.

El límite mínimo de los tiempos de retención, está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas, debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias que permanecen dentro del reactor.

Por esta razón en los últimos años se han buscado diseños de cámaras de digestión, que procuren lograr grandes superficies internas sobre las cuales se depositan como una película las bacterias u otros sistemas que logran retener a las bacterias metanogénicas, logrando de este modo tiempos de retención menores.

2.5.6. Compuestos inhibidores ¹⁵

Existen algunas sustancias que pueden inhibir la digestión anaeróbica eliminando la actividad biológica de las bacterias presentes en el proceso. Estas sustancias pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaerobios o pueden formar parte del sustrato.

Experimentalmente se ha comprobado que la magnitud del efecto tóxico de una sustancia puede ser reducida significativamente por aclimatación de la población de

¹⁵ CUESTA, María José. Op. Cit. p. 24, 25.

microorganismos al tóxico. Por otra parte, muchas de estas sustancias a bajas concentraciones pueden ser estimuladoras del proceso. Entre estas sustancias inhibidoras están el oxígeno, los ácidos volátiles, hidrógeno, nitrógeno amoniacal, sulfatos y sulfuros entre otras sustancias tóxicas.

2.5.6.1. Oxígeno

Aunque su efecto inhibidor no es permanente, ya que en la flora bacteriana existen microorganismos que van consumiendo el oxígeno que pueda tener el medio, si la biomasa es rica en nitrógeno, se puede producir un exceso de amoníaco que inhibe el proceso.

2.5.6.2. Ácidos volátiles

Un síntoma típico de mal funcionamiento de los digestores es el aumento de la concentración de los ácidos volátiles en el efluente. La inestabilidad del proceso puede estar relacionada con una sobrecarga orgánica del digestor, una entrada de elementos tóxicos inhibidores en el efluente o una variación de temperatura.

2.5.6.3. Hidrógeno

El hidrógeno es un compuesto importante del proceso anaerobio. Su acumulación en el medio, provoca la inhibición de la acetogénesis y, consecuentemente, la acumulación de ácidos grasos volátiles con más de dos átomos de carbono.

2.5.6.4. Nitrógeno amoniacal

Durante el proceso anaerobio, el nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal es un nutriente importante para el crecimiento bacteriano, una concentración excesiva puede limitar su crecimiento.

Aquellos residuos que contengan mayores proporciones de proteínas u otros compuestos nitrogenados son los que presentan más problemas de inhibición por amonio.

2.5.6.5. Sulfatos y sulfuros

La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir la inhibición del proceso anaerobio, especialmente de la metanogénesis. En presencia de sulfatos, las bacterias metanogénicas compiten con las sulfato – reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), mostrando éstas últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. El resultado de esta competición determinará la proporción de ácido sulfhídrico y metano en el biogás producido.

El sulfuro es también un inhibidor para muchos grupos bacterianos. En general, los metanogénicos son más sensibles que los acidogénicos y acetogénicos. Por tanto, la inhibición tiene dos etapas, la primera debida a la competición por el sustrato entre los microorganismos metanogénicos y sulfato – reductores y la segunda es una inhibición directa del crecimiento metanogénico por la presencia de sulfuros solubles.

2.5.7. Agitación ¹⁶

Existen diferentes motivos para mantener un grado de agitación adecuado en el medio de digestión: mezclado y homogeneización del sustrato, distribución uniforme de calor para mantener la temperatura homogénea, favorecer la transferencia de gases y evitar la formación de espumas o la sedimentación.

¹⁶ CUESTA, María José. Op. Cit. p. 25.

La agitación puede ser mecánica o neumática a través del burbujeo de biogás recirculado a la presión adecuada. En ningún caso debe ser violenta, ya que podría destruir los agregados de bacterias.

En la tabla 2, se puede observar las condiciones ideales de los diferentes parámetros en función de cada fase del proceso de digestión anaeróbica.

Tabla 2: Condiciones ideales para la digestión anaerobia en función de la fase

| PARÁMETRO | HIDRÓLISIS/ACIDIFICACIÓN | FORMACIÓN DE CH ₄ |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|
| Temperatura (°C) | 25-35 | Mesófilo: 32-42 Termófilo: 50-58 |
| pH | 5,2-6,3 | 6,7-7,5 |
| Relación C:N | 10-45 | 20-30 |
| Contenido en sólidos (%) | <40 | <30 |
| Potencial redox (mV) | 300-100 | <250 |
| Demanda de nutrientes C:N:P:S | 500:15:5:3 | 600:15:5:3 |
| Elementos traza | No existen requerimientos específicos | Micronutrientes esenciales: Ni, Co, Mo, Se. |

Fuente: ENYA, Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador, 2008

Como se definió anteriormente, los principales productos que se obtienen de la digestión anaeróbica son:

- Biogás
- Efluente o bioabono

2.6. Biogás

2.6.1. Composición del biogás¹⁷

El biogás es el producto gaseoso de la digestión anaerobia de compuestos orgánicos, esta mezcla gaseosa está formada principalmente por metano y dióxido de carbono, y pequeñas proporciones de otros gases como: ácido sulfhídrico (H₂S), hidrógeno (H₂), y amoníaco (NH₃). La composición o riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. En la tabla 3 se muestran valores medios de composición del biogás en función del sustrato utilizado.

Tabla 3: Componentes del biogás en función del sustrato utilizado

| Componente | Desechos agrícolas | Lodos cloacales | Desechos industriales | Gas de vertedero |
|----------------------|--------------------|-----------------|-----------------------|------------------|
| Metano | 50 – 80% | 50 – 80% | 50 – 70% | 45 – 65% |
| Dióxido de Carbono | 30 – 50% | 20 – 50% | 30 – 50% | 34 – 55% |
| Agua | Saturada | Saturada | Saturada | Saturada |
| Hidrógeno | 0 – 2% | 0 – 5% | 0 – 2% | 0 – 1% |
| Sulfuro de Hidrógeno | 100 – 7000ppm | 0 – 1% | 0 – 8% | 0,5 – 100ppm |
| Amoníaco | Trazas | Trazas | Trazas | Trazas |
| Monóxido de Carbono | 0 – 1% | 0 – 1% | 0 – 1% | Trazas |
| Nitrógeno | 0 – 1% | 0 – 3% | 0 – 1% | 0 – 20% |
| Oxígeno | 0 – 1% | 0 – 1% | 0 – 1% | 0 – 5% |

Fuente: Coombs J, Diccionario de biotecnología, 1990

¹⁷ CUESTA, María José. Op. Cit. p. 29, 30.

En términos generales, el biogás puede ser obtenido de las aguas residuales orgánicas y de residuos sólidos, como por ejemplo, el estiércol, desechos de pastos o desechos urbanos. Los procesos de biodegradación se realizan dentro del digestor, que es la tecnología utilizada para realizar la fermentación anaeróbica y la producción de biogás. Existen diversos factores que afectan la producción de biogás, tales como el tipo de sustrato o nutrientes disponibles, la temperatura del sustrato, la carga volumétrica, el tiempo de retención, el grado de mezclado y la presencia de inhibidores del proceso. Para controlar este proceso se han desarrollado diversos modelos de digestores que responden a las características de la materia prima a utilizar, la aplicación que se requiera, las exigencias de los niveles de descontaminación, el costo –beneficio de los equipos, entre otros.

2.6.2. Características del biogás ¹⁸

En la tabla 4 se describen algunas de las características más importantes del biogás.

Tabla 4: Características principales del biogás

| Característica | Valores |
|------------------------------|---------------------------------|
| Densidad | 1,09Kg/m ³ |
| Solubilidad en agua | Baja |
| Presión crítica | 673,1 psi |
| Temperatura crítica (metano) | -82,5 °C |
| Poder calorífico | 4500 a 6500 Kcal/m ³ |
| Temperatura de la llama | 870°C |

Fuente: Coombs J, Diccionario de biotecnología, 1990

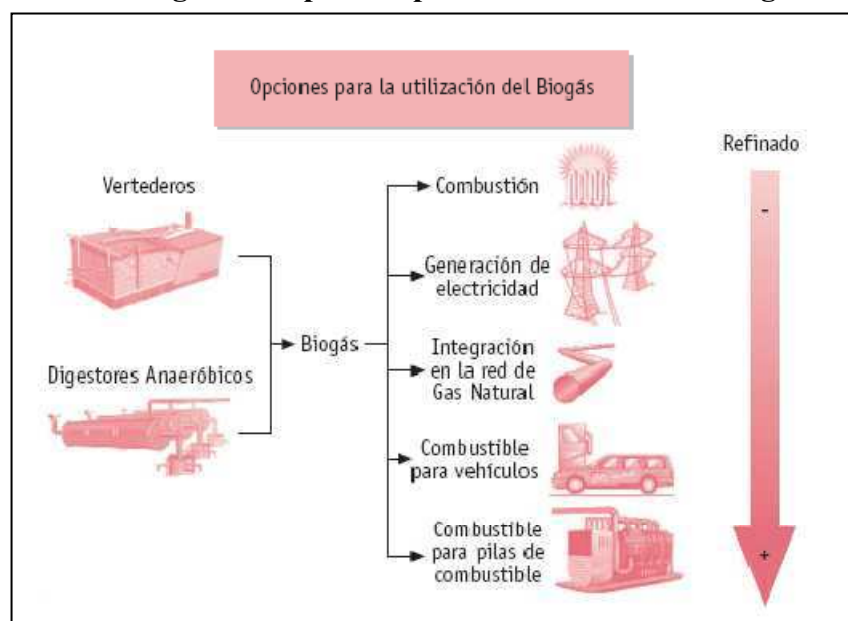
¹⁸ Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, Op. Cit. p. 7.

El biogás es incoloro, inodoro e insípido, por lo que es difícil detectarlo, pero por tener una densidad menor que la del aire su peligrosidad asfixiante y explosiva disminuye. La temperatura crítica del metano es $-82,5^{\circ}\text{C}$ (116.5°F) y su presión crítica de 45.8 kg / cm^2 ($673,1\text{psi}$), características que obligan a utilizar el biogás en su estado natural, ya que el equipo para licuarlo consume demasiada energía y lo hace excesivamente costoso en unidades de poca producción.

2.6.3. Usos del biogás ¹⁹

La utilización del biogás como fuente de energía aumenta día a día, según la importancia que se brinda a las energías renovables como alternativa a las fuentes tradicionales de energía de origen no renovable (petróleo, gas, carbón, etc.). El biogás puede utilizarse en prácticamente las mismas aplicaciones energéticas desarrolladas para el gas natural: generación de calor mediante combustión, generación de electricidad, integración en la red de gas natural, combustible para vehículos y combustible de pilas de combustible. En la figura 2 se muestran algunas opciones para la utilización del biogás.

Figura 2: Opciones para la utilización del biogás



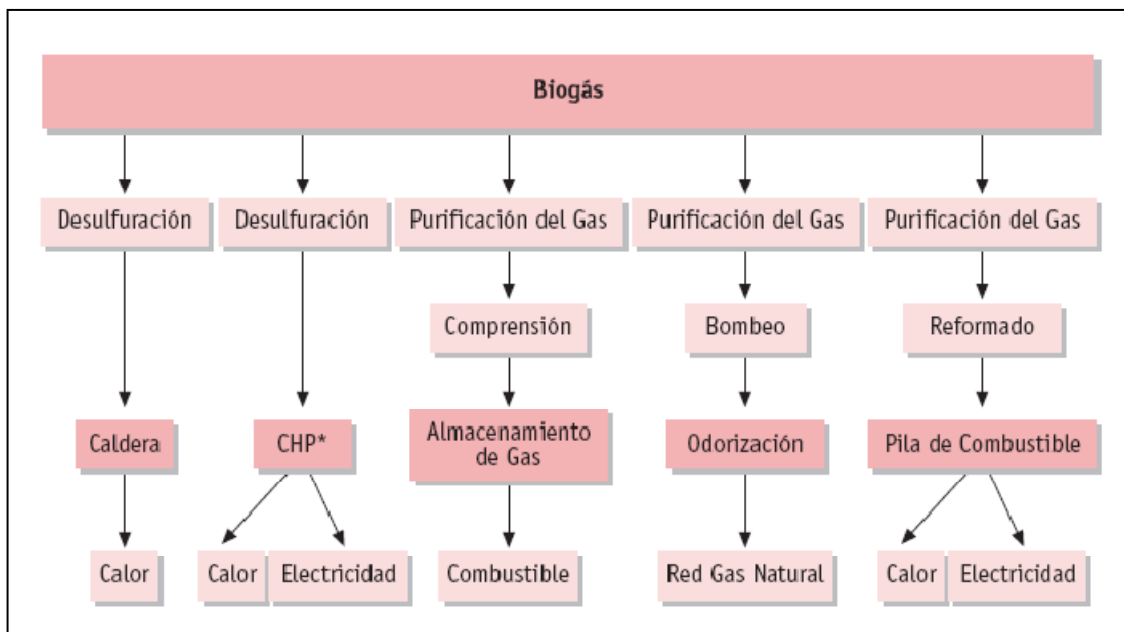
Fuente: CUESTA, María José, Situación actual de la producción de biogás, 2008

¹⁹ CUESTA, María José. Op. Cit. p. 76, 77.

En la actualidad, las aplicaciones más comunes del biogás son la combustión directa para la producción de calor y la generación de energía eléctrica. No obstante, existe un interés creciente por otras alternativas como combustible de automoción y su integración en la red de gas natural.

El biogás debe ser refinado previamente en cualquiera de sus aplicaciones energéticas. En este sentido, las operaciones de depuración varían en función del uso del biogás, tal y como se muestra en la figura 3. Los requerimientos de calidad son mayores cuando se utiliza como combustible de automoción, en las líneas de distribución del gas natural o en pilas de combustible. La purificación del biogás incluye la eliminación de dióxido de carbono (CO₂), ácido sulfhídrico (H₂S), amoníaco (NH₃), agua y partículas sólidas.

Figura 3: Necesidad de tratamiento del biogás en función del uso



Fuente: CUESTA, María José, Situación actual de la producción de biogás, 2008

2.6.3.1. Obtención de calor por combustión directa ²⁰

El biogás se puede utilizar en la generación de calor a través de su combustión, a su vez, este calor tiene distintas aplicaciones. Se puede emplear para calefacción y agua caliente (tanto en la propia instalación productora como a nivel residencial), para el calentamiento de los reactores donde se produce la digestión anaeróbica, para incinerar o esterilizar desechos provenientes del sector médico, para el secado de forraje, y en calentadores, cocinas de gas, lámparas o quemadores - estufas, tanto de uso industrial como doméstico.

El biogás también se puede aplicar en otros aparatos, como refrigeradores domésticos o quemadores infrarrojos, comúnmente utilizados en la calefacción de ambientes en ganadería (criaderos o parideras). Recientemente, se han desarrollado equipos para el enfriamiento de leche y otros productos agrícolas, lo que abre un importante campo de aplicación directa y rentable del biogás.

El principal inconveniente que presenta el biogás en este caso es la necesidad de ubicar la zona de consumo de calor lo más cerca posible de la zona donde se genera, ya que debido al bajo poder calorífico del biogás, este no puede ser trasladado de forma rentable por tuberías. Por ello, lo habitual es que el calor generado por la combustión del biogás sea utilizado en las propias instalaciones productoras.

2.6.3.2. Generación de electricidad ²¹

El biogás puede ser usado para generar electricidad de tres formas diferentes:

- Utilizando motores de combustión que van unidos a generadores de electricidad.
- Empleando turbinas o microturbinas de gas.
- En sistemas de cogeneración y trigeneración.

²⁰ CUESTA, María José. Op. Cit. p. 78.

²¹ Idem. p. 79, 80, 81, 82.

Motores de combustión unidos a generadores de electricidad

Una primera manera de generar electricidad es mediante el uso de motores de combustión interna, tanto los que usan gasolina (motores de ciclo Otto) como los que funcionan con gasóleo (diesel). El biogás se puede usar como combustible para estos motores, pero previamente deben ser eliminadas las impurezas que pueden afectar al rendimiento y mantenimiento de los mismos. El biogás tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110, lo que hace que sea ideal para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, aunque como desventaja presenta una baja velocidad de encendido, el rendimiento del biogás en los motores de ciclo Otto es muy adecuado, ya que sólo existe una merma de la potencia máxima de entre un 20% y un 30%, y pueden funcionar usando un 100% de biogás. En cuanto a los motores diesel, generalmente usan un sistema mixto de biogás y diesel, que permite aplicar distintas proporciones de ambos combustibles y el paso de uno a otro de forma rápida y confiable. Para ello, estos motores añaden un mezclador de gases con un sistema de control, manteniendo el sistema de inyección convencional.

Turbinas y microturbinas

La preocupación existente en la actualidad por el medio ambiente y su protección ha traído consigo la introducción de nuevas tecnologías para la producción de energías más respetuosas con la naturaleza.

El uso de las turbinas de gas, que son relativamente menos contaminantes debido a su mejor rendimiento, ha aumentado considerablemente, este crecimiento se ha visto favorecido por el incremento de actividad en el sector del gas y además por el crecimiento sostenido de la demanda, una de las ventajas de las turbinas es que requieren menor tiempo de instalación que otros sistemas equivalentes, por lo que resultan muy adecuadas para proyectos de desarrollo rápido. En este sentido, se han introducido varias modificaciones en el diseño de las turbinas para que resulten más económicas y medioambientalmente más atractivas, una de las alternativas que permite utilizar las turbinas de gas de manera que se obtengan buenos rendimientos

es su utilización en ciclos combinados en lugar de utilizarlas en ciclos abiertos, de este modo el rendimiento global de la instalación es superior al de la turbina de gas operando en solitario.

Un ejemplo del uso del biogás como combustible en turbinas es la utilización de turbinas de gas derivadas de los motores aeronáuticos para la producción de electricidad y calor, se ha diseñado plantas de ciclo combinado en varios países del mundo, destacando Estados Unidos y Brasil, sin embargo, es necesario realizar ciertas modificaciones en la cámara de combustión para que admita el uso de combustibles con poder calorífico bajo, como es el biogás.

Sistemas de cogeneración y trigeneración

Los sistemas de cogeneración (calor y potencia) buscan la mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía contenida en el biogás. La cogeneración genera simultáneamente electricidad y calor, que es capturado para su uso doméstico o industrial, de esta forma, se hace un uso más completo de la energía que la lograda mediante la generación convencional de electricidad, donde el calor generado en el proceso se pierde. Una central de cogeneración de electricidad – calor funciona con turbinas, motores de combustión o pilas de combustible, ya que cualquiera de estas tecnologías libera calor en el proceso de generación de electricidad. Las centrales de cogeneración pueden alcanzar un rendimiento energético del orden del 90%, además, el procedimiento es más ecológico, ya que durante la combustión se libera menos CO₂, que usando fuentes de energía tradicionales (carbón o petróleo).

Recientemente, se ha empezado a hablar de trigeneración, que es un proceso similar a la cogeneración en el que se produce frío, además de energía eléctrica y calor, típicos de la cogeneración, utilizando un único combustible, como es el biogás. El frío normalmente se obtiene por el método de absorción.

La trigeneración hace posible unir la demanda del calor en invierno con la de frío en los meses de verano, el calor residual que se obtiene es la suma del producido por la generación de electricidad, más el sustraído del proceso de refrigeración, en este sentido, se consigue más cantidad de calor, aunque a menor temperatura y con la desventaja de que las posibles aplicaciones de este calor pueden verse reducidas.

2.6.3.3. Integración en la red de gas natural ²²

El biogás puede introducirse (una vez limpio y refinado) en la red de gas natural, ya que al igual que el gas natural, está constituido principalmente por metano. El biogás tiene que ser depurado previamente para que alcance los requerimientos de calidad del gas natural y se pueda introducir en su red de distribución, la purificación del biogás consiste en la eliminación de CO₂, H₂S, NH₃, agua y partículas sólidas.

La integración del biogás en las redes de gas natural ha sido probada con cierto éxito en varios países como Suiza, Suecia, Alemania, Francia y en los Estados Unidos.

2.6.3.4. Utilización como combustible de vehículos ²³

Junto con la generación de electricidad, esta es la aplicación con más futuro del biogás. El desarrollo actual de los biocombustibles como alternativa a los combustibles convencionales genera mayor interés en la industria del transporte urbano, vehículos ligeros y pesados, donde ya es un hecho probado su aplicación y supone una interesante promesa de futuro.

Desde hace varios años existen vehículos que funcionan con gas natural. Se estima que los vehículos que utilizan este tipo de combustible emiten un 20% menos de CO₂ (principal causante del efecto invernadero) que los vehículos que funcionan con

²² CUESTA, María José. Op. Cit. p. 85.

²³ Idem. p. 86, 87.

gasolina o con gasóleo. El biogás puede sustituir al gas natural en los vehículos propulsados por este combustible, previo refinado del biogás para eliminar impurezas y, de esta forma, elevar los niveles de metano hasta casi el 95%

En este sentido, se han desarrollado dos tipos de tecnología para el refinado y limpieza del biogás para su uso como combustible de automoción:

- **La absorción en agua (absorción física):** Su principio básico consiste en lavar el biogás con agua a determinada presión. Con este procedimiento se garantiza elevar la concentración de metano hasta valores similares al gas natural.
- **La absorción en alcianoamina (absorción química):** Su principio básico consiste en lavar el biogás con una alcianoamina disuelta en agua. Como resultado de la reacción que tiene lugar, se eliminan componentes indeseables y se eleva la concentración de metano hasta valores similares al gas natural.

2.6.3.5. Aplicación en pilas de combustible ²⁴

Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos en los que la energía de una reacción química se convierte directamente en electricidad. A diferencia de la pila eléctrica o batería, una pila de combustible no se acaba ni necesita ser recargada, ya que funciona mientras el combustible y el oxidante le sean suministrados.

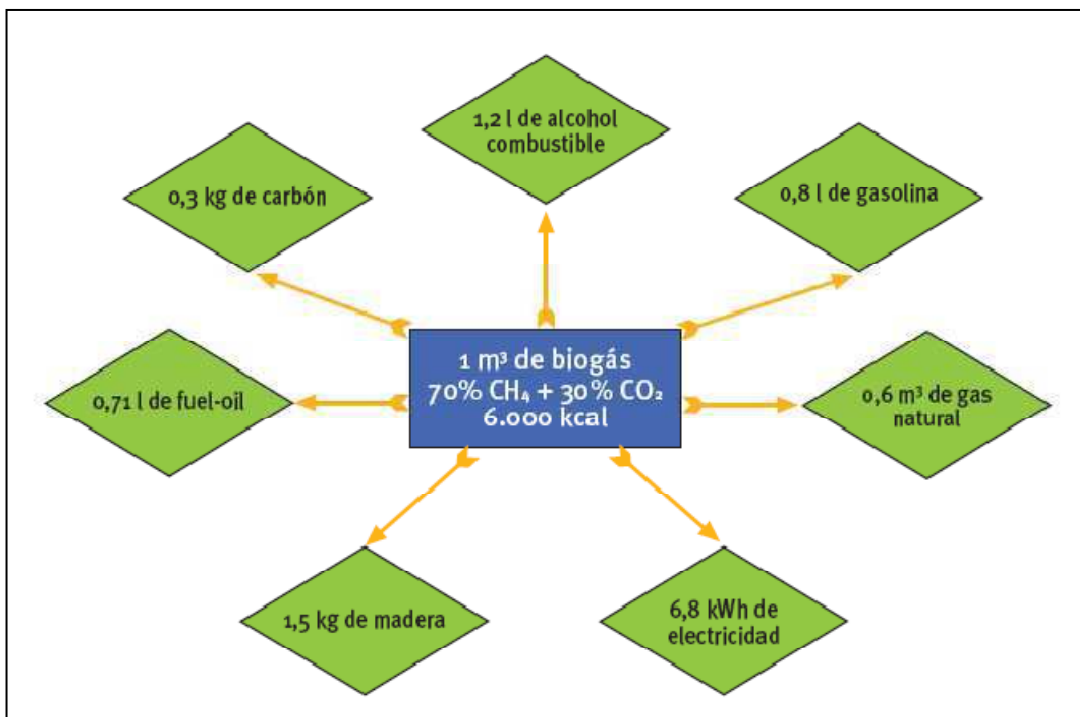
Su principio de funcionamiento es inverso al de la electrólisis del agua, en la que se separa este compuesto en hidrógeno y oxígeno, mediante aporte de energía eléctrica, en el caso de las pilas de combustible, se obtiene energía eléctrica por medio de la reacción entre hidrógeno y oxígeno, generándose vapor de agua. La utilización de pilas de combustible ofrece ventajas sustanciales sobre la tecnología clásica de combustión utilizando combustibles fósiles, ya que la eficiencia es superior y únicamente se emite vapor de agua a la atmósfera.

²⁴ CUESTA, María José. Op. Cit. p. 88.

Dado que en el proceso de generación de electricidad también se produce calor, las pilas de combustible también se pueden adaptar como sistemas de cogeneración, produciéndose simultáneamente energía eléctrica y calorífica. Cuando el biogás se utiliza como combustible en pilas de combustible, lo habitual es que sea previamente transformado en hidrógeno, los métodos más comunes para la transformación de metano en hidrógeno son: el reformado con vapor de agua, la oxidación parcial y el autorreformado.

En la figura 4, se puede apreciar de forma general algunas aplicaciones que puede reemplazar el biogás, comparado con otras fuentes de energía.

Figura 4: Equivalencia del biogás con otras fuentes de energía



Fuente: Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, Biomasa: Digestores anaerobios, 2007

2.6.4. Métodos de depuración del biogás ²⁵

2.6.4.1. Eliminación del dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono no tiene ningún poder calorífico. Su eliminación no es aconsejable salvo en los casos de almacenaje del biogás a altas presiones, debido a que sería inútil gastar energía de compresión y volumen de almacenaje de alto costo en un gas que no daría ningún beneficio adicional.

Se utilizan varios sistemas entre los cuales los más difundidos son los que emplean su disolución en agua a presión y otros que usan mezclas químicas de gran complejidad.

2.6.4.2. Eliminación del ácido sulfhídrico (H₂S)

Determinados equipos requieren que el gas a utilizar se encuentre libre de H₂S, debido a que corroe las partes vitales de algunas instalaciones.

El método más utilizado es hacer pasar el gas por un filtro que contiene hidróxido de hierro. El H₂S del gas se combina con el hierro formando sulfuro de hierro, esta reacción es reversible y el hidróxido de hierro puede ser regenerado exponiendo el sulfuro al aire tomando los cuidados respectivos debido a que la reacción es exotérmica.

2.6.4.3. Eliminación del agua

El biogás al salir del digestor está saturado con vapor de agua. Generalmente es recomendable el secado, la refrigeración o el diseño de la red de tuberías con pequeños diámetros como métodos utilizados comúnmente para condensar el agua.

²⁵ LLANEZA, Herminio, *Caracterización, purificación y control del biogás*, 1^{era} Edición, Editorial Gobierno de España, Madrid – España 2007, p. 12, 13, 14.

2.7. Efluente o Bioabono ²⁶

El bioabono se puede definir como el producto resultante de someter a un proceso de fermentación controlado, una serie de residuos orgánicos, sólidos o semisólidos, obteniendo al cabo de un tiempo, un material semi-humificado, libre de insectos en diferentes estados de su vida, así como de gérmenes patógenos, pero rico en microorganismos del suelo que permiten tener una buena disponibilidad de nutrientes para las plantas.

2.7.1. Características del bioabono ²⁷

El bioabono se caracteriza por ser rico en materia orgánica y nutrientes, usualmente contiene un 2 % de nitrógeno, 1.5% de fósforo, 1.8% de potasio y otros elementos. Dichas características lo convierten en un material orgánico ideal para aplicarse en los suelos agrícolas, especialmente en aquellos donde la materia orgánica es escasa.

El efluente carece prácticamente de olor debido a que las sustancias provocadoras del mal olor son reducidas casi en su totalidad en función al tiempo de retención. La tabla 5 contiene valores aproximados de la composición de los principales nutrientes.

Tabla 5: Composición de los principales nutrientes del bioabono

| MATERIAL DE CARGA ESTIERCOLES | COMPOSICION (%) | | | RELACION NUTRITIVA | | |
|----------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|
| | N ₂ | P ₂ O ₅ | K ₂ O | N ₂ | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| Vacuno | 0,46 | 0,2 | 0,5 | 2,3 | 1 | 2,5 |
| Porcino | 0,72 | 0,4 | 0,3 | 1,8 | 1 | 0,6 |
| Aviar (seco) | 3,60 | 4,6 | 2,5 | 0,8 | 1 | 0,6 |

Fuente: HILBERT, Jorge, Manual para la Producción de Biogás, 2003

²⁶ Asociación de estudiantes del sector agropecuario costarricense, *Memoria del segundo congreso del sector agropecuario*, 1^{era} Edición, Costa Rica 1998, p. 126.

²⁷ HILBERT, Jorge, *Manual para la Producción de Biogás*, Editorial Instituto de Ingeniería Rural, Argentina 2003, p. 40.

2.7.2. Efecto del efluente sobre el suelo²⁸

El efecto en los suelos de la aplicación de bioabono se traduce en una mejora significativa de su estructura y sobre todo en su fertilidad. La cantidad de humus estable se duplica con respecto al que se consigue mediante la utilización de desechos sin tratar, incrementando en forma significativa la actividad biológica del suelo.

2.7.3. Efecto sobre los cultivos

Existen amplias evidencias del incremento en la producción de distintas especies provocada por la aplicación de efluente al suelo. En este aspecto, las cifras dependen del material orgánico de carga, del digester, del suelo y finalmente del cultivo.

2.7.4. Aspecto sanitario

El uso de efluente aporta indudables beneficios al reemplazar otros costosos sistemas para obtener el mismo grado de descontaminación. El tratamiento de los desechos por vía anaeróbica elimina la acumulación de estos a la intemperie, evitando la proliferación de moscas, mosquitos, otros insectos y roedores portadores de peligrosas enfermedades.

El proceso en si mismo produce una reducción del 90% al 99% de los principales patógenos (estafilococos, salmonella, pseudo – monas). Esta ventaja importante desde el punto de vista del saneamiento está regulada por la temperatura de fermentación y la cantidad de días que permanece la biomasa dentro del digester (tiempo de retención).

²⁸ HILBERT, Jorge. Op. Cit. p. 42.

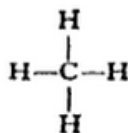
2.7.5. Aplicaciones del efluente ²⁹

El efluente que se obtiene del proceso de digestión anaeróbica tiene otras aplicaciones aparte de su uso en la mejora de los suelos y cultivos como abono, entre las cuales merecen mencionarse: la alimentación de algas, peces y animales en raciones balanceadas.

Es también un aditivo al material vegetal para la elaboración de composta, ya que aporta una buena fuente de nitrógeno que acelera el proceso y enriquece al mismo tiempo el producto final con fósforo y otros elementos. El proceso de composta completa la efectiva destrucción de patógenos lograda en la digestión anaeróbica.

2.8. Metano ³⁰

El metano es el hidrocarburo alcano más sencillo cuya fórmula química es CH₄, cada uno de los átomos de hidrógeno está unido al carbono por medio de un enlace covalente. Se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias.



2.8.1. Propiedades del metano

El metano es el componente principal del biogás, aproximadamente constituye un 70% de su volumen a temperatura ambiente y presión atmosférica estándar. El metano es un gas incoloro e inodoro, como medida de seguridad se añade un odorífero, habitualmente metanotiol o etanotiol. El metano tiene un punto de

²⁹ HILBERT, Jorge. Op. Cit. p. 43.

³⁰ GRANADOS, Ricardo, *Química orgánica simplificada*, 1^{era} Edición, Editorial Reverté, Barcelona – España 2005, p. 61.

ebullición de $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una atmósfera y un punto de fusión de $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$. El metano líquido no es combustible.

2.8.2. Fuentes

En la naturaleza se produce por la putrefacción anaeróbica de las plantas, este proceso natural se puede aprovechar para producir biogás. Muchos microorganismos anaeróbicos lo generan utilizando el CO_2 como aceptor final de electrones y constituye hasta el 97% del gas natural.

2.8.3. Efectos del metano³¹

El metano es un gas de efecto invernadero relativamente potente que contribuye al calentamiento global del planeta Tierra, ya que tiene un potencial de calentamiento global de 23. Esto significa que en una media de tiempo de 100 años cada kg de CH_4 calienta la Tierra 23 veces más que la misma masa de CO_2 , sin embargo hay aproximadamente 220 veces más dióxido de carbono en la atmósfera de la Tierra que metano por lo que el metano contribuye de manera menos importante al efecto invernadero.

2.8.4. Combustión del metano³²

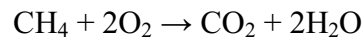
La combustión del metano es la reacción principal que tiene lugar al quemar biogás, el producto importante no es el dióxido de carbono ni el agua, sino el calor. La combustión de hidrocarburos sólo se efectúa a temperaturas elevadas, como las que proporcionan una llama o una chispa, sin embargo, una vez iniciada, la reacción desprende calor, que a menudo es suficiente para mantener la alta temperatura y

³¹ NEVEL, Bernard J., *Ciencias ambientales*, 6^{era} Edición, Editorial PEARSON, p. 412.

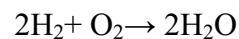
³² O'CONNORS, Davis, *Química: experimento y teorías*, Editorial Reverté, Barcelona – España 1982, p. 405.

permitir que la combustión continúe. El calor de combustión que genera el metano es de 213kcal.

El metano reacciona en primer lugar con el oxígeno, acto seguido se descompone en el radical formil, que a continuación genera dióxido de carbono e hidrógeno.



Posteriormente el H₂ se oxida formando H₂O, desprendiendo calor. Este proceso es muy rápido, siendo su duración habitual inferior a un milisegundo.



Finalmente el CO se oxida, formando CO₂ y liberando más calor. Este proceso generalmente es más lento que el resto de pasos, y requiere unos cuantos milisegundos para producirse.

2.9. Tecnología empleada en la digestión anaeróbica

La tecnología empleada en la digestión anaeróbica, para el tratamiento de los desechos orgánicos y la generación de biogás se denomina biodigestor, existe una amplia gama de biodigestores que están diseñados en función principalmente de las necesidades de producción y del tipo de desecho a tratar.

2.9.1. Biodigestor³³

Un biodigestor es un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita material orgánico para su fermentación (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, aguas residuales, etc.) en

³³ HILBERT, Jorge. Op. Cit. p. 14.

determinada dilución de agua para que a través de la fermentación anaeróbica se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se disminuya el potencial contaminante de los excrementos.

Los biodigestores son sistemas sencillos de implementar con materiales económicos y se introducen principalmente en comunidades rurales aisladas, para obtener el doble beneficio de conseguir solventar la problemática energética - ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales.

2.9.2. Clasificación de los biodigestores³⁴

La clasificación más común para los biodigestores, es en función de su régimen de carga, así se tienen los tres siguientes grupos.

2.9.2.1. Biodigestores tipo Batch

La carga de la totalidad del material a fermentar se hace al inicio del proceso y la descarga del efluente se hace al finalizar el proceso, por lo general requieren de mayor mano de obra y de un espacio para almacenar la materia prima si esta se produce continuamente.

Este tipo de digestor se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que ha dejado de producir gas combustible. Este sistema es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente, es también ideal a nivel de laboratorio si se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico en particular.

³⁴ HILBERT, Jorge. Op. Cit. p. 15.

2.9.2.2. Biodigestores de carga continua

Los biodigestores de carga continua se caracterizan principalmente, porque el material a fermentar y la descarga del efluente se realiza de manera continua durante el proceso, que se extiende indefinidamente a través del tiempo. Por lo general requieren de menos mano de obra, pero de una mezcla más fluida o movilizada de manera mecánica y de un depósito de gas.

2.9.2.3. Biodigestores de carga semicontinua

Es el tipo de digestor más usado en el medio rural, cuando se trata de digestores pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el hindú y el chino.

Entre los de tipo hindú existen varios diseños, pero en general son verticales y enterrados, se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación.

Los digestores tipo chino, igualmente requieren de una carga diaria de mezcla, son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo, y se construyen totalmente enterrados. En este tipo de digestores el biogás se almacena dentro del mismo sistema, a medida que aumenta el volumen del gas almacenado en el domo de la planta, aumenta su presión, forzando al líquido digerido a salir.

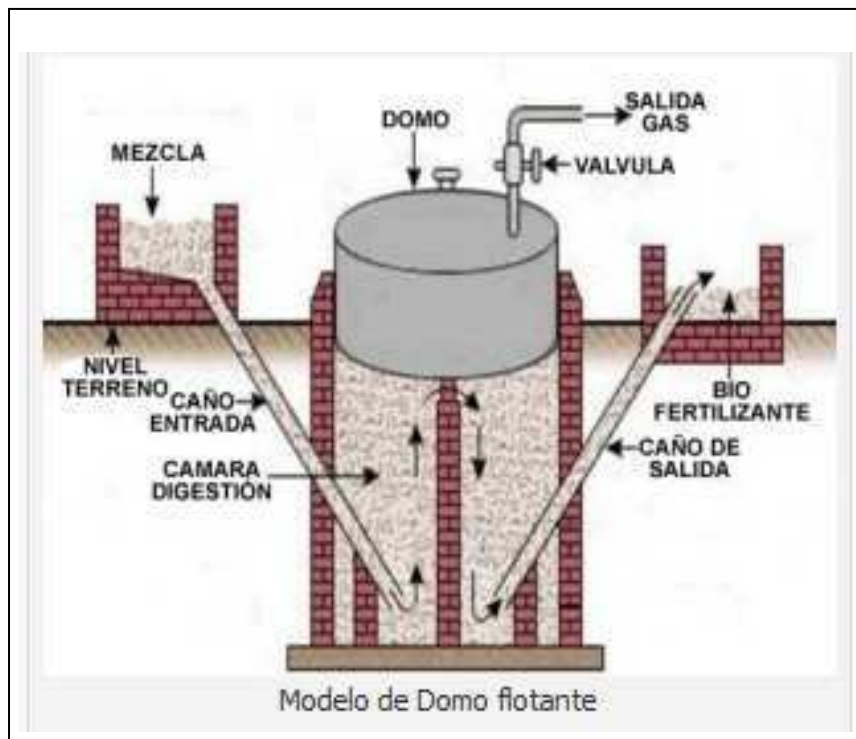
2.9.3. Biodigestores tipo hindú o de campana flotante

Este tipo de digestor posee una cámara de digestión de forma cilíndrica sobre la cual flota la campana gasométrica generalmente construida en hierro. La salida del efluente se efectúa por rebalse. Este digestor funciona en forma continua realizándose por lo general una o dos cargas diarias, el gas, gracias al gasómetro

flotante se almacena a presión constante y volumen variable, esta presión de salida puede ser incrementada con la adición de contrapesos. (Ver figura 5)

Demanda un mayor gasto de materiales y la campana gasométrica es generalmente el elemento más caro del equipo, su funcionamiento es muy sencillo y no presenta serios inconvenientes. El vaciado completo sólo se realiza en el caso de requerir alguna reparación o limpieza.

Figura 5: Esquema de un biodigestor tipo campana flotante



Fuente: <http://biodigestores.org/>

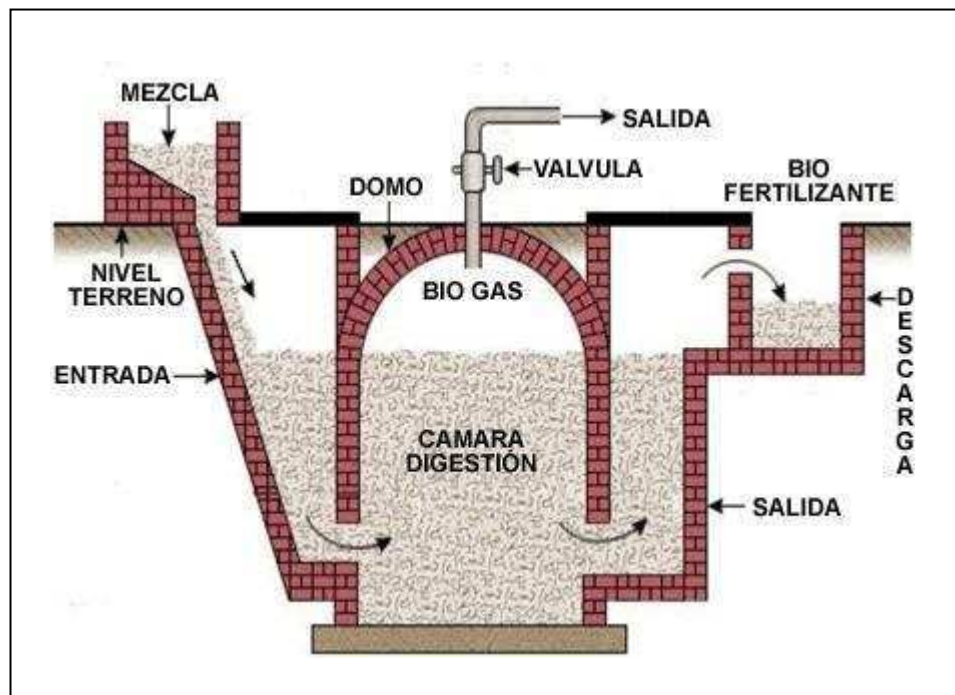
2.9.4. Biodigestores tipo chino o de cúpula fija

El biodigestor chino se caracteriza por poseer una cúpula fija para la recolección del biogás, son tanques redondos y achatados con el techo y el piso en forma de domo. A medida que aumenta la producción de gas, aumenta la presión en el domo o cúpula

fija, forzando al líquido digerido a salir, llegando a alcanzar presiones internas de hasta más de 10 mm de columna de agua. (Ver figura 6)

Se requieren materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de biodigestor, pero tienen la ventaja de tener una larga vida útil de hasta 25 años con un adecuado mantenimiento.

Figura 6: Esquema de un biodigestor tipo cúpula fija



Fuente: <http://biodigestores.org/>

El tipo de biodigestor propuesto en esta tesis es de tipo cúpula fija y la carga a implementar para el biodigestor es semi - continua, debido a que se requiere obtener una cantidad de biogás diario y se dispone de la materia orgánica en forma permanente gracias a la existencia de ganado vacuno.

2.9.5. Criterios del diseño³⁵

El diseño del biodigestor se realiza fundamentalmente en función de dos parámetros:

- Cantidad de energía requerida para un uso determinado (donde se debe calcular la cantidad de materia orgánica necesaria, los materiales a utilizar y el volumen del biodigestor).
- Cantidad de materia orgánica disponible a procesar (donde se debe calcular la producción de biogás, los materiales a utilizar y el volumen del biodigestor).

Para el caso de esta tesis el criterio de diseño se basó en la necesidad energética a cubrir para la pasteurización de 200 litros de leche diarios, dentro del proceso de elaboración de quesos.

2.9.6. Partes principales de un biodigestor de cúpula fija

2.9.6.1. Tanque de digestión

Está compuesto por la cámara de fermentación y la cúpula. En la cámara de fermentación anaeróbica el material a descomponer permanece un determinado tiempo, llamado tiempo de retención, en el cual ocurre la degradación y liberación del biogás. Su geometría es cilíndrica y su capacidad está dada por el volumen de material a degradar. La función de la cúpula es almacenar el gas en los momentos que no existe consumo, pues la producción de gas es ininterrumpida a lo largo de todo el día, la capacidad de almacenaje de la cúpula depende del volumen de la cámara de fermentación.

³⁵ GUARDADO, José Antonio. Op. Cit. p. 47.

2.9.6.2. Conducto de carga

Es la tubería de entrada a través de la cual se suministra la materia orgánica en forma conjunta con agua. Los materiales que ingresan se denominan afluente.

2.9.6.3. Tanque de mezcla

El tanque de mezcla es el lugar donde se realiza la mezcla del agua con los desechos orgánicos en las proporciones establecidas. Su volumen debe ser mayor a la cantidad de mezcla diaria que debe alimentar el biodigestor.

2.9.6.4. Tanque de compensación

Este tanque se ubica a la salida del efluente, su volumen debe ser igual al volumen del cono esférico, debido a que debe compensar el volumen del gas que se encuentra en su interior.

2.9.6.5. Trampa de agua

La trampa de agua lo constituye un pequeño volumen ubicado junto al tanque de compensación, que elimina el agua contenida en el biogás, además elimina el gas que no se utilice para evitar altas presiones dentro del biodigestor.

2.10. Pasteurización de la leche ³⁶

La leche pasteurizada es aquella que ha sido sometida a un tratamiento térmico específico y por un tiempo determinado para lograr la destrucción total de los organismos patógenos que pueda contener, sin alterar en forma considerable su

³⁶ REVILLA, Aurelio, *Tecnología de la Leche*, 2^{da}. Edición, Editorial IICA, San José - Costa Rica 1982, p. 131, 132.

composición, sabor, ni valor alimenticio. La pasteurización no corrige los defectos de la leche, solamente ayuda a conservar sus propiedades naturales mediante la destrucción del 90 al 99% de los microorganismos y el desactivado de varias enzimas, lo cual representa un aumento en la vida comercial del producto.

La temperatura de pasteurización está íntimamente relacionada con el tiempo de exposición necesario para la destrucción de los microorganismos patógenos más resistentes. En el caso de la leche, originalmente se tomó como base la destrucción del mycobacterium tuberculosis que requiere de 60°C (140°F) de temperatura por espacio de 15 a 20 minutos, sin embargo en la práctica se exige 65°C (149°F) de temperatura durante 30 minutos, con el objeto de contar con un margen de seguridad.

2.10.1. Métodos de pasteurización

2.10.1.1. Pasteurización lenta

También es conocida como pasteurización baja, discontinua, por retención o por sostenimiento. Se realiza calentando la leche a 65°C (149°F) de temperatura durante 30 minutos como mínimo, con agitación constante en un equipo adecuado y propiamente operado.

Una de las grandes ventajas de este sistema es que no modifica en forma considerable las propiedades de la leche, mantiene el valor nutritivo y no destruye la línea de crema.

El efecto germicida de este método está cerca del 95% y no es recomendable usarlo cuando la leche cruda tiene un alto cómputo bacterial. Este método es muy usado en pequeñas plantas, y especialmente en la pasteurización de los subproductos de la leche, tales como cremas, mezclas para helados y leches con sabores, producidos en pequeña escala.

2.10.1.2. Pasteurización rápida

Es conocida como pasteurización alta, continua, relámpago, TATC (Temperatura alta y tiempo corto) y, en varios textos, también se le denomina HTST (High temperature, short time). Este método consiste en calentar la leche entre 72 y 77° C (161.6 - 170.6°F) durante 15 segundos como mínimo, en un equipo adecuado y propiamente operado. La temperatura de pasteurización varía según el producto.

Una de las mayores ventajas de este sistema es la capacidad de pasteurización, que puede llegar a más de 15 000 litros de leche por hora, y a esto se debe a que en la actualidad sea el sistema más usado. La eficiencia germicida de este método está cerca del 99.5% y las alteraciones en los componentes de la leche son insignificantes. La pasteurización rápida es muy eficiente en el uso del calor ya que éste se recupera entre el 70 y 90% en la sección regenerativa del sistema.

2.11. Bases teóricas de transferencia de calor³⁷

La transferencia de calor, permite determinar la razón, con respecto al tiempo, de energía transferida provocada por un desequilibrio de temperaturas. El calor puede ser transferido desde una fuente hasta un receptor mediante conducción, convección, o radiación. En muchos casos, el intercambio ocurre por una combinación de dos o más de estos mecanismos.

2.11.1. Transferencia de calor por conducción

La velocidad de flujo de calor por conducción, es proporcional al área aprovechable para la transferencia de calor y al gradiente de temperatura en dirección del flujo de calor. La velocidad de flujo de calor en una dirección dada puede ser expresada por la ecuación o Ley de Fourier como:

³⁷ KARLEKAR, B. V. Transferencia de calor, 2da Edición, Editorial, McGRAW-HILL, Mexico 1995. p. 4, 14, 20.

$$Q = -kA \frac{dt}{dx}$$

Donde:

Q : Flujo de calor (BTU/h o W)

k : Coeficiente de conducción térmico (BTU/hpie°F o W/m°C)

A : Área de transferencia (pie² o m²)

$\frac{dt}{dx}$: Variación de la temperatura con respecto al incremento en x (°F/pie o °C/m)

2.11.2. Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección ocurre, siempre que una superficie está en contacto con un fluido que tiene temperatura diferente a la de la superficie en cuestión.

Cuando el movimiento del fluido queda establecido por fuerzas naturales, se denomina convección natural, y cuando intervienen mecanismos para forzar la transferencia se denomina convección forzada.

La siguiente ecuación, conocida como la Ley del enfriamiento de Newton se usa como base para la evaluación de las velocidades de transferencia de calor por convección.

$$Q = hA\Delta t$$

Donde:

Q : Flujo de calor (BTU/h o W)

h : Coeficiente de convección térmico (BTU/hpie²°F o W/m²°C)

A : Área de transferencia (pie² o m²)

Δt : Variación de la temperatura (°F o °C)

La constante de proporcionalidad h es designada como el coeficiente de transferencia de calor, y es una función del tipo de agitación y la naturaleza del fluido. El coeficiente de transferencia de calor, es similar a la conductividad térmica k , frecuentemente se determina sobre la base de datos experimentales.

2.11.3. Transferencia de calor por radiación

Cuando la energía es transferida desde una fuente hacia un receptor sin que existan de por medio moléculas de otra sustancia, el método de transferencia de calor es designado como radiación. Basándose en la segunda Ley de la termodinámica, Stefan Boltzmann estableció la ecuación que describe la velocidad a la cual una fuente da calor se transfiere por radiación:

Donde:

: Flujo de calor (BTU/h o W)

: Coeficiente de Stefan Boltzmann (BTU/hpie²°R⁴ o W/m²°K⁴)

: Emisividad

T: Temperatura (°R o °K)

2.11.3.1. Emisividad

El coeficiente de emisividad (ϵ), es un número adimensional que relaciona la habilidad de un objeto real para irradiar energía térmica, con la habilidad de irradiar si éste fuera un cuerpo negro:

$$\epsilon = \frac{\text{radiacion emitida por una superficie}}{\text{radiacion emitida si fuera un cuerpo negro}}$$

Un cuerpo negro, por consiguiente, tiene un coeficiente $\epsilon = 1$, mientras que en un objeto real, ϵ siempre se mantendrá menor a 1.

CAPÍTULO III

CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL BIODIGESTOR

2.12. Introducción

En este capítulo primero se procederá a calcular la cantidad total de calor requerido, para ello se considerará el cálculo del flujo de calor necesario para calentar los 200 litros de leche, los cálculos de transferencia de calor por radiación y convección que aportan el calor, el cálculo de las pérdidas que se generan igualmente por radiación y convección y se realizará el balance de energía correspondiente.

Con el cálculo del calor total requerido, se calculará el volumen diario de biogás necesario para cubrir la necesidad energética calculada, el volumen total del biodigestor y la cantidad de cabezas de ganado vacuno necesarias para la producción del biogás calculado.

Finalmente se realizará el dimensionamiento del biodigestor, considerando los parámetros respectivos.

2.13. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALOR NECESARIO PARA PASTEURIZAR LA LECHE

El diseño del biodigestor propuesto, se basará en la demanda energética que se requiere para la pasteurización lenta de 200 litros de leche diarios, dentro del proceso de elaboración de quesos. Por ello, es necesario conocer la cantidad de calor que permite elevar desde la temperatura ambiente de 20°C de la leche hasta la temperatura de pasteurización a 65°C.

Suposiciones:

- Se asume la entalpía del agua, debido a que la leche de vaca entera, contiene hasta un 90,5%³⁸ de agua y su densidad promedio es de 1,032 a 20°C.³⁹
- Se calentarán 200Lt de leche y por motivos prácticos se asume que 1Lt de leche equivale aproximadamente 1Kg.
- La eficiencia del proceso de combustión es del 50%. (Ver tabla 6)

Tabla 6: Eficiencias de los sistemas que utilizan biogás

| <i>Utilisation system for biogas</i> | <i>Conversion efficiency %</i> | <i>A:F Ratio</i> | <i>Overall efficiency %</i> | <i>Useful energy form</i> |
|--------------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Burners for Cooking | 95 | 7.5 | 50-55 | Heat at 60-250°C |
| Water heaters | 95 | 7.5 | 70-80 | Hot water at 70°C |
| Mantle lamps | 95 | 7.5 | 1.5 | Light energy |
| Stationary I.C. Engines | 98 | 5.6-6.0 | 20 | Mech. energy |
| Mobile I.C. Engines | 98 | 5.6-6.0 | 8 | Mech. energy |
| Modified Gas Turbine ⁺ | 98 | 5.6-6.0 | 8-14 | Mech. energy |
| Secondary fuel such as SNG, etc. | — | — | 80 | Chemical energy |

Fuente: Nijaguna B. T., *Biogas Technology*, 2002

³⁸ REVILLA, Aurelio, *Tecnología de la Leche*, 2^{da}. Edición, Editorial IICA, San José - Costa Rica 1982, p. 18.

³⁹ ALAIS, Charles, *Ciencia de la Leche*, 4^{ta}. Edición, Editorial Reverté, Sevilla – España 2003, p. 254.

Datos:

- Temperatura de pasteurización de la leche: $T_{pasL} = 65^{\circ}C$ ⁴⁰
- Temperatura ambiente: $T_{amb} = 20^{\circ}C$
- Masa de la leche: $m = 200Kg$
- Entalpía del agua a $20^{\circ}C$ y $65^{\circ}C$. (Ver tabla 7)

Tabla 7: Entalpía del agua

| Temperatura (T°) | Entalpía h_f (KJ/Kg) |
|------------------|------------------------|
| 20 | 83,96 |
| 65 | 272,06 |

Fuente: Yunus A. Cengel, Termodinámica, 2003

3.2.1. Cálculo del calor ideal para calentar 200Lt de leche ⁴¹

El calor ideal representa el calor sin considerar la eficiencia del equipo. Es posible calcular el calor ideal utilizando la siguiente ecuación, debido a que no existe trabajo del sistema y la presión es constante.

$$Q_i = m(h_{f@65^{\circ}} - h_{f@20^{\circ}})$$

$$Q_i = 200Kg(272,06 - 83,96)KJ/Kg$$

$$Q_i = 200Kg * 188,1 \frac{KJ}{Kg}$$

$$Q_i = 37620KJ$$

Donde:

Q_i : Calor ideal (KJ)

m : Masa (Kg)

h_f : Entalpía del líquido (KJ/Kg)

⁴⁰ REVILLA, Aurelio. Op. Cit. p. 130.

⁴¹ ÇENGEL, Yunus, *Termodinámica*, 4^{ta}. Edición, Editorial Mc Graw Hill, México D. F. – México. 2003, p. 170.

3.2.2. Cálculo del calor real requerido con un rendimiento del 50% ⁴²

Para obtener el calor real, se debe considerar la eficiencia del equipo empleado, en este caso un quemador industrial.

$$Q_{real} = Q_i * \eta$$

$$Q_{real} = 37620KJ * \frac{100}{50}$$

$$Q_{real} = 75240KJ$$

Donde:

Q_{real} : Calor real (KJ)

Q_i : Calor ideal (KJ)

η : Rendimiento

⁴² ÇENGEL, Yunus. Op. Cit. p. 250.

3.3. CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR NECESARIO PARA EL CALENTAMIENTO

Con el valor del calor real, se procede a calcular el flujo de calor necesario para calentar la leche en el tiempo requerido, que es de 3 horas.

Suposiciones:

- El tiempo de calentamiento es de 3 horas (basado en el tiempo actual que se emplea para pasteurizar los 200Lt de leche con el uso de tanques domésticos de GLP).

Cálculo del flujo de calor ⁴³

$$\dot{Q} = \frac{Q_{Real}}{t}$$

$$\dot{Q} = \frac{75240KJ}{3h}$$

$$\dot{Q} = 25080 \frac{KJ}{h} * \frac{1h}{3600s}$$

$$\dot{Q} = 6.97KW$$

Donde:

\dot{Q} : Flujo de calor necesario para el calentamiento (KW)

Q_{real} : Calor real (KJ)

t : Tiempo de calentamiento (h)

⁴³ ÇENGEL, Yunus. Op. Cit. p. 123.

3.4. CÁLCULO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN DE LA LLAMA A LA BASE DE LA OLLA

La principal fuente de calor que ingrese al sistema para el calentamiento de la leche, será la transferencia de calor por radiación que generen los gases de la combustión del metano que contiene el biogás. Para obtener este valor, se deben realizar los cálculos especificados a continuación:

Suposiciones:

- Se supone que la temperatura de la pared de la base de la olla tiene aproximadamente 150°F más que la temperatura del líquido. Esto debido a que no puede superar ampliamente la temperatura de ebullición del líquido.
- Se considera a la base de la olla de acero inoxidable como un cuerpo negro, debido a que cumple con la siguiente desigualdad,⁴⁴ y se considera el valor de 0,07 como la emisividad del acero inoxidable de acuerdo a la tabla 8.

$$\frac{\epsilon_{sup} + 1}{2} > 0,8$$

$$\frac{0,07 + 1}{2} > 0,8$$

$$0,535 > 0,8$$

⁴⁴ HOLMAN, J. P., *Transferencia de Calor*, 10^{ma}. Reimpresión, Editorial Mc Graw Hill, México D. F. – México. 1999, p. 387.

Tabla 8: Valores de emisividad para materiales comunes

| Material | Emisividad |
|---|------------|
| Aluminio | |
| Pulido | 0.05 |
| Cobre | |
| Pulido | 0.05 |
| Oxidado | 0.78 |
| Níquel | |
| Pulido | 0.05 |
| Oxidado | 0.37 |
| con un recubrimiento de aceite de 25 μm | 0.27 |
| con un recubrimiento de aceite de 125 μm | 0.72 |
| Acero inoxidable | |
| Pulido | 0.07 |
| Oxidado | 0.79 |
| Ladrillo | 0.93 |
| Hormigón | 0.92 |
| Arena | 0.90 |
| Agua | 0.96 |
| Piel humana | 0.98 |

Fuente: Boreman Glenn, Fundamento de electro óptica, 1999

- En la parte inferior de la olla existe una superficie con una temperatura de 300°C, producto de la transferencia de calor de los productos de combustión de la llama.

Datos:

- Temperatura de la llama: ($T_g = 870^\circ\text{C} = 1143,15\text{K} = 1598\text{F}$)⁴⁵
- Temperatura de la base de la olla: $T_1 = 65^\circ\text{C} + 65,5^\circ\text{C} = 130,5^\circ\text{C} = 403,65\text{K}$
- Temperatura de la superficie inferior: $T_2 = 300^\circ\text{C} = 573,15\text{K}$
- Constante de Stefan Boltzmann ⁴⁶: $\sigma = 5,66 * 10^{-8}\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$

⁴⁵ NIJAGUNA, B. T., *Biogas Technology*, Editorial New Age International Publisher, Nueva Delhi – India 2002. p. 36

⁴⁶ KARLEKAR, B. V., *Transferencia de Calor*, 2^{da}. Edición, Editorial Mc Graw Hill, México D. F. – México. 1995, p. 21.

Los sólidos, líquidos y algunos gases emiten radiación térmica como resultado de su temperatura. E_b , representa la potencia emisiva de un cuerpo negro, que es la energía total emitida por unidad de área y por unidad de tiempo. Aún cuando raramente se encuentra un verdadero cuerpo negro, este concepto proporciona una referencia muy útil para comparar la emisión radiante de cuerpos reales. Para el caso de este trabajo, este concepto permitirá conocer la energía radiante emitida por el gas, por la superficie de la base de la olla y por la superficie inferior.

3.4.1. Cálculo de la potencia emisiva del gas ⁴⁷

$$E_{bg} = \sigma T_g^4$$

$$E_{bg} = 5,66 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 k^4} (1143,15K)^4$$

$$E_{bg} = 96656,11 \frac{W}{m^2} = 96,656 \frac{KW}{m^2}$$

Donde:

E_{bg} : Potencia emisiva del gas (KW/m²)

σ : Constante de Stefan Boltzmann (W/m²K⁴)

T_g : Temperatura de la llama (K)

3.4.2. Cálculo de la potencia emisiva de la base de la olla

$$E_{b1} = \sigma T_1^4$$

$$E_{b1} = 5,66 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 k^4} (403,65K)^4$$

$$E_{b1} = 1502,575 \frac{W}{m^2} = 1,502 \frac{KW}{m^2}$$

⁴⁷ KARLEKAR, B. V. Op. Cit. 320.

Donde:

E_{b1} : Potencia emisiva de la base de la olla (KW/m^2)

σ : Constante de Stefan Boltzmann (W/m^2K^4)

T_1 : Temperatura en la base de la olla (K)

3.4.3. Cálculo de la potencia emisiva de la superficie inferior

$$E_{b2} = \sigma T_2^4$$

$$E_{b2} = 5,66 * 10^{-8} \frac{W}{m^2k^4} (573,15K)^4$$

$$E_{b2} = 6107,867 \frac{W}{m^2} = 6,108 \frac{KW}{m^2}$$

Donde:

E_{b2} : Potencia emisiva de la superficie inferior (KW/m^2)

σ : Constante de Stefan Boltzmann (W/m^2K^4)

T_2 : Temperatura en la superficie inferior (K)

El intercambio de radiación entre un gas y una superficie se considera complejo. A diferencia de la mayor parte de los sólidos, en la generalidad de los casos los gases son transparentes a la radiación. Cuando absorben y emiten radiaciones, lo hacen sólo en ciertas bandas estrechas de longitud de onda. Algunos gases, como el nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2) y otros con estructura molecular simétrica no polar, son esencialmente transparentes a bajas temperaturas, mientras que el dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua (H_2O) y varios gases de hidrocarburos pueden emitir radiación en forma considerable.

3.4.4. Cálculo de la longitud media equivalente ⁴⁸

L_e , representa la longitud característica del volumen que contiene los gases que emiten la radiación. Para el caso del problema planteado, el volumen de gas se considera entre dos planos infinitos (la superficie de la base de la olla, y la superficie inferior del quemador). En la tabla 9 se encuentran tabulaciones de estas longitudes.

Tabla 9: Longitud media equivalente para volúmenes de gas

| <i>Volumen de gas</i> | <i>Dimensión característica</i> | L_e |
|---|---|---------|
| Volumen entre dos planos infinitos | Distancia de separación L | $1.8L$ |
| Cilindro circular con altura = al diámetro, radiación hacia el centro de la base | Diámetro D | $0.71D$ |
| Hemisferio, radiación hacia el elemento en el centro de la base | Radio R | R |
| Esfera, radiación hacia la superficie completa | Diámetro D | $0.65D$ |
| Cilindro circular infinito, radiación hacia la superficie convexa que lo encierra | Diámetro D | $0.95D$ |
| Cilindro circular con altura = diámetro, radiación hacia la superficie completa | Diámetro D | $0.60D$ |
| Cilindro circular, altura semiinfinita, radiación en la base completa | Diámetro D | $0.65D$ |
| Cubo, radiación hacia cualquier cara | Borde L | $0.60L$ |
| Volumen que rodea un manojó de tubos infinito, radiación en un solo tubo | Diámetro D del tubo, distancia entre los centros S de los tubos | |

Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

$$L_e = 1,8L$$

$$L_e = 1,8(0,1m)$$

$$L_e = 0,18m$$

Donde:

L_e : Longitud media equivalente entre dos planos infinitos

L : Distancia entre las superficies = 10cm = 0,1m

⁴⁸ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 385

3.4.5. Productos de la combustión ⁴⁹

Los productos de la combustión del metano están formados por dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno. El calor se transmite desde los productos de la combustión, principalmente mediante radiación y convección hacia el entorno.

Productos de la Combustión del metano

Anexos 1: Constantes de Combustión

$$CO_2 = 2,74Kg \rightarrow 14,95\%$$

$$H_2O = 2,25Kg \rightarrow 12,24\%$$

$$N_2 = 13,28Kg \rightarrow 72,81\%$$

3.4.6. Presión del gas a la salida de digester ⁵⁰

La presión del gas a la salida del digester es:

$$P_{sal} = 10cm \text{ columna de Agua} = 0,01atm$$

Para la mezcla de los productos de la combustión se suma la presión atmosférica:

$$P_g = 1atm + 0,01atm = 1,01atm$$

Donde:

P_g : Presión del gas (atm)

⁴⁹ PERRY, Robert, *Manual del Ingeniero Químico*, 6^{ta}. Edición, Editorial Mc Graw Hill, México D. F. – México. 2009, p 27-32.

⁵⁰ NIJAGUNA, B. T. Op. Cit. p. 236.

3.4.7. Cálculo de las presiones parciales del CO₂ y H₂O a 1,01atm ⁵¹

Para obtener las presiones parciales se debe multiplicar el porcentaje de cada uno de los productos de la combustión del metano por la presión del gas. Estos cálculos permitirán posteriormente obtener mediante tablas, valores de emisividades de los gases producto de la combustión, para finalmente obtener la emisividad total de la mezcla.

Presión parcial del CO₂

$$P_{CO_2} = \%CO_2 * P_g$$

$$P_{CO_2} = \frac{14,95}{100} * 1,01atm$$

$$P_{CO_2} = 0,152atm * \frac{101,32 KN/m^2}{1atm} = 15,35 \frac{KN}{m^2}$$

Donde:

P_{CO_2} : Presión parcial del CO₂ (KN/m²)

P_g : Presión del gas (atm)

Presión parcial del H₂O

$$P_{H_2O} = \%H_2O * P_g$$

$$P_{H_2O} = \frac{12,24}{100} * 1,01atm$$

$$P_{H_2O} = 0,124atm * \frac{101,32 KN/m^2}{1atm} = 12,52 \frac{KN}{m^2}$$

Donde:

P_{H_2O} : Presión parcial del H₂O (KN/m²)

P_g : Presión del gas (atm)

⁵¹ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 388.

El nitrógeno no se calcula porque los gases diatómicos tienen emisividades bajas cercanas al cero.⁵²

3.4.8. Cálculo de la emisividad total de la mezcla

Con los valores obtenidos previamente se procede a realizar las siguientes operaciones, con el fin de encontrar en las figuras correspondientes, los valores de emisividades y factores de corrección:⁵³

Primera operación

$$P_{CO_2} * L_e = 15,35 \frac{KN}{m^2} * 0,18m$$

$$P_{CO_2} * L_e = 2,763 \frac{KN}{m} * \frac{1atm}{101.32 KN/m^2} * \frac{3,28pie}{1m} = 0,089atm * pie$$

Segunda operación

$$P_{H_2O} * L_e = 12,52 \frac{KN}{m^2} * 0,18m$$

$$P_{H_2O} * L_e = 2,254 \frac{KN}{m} * \frac{1atm}{101.32 KN/m^2} * \frac{3,28pie}{1m} = 0,073atm * pie$$

Tercera operación

$$P_{CO_2}L_e + P_{H_2O}L_e = (0,089 + 0,073)atm * pie$$

$$P_{CO_2}L_e + P_{H_2O}L_e = 0,162atm * pie$$

Cuarta operación

$$\frac{1}{2}(P_g + P_{H_2O}) = 0,5(1,01 + 0,124)$$

$$\frac{1}{2}(P_g + P_{H_2O}) = 0,567atm$$

⁵² KERN, Donald, *Procesos de Transferencia de Calor*, 1^{era}. Edición, Editorial CECSA, México D. F. – México. 1999, p 784.

⁵³ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 389.

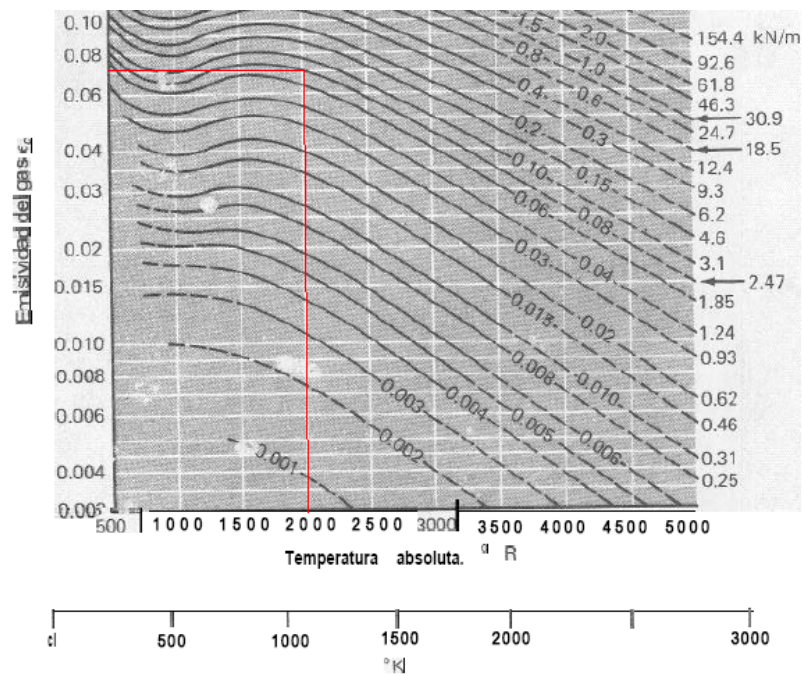
Quinta operación

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{CO_2} + P_{H_2O}} = \frac{0,124atm}{0,152atm + 0,124atm}$$

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{CO_2} + P_{H_2O}} = \mathbf{0,449}$$

Con los resultados de estas 5 operaciones se procede a encontrar el valor de la emisividad total de la mezcla a partir de las figuras 7 a 11. Una vez obtenido el valor total de la emisividad de la mezcla se procederá a calcular la irradiación de las superficies.

Figura 7: Emisividad del dióxido de Carbono



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

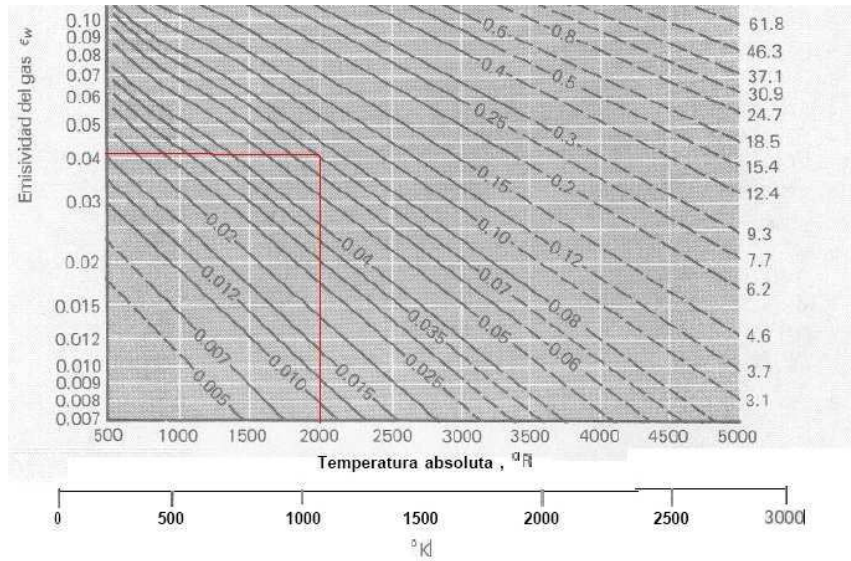
@870°C ≈ 2000°R (Temperatura de la llama)

$P_{CO_2} L_e = 0,089atm * pie$ (Primera operación)

Se obtiene la emisividad del CO₂

$$\epsilon_{CO_2} = \mathbf{0,071}$$

Figura 8: Emisividad del vapor de agua



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

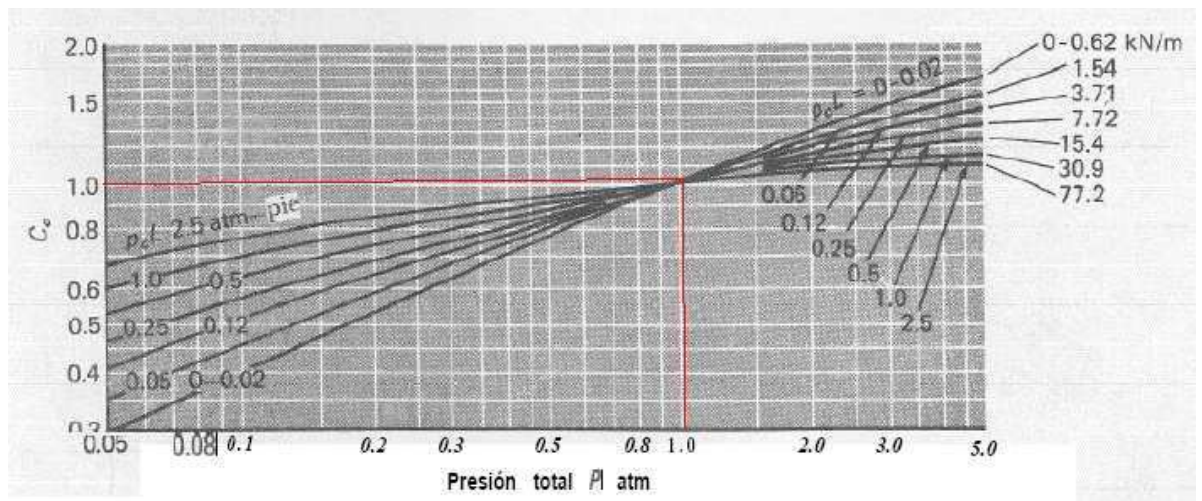
@870°C ≈ 2000°R (Temperatura de la llama)

$P_{H_2O} L_e = 0,073 atm * pie$ (Segunda operación)

Se obtiene la emisividad del H₂O

$$\epsilon_{H_2O} = 0,041$$

Figura 9: Factor de corrección para la emisividad del CO₂



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

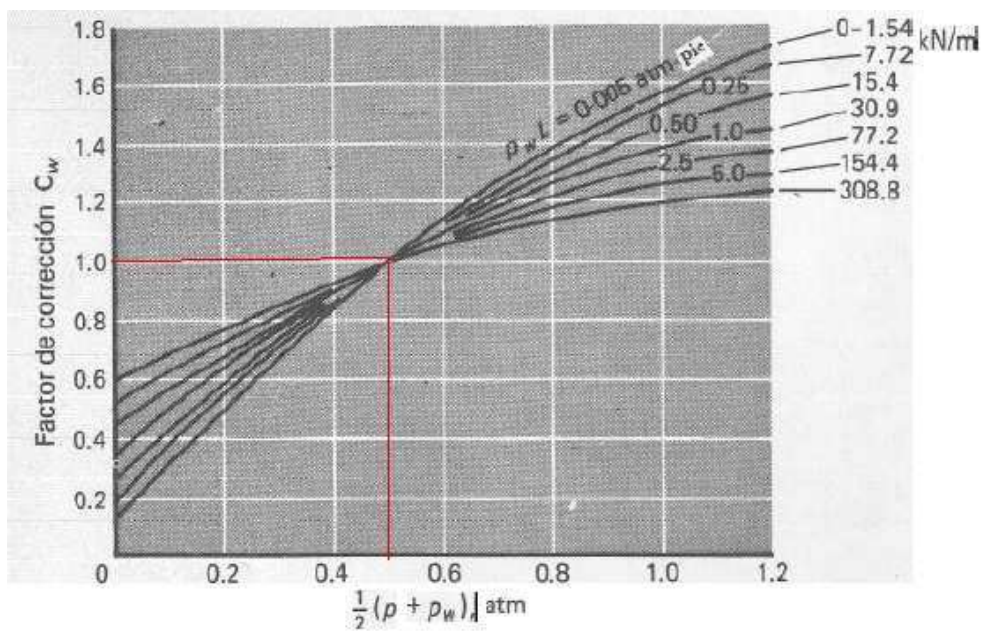
@1,01atm (Presión de la mezcla de gases producto de la combustión)

$$P_{CO_2}L_e = 0,089atm * pie \text{ (Primera operación)}$$

Se obtiene el factor de corrección para el CO₂

$$C_{CO_2} = 1,0$$

Figura 10: Factor de corrección para la emisividad del H₂O



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

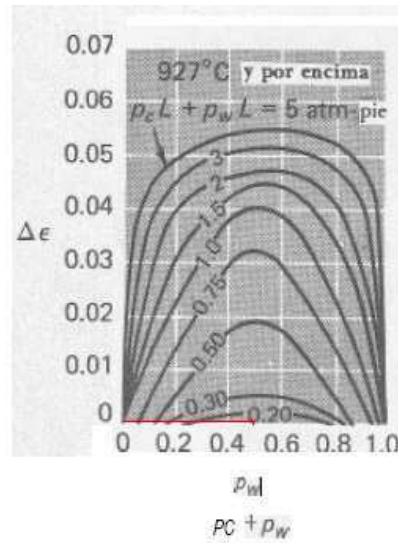
$$\frac{1}{2}(P_g + P_{H_2O}) = 0,567atm \text{ (Cuarta operación)}$$

$$P_{H_2O}L_e = 0,073atm * pie \text{ (Segunda operación)}$$

Se obtiene el factor de corrección para el H₂O

$$C_{H_2O} = 1,0$$

Figura 11: Factor de corrección cuando CO₂ y H₂O, están presentes simultáneamente



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

$$P_{CO_2}L_e + P_{H_2O}L_e = 0,162atm * pie \text{ (Tercera operación)}$$

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{CO_2} + P_{H_2O}} = 0,449 \text{ (Quinta operación)}$$

Se obtiene el factor de corrección simultáneo

$$\Delta_\epsilon = 0,003$$

Emisividad total de la mezcla⁵⁴

$$\epsilon_g = C_{CO_2}\epsilon_{CO_2} + C_{H_2O}\epsilon_{H_2O} - \Delta_\epsilon$$

$$\epsilon_g = (1,0 * 0,071) + (1,0 * 0,041) - 0,003$$

$$\epsilon_g = 0,109$$

Donde:

ϵ_g : Emisividad total de la mezcla

C_{CO_2} y C_{H_2O} : Factores de corrección

ϵ_{CO_2} y ϵ_{H_2O} : Emisividades del CO₂ y del H₂O

Δ_ϵ : Factor de corrección simultáneo

⁵⁴ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 381.

3.4.9. Cálculo de la absorbencia total en la base de la olla ⁵⁵

La absorbencia se define como la fracción de la energía radiante disponible que es absorbida por determinada materia, superficie o partícula. Para calcular la absorbencia en la base de la olla, se deben realizar las siguientes operaciones con el fin de encontrar en las figuras correspondientes, los valores de emisividades y factores de corrección (se usan las mismas tablas empleadas en el cálculo de la emisividad total de la mezcla), ver figuras 12 a 14. Este cálculo permitirá obtener posteriormente, el valor de la transmitividad de la base de la olla.

Primera operación

$$P_{CO_2} L_e \left(\frac{T_1}{T_g} \right) = 2,763 \frac{KN}{m} \left(\frac{403,65K}{1143,15K} \right)$$

$$P_{CO_2} L_e \left(\frac{T_1}{T_g} \right) = 0,976 \frac{KN}{m}$$

Segunda operación

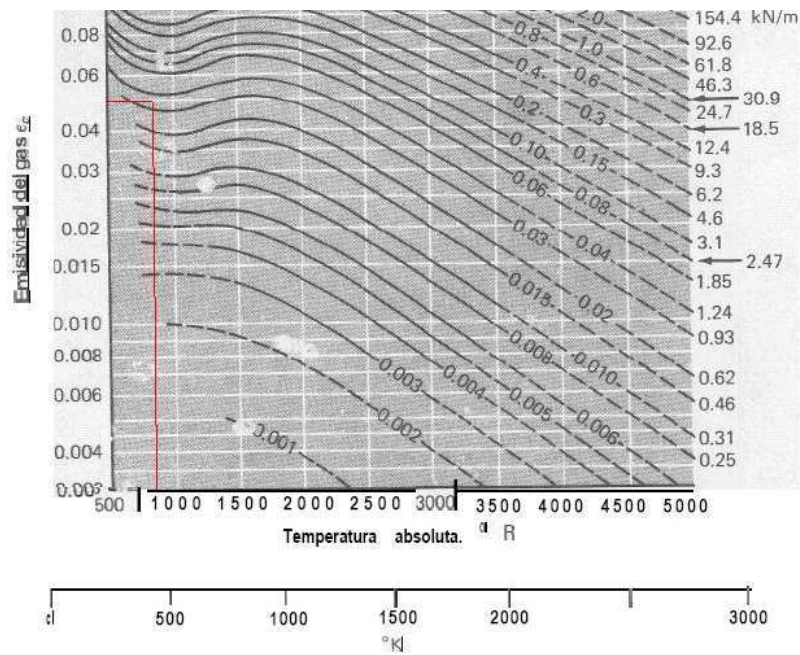
$$P_{H_2O} L_e \left(\frac{T_1}{T_g} \right) = 2,254 \frac{KN}{m} \left(\frac{403,65K}{1143,15K} \right)$$

$$P_{H_2O} L_e \left(\frac{T_1}{T_g} \right) = 0,796 \frac{KN}{m} * \frac{1atm}{101.32 KN/m^2} * \frac{3,28pie}{1m} = 0,026atm * pie$$

Con los valores obtenidos al realizar estas 2 operaciones se procede a encontrar el valor de la absorbencia en la base de la olla.

⁵⁵ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 389.

Figura 12: Emisividad prima del Dióxido de Carbono



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

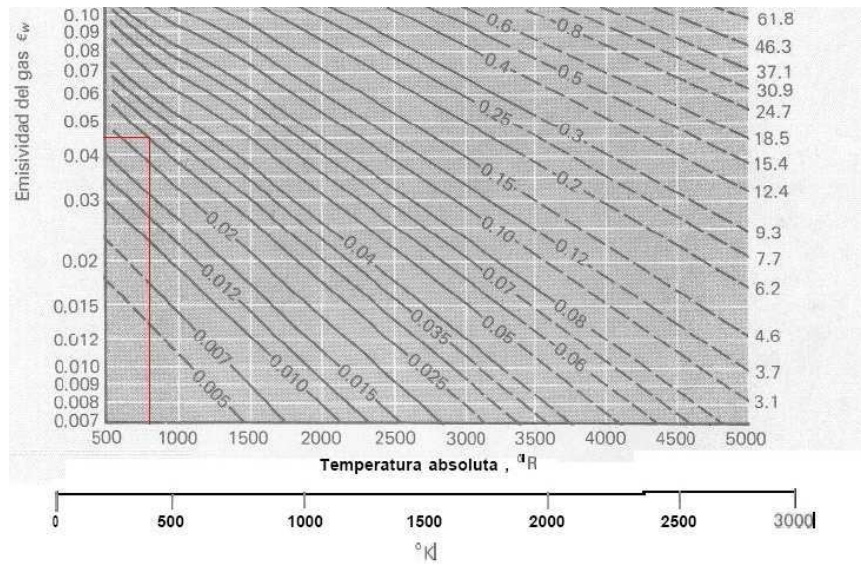
@130,5°C ≈ 403,65K (Temperatura de la base de la olla)

$$P_{CO_2} L_e \left(\frac{T_1}{T_g} \right) = 0,976 \frac{KN}{m} \text{ (Primera operación)}$$

Se obtiene la emisividad prima del CO₂

$$\epsilon'_{CO_2} = 0,05$$

Figura 13: Emisividad prima del Vapor de Agua



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

@130,5°C \approx 403,65K (Temperatura de la base de la olla)

$$P_{H_2O} L_e \left(\frac{T_1}{T_g} \right) = 0,026 \text{ atm} * \text{pie (Segunda operación)}$$

Se obtiene la emisividad prima del H₂O

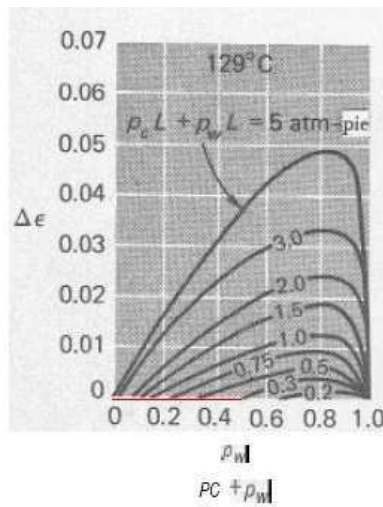
$$\epsilon'_{H_2O} = 0,045$$

Los Factores de corrección del CO₂ y del H₂O, son los mismos encontrados para el cálculo de la emisividad total.

$$C_{CO_2} = 1$$

$$C_{H_2O} = 1$$

Figura 14: Factor de corrección para la absorbencia cuando CO₂ y H₂O, están presentes simultáneamente



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{CO_2} + P_{H_2O}} = 0,449$$

$$P_{CO_2} L_e + P_{H_2O} L_e = 0,162 atm * pie$$

Se obtiene el factor de corrección simultáneo

$$\Delta\alpha = 0$$

Con los valores obtenidos, se procede a encontrar los valores de absorbencia en la base de la olla, tanto para el CO₂ como para el H₂O.⁵⁶

Cálculo de la absorbencia del CO₂ en la base de la olla

$$\alpha_{CO_2} = C_{CO_2} \epsilon'_{CO_2} \left(\frac{T_g}{T_1} \right)^{0,65}$$

$$\alpha_{CO_2} = 1,0 * 0,05 \left(\frac{1143,15K}{403,65K} \right)^{0,65}$$

$$\alpha_{CO_2} = 0,0984$$

⁵⁶ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 389.

Cálculo de la absorbencia del H₂O en la base de la olla

$$\alpha_{H_2O} = C_{H_2O} \epsilon'_{H_2O} \left(\frac{T_g}{T_1} \right)^{0,45}$$

$$\alpha_{H_2O} = 1,0 * 0,045 \left(\frac{1143,15K}{403,65K} \right)^{0,45}$$

$$\alpha_{H_2O} = \mathbf{0,0718}$$

Donde:

α_{CO_2} y α_{H_2O} : Absorbencias del CO₂ y del H₂O

C_{CO_2} y C_{H_2O} : Factores de corrección del CO₂ y del H₂O

ϵ'_{CO_2} y ϵ'_{H_2O} : Emisividades primas

T_1 : Temperatura de la base de la olla

T_g : Temperatura de la llama

Cálculo de la absorbencia total de la mezcla en la base de la olla ⁵⁷

$$\alpha_g(T_1) = \alpha_{CO_2} + \alpha_{H_2O} - \Delta' \alpha$$

$$\alpha_g(T_1) = 0,0984 + 0,0718 - 0$$

$$\alpha_g(T_1) = \mathbf{0,17}$$

Donde:

$\alpha_g(T_1)$: Absorbencia total de la mezcla en la base de la olla

α_{CO_2} y α_{H_2O} : Absorbencia del CO₂ y del H₂O

Δ_α : Factor de corrección simultáneo

⁵⁷ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 389.

3.4.10. Cálculo de la transmitividad desde la base de la olla ⁵⁸

La transmitividad se define, como la fracción de la radiación incidente transmitida por un medio. Para el caso de líquidos y sólidos, este valor se considera igual a 0, para el caso de gases como el presente problema se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tau_g(T_1) = 1 - \alpha_g(T_1)$$

$$\tau_g(T_1) = 1 - 0,17$$

$$\tau_g(T_1) = \mathbf{0,83}$$

Donde:

$\tau_g(T_1)$: Transmitividad de la radiación desde la base de la olla

$\alpha_g(T_1)$: Absorbencia total de la mezcla en la base de la olla

3.4.11. Cálculo de la absorbencia de la superficie inferior

Para calcular la absorbencia de la superficie inferior, se deben realizar los mismos pasos que se efectuaron para el cálculo de la absorbencia en la base de la olla utilizando las figuras 15, 16 y 17:

Primera operación

$$P_{CO_2} L_e \left(\frac{T_2}{T_g} \right) = 2,763 \frac{KN}{m} \left(\frac{573,15K}{1143,15K} \right)$$

$$P_{CO_2} L_e \left(\frac{T_2}{T_g} \right) = 1,385 \frac{KN}{m} * \frac{1atm}{101.32 KN/m^2} * \frac{3,28pie}{1m} = \mathbf{0,045atm * pie}$$

⁵⁸ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 389.

Segunda operación

$$P_{H_2O} L_e \left(\frac{T_2}{T_g} \right) = 2,254 \frac{KN}{m} \left(\frac{573,15K}{1143,15K} \right)$$

$$P_{H_2O} L_e \left(\frac{T_2}{T_g} \right) = 1,13 \frac{KN}{m} * \frac{1atm}{101.32 KN/m^2} * \frac{3,28pie}{1m} = 0,036atm * pie$$

Donde:

P_{CO_2} y P_{H_2O} : Presiones parciales

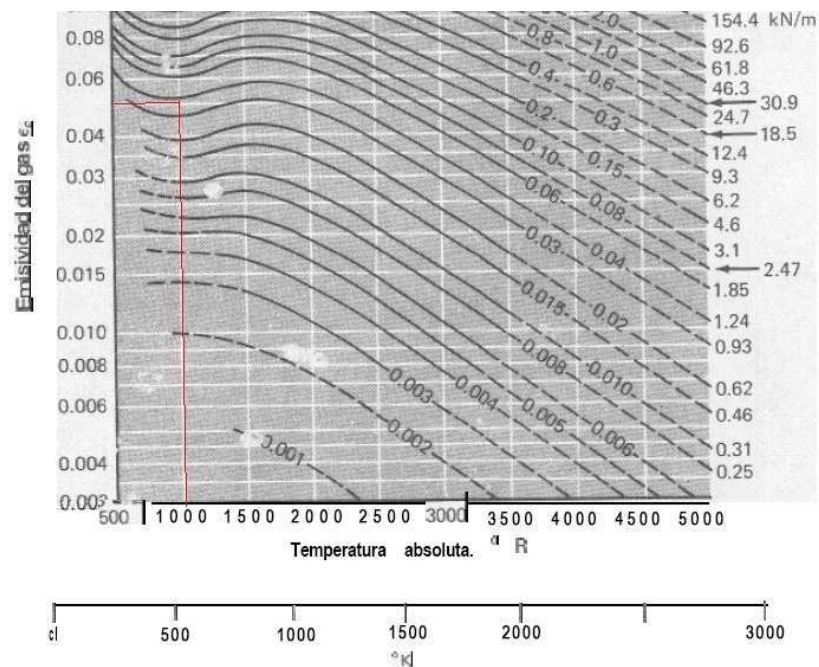
L_e : Longitud media equivalente entre dos planos infinitos

T_2 : Temperatura de la superficie inferior

T_g : Temperatura de la llama

Con los valores obtenidos al realizar estas 2 operaciones se procede a encontrar el valor de la absorbencia en la base de la olla a partir de las siguientes figuras:

Figura 15: Emisividad dos prima del dióxido de carbono



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

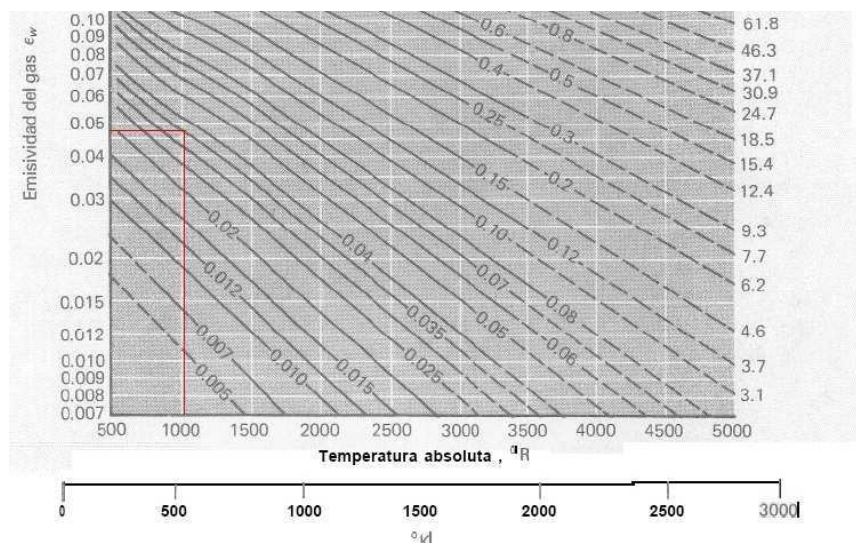
@300°C = 573,15K (Temperatura de superficie inferior)

$$P_{CO_2} L_e \left(\frac{T_2}{T_g} \right) = 0,045 atm * pie$$

Se obtiene la emisividad dos prima del CO₂

$$\epsilon''_{CO_2} = 0,055$$

Figura 16: Emisividad dos prima del vapor de agua



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

@300°C = 573,15K (Temperatura de superficie inferior)

$$P_{H_2O} L_e \left(\frac{T_2}{T_g} \right) = 0,036 atm * pie$$

Se obtiene la emisividad dos prima del H₂O

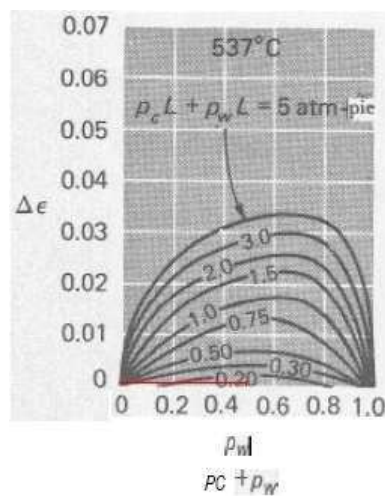
$$\epsilon''_{H_2O} = 0,048$$

Los Factores de corrección del CO₂ y del H₂O, son los mismos encontrados para el cálculo de la emisividad total.

$$C_{CO_2} = 1$$

$$C_{H_2O} = 1$$

Figura 17: Factor de corrección prima para la absorbencia, cuando CO₂ y H₂O, están presentes simultáneamente



Fuente: Holman J.P., Transferencia de Calor, 1999

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{CO_2} + P_{H_2O}} = 0,449$$

$$P_{CO_2}L_e + P_{H_2O}L_e = 0,162atm * pie$$

$$\Delta'_{\alpha} = 0,002$$

Con los valores obtenidos en las tablas se procede a encontrar los valores de absorbencia en la superficie inferior, tanto para el CO₂ como para el H₂O.⁵⁹

⁵⁹ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 390.

Cálculo de la absorbencia del CO₂ en la superficie inferior

$$\alpha''_{CO_2} = C_{CO_2} \epsilon''_{CO_2} \left(\frac{T_g}{T_2} \right)^{0,65}$$

$$\alpha''_{CO_2} = 1,0 * 0,055 \left(\frac{1143,15K}{573,15K} \right)^{0,65}$$

$$\alpha''_{CO_2} = \mathbf{0,086}$$

Cálculo de la absorbencia del H₂O en la superficie inferior

$$\alpha''_{H_2O} = C_{H_2O} \epsilon''_{H_2O} \left(\frac{T_g}{T_2} \right)^{0,45}$$

$$\alpha''_{H_2O} = 1,0 * 0,048 \left(\frac{1143,15K}{573,15K} \right)^{0,45}$$

$$\alpha''_{H_2O} = \mathbf{0,0655}$$

Donde:

α''_{CO_2} y α''_{H_2O} : Absorbencia del CO₂ y H₂O

C_{CO_2} y C_{H_2O} : Factores de corrección del CO₂ y H₂O

ϵ''_{CO_2} y ϵ''_{H_2O} : Emisividades dos prima

T_2 : Temperatura de la superficie inferior

T_g : Temperatura de la llama

Cálculo de la absorbencia total de la mezcla en la superficie inferior ⁶⁰

$$\alpha_g(T_2) = \alpha''_{CO_2} + \alpha''_{H_2O} - \Delta' \alpha$$

$$\alpha_g(T_2) = 0,086 + 0,0655 - 0,002$$

$$\alpha_g(T_2) = \mathbf{0,149}$$

⁶⁰ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 390.

Donde:

$\alpha_g(T_2)$: Absorbencia total de la mezcla en la superficie inferior

α''_{CO_2} y α''_{H_2O} : Absorbencia del CO_2 y H_2O

Δ'_α : Factor dos prima de corrección simultáneo

3.4.12. Cálculo de la transmitividad de la radiación desde la superficie inferior ⁶¹

$$\tau_g(T_2) = 1 - \alpha_g(T_2)$$

$$\tau_g(T_2) = 1 - 0,149$$

$$\tau_g(T_2) = \mathbf{0,851}$$

Donde:

$\tau_g(T_2)$: Transmitividad de la radiación desde la superficie inferior

$\alpha_g(T_2)$: Absorbencia total de la mezcla en la superficie inferior

Con los valores de emisividad, potencia emisiva y transmitividad, obtenidos previamente, se procede a calcular la irradiación que es la energía por unidad de tiempo incidente en una unidad de área de determinada superficie.

Para un sistema de placas paralelas todas las áreas son iguales y todos los factores de forma son unidad, por lo que para calcular la irradiación de los dos planos se tiene: ⁶²

⁶¹ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 390.

⁶² Idem.

3.4.13. Cálculo de la irradiación en la base de la olla

$$G_1 = \epsilon_g(T_g)E_{bg} + \tau_g(T_2)E_{b2}$$

$$G_1 = 0,109 * 96,65 \frac{KW}{m^2} + 0,851 * 6,108 \frac{KW}{m^2}$$

$$G_1 = 15,733 \frac{KW}{m^2}$$

3.4.14. Cálculo de la irradiación en la superficie inferior

$$G_2 = \epsilon_g(T_g)E_{bg} + \tau_g(T_1)E_{b1}$$

$$G_2 = 0,109 * 96,65 \frac{KW}{m^2} + 0,83 * 1,506 \frac{KW}{m^2}$$

$$G_2 = 11,785 \frac{KW}{m^2}$$

Donde:

G_1 y G_2 : Irradiación en la base de la olla y en la superficie inferior respectivamente

$\epsilon_g(T_g)$: Emisividad total de la mezcla

E_{bg} : Potencia emisiva del gas

$\tau_g(T_1)$ y $\tau_g(T_2)$: Transmitividad en la base de la olla y en la superficie inferior respectivamente

E_{b1} y E_{b2} Potencia emisiva en la base de la olla y en la superficie inferior respectivamente

Al ser las dos superficies negras, la ganancia de calor por área tanto para la base de la olla como para la superficie inferior es: ⁶³

⁶³ HOLMAN, J. P. Op. Cit. p. 390.

3.4.15. Ganancia de calor por superficie de área de la base de la olla

$$\frac{Q_1}{A} = G_1 - E_{b1}$$

$$\frac{Q_1}{A} = 15,733 \frac{KW}{m^2} - 1,506 \frac{KW}{m^2}$$

$$\frac{Q_1}{A} = 14,227 \frac{KW}{m^2}$$

3.4.16. Ganancia de calor por superficie de área de la superficie inferior

$$\frac{Q_2}{A} = G_2 - E_{b2}$$

$$\frac{Q_2}{A} = 11,785 \frac{KW}{m^2} - 6,108 \frac{KW}{m^2}$$

$$\frac{Q_2}{A} = 5,612 \frac{KW}{m^2}$$

Donde:

$\frac{Q_1}{A}$ y $\frac{Q_2}{A}$: Ganancia de calor en la base de la olla y en la superficie inferior respectivamente

G_1 y G_2 : Irradiación en la base de la olla y en la superficie inferior respectivamente

E_{b1} y E_{b2} Potencia emisiva en la base de la olla y en la superficie inferior respectivamente

3.4.17. Cálculo del calor que ingresa al recipiente por radiación

Finalmente para encontrar el calor que ingresa al recipiente por radiación, se multiplica la ganancia de calor de la superficie de la olla por el área de la base de la olla.

Diámetro de la olla:

$$D_{olla} = 80cm = 0,8m = 2,625pie$$

$$Q_r = Q_2 * \frac{D_{olla}^2 \pi}{4}$$

$$Q_r = 14,227 \frac{KW}{m^2} * \frac{(0,8m)^2 \pi}{4}$$

$$Q_r = 7,151KW$$

Donde:

Q_r : Calor que ingresa a la olla por radiación

Q_2 : Calor ganado por la base de la olla

D_{olla} : Diámetro de la base de la olla

3.5. CÁLCULO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN DEL AIRE CALIENTE A LA BASE DE LA OLLA

Otra fuente de calor que ingresa al sistema para el calentamiento de la leche, será la transferencia de calor por convección natural del aire caliente a la base de la olla. Para obtener este valor, se deben realizar los cálculos especificados a continuación:

Suposiciones:

- Se supone que la placa base de la olla es horizontal con la cara hacia abajo.⁶⁴
- El cálculo se lo realizará por medio de convección natural.

Para obtener el valor del calor que se transfiere a la base de la olla por convección a través del aire, es necesario primero calcular el coeficiente de convección. Este valor depende de una variedad de factores como: la velocidad, densidad, viscosidad, conductividad térmica, geometría, etc. Por lo que se deben realizar los siguientes cálculos.

3.5.1. Cálculo de la temperatura de película ⁶⁵

En los casos de convección natural se evalúa las propiedades del fluido a una temperatura igual a la media aritmética de la temperatura de la pared y del fluido ambiente.

$$T_p = \frac{T_g + T_1}{2}$$

$$T_p = \frac{1598^{\circ}F + 266,9^{\circ}F}{2}$$

$$T_p = 932,45^{\circ}F$$

⁶⁴ KARLEKAR, B. V. Op. Cit. p. 620.

⁶⁵ Idem. p. 596.

Donde:

T_p : Temperatura de la película

T_g : Temperatura de la llama

T_1 : Temperatura de la base de la olla

Con la temperatura de la película se procede a encontrar algunas de las propiedades del fluido en tablas:

Anexo 2: Valores de propiedades de gases a presión atmosférica (aire)

Viscosidad cinemática:

$$@932,45^\circ F \rightarrow \gamma = 79,56 * 10^{-5} \text{ pie}^2 / \text{s}$$

Número de Prandtl:

$$@932,45^\circ F \rightarrow Pr = 0,686$$

Coefficiente de conducción térmica:

$$@932,45^\circ F \rightarrow k = 0,03183 \text{ BTU}/\text{hpie}^\circ F$$

Longitud característica de la placa ⁶⁶

La longitud característica, es un parámetro que permite correlacionar los datos de las placas, para el posterior cálculo del coeficiente de convección.

$$L_c = \frac{\text{Área placa plana}}{\text{Perímetro placa plana}} = \frac{A}{P} = \frac{(\pi/4)D_{olla}^2}{\pi D_{olla}} = \frac{D_{olla}}{4}$$

$$L_c = \frac{0,8m * 3,281\text{pie}}{4m}$$

$$L_c = 0,656\text{pie}$$

⁶⁶ KARLEKAR, B. V. Op. Cit. p. 622.

Donde:

L_c : Longitud característica de la placa

A : Área de la base de la olla

P : Perímetro de la base de la olla

D : Diámetro de la base de la olla

Coefficiente de expansión térmica ⁶⁷

$$\beta = \frac{1}{T_g}$$

$$\beta = \frac{1}{(460 + 1598)^\circ R}$$

$$\beta = 4,86 * 10^{-4} / ^\circ R$$

Donde:

β : Coeficiente de expansión térmica

T_g : Temperatura de la llama

Gravedad

$$g = 32,2 \frac{pie}{s^2}$$

3.5.2. Cálculo del número de Grashof ⁶⁸

Con los valores obtenidos previamente procedemos a determinar el número de Grashof, que es el número adimensional relevante en los cálculos de convección natural.

⁶⁷ KARLEKAR, B. V. Op. Cit. p. 596.

⁶⁸ Idem. p. 592.

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL_c^3}{\gamma^2}$$

$$Gr = \frac{32,2 \frac{pie}{s^2} * 4,86 * 10^{-4} (1598 - 266,9) F * (0,656 pie)^3}{\left(79,56 * 10^{-5} \frac{pie^2}{s}\right)^2 \text{ } ^\circ R}$$

$$Gr = 0,929 * 10^7$$

Donde:

Gr: Número de Grashof

g: Gravedad

β : Coeficiente de expansión térmica

ΔT : Diferencia de temperatura entre la temperatura de la llama y la temperatura de la base de la olla.

L_c : Longitud característica de la placa

γ : Viscosidad cinemática

3.5.3. Cálculo del número de Rayleigh ⁶⁹

El número de Rayleigh, es una cantidad adimensional que permite obtener el valor del número de Nusselt.

$$Ra = Pr * Gr_{L_c}$$

$$Ra = 0,686 * 0,929 * 10^7$$

$$Ra = 0,637 * 10^7$$

Donde:

Ra: Número de Rayleigh

Pr: Número de Prandtl

Gr: Número de Grashof

⁶⁹ KARLEKAR, B. V. Op. Cit. p. 594.

3.5.4. Cálculo del número de Nusselt ⁷⁰

El número de Nusselt para placas horizontales calientes con cara hacia abajo se encuentra en el siguiente rango:

$$Nu_{prom} = 0,27(Ra_{Lc}^{1/4}) \text{ Para } 3 * 10^5 < (Ra_{Lc}) < 10^{10}$$

Entonces:

$$Nu_{prom} = 0,27(0,637 * 10^7)^{1/4}$$

$$Nu_{prom} = \mathbf{13,564}$$

Donde:

Nu_{prom} : Número de Nusselt

Ra : Número de Rayleigh

3.5.5. Cálculo del coeficiente de convección ⁷¹

$$h_{prom} = \frac{Nu_{prom} * k}{L_c}$$

$$h_{prom} = \frac{13,564 * 0,03183 \text{ BTU}/\text{hpie}^\circ\text{F}}{0,656\text{pie}}$$

$$h_{prom} = \mathbf{0,658} \frac{\text{BTU}}{\text{hpie}^2\text{F}}$$

Donde:

h_{prom} : Coeficiente de convección promedio

Nu_{prom} : Número de Nusselt

k : Coeficiente de conducción térmica

L_c : Longitud característica de la placa

⁷⁰ KARLEKAR, B. V. Op. Cit. p. 594.

⁷¹ Idem. p. 600.

3.5.6. Cálculo de la transferencia de calor por convección del aire ⁷²

$$Q_h = h_{prom}A(T_g - T_1)$$

$$Q_h = 0,658 \frac{BTU}{hpie^2 \circ F} \left(2,625^2 \frac{\pi}{4} pie^2 \right) (1598^\circ F - 266,9^\circ F)$$

$$Q_h = 4740,07 \frac{BTU}{h} * \frac{0,293Wh}{1BTU} = 1388,84W = 1,388KW$$

Donde:

Q_h : Calor transferido por convección del aire

h_{prom} : Coeficiente de convección promedio

A : Área de la base de la olla

T_g : Temperatura de la llama

T_1 : Temperatura de la base de la olla

⁷² KARLEKAR, B. V. Op. Cit. p. 629.

3.6. CÁLCULO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL

La transferencia de calor total que se gana por la combustión del biogás y que es transmitida por radiación de la llama y por convección natural del aire, se obtiene sumando estas dos cantidades.

$$Q_T = Q_r + Q_h$$

$$Q_T = (7,151 + 1,388)KW$$

$$Q_T = 8,539KW$$

Donde:

Q_T : Calor total transferido por la combustión del biogás

Q_r : Calor transferido por radiación

Q_h : Calor transferido por convección del aire

Una vez que se ha obtenido el valor de la transferencia de calor total, es necesario tomar en cuenta que este calor no se transfiere completamente al recipiente, sino que una pequeña parte se pierde, por lo que se debe calcular estas pérdidas tanto por radiación como por convección.

3.7. CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR RADIACIÓN

Suposiciones:

- Se supone una temperatura de la pared del recipiente, igual a la de la leche de 65°C y una temperatura estable del aire de 20°C.

Cuando la diferencia de temperatura entre una superficie y sus alrededores es pequeña, se define un coeficiente de radiación de transferencia de calor a una temperatura media para obtener el valor de la transferencia de calor por radiación.⁷³

3.7.1. Cálculo de la temperatura media

$$T_m = \frac{T_{pasL} + T_{\infty}}{2}$$

$$T_m = \frac{65^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C}}{2}$$

$$T_m = 42,5^{\circ}\text{C} = 315,65\text{K}$$

Donde:

T_m : Temperatura de media

T_{pasL} : Temperatura a la que se pasteuriza la leche

T_{∞} : Temperatura ambiente

3.7.2. Cálculo del coeficiente de radiación

$$h_r = 4\epsilon_{sup}\sigma T_m^3$$

$$h_r = 4 * 0,07 \left(5,66 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{k}^4} \right) (315,65)^3$$

$$h_r = 0,498 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{k}}$$

⁷³ KARLEKAR, B. V. Op. Cit. p. 22.

Donde:

h_r : Coeficiente de radiación

ϵ_{sup} : Emisividad de la superficie

σ : Constante de Stefan - Boltzmann

T_m : Temperatura de media

3.7.3. Cálculo del calor perdido por radiación

$$Q_{rp} = h_r A_T (T_{pasL} + T_{\infty})$$

$$Q_{rp} = 0,498 \frac{W}{m^2k} \left(\frac{0,8m^2\pi}{4} + 0,8m\pi 0,7m \right) (65^{\circ}C - 25^{\circ}C)$$

$$Q_{rp} = 45,058W = 0.045KW$$

Donde:

Q_{rp} : Calor perdido por radiación

h_r : Coeficiente de radiación

A_T : Área total de las paredes de la olla

T_{pasL} : Temperatura a la que se pasteuriza la leche

T_{∞} : Temperatura ambiente

3.8. CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR CONVECCIÓN CON EL AIRE

Suposiciones:

- Se supone una temperatura estable de la leche de 65°C y una temperatura estable del aire de 20°C.
- El cálculo se lo realizará por medio de convección natural.
- Se considera que la superficie de la olla tiene la misma temperatura de 65°C que la leche, debido a su espesor (2mm).

Para obtener el valor del calor que se pierde por convección con el aire, es necesario primero calcular el coeficiente de convección tal como se procedió para obtener el calor transferido por convección del aire:

3.8.1. Cálculo de la temperatura de película

$$T_p' = \frac{T_{pasL} + T_{\infty}}{2}$$

$$T_p' = \frac{149^{\circ}F + 68^{\circ}F}{2}$$

$$T_p' = \mathbf{108,5^{\circ}F}$$

Donde:

T_p' : Temperatura de la película

T_{pasL} : Temperatura a la que se pasteuriza la leche

T_{∞} : Temperatura ambiente

Con la temperatura de la película se procede a encontrar algunas de las propiedades del fluido interpolando los valores en tablas:

Anexo 2: Valores de propiedades de gases a presión atmosférica

Viscosidad cinemática:

$$@108,5^{\circ}F \rightarrow \gamma' = 18,62 * 10^{-5} \text{ pie}^2/\text{s}$$

Número de Prandtl:

$$@108,5^{\circ}F \rightarrow Pr' = 0,704$$

Coefficiente de conducción térmica:

$$@108,5^{\circ}F \rightarrow k' = 0,0158 \text{ BTU}/\text{hpie}^{\circ}F$$

Cálculo del coeficiente de expansión térmica

$$\beta' = \frac{1}{T_p'} = \frac{1}{(460 + 108,5)^{\circ}R}$$

$$\beta' = 1,759 * 10^{-3}/^{\circ}R$$

Donde:

β' : Coeficiente de expansión térmica

T_p' : Temperatura de la llama

Gravedad

$$g = 32,2 \frac{\text{pie}}{\text{s}^2}$$

Cálculo de la longitud característica

La longitud característica para cilindros verticales es igual a la altura del cilindro.

$$L_c' = 0,70m = 2,296pie$$

3.8.2. Cálculo del número de Grashof

$$Gr' = \frac{g\beta'\Delta T' L_c'^3}{\gamma'^2}$$

$$Gr' = \frac{32,2 \frac{pie}{s^2} * 1,759 * 10^{-3} (149 - 68)F * (2,296pie)^3}{\left(18,62 * 10^{-5} \frac{pie^2}{s}\right)^2 \text{ } ^\circ R}$$

$$Gr' = 1,602 * 10^9$$

Donde:

Gr' : Número de Grashof

g : Gravedad

β' : Coeficiente de expansión térmica

$\Delta T'$: Diferencia de temperatura entre la temperatura de la leche y la temperatura del ambiente.

L_c' : Longitud característica de la placa

γ' : Viscosidad cinemática

3.8.3. Cálculo del número de Rayleigh

$$Ra' = Pr' * Gr'$$

$$Ra' = 0,704 * 1,602 * 10^9$$

$$Ra' = 1,128 * 10^9$$

Donde:

Ra' : Número de Rayleigh

Pr' : Número de Prandtl

Gr' : Número de Grashof

3.8.4. Cálculo del número de Nusselt ⁷⁴

El número de Nusselt para placas verticales se encuentra en el siguiente rango:

$$Nu'_{prom} = 0,10 (Ra'^{1/3}) \text{ Para } 10^9 < (Ra') < 10^{12}$$

Entonces:

$$Nu'_{prom} = 0,10(1,128 * 10^9)^{1/3}$$

$$Nu'_{prom} = \mathbf{104,096}$$

Donde:

Nu'_{prom} : Número de Nusselt

Ra' : Número de Rayleigh

3.8.5. Cálculo del coeficiente de convección

$$h'_{prom} = \frac{Nu'_{prom} * k'}{L_c'}$$

$$h_{prom} = \frac{104,096 * 0,0158 \text{ BTU}/\text{hpie}^\circ\text{F}}{2,296\text{pie}}$$

$$h_{prom} = \mathbf{0,716} \frac{\text{BTU}}{\text{hpie}^2\circ\text{F}}$$

⁷⁴ KARLEKAR, B. V. Op. Cit. p. 612.

Donde:

h'_{prom} : Coeficiente de convección promedio

Nu'_{prom} : Número de Nusselt

k' : Coeficiente de conducción térmica

L_c' : Longitud característica de la placa

3.8.6. Cálculo del calor perdido por convección

$$Q_{hp} = h'_{prom} A_T (T_{pasL} - T_{\infty})$$

$$Q_{hp} = 0,716 \frac{BTU}{hpie^{2\circ F}} \left(2,625^2 \frac{\pi}{4} + 2,625 * \pi * 2,296 \right) pie^2 (149^{\circ F} - 68^{\circ F})$$

$$Q_{hp} = 1411,986 \frac{BTU}{h} * \frac{0,293Wh}{1BTU} = 413,712W = 0,413KW$$

Donde:

Q_{hp} : Calor perdido por convección del aire

h'_{prom} : Coeficiente de convección promedio

A_T : Área total de las paredes de la olla

T_{pasL} : Temperatura a la que se pasteuriza la leche

T_{∞} : Temperatura ambiente

3.9. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS TOTALES

Las pérdidas de calor total se obtienen sumando las pérdidas por radiación y por convección natural del aire.

$$Q_{Tp} = Q_{rp} + Q_{hp}$$

$$Q_{Tp} = (0,045 + 0,413)KW$$

$$Q_{Tp} = \mathbf{0,458KW}$$

Donde:

Q_{Tp} : Pérdida de calor total

Q_{rp} : Calor perdido por radiación

Q_{hp} : Calor perdido por convección del aire

Una vez que se obtiene el valor total de las pérdidas se puede calcular la cantidad de calor total requerido, este valor es igual a la suma de las pérdidas de calor más el flujo de calor necesario para el calentamiento de los 200Lt de leche.

3.10. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALOR TOTAL REQUERIDO

$$Q_{Req} = Q_{Tp} + \dot{Q}$$

$$Q_{Req} = (0,458 + 6,97)KW$$

$$Q_{Req} = 7,43KW$$

Donde:

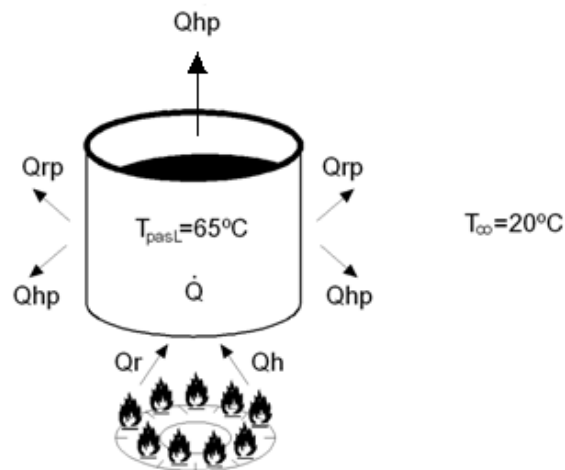
Q_{Req} : Calor total requerido

Q_{Tp} : Pérdida de calor total

\dot{Q} : Flujo de calor necesario para el calentamiento

El valor de la transferencia de calor total (radiación y convección) por la combustión del biogás que se obtuvo previamente, es el calor del cual se dispone para el calentamiento de la leche, este valor debe ser superior a la cantidad de calor total requerido. Para conocer si la energía disponible abastece la energía requerida se efectúa un balance de energía. (Ver figura 18)

Figura 18: Esquema del balance de energía



Fuente: Autores

Cantidad de calor disponible > Cantidad de calor requerido

$$Q_r + Q_h > Q_{rp} + Q_{hp} + \dot{Q}$$

$$Q_T > Q_{Req}$$

$$8,539KW > 7,43KW$$

3.11. CÁLCULO DEL VOLUMEN DIARIO DE BIOGÁS

Para determinar el volumen diario de biogás se debe conocer el flujo de biogás, para lo cual es necesario relacionar la cantidad de calor requerido con el valor calorífico neto del biogás que se muestra en la tabla 10.

Tabla 10: Propiedades del biogás

| Designation | Unit | CH ₄ | CO ₂ | H ₂ | H ₂ S | Biogas mixture of 60% CH ₄ : 40% CO ₂ |
|------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|---|
| Volume (part) | % | 55-70 | 27-44 | 1 | 3 | 100.0 |
| Net calorific value (n.c.v.) | kJ/m ³ | 35800 | — | 10800 | 22800 | 21500 |
| Limit of inflamability | Vol.% | 5-15 | — | 4-80 | 4-4.5 | 6-12 |
| Inflamation point | °C | 650-750 | — | 585 | — | 650-750 |
| Density (normal) | g/l | 0.72 | 1.98 | 0.09 | 1.54 | 1.20 |
| Density ratio to air | — | 0.55 | 2.5 | 0.07 | 1.2 | 0.83 |

Fuente: Nijaguna B. T., Biogas Technology, 2002

Cantidad de calor disponible

$$Q_T = 8,539KW * 3600seg = 30740,4 \frac{KJ}{h}$$

3.11.1. Cálculo del flujo de biogás

$$\dot{m}_{Biogás} = \frac{Q_T}{vcn}$$

$$\dot{m}_{Biogás} = \frac{30740,4 \frac{KJ}{h}}{21500 \frac{KJ}{m^3}}$$

$$\dot{m}_{Biogás} = 1,429 \frac{m^3}{h}$$

Donde:

$\dot{m}_{Biogás}$: Flujo de biogás (m³/h)

Q_T : Cantidad de calor disponible (KJ/h)

vcn : Valor calorífico neto (KJ/m³)

Como el consumo de biogás diario será destinado a la pasteurización de 200Lt de leche y este proceso tiene una duración de aproximadamente 3horas, para obtener el volumen diario de biogás a utilizar, se multiplica el valor del flujo de biogás por el tiempo diario de uso.

3.11.2. Cálculo del volumen diario de biogás

$$VG = \dot{m}_{Biogás} * t$$

$$VG = 1,429 \frac{m^3}{h} * 3h$$

$$VG = 4,287m^3/d$$

Donde:

VG : Volumen diario de biogás (m^3/d)

$\dot{m}_{Biogás}$: Flujo de biogás (m^3/h)

t : Tiempo de calentamiento (h)

Para los cálculos de dimensionamiento del biodigestor, se aproxima el valor del volumen diario de biogás a $4,5m^3$.

3.12. CÁLCULO DEL VOLUMEN TOTAL DEL BIODIGESTOR

Para obtener el volumen total que debe tener el digestor para almacenar la cantidad diaria de biogás requerida para la pasteurización de la leche, se efectúan los siguientes cálculos.

3.12.1. Cálculo de la cantidad diaria de desechos orgánicos (C_{ed})⁷⁵

La cantidad diaria de estiércol que se debe recolectar, se calcula dividiendo el volumen de biogás por la producción de biogás por kilogramo de estiércol vacuno que se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Rendimiento del biogás en función del sustrato

| MATERIA | RENDIMIENTO DEL BIOGAS (M3/ton.) |
|----------------------|-------------------------------------|
| Estiércol vacuno | 40 |
| Estiércol de cerdo | 60 |
| Heces humanas | 28 |
| Residuos de cosechas | 40 |
| Jacintos de agua | 50 |
| Estiércol avícola | 115 |

Fuente: Jiménez Luis M., Medio Ambiente y desarrollo alternativo, 1992

Al realizar una regla de tres simple se puede obtener el volumen de biogás que genera cada kilogramo de estiércol vacuno.

$$40m^3 \rightarrow 1ton$$

$$1m^3 \rightarrow x = 0,025ton * \frac{1000kg}{1ton} = 25Kg$$

Entonces:

$$25Kg \rightarrow 1m^3$$

$$1Kg \rightarrow x = 0,04m^3$$

⁷⁵ MARTÍ, Jaime, *Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores*, Bolivia. 2008, p. 19.

De acuerdo al tipo de biomasa, la producción típica de biogás (PB) que se obtiene de los desechos vacunos es de 0.04 m³ por cada Kg.

Entonces:

$$C_{ed} = \frac{VG}{PB}$$

$$C_{ed} = \frac{4,5m^3/d}{0,04m^3/Kg}$$

$$C_{ed} = \mathbf{112,5Kg/d}$$

Donde:

C_{ed} : Cantidad diaria de desechos orgánicos (Kg/d)

VG : Volumen diario de biogás (m³)

PB : Producción de biogás por Kg de estiércol vacuno (m³/Kg)

3.12.2. Cálculo de la cantidad de sólidos totales ⁷⁶

Los sólidos totales representan el porcentaje de estiércol seco contenido en la materia orgánica, constituyendo así la carga real de materia sólida que alimenta al digester. El estiércol fresco de ganado vacuno contiene un promedio de 14% de materia seca.

$$ST = \frac{C_{ed} * 14\%}{100\%}$$

$$ST = \frac{112,5Kg/d * 14\%}{100\%}$$

$$ST = \mathbf{15,75Kg/d}$$

Donde:

ST : Cantidad de sólidos totales (Kg/d)

C_{ed} : Cantidad diaria de desechos orgánicos (Kg/d)

⁷⁶ MARTÍ, Jaime. Op. Cit. p. 21.

3.12.3. Cálculo de la cantidad sólidos volátiles (SV) ⁷⁷

Los sólidos volátiles se refieren a la cantidad de sólidos totales que se transforman en gas en el proceso de biodigestión. Estos equivalen en promedio al 83% de los sólidos totales.

$$SV = \frac{ST * 83\%}{100\%}$$

$$SV = \frac{15,75Kg/d * 83\%}{100\%}$$

$$SV = 13,073Kg/d$$

Donde:

SV: Cantidad de sólidos volátiles (Kg/d)

ST: Cantidad de sólidos totales (Kg/d)

3.12.4. Cantidad de agua por kilogramo de estiércol ⁷⁸

Para alimentar el biodigestor los desechos orgánicos deben ser diluidos en agua con el fin de que las bacterias anaeróbicas encargadas de producir el biogás tengan una acción más efectiva. La dilución comúnmente usada es de 1 a 1, o de 1 a 2 partes de estiércol por partes de agua respectivamente.

Para realizar los cálculos del biodigestor propuesto se utilizará una proporción de 1 a 2, es decir por una parte de estiércol se añadirán 2 partes de agua con el fin principalmente de evitar natas en el digestor que dificulten la salida del gas. (Ver tabla 12.

⁷⁷ MARTÍ, Jaime. Op. Cit. p. 22.

⁷⁸ Ministerio de electricidad y energía Renovable. *Estudio de factibilidad para producción de energía mediante biodigestores*, Ecuador. 2008. p. 117

Tabla 12: Proporciones para la mezcla

| MATERIA PRIMA | MEZCLA |
|----------------------------|------------------------|
| Estiércol de ganado vacuno | 1Kg + 2 litros de agua |
| Estiércol de cerdos | 1Kg + 1 litros de agua |
| Desechos agrícolas verdes | 1Kg + 2 litros de agua |

Fuente: Ministerio de electricidad y energía Renovable del Ecuador, Estudio de factibilidad para producción de energía mediante biodigestores, 2008

3.12.5. Cálculo del volumen del líquido diario ⁷⁹

El volumen del líquido diario representa la mezcla de agua y materia orgánica que diariamente debe ingresar al biodigestor para producir la cantidad de biogás necesaria, esta mezcla se conoce también con el nombre de afluente. Para su cálculo se toma en cuenta la relación de cantidad de agua por kilogramo de estiércol que se determinó es 1 a 2 partes de estiércol por partes de agua respectivamente, por lo que el resultado se obtiene sumando los kilogramos de estiércol más dos veces los mismos kilogramos. (Para este cálculo se asume que 1 Kilogramo de estiércol es igual a 1 Litro de agua).

$$VL_d = Ced + 2(Ced)$$

$$VL_d = 112,5Kg/d + 2(112,5Kg/d)$$

$$VL_d = 337,5Lt/d$$

Donde:

VL_d : Volumen del líquido diario (Lt/d)

C_{ed} : Cantidad diaria de desechos orgánicos (Kg/d)

⁷⁹ MARTÍ, Jaime. Op. Cit. p. 20.

3.12.6. Cálculo del tiempo de retención

El tiempo de retención es el lapso de tiempo durante el cual la materia orgánica permanece en el biodigestor. Este tiempo depende en gran medida de la temperatura del entorno en el que se encuentre el biodigestor. Esta relación entre el tiempo de retención y la temperatura del medio es inversamente proporcional, es decir que, si la temperatura del medio es mayor, el tiempo de retención será menor. De acuerdo con la tabla 13 se escogerá un valor de 25 días, tomando en consideración que el lugar de instalación del biodigestor se encuentra a en una zona tipo valle de la ciudad de Ibarra.

Tabla 13: Tiempos de retención

| Tiempo de retención según temperatura | | |
|---------------------------------------|------------------|----------------------------|
| Región característica | Temperatura (°C) | Tiempo de retención (días) |
| Trópico | 30 | 15 |
| Valle | 20 | 25 |
| Altiplano | 10 | 60 |

Fuente: Martí Jaime, Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores, 2008

3.12.7. Cálculo del volumen del líquido (VL) ⁸⁰

El volumen del líquido representa la cantidad de mezcla de agua y materia orgánica o afluente contenida en el digestor. Se calcula multiplicando el volumen del líquido diario que ingresa al digestor por el número de días de retención que deberán transcurrir hasta que comience la producción de biogás.

$$VL = \frac{VL_D * TR}{1000}$$

$$VL = \frac{337,5Lt/d * 25d}{1000}$$

$$VL = 8,438m^3$$

⁸⁰ MARTÍ, Jaime. Op. Cit. p. 20.

Donde:

V_L : Volumen del líquido (m^3)

V_{L_d} : Volumen del líquido diario (Lt/d)

TR : Tiempo de retención (d)

3.12.8. Cálculo del volumen total del digestor (VT)

El volumen total del digestor es igual al volumen ocupado por el líquido más el volumen ocupado por el gas producido.

$$VT = VL + VG$$

$$VT = 8,438m^3 + 4,5m^3$$

$$VT = 12,94m^3 \approx 13m^3$$

Donde:

VT : Volumen total del digestor (m^3)

V_L : Volumen del líquido (m^3)

V_G : Volumen diario de biogás (m^3)

3.13. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CABEZAS DE GANADO VACUNO NECESARIAS PARA LA PRODUCCIÓN BIOGÁS

3.13.1. Estiércol recogido (semi-estabulado)

Es la cantidad de estiércol útil y depende de la forma en que se mantenga a los animales. Para este caso el ganado es semi-estabulado lo que significa que se aprovecha el 50% del estiércol producido por cada animal.

3.13.2. Estiércol producido por kilogramo de animal ($E_{c/v}$)

De acuerdo a la tabla 14 se conoce que por cada 100 Kg de peso vivo de ganado vacuno lechero se puede obtener 8 kg de estiércol. Por lo tanto si cada vaca tiene un peso promedio de 400Kg, la cantidad diaria de estiércol producido por cada una es de 32Kg.

Tabla 14: Cantidad de estiércol producido por peso de animal

| GANADO | Kg de estiércol producido por cada 100Kg de peso del animal |
|---------|---|
| Cerdo | 4 |
| Bovino | 8 |
| Caprino | 4 |
| Conejos | 3 |
| Equino | 7 |

Fuente: Martí Jaime, Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores, 2008

3.13.3. Número de vacas (#*v*) ⁸¹

El número de vacas que se necesita para producir la cantidad de biogás requerido, se obtiene dividiendo la cantidad diaria de estiércol necesario por el peso de estiércol producido por cada animal. Para el caso de nuestro cálculo se debe multiplicar este resultado por 2 debido a que el ganado se encuentra semi-estabulado, por lo que se aprovecha solo el 50% del estiércol de cada animal.

$$\#v = \frac{C_{ed}}{E_{c/v}}$$

$$\#v = \frac{112.5Kg/d}{32kg/d} * 2$$

$$\#v = 7,03 \approx 8 \text{ vacas}$$

Donde:

#*v*: Número de vacas

C_{ed}: Cantidad diaria de desechos orgánicos (Kg/d)

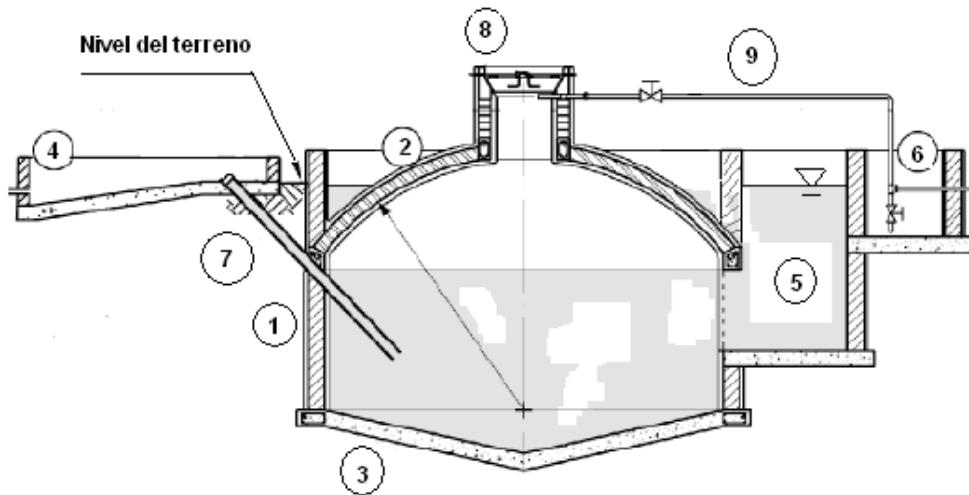
E_{c/v}: Cantidad diaria de estiércol producida por cada vaca (Kg/d)

⁸¹ MARTÍ, Jaime. Op. Cit. p. 20.

3.14. DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

El parámetro principal que define el dimensionamiento de un biodigestor, es el volumen diario de biogás que se requiera para un determinado fin. Una vez obtenido este valor, es posible conocer el volumen total para proceder al dimensionamiento del digestor y de las diferentes partes (ver figura 19) como se detalla a continuación:

**Figura 19: Esquema de las partes del biodigestor
(Corte transversal)**

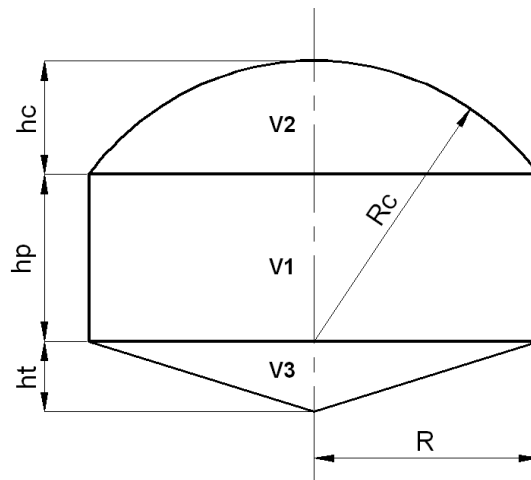


| Ítem | Descripción |
|------|-----------------------------|
| 1 | Muro cilíndrico |
| 2 | Cúpula |
| 3 | Base cónica |
| 4 | Tanque de carga o de mezcla |
| 5 | Tanque de compensación |
| 6 | Trampa de agua |
| 7 | Tubo de carga |
| 8 | Cuello |
| 9 | Tubo de salida de biogás |

3.14.1. Dimensionamiento de la cúpula, el cilindro contenedor y la base cónica del digestor

El alma del biodigestor es el contenedor donde ingresa la mezcla y ocurre la producción de biogás. En los biodigestores de cúpula fija, el contenedor se caracteriza por su forma, que consta de tres partes: cónica, cilíndrica y esférica, como se puede ver en la figura 3.14.⁸²

Figura 20: Esquema de la forma de un biodigestor tipo cúpula fija



Fuente: Autores

Donde:

hc: Altura de la cúpula

hp: Altura de la pared

ht: Altura del cono base

R: Radio básico

Rc: Radio de la cúpula

D: Diámetro del cilindro

V1: Volumen del cilindro

V2: Volumen de la cúpula

V3: Volumen del cono base

⁸² GUARDADO, José Antonio, *Diseño y Construcción de Plantas de Biogás*, Editorial CUBASOLAR, Cuba 2007. p. 20.

Para determinar las dimensiones de cada sección, identificadas en el esquema 3.14, se han establecido las siguientes proporciones.

Proporciones⁸³

$$hc = 2U$$

$$hp = 3U$$

$$ht = 0,15D$$

$$Rc = 5U$$

$$D = 8U$$

Donde:

U : Unidad proporcional (m)

Las fórmulas que se emplean para calcular los diferentes elementos del biodigestor de cúpula fija, a partir de las proporciones y el volumen total calculado son las siguientes:

Radio básico (R)

El radio básico es el radio correspondiente al cilindro del digestor, donde se almacenará la mezcla que se convertirá en biogás.

$$R = \sqrt[3]{VT/(\pi * 1,121)}$$

$$R = \sqrt[3]{13m^3/(\pi * 1,121)}$$

$$\mathbf{R = 1,545m}$$

Donde:

R : Radio básico (m)

VT : Volumen total del digestor (m³)

⁸³ GUARDADO, José Antonio, *Diseño y Construcción de Plantas de Biogás*, Editorial CUBASOLAR, Cuba 2007. p. 24.

Unidad proporcional (U) ⁸⁴

La unidad proporcional U, permite el cálculo de los elementos del digestor, relacionando las diferentes dimensiones a partir del Radio básico, utilizando la siguiente razón.

$$U = \frac{R}{4}$$

$$U = \frac{1,545m}{4}$$

$$U = 0,386m$$

Donde:

U: Unidad proporcional (m)

R: Radio básico (m)

Radio de la cúpula (Rc)

Es el radio comprendido entre el arco de la cúpula y el centro de la base del cilindro del digestor. Se calcula a través de la siguiente proporción:

$$Rc = 5U$$

$$Rc = 5(0,386m)$$

$$Rc = 1,93m$$

Donde:

Rc: Radio de la cúpula (m)

U: Unidad proporcional (m)

⁸⁴ GUARDADO, José Antonio, Op. Cit. p. 24.

Diámetro (D) ⁸⁵

Es el diámetro del cilindro del digestor, se calcula con la siguiente proporción:

$$D = 8U$$

$$D = 8(0,386m)$$

$$**D = 3,088m**$$

Donde:

D: Diámetro (m)

U: Unidad proporcional (m)

Altura de la cúpula (hc)

Es la altura comprendida entre el polo de la esfera y la base superior del cilindro del digestor. Se calcula a través de la siguiente proporción:

$$hc = 2U$$

$$hc = 2(0,386m)$$

$$**hc = 0,772m**$$

Donde:

hc: Altura de la cúpula (m)

U: Unidad proporcional (m)

Altura de la pared (hp)

La altura de la pared es la altura del cilindro del digestor. La proporción usada es:

⁸⁵ GUARDADO, José Antonio, Op. Cit. p. 24.

$$hp = 3U$$

$$hp = 3(0,386m)$$

$$**hp = 1,158m**$$

Donde:

hp: Altura de la pared (m)

U: Unidad proporcional (m)

Altura del cono base (ht) ⁸⁶

La altura del cono base es la altura comprendida entre la cúspide del cono invertido y el centro de la base del cilindro del digestor. Su proporción de cálculo es:

$$ht = 0,15D$$

$$ht = 0,15(3,088m)$$

$$**ht = 0,463m**$$

Donde:

ht: Altura del cono base (m)

D: Diámetro (m)

3.14.1.1.Volumen del cilindro (V1)

El volumen del cilindro se calcula utilizando la fórmula para el volumen de un cilindro.

$$V1 = \pi * R^2 * hp$$

$$V1 = \pi * (1,545m)^2 * (1,158m)$$

$$**V1 = 8,684m^3**$$

⁸⁶ GUARDADO, José Antonio, Op. Cit. p. 24.

Donde:

$V1$: Volumen del cilindro (m^3)

R : Radio básico (m)

hp : Altura de la pared (m)

3.14.1.2. Volumen del segmento esférico ⁸⁷

El volumen del segmento esférico se calcula con la fórmula para calcular un casquete esférico, es decir una parte de una esfera determinada por un plano secante:

$$V2 = \pi * hc^2 \left[Rc - \left(\frac{hc}{3} \right) \right]$$

$$V2 = \pi * (0,772m)^2 \left[1,93m - \left(\frac{0,772m}{3} \right) \right]$$

$$V2 = 3,132m^3$$

Donde:

$V2$: Volumen del segmento esférico (m^3)

hc : Altura de la cúpula (m)

Rc : Radio de la cúpula (m)

3.14.1.3. Volumen del cono base

El volumen del cono base se calculará utilizando la fórmula para calcular el volumen de un cono. Esta fórmula es:

$$V3 = \frac{\pi * R^2 * ht}{3}$$

$$V3 = \frac{\pi * (1,545m)^2 * (0,463m)}{3}$$

$$V3 = 1,157m^3$$

⁸⁷ GUARDADO, José Antonio, Op. Cit. p. 24.

Donde:

$V3$: Volumen del cono base (m^3)

R : Radio básico (m)

ht : Altura del cono base (m)

3.14.2. Volumen del tanque de carga o mezcla ⁸⁸

El tanque de mezcla debe tener un volumen poco mayor al volumen del líquido diario que ingresa al digestor. Es conveniente construir el piso del tanque con una pequeña inclinación hacia el lado opuesto del tubo de carga, para evitar que materiales inertes penetren en el biodigestor, como piedras que sean arrastradas por el sustrato. Es importante también dejar una abertura en el lado de la inclinación, por donde se puedan evacuar estos materiales. Como en este tanque es donde se efectúa la mezcla del estiércol con agua, se requiere colocar tapones en el tubo de descarga y en el de evacuación de sedimentos, fácilmente removibles sin necesidad de tocar el sustrato.

$$V_{tm} > VL_d$$

$$0,37m^3 = 0,338m^3$$

Donde:

V_{tm} : Volumen del tanque de carga (m^3)

VL_d : Volumen del líquido diario (m^3)

3.14.3. Volumen del tanque de compensación

El tanque de compensación debe tener un volumen equivalente al volumen de gas en el segmento esférico.

$$V_{tc} = V3$$

$$V_{tc} = 1,157m^3$$

⁸⁸ GUARDADO, José Antonio, Op. Cit. p. 29.

Donde:

V_{tc} : Volumen del tanque de compensación (m^3)

V_3 : Volumen del cono base (m^3)

3.14.4. Volumen del tanque de la trampa de agua ⁸⁹

El tanque de la trampa de agua no requiere de gran volumen, su función es la de eliminar el vapor de agua que contiene el biogás, y eliminar el biogás que no se utilice para evitar altas presiones dentro del digestor. El parámetro a tomar en cuenta es su altura, la misma que debe ser igual a la altura de la cúpula.

$$V_{tt} = 0,25m^3$$

Donde:

V_{tt} : Volumen del tanque de la trampa de agua (m^3)

3.14.5. Longitud de la tubería de carga

El tubo que comunica el tanque de mezcla con el biodigestor es de PVC y tiene un diámetro que varía entre 10 y 15 cm, en dependencia del tamaño de la planta. El extremo que penetra en el biodigestor debe estar a una altura entre 40 y 60 cm del fondo, para evitar que el material sedimentado lo obstruya y con una ángulo de 45°.

$$L_{tc} = 1,45m$$

3.14.6. Cuello ⁹⁰

El cuello debe cumplir un ancho mínimo de 50cm, para permitir el ingreso al operario para mantenimiento o limpieza. Su altura igualmente no debe exceder los 50cm.

⁸⁹ GUARDADO, José Antonio, Op. Cit. p. 28.

⁹⁰ Idem. p. 38.

3.15. Nomenclatura de las variables de cálculo y resumen de fórmulas

A continuación se detallan las variables empleadas en cada uno de los cálculos para el diseño del biodigestor, sus respectivas fórmulas, símbolos y unidades. Esta tabla permitirá una comprensión más clara de los cálculos realizados en este capítulo y de los diferentes datos que intervinieron en el diseño.

Tabla 15: Nomenclatura de las variables de cálculo y resumen de fórmulas

| Nomenclatura de las variables de cálculo | | | | |
|--|------------------|--|-------------------------|------------------|
| Item | Símbolo | Descripción | Fórmula | Unidad |
| 1 | T_{pasL} | Temperatura de pasteurización | – | °C - °F |
| 2 | T_{amb} | Temperatura ambiente | – | °C - °F |
| 3 | m | masa de la leche | – | Kg |
| 4 | h_f | Entalpía del líquido | – | KJ/Kg |
| 5 | Q_i | Calor ideal | $Q_i = h_{ff} - h_{fo}$ | KJ |
| 6 | Q_{real} | Calor real | $Q_{real} = Q_e * \eta$ | KJ |
| 7 | η | Eficiencia del quemador | – | – |
| 8 | \dot{Q} | Flujo de calor | $\dot{Q} = \frac{Q}{t}$ | KW |
| 9 | t | Tiempo de pasteurización | – | h |
| 10 | ϵ_{sup} | Emisividad de la superficie | TABLAS | – |
| 11 | T_g | Temperatura de la llama | – | °C - °F |
| 12 | T_1 | Temperatura de la base de la olla | – | °C - °F |
| 13 | T_2 | Temperatura de la superficie inferior de la olla | – | °C - °F |
| 14 | σ | Constante de Boltzmann | – | W/m^2K^4 |
| 15 | E_{bg} | Potencia emisiva del gas | $E_{bg} = \sigma T_g^4$ | $\frac{KW}{m^2}$ |

| | | | | |
|----|--------------------|--|--|------------------|
| 16 | E_{b1} | Potencia emisiva de la base de la olla | $E_{b1} = \sigma T_1^4$ | $\frac{KW}{m^2}$ |
| 17 | E_{b2} | Potencia emisiva de la superficie inferior | $E_{b2} = \sigma T_2^4$ | $\frac{KW}{m^2}$ |
| 18 | L_e | Longitud media equivalente | $L_e = 1,8L$ | m |
| 19 | P_g | Presión del gas | - | atm |
| 20 | P_{CO_2} | Presión parcial de bióxido de carbono | $P_{CO_2} = \%CO_2 * P_g$ | $\frac{KN}{m^2}$ |
| 21 | P_{H_2O} | Presión parcial del vapor de agua | $P_{H_2O} = \%H_2O * P_g$ | $\frac{KN}{m^2}$ |
| 22 | ϵ_{CO_2} | Emisividad de dióxido de carbono | TABLAS | - |
| 23 | ϵ_{H_2O} | Emisividad de vapor de agua | TABLAS | - |
| 24 | C_{CO_2} | Factor corrección para la emisividad de dióxido de carbono | TABLAS | - |
| 25 | C_{H_2O} | Factor corrección para la emisividad de vapor de agua | TABLAS | - |
| 26 | Δ_ϵ | Factor de corrección para dióxido de carbono y vapor de agua | TABLAS | - |
| 27 | ϵ_g | Emisividad total de la mezcla | $\epsilon_g = C_{CO_2}\epsilon_{CO_2} + C_{H_2O}\epsilon_{H_2O} - \Delta_\epsilon$ | - |
| 28 | ϵ'_{CO_2} | Emisividad prima de dióxido de carbono | TABLAS | - |
| 29 | ϵ'_{H_2O} | Emisividad prima de vapor de Agua | TABLAS | - |
| 30 | Δ_α | Factor de corrección prima para la absorbencia CO_2 y H_2O | TABLAS | - |
| 31 | α_{CO_2} | Absorbencia de dióxido de carbono en la base de la olla | $\alpha_{CO_2} = C_{CO_2}\epsilon'_{CO_2} \left(\frac{T_g}{T_1}\right)$ | - |
| 32 | α_{H_2O} | Absorbencia de vapor de agua en la base de la olla | $\alpha_{H_2O} = C_{H_2O}\epsilon'_{H_2O} \left(\frac{T_g}{T_1}\right)$ | - |
| 33 | $\alpha_g(T_1)$ | Absorbencia total de la mezcla | $\alpha_g(T_1) = \alpha_{CO_2} + \alpha_{H_2O} - \Delta_\alpha$ | - |
| 34 | $\tau_g(T_1)$ | Transmitividad para desde la base de la olla | $\tau_g(T_1) = 1 - \alpha_g(T_1)$ | - |

| | | | | |
|----|---------------------|---|--|---------------------|
| 35 | ϵ''_{CO_2} | Emisividad dos prima del dióxido de carbono | TABLAS | - |
| 36 | ϵ''_{H_2O} | Emisividad dos prima de vapor de agua | TABLAS | - |
| 37 | Δ'_α | Factor de corrección prima para CO2 y H2O | TABLAS | - |
| 38 | α''_{CO_2} | Absorbencia de dióxido de carbono en la sup. inferior | $\alpha_{CO_2} = C_{CO_2} \epsilon'_{CO_2} \left(\frac{T_g}{T_1} \right)$ | - |
| 39 | α''_{H_2O} | Absorbencia de vapor de agua en la sup. Inferior | $\alpha_{H_2O} = C_{H_2O} \epsilon'_{H_2O} \left(\frac{T_g}{T_1} \right)$ | - |
| 40 | $\alpha_g(T_2)$ | Absorbencia total de la mezcla en la sup. Inferior | $\alpha_g(T_1) = \alpha_{CO_2} + \alpha_{H_2O} - \Delta_\alpha$ | - |
| 41 | $\tau_g(T_2)$ | Transmitividad desde la sup. Inf. | $\tau_g(T_1) = 1 - \alpha_g(T_1)$ | - |
| 42 | G_1 | Irradiación en la superficie de la base de la olla | $G_1 = \epsilon_g(T_g) E_{bg} + \tau_g(T_2) E_{b2}$ | $\frac{KN}{m^2}$ |
| 43 | G_2 | Irradiación en la superficie Inferior | $G_2 = \epsilon_g(T_g) E_{bg} + \tau_g(T_1) E_{b1}$ | $\frac{KN}{m^2}$ |
| 44 | Q_r | Calor que ingresa por radiación | $Q_r = 14,227 \frac{KW}{m^2} * \frac{(1m)^2 \pi}{4}$ | KW |
| 45 | L_c | Longitud característica de la placa | $L_c = \frac{A_{placa plana}}{P_{placa plana}} = \frac{A}{P}$ | ft |
| 46 | β | Coefficiente de expansión térmica | $\beta = \frac{1}{T_\infty}$ | $^{\circ}R$ |
| 47 | T_p | Temperatura de la película | $T_p = \frac{T_g + T_1}{2}$ | $^{\circ}F$ |
| 48 | γ | Viscosidad cinemática | - | pie^2/s |
| 49 | Pr | Número de Prandtl | - | - |
| 50 | k | Coefficiente de conductividad térmica | - | $BTU/hpte^{\circ}F$ |
| 51 | Gr_L | Número de Grashof | $Gr_L = \frac{g \beta \Delta T L_c^3}{\gamma^2}$ | - |

| | | | | |
|----|---------------|---|---|--------------------------|
| 52 | Ra_{Lc} | Número de Rayleigh | $Ra_{Lc} = Pr * Gr_L$ | - |
| 53 | Nu_{prom} | Número de Nusselt | $Nu_{prom} = 0,27(Ra_{Lc}^{1/4})$ | - |
| 54 | h_{prom} | Coefficiente de convección | $h_{prom} = \frac{Nu_{prom} * k}{L_c}$ | $\frac{BTU}{hpie^{2u}F}$ |
| 55 | Q_h | Transferencia de calor por convección | $Q_h = hA(Tf_{leche} - T_{\infty})$ | KW |
| 56 | Q_T | Transferencia de calor total | $Q_T = Q_r + Q_h$ | KW |
| 57 | h_r | Coefficiente de Radiación | $h_r = 4\epsilon\sigma T_p^3$ | $\frac{W}{m^2 k}$ |
| 58 | Q_{rp} | Pérdidas de calor por radiación | $Q_{rp} = h_r A_T (T_{p asL} + T_{\infty})$ | KW |
| 59 | Q_{hp} | Pérdidas de calor por convección | $Q_{hp} = hA(Tf_{leche} - T_{\infty})$ | KW |
| 60 | Q_{TP} | Pérdidas totales por transferencia de calor | $Q_{TP} = Q_r + Q_h$ | KW |
| 61 | Q_{Req} | Cantidad de calor requerido | $Q_{ReqT} = Q_{TP} + Q_{req}$ | KW |
| 62 | vcn | Valor calorífico neto | - | $\frac{KJ}{m^3}$ |
| 63 | VG | Volumen diario de biogás | $VG = Cb * (t + 0.5) * 2$ | m ³ /d |
| 64 | Pv | Peso promedio c/animal | - | Kg |
| 65 | E | Estiércol recogido (semi-estabulado) | - | % |
| 66 | $E_{c/v}$ | Estiércol por animal | - | Kg/d |
| 67 | PB | Producción de biogás por Kg de estiércol vacuno | - | m ³ /Kg |
| 68 | $Cant_{H_2O}$ | Cantidad de agua por kilogramo de estiércol | - | Lt |

| | | | | |
|----|----------|--|--|----------------|
| 69 | TR | Tiempo de retención | - | día |
| 70 | C_{ed} | Cantidad diaria de estiércol necesario | $C_{ed} = \frac{VG}{PB}$ | Kg/d |
| 71 | ST | Sólidos totales | $ST = \frac{C_{ed} * 149\%}{100\%}$ | Kg/d |
| 72 | SV | Sólidos volátiles | $SV = \frac{ST * 83\%}{100\%}$ | Kg/d |
| 73 | VL_d | Volumen del líquido diario | $VL_d = C_{ed} + 2(C_{ed})$ | Lt/d |
| 74 | VL | Volumen del líquido | $VL = \frac{VL_d * TR}{1000}$ | m ³ |
| 75 | $\#v$ | Nº de vacas | $\#v = \frac{C_{ed}}{E_{c/v}}$ | NA |
| 76 | VT | Volumen Total del digestor | $VT = VL + VG$ | m ³ |
| 77 | R | Radio básico | $R = \sqrt[3]{VT / (\pi * 1,121)}$ | m |
| 78 | U | Unidad proporcional | $U = \frac{R}{4}$ | m |
| 79 | R | Radio de la cúpula | $R_c = 5U$ | m |
| 80 | D | Diámetro | $D = 8U$ | m |
| 81 | hc | Altura de la cúpula | $hc = 2U$ | m |
| 82 | hp | Altura de la pared | $hp = 3U$ | m |
| 83 | ht | Altura del cono base | $ht = 0,15D$ | m |
| 84 | V1 | Volumen del cilindro | $V1 = \pi * R^2 * hp$ | m ³ |
| 85 | V2 | Volumen del segmento esférico | $V2 = \pi * hc^2 \left[R_c - \left(\frac{hc}{3} \right) \right]$ | m ³ |
| 86 | V3 | Volumen del cono base | $V3 = \frac{\pi * R^2 * ht}{3}$ | m ³ |

CAPÍTULO IV

ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DEL BIODIGESTOR TIPO CÚPULA FIJA

4.1. Introducción

En este capítulo, se definen las especificaciones y parámetros a tomar en cuenta en la construcción del biodigestor, así como para su puesta en marcha, los mismos que asegurarán un óptimo funcionamiento de acuerdo a los requerimientos planteados.

Se especifica también el procedimiento para realizar un mantenimiento correcto del biodigestor, el cual permitirá obtener los resultados deseados y prolongar la vida útil del digestor.

4.2. Especificaciones de construcción

4.2.1. Ubicación del digestor ⁹¹

La ubicación de un biodigestor es tan importante como su propia construcción, una correcta ubicación desempeña un papel importante para su fácil manejo y operación. Los principales aspectos que se deben tener en cuenta al ubicar un biodigestor son los siguientes:

- Seleccionar el lugar más cercano posible, a la fuente de materia prima.
- Debe procurarse que la topografía del terreno permita el cargado de la planta por gravedad.
- En el lugar de instalación debe existir una fuente de agua para realizar la mezcla y mantener la limpieza de la planta.
- La instalación donde se utilice el biogás debe encontrarse lo más cerca posible de la planta de biogás.
- La topografía del terreno debe favorecer que la utilización del bioabono líquido se realice por gravedad.
- Se debe evitar el contacto con el manto freático, para prevenir las filtraciones hacia el interior o la contaminación del manto.
- Para lograr un buen trazado de la planta, en el área de construcción es imprescindible eliminar escombros, hierbas, plantas y raíces.

Desde que comienza hasta que termina la construcción, todas las medidas verticales se deben tomar a partir del nivel de referencia, que se establece por encima del nivel del terreno para su fácil control, este nivel se debe mantener inalterable durante toda la construcción, ya que cualquier movimiento o desplazamiento conlleva a errores en la construcción, en ocasiones de gran significación.

⁹¹ GUARDADO, José Antonio, *Diseño y Construcción de Plantas de Biogás*, Editorial CUBASOLAR, Cuba 2007. p. 10, 11.

4.2.2. Excavación ⁹²

La excavación puede realizarse de forma manual o mecanizada. Para la seguridad de los constructores se debe dejar cierta inclinación en las paredes, de acuerdo con el tipo de terreno.

La excavación debe abrirse a la profundidad exacta, para evitar rellenos a la hora de cimentar, por lo que se debe tomar, cada cierto tiempo, medidas verticales a partir del nivel de referencia. Es importante asegurarse de que el fondo de la excavación esté siempre un metro como mínimo por encima del nivel freático para evitar su contaminación. Finalmente se deben realizar observaciones del terreno, para definir sus características generales, que permitan hacer las correcciones pertinentes en caso de que el terreno lo exija para garantizar la resistencia e impermeabilización necesarias.

4.2.3. Construcción de la losa de cimentación ⁹³

Con los niveles correspondientes en la excavación se procede a fundir la losa, lo cual por lo general se realiza manualmente. La nivelación de la superficie de terminación de la losa se efectúa con la ayuda de la escuadra de madera.

En caso de losas de hormigón, se recomienda que ésta posea una resistencia de 15Mpa, para que sea resistente a la compresión a que estará sometida y, además, debe ser impermeable, lo que se logra mediante la adecuada dosificación de los agregados, la relación agua – cemento de la mezcla debe ser menor o igual a 0,5. Es recomendable que la fundición de la losa se realice en un solo día, para que todo el hormigón posea la misma edad y se eviten juntas de fundición.

⁹² GUARDADO, José Antonio. Op. Cit. p. 11, 12.

⁹³ Idem. p. 46.

4.2.4. Construcción del muro cilíndrico ⁹⁴

En la conformación del muro generalmente se utilizan bloques de 20 o 15 cm de espesor, es importante que al levantar el muro se tengan en cuenta los orificios de tuberías o conductos de entrada y salida de los desechos.

4.2.5. Construcción de la viga de cerramiento o de apoyo

Esta viga de apoyo, sirve como elemento de cierre del muro y a la vez, de apoyo de la cúpula. Se funde con hormigón armado con una resistencia de 20Mpa de forma uniforme sobre el muro, es importante que la superficie superior de la viga, una vez fundida, posea la debida inclinación, de manera que se logre el ángulo preciso con que debe colocarse la primera hilada de los ladrillos que conforman la cúpula.

4.2.6. Construcción de la cúpula o domo esférico

Para la colocación de la primera fila de ladrillos de la cúpula, se utiliza como guía la superficie superior de la viga de cerramiento. El radio debe señalarse mediante una estaca clavada, correctamente aplomada en su canto inferior, de manera que indique la posición del interior en el que debe quedar colocado cada ladrillo.

4.2.7. Construcción de la viga de cierre

Sirve de elemento de cierre de la cúpula, manteniendo el orificio necesario en ésta para el acceso o inspección del interior del biodigestor. Además, sirve de base para el cuello. Su sección es trapezoidal y se conforma con hormigón armado de una resistencia de 15 a 20Mpa.

⁹⁴ GUARDADO, José Antonio. Op. Cit. p. 47.

4.2.8. Construcción del cuello ⁹⁵

Sobre la viga se construye el cuello, que tiene forma cilíndrica y se conforma con ladrillos que se colocan hasta alcanzar la altura a la que se coloca la tapa, que sirve como cierre hermético del biodigestor. Posteriormente se funde el asiento para la tapa.

El mortero para la colocación de los ladrillos debe tener una dosificación de 1:3 (cemento y arena), mientras que el hormigón 1:2:3 (uno de cemento, dos de arena y tres de piedra).

4.2.9. Construcción de la tapa de hormigón ⁹⁶

La tapa que se debe fundir garantiza el cierre hermético del biodigestor, generalmente se funden aparte, mediante el empleo de moldes con las dimensiones establecidas. En la conformación de la tapa puede emplearse hormigón con arena fina (gravilla), con resistencia de 15 Mpa, colocando una malla de alambre como refuerzo.

4.2.10. Herramientas empleadas para la construcción

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

⁹⁵ GUARDADO, José Antonio. Op. Cit. p. 48.

⁹⁶ Idem. p. 48.

4.2.11. Trabajos de acabado⁹⁷

Los trabajos de acabado constituyen un proceso de máxima importancia para una obra, ya que son los que garantizan la debida protección de los elementos que la componen, y a la vez brindarle la adecuada estética a todo el conjunto.

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

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

4.2.12. Impermeabilización

En zonas de acumulación de gas, como el interior de la cúpula y el cuello, es recomendable, aplicar un estucado para la aplicación de la protección impermeabilizante. Esta última generalmente se obtiene mediante el empleo de varias manos de pintura a base de agua con cemento.

⁹⁷ GUARDADO, José Antonio. Op. Cit. p. 49, 50.

4.3. Puesta en marcha del biodigestor ⁹⁸

La puesta en marcha de una planta de biogás requiere de un grupo de operaciones que aseguran el éxito del funcionamiento. Los requerimientos principales a tener en cuenta para el logro de este propósito son:

- Después de ser construido, el digestor debe ser curado, para ello se llena de agua sin carga orgánica durante diez o doce días.
- Cargar el digestor tan rápido como se pueda (durante la etapa de curado se puede acumular la mayor cantidad de excreta posible para disponer del volumen necesario).
- Una vez lleno el digestor, no se debe adicionar más mezcla hasta pasados quince días, aproximadamente.
- El tiempo de puesta en marcha puede ser disminuido, utilizando un inóculo proveniente de otro digestor en operación donde ya existe la presencia de las bacterias metanogénicas.
- Dejar abierta la válvula de salida del gas durante el período de espera (para dejar escapar el aire).
- Dejar escapar el gas inicial ya que puede ser explosivo y peligroso, o también no ser combustible por exceso de dióxido de carbono (CO₂).

⁹⁸ GUARDADO, José Antonio. Op. Cit. p. 51.

4.4. Mantenimiento del biodigestor ⁹⁹

Para obtener un funcionamiento óptimo del biodigestor, es necesario seguir algunos pasos sencillos:

- **Remoción de Sedimentos:** Cada 3 a 5 años es necesario quitar los sedimentos que están en el fondo del reactor del Biodigestor. Lo más sencillo es rentar un camión para bombear lodos, y pedir que ellos metan la manguera hasta el fondo del reactor para sacar los lodos acumulados en el fondo. Si se cuenta con una bomba de lodos, se podrá realizar esta actividad.
- Diariamente se debe cuidar que solo se introduzca agua y excremento al biodigestor. Por ningún motivo deberán ingresar objetos como piedras, basura, vidrios, tierra, etc. Se recomienda colocar una rejilla o malla de criba como coladera en la salida del tanque de mezcla. La presencia de estos materiales forma costras que impiden el movimiento del agua y la salida del gas.
- Para evitar la formación de nata (residuos de desechos flotantes) que se puede producir en el interior del digestor, es muy importante que el mezclado de los desechos con el agua, sea lo más uniforme posible, para ello, se deberá dedicar un tiempo prudencial durante el mezclado.
- Para asegurar el funcionamiento correcto del biodigestor, se deben drenar la trampa de agua y los puntos bajos de las tuberías aproximadamente cada 2 meses. De esta manera se evita la acumulación de residuos que devengan en el mal funcionamiento del digestor.
- **Cambio de filtro de ácido sulfhídrico:** Es necesario cambiar el filtro de ácido sulfhídrico cada 3 meses o cuando se detecte olor de azufre saliendo de las hornillas (olor similar a un huevo en descomposición). El filtro es un lustre o rebaba de hierro oxidable que se ubica en la tee de la trampa de agua.

⁹⁹ GUARDADO, José Antonio. Op. Cit. p. 52.

Para cambiar el filtro se deben usar guantes y protección de ojos (el polvo acumulado en el filtro viejo es muy corrosivo), cerrar la válvula de paso a la salida del biodigestor, retirar del interior el lustre de hierro viejo y colocar un lustre nuevo.

4.5. Medidas de seguridad ¹⁰⁰

- Si se aplica antibióticos o vacunas a los animales, no se deben colocar sus desechos durante 4 días, para que el excremento contaminado no entre al sistema, inhibiendo la producción de biogás.
- **Limpieza:** Las áreas alrededor del biodigestor deberán mantenerse limpias y libres de cualquier elemento que pueda caer dentro del tanque de mezcla. El área del biodigestor deberá estar libre de elementos que puedan por su composición inhibir la producción del biogás.
- Evitar la presencia de residuos de aceite, jabón, detergentes o antibióticos (estos materiales pueden destruir las bacterias metanogénicas).
- **Revisión:** Es importante inspeccionar diariamente todos los componentes del sistema: la botella que mantenga su nivel de agua, que las conexiones de las mangueras y tuberías no tengan fugas, que los tubos de entrada y salida en el reactor no estén bloqueados y que las mangueras no tengan agua obstruyendo el paso del gas.

¹⁰⁰ GUARDADO, José Antonio. Op. Cit. p. 53.

4.6. Seguridad industrial para la operación y mantenimiento del digestor ¹⁰¹

El personal de mantenimiento y operaciones deberá utilizar equipo de protección adecuado y seguir los procedimientos que se requiera para resguardar su seguridad y la de aquellos que trabajen en sus inmediaciones. Para la utilización segura de los aparatos de protección personal, se deberá instruir adecuadamente a los empleados respecto a la selección, utilización, y mantenimiento de los mismos.

- **Protección ocular:** La protección para los ojos deberá usarse debido a que en el manejo y operación de un biodigestor existen riesgos de lesiones biológicas y químicas.



- **Protección de las manos:** Para evitar que las sustancias tóxicas entren en contacto con la piel, se deberá usar una protección adecuada para las manos. De acuerdo al tipo de sustancia que se manipula en los biodigestores se recomiendan guantes de caucho resistente.



- **Protección de la cabeza:** Como práctica estándar, se deberán usar cascos de seguridad para proteger la cabeza del empleado.



¹⁰¹ CORTÉZ, José María, Seguridad e higiene del trabajo, 9^{na} Edición, Editorial TÉBAR S.L., Madrid - España 2007. p. 489 – 492.

- **Protección de los pies:** Se deberá utilizar una protección para los pies, a fin de protegerlos del contacto con los desechos. La protección de los pies deberá incluir botas impermeables de caña alta.



- **Protección del aparato respiratorio:** Para proteger a los empleados contra los contaminantes suspendidos en el aire, se debe usar una mascarilla. Estas máscaras ayudan a protegerse de contaminantes.



CAPÍTULO V

ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DEL PROYECTO

5.1. Introducción

En este capítulo, se evaluará la conveniencia de implantar el biodigestor tipo cúpula fija para generación de biogás, a ser utilizado como combustible para la pasteurización de 200 litros de leche dentro del proceso de elaboración de quesos, como una alternativa al uso de tanques domésticos de GLP, utilizados actualmente.

Se expondrán las ventajas que presenta esta alternativa, se definirá el costo de la inversión del proyecto y se realizará un análisis comparativo entre la solución propuesta y el uso de tanques de GLP.

5.2. Ventajas de la implementación del biodigestor propuesto

Las principales ventajas que se obtienen de la implementación de un biodigestor para generación de biogás se describen a continuación:

- El biogás constituye una abundante y barata fuente de energía, de fácil obtención a partir de desechos animales, vegetales e industriales. Esta energía puede ser utilizada en numerosos procesos que tienen incidencia en la economía, no solo por la generación de energía sino también por la producción de biofertilizantes de alta calidad.
- Desde el punto de vista energético, el biogás constituye una fuente energética renovable y limpia. Además, su utilización contribuye a reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles y proporciona seguridad en cuanto al abastecimiento energético.
- La combustión del biogás genera menos elementos nocivos que los combustibles tradicionales, reduciendo así las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero a la atmósfera.
- Para el caso particular del lugar donde se pretende implantar esta tecnología, su aplicación no solo permitiría el abastecimiento energético por aproximadamente 20 años, sino que soluciona el problema de la eliminación de desechos provenientes del ganado, mejorando así la salud y la higiene.
- Finalmente, la ventaja principal que la implementación de este proyecto traería consigo, es la disminución del costo de tanques de GLP, que además debería ser mayor si se considera que por ser un negocio, se deberían adquirir los tanques de uso industrial a un costo sensiblemente superior.

5.3. Costo del proyecto

Tabla 16: Costo de la inversión del proyecto

| LISTA DE RUBROS Y PRECIOS | | | | | |
|---------------------------|--|----------------|----------|--------------|----------------|
| Ítem | Material | Unidad | Cantidad | Precio Unit. | Precio Total |
| 1 | Hormigón simple F'C=180Kg/cm ² | m ³ | 8,5 | 66,16 | 562,36 |
| 2 | Varilla corrugada antisísmica A-42S D=12mm | qq | 5 | 49,27 | 246,35 |
| 3 | Ladrillo estructural 8CM, 43xm ² , 14x8x29 | m ² | 12,5 | 16,36 | 204,50 |
| 4 | Cemento Chimborazo (50Kg) | Kg | 5 | 7,00 | 35,00 |
| 5 | Arena cribada para hormigones | m ³ | 4 | 7,00 | 28,00 |
| 6 | Encofrado muro E=0,3-1Lado | m ³ | 8,5 | 29,55 | 251,18 |
| 7 | Pintura impermeable Agua Stop Cóndor | cc | 1 | 17,62 | 17,62 |
| 8 | Tubo de PVC sanitario 110mm | m | 1,55 | 4,16 | 6,448 |
| 9 | Tubo de PVC sanitario 160mm | m | 2,6 | 9,5 | 24,7 |
| 10 | Válvula de media vuelta de 1/2" | u | 2 | 4 | 8 |
| 11 | Manguera reforzada de 3/4" | m | 3 | 3,75 | 11,25 |
| 12 | Tubería PVC (presión roscable) 3/4" (6m) | m | 1 | 11,09 | 11,09 |
| 13 | Codo PVC 45 CED 80 (presión roscable) de 3/4" | u | 1 | 0,57 | 0,57 |
| 14 | Tee PVC CED 40 (presión roscable) de 3/4" | u | 1 | 0,8 | 0,8 |
| 15 | Excavación de zanjas a mano en tierra h=2,75m | m ³ | 6,94 | 24,60 | 170,72 |
| 16 | Albañil | d | 12 | 25,00 | 300,00 |
| 17 | Ayudante | d | 12 | 20,00 | 240,00 |
| | | | | Total | 2118,59 |

5.4. Análisis comparativo

Para determinar que la construcción del biodigestor es viable, es necesario comparar los costos que demanda la compra actual de los tanques domésticos de GLP. Para ello de acuerdo a la tabla 16, se conoce que 1m^3 de biogás equivale a 2.309 Kg de GLP.

Tabla 17: Equivalencia del biogás con otras fuentes de energía

| Name of Fuel | Unit | Biogas (1m^3) | Kerosene (1 litre) | Fire-wood (1 kg) | Cowdung cake (1 kg) | Charcoal (1 kg) | Soft-coke (1 kg) | LPG (1 kg) | Furnance Oil (1 litre) | Coal gas (1m^3) | Electricity (1 kWh) |
|--------------|--------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|---------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Biogas | m^3 | 1.0 | 1.613 | 0.288 | 0.081 | 0.686 | 0.623 | 2.309 | 2.398 | 0.849 | 0.213 |

Fuente: Nijaguna B. T., Biogas Technology, 2002

Los tanques que se distribuyen en el territorio ecuatoriano para uso doméstico e industrial tienen una capacidad de 15Kg. De los cálculos realizados para el diseño, se obtuvo que el volumen necesario para cubrir la demanda energética para el calentamiento diario de la leche es de $4,287\text{m}^3$.

Entonces:

Para encontrar la cantidad de kilogramos de GLP, que pueden ser remplazados al implementar el biodigestor, se tiene la siguiente operación:

$$GLP_{Kg} = 4,287 * 2.309Kg$$

$$GLP_{Kg} = 9.89 \approx 10Kg$$

El valor de 10Kg corresponde a dos tercios del contenido total de un tanque de GLP. Entonces para conocer la cantidad de tanques que se usan al mes se tiene la siguiente regla de tres:

Consumo diario \rightarrow 2/3 cilindro

Consumo mensual (30días) $x = 20$ cilindros.

Con un costo comercial del cilindro de gas doméstico de 3,50 dólares en el lugar de implementación debido a la lejanía, y del cilindro industrial de 22 dólares, los costos anuales por concepto de gas son:

Cilindro doméstico

$$C_{adom.} = \$3,50 * 20cilindros * 12meses$$

$$C_{adom.} = \$840$$

Cilindro industrial (Sin subsidio)

$$C_{adom.} = \$22 * 20cilindros * 12meses$$

$$C_{adom.} = \$5280$$

La inversión estimada de \$2118,59, se vería justificada en menos de seis meses, si las disposiciones gubernamentales exigirían de forma definitiva, el uso de tanques industriales a las empresas.

Por otro lado, si se continúa con la compra de los tanques de GLP de uso doméstico, subsidiado por el gobierno, la inversión se recuperaría en lapso de aproximadamente 2 años y medio.

CAPÍTULO VI

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE VERIFICACIÓN DEL PROYECTO

6.1. Introducción

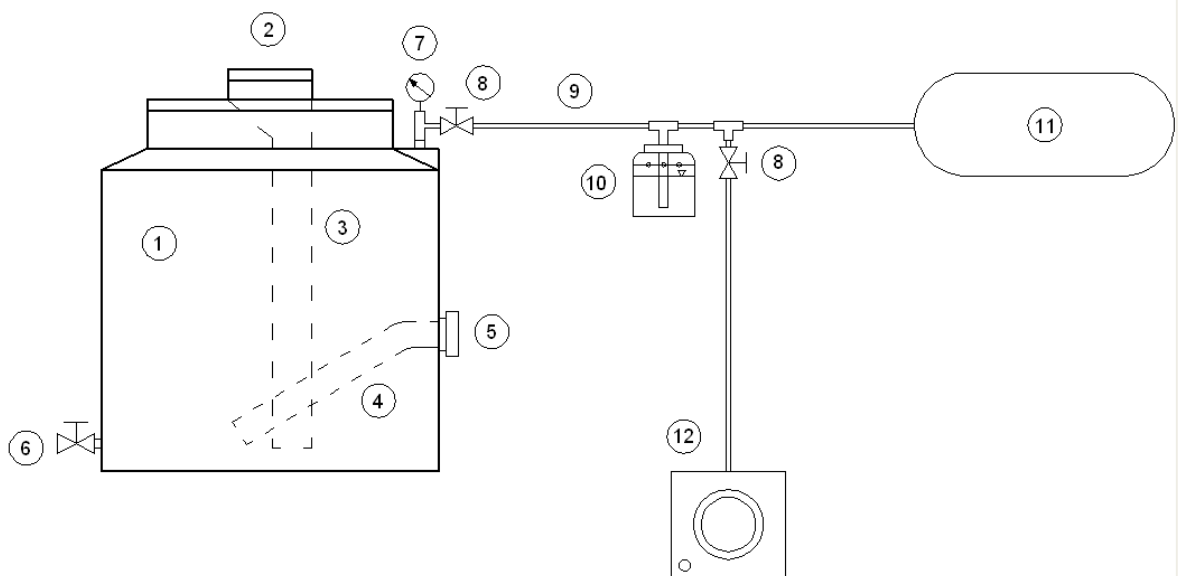
En este capítulo se detallan los materiales, el procedimiento de construcción y el proceso de puesta en marcha en la construcción del modelo de verificación del proceso de biodigestión, que contempla el alcance de esta tesis.

Para esto se realiza un esquema explicativo del modelo, detallando sus partes y se adjuntan respaldos fotográficos que demuestran el proceso de construcción.

El modelo de verificación, consiste en la construcción de un biodigestor a pequeña escala para la demostración del proceso de digestión anaeróbica y la consecuente producción de biogás como fuente de energía. (Ver figura 21)

6.2. Esquema del modelo de verificación

Figura 21: Modelo de verificación



| PARTES DEL MODELO DE VERIFICACIÓN | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1 | Tanque digestor |
| 2 | Tapa para ingreso de mezcla |
| 3 | Tubo para ingreso de carga |
| 4 | Tubo para salida de bioabono |
| 5 | Tapón para salida de bioabono |
| 6 | Válvula para lodos pesados |
| 7 | Manómetro |
| 8 | Válvula de media vuelta |
| 9 | Manguera para flujo de biogás |
| 10 | Válvula de seguridad de agua |
| 11 | Acumulador de gas |
| 12 | Quemador |

6.3. Materiales utilizados en la construcción

En la tabla 17, se enumeran los materiales utilizados en la construcción del modelo de verificación:

Tabla 18: Lista de materiales empleados en la construcción del modelo de verificación

| Item | Descripción |
|-------------|---|
| | Para el tanque digestor |
| 1 | Tanque tipo botella de pie de 250Lt de capacidad |
| 2 | Tubo de PVC de 3plg para ingreso de la materia |
| 3 | Reducción de 4 a 3plg (para conexión entre tapa y tubo de alimentación) |
| 4 | Brida de acero AISI 1018 de 4plg para la tapa de alimentación |
| 5 | Tapa de rosca hermética de PVC de 4plg |
| 6 | Tubo de PVC de 2plg para salida del efluente |
| 7 | Adaptador de 2plg para el tubo de salida |
| 8 | Codo de 45° de 2plg para tubo de salida |
| 9 | Tapón roscado de 2plg para salida del efluente |
| 10 | Adaptador de 1plg para válvula de salida de lodos PESADOS |
| 11 | Válvula de media vuelta de 1plg para salida de lodos pesados |
| 12 | Adaptador de 1/2plg para salida del biogás |
| 13 | Neplo corrido de 1/2plg |
| 14 | Tee de 1/2plg |
| 15 | Bushin de bronce 1/2 a 1/4plg para adaptar el manómetro |
| 16 | Manómetro de 0 a 10 psi |
| 17 | Válvula de media vuelta de 1/2plg para salida del biogás |
| 18 | Pitón de bronce de 1/2plg para adaptar manguera |
| 19 | Manguera para gas de 1/4plg |
| | Para la válvula de seguridad |
| 20 | Recipiente plástico de 2Lt de capacidad con tapa |
| 21 | Tee de 1/2plg |

| | |
|----|--|
| 22 | 2 nepllos corridos de 1/2plg |
| 23 | Tubo de 1/2plg de 15 cm de largo |
| 24 | Codo de 90° de 1/2plg para conexión con manguera |
| 25 | Unión de 1/2plg para sujetar el tubo |
| 26 | Lustre de acero para limpiar el biogás |
| 27 | Para el acumulador de gas |
| 28 | Flotador de vinilo |
| 29 | Manguera transparente de vinilo de 1/4 plg |
| 30 | Pitón de bronce de 1/4plg para adaptar la manguera |
| 30 | Para la línea de consumo |
| 31 | Válvula de media vuelta de 1/2plg para salida del biogás |
| 32 | Tee de 1/2plg |
| 33 | Manguera transparente de vinilo de 1/4 plg |

6.4. Partes principales del modelo de verificación

- Tanque digestor
- Válvula de seguridad de agua
- Acumulador de gas

6.4.1. Tanque digestor

Es el recipiente donde se introduce la mezcla de los desechos orgánicos y el agua para la obtención de biogás. Para este fin, el tanque fue adaptado con una brida para sujetar la tapa del tubo de alimentación para los desechos orgánicos, un tubo para la salida del efluente y una válvula de media vuelta para la descarga de los lodos pesados que se puedan acumular en la en la base del tanque como se muestra en las figuras 22, 23 y 24.

Figura 22: Brida de sujeción



Figura 23: Tubo de salida de lodos



Figura 24: Válvula de salida de lodos



Adicionalmente, como se puede observar en la figura 25, se adaptó al tanque el sistema para la salida del biogás generado en el proceso de digestión anaeróbica, utilizando una válvula de media vuelta y un manómetro, que permitirá visualizar la presión del biogás en el interior del digestor.

Figura 25: Válvula para salida del biogás



Anexo 3: Especificaciones del tanque tipo botella de pie

6.4.2. Válvula de seguridad de agua

La válvula de seguridad permite que el gas que no se ocupe o almacene, pueda escaparse al aire cuando la presión del digester llega a un valor límite. Consta de un recipiente plástico de 2 litros de capacidad, que se llena de agua hasta un nivel que permita ejercer una presión de aproximadamente 10cm de columna de agua (10 mbar = 0,98 kPa). En el recipiente se introduce un tubo de 15cm de largo conectado a una T en la manguera de flujo del biogás, en la que se inserta un poco de lustre de acero, con el fin de eliminar el ácido sulfhídrico que contiene el gas producido, como se muestra en la figuras 26 y 27.

Figura 26: Lustre para depuración



Figura 27: Válvula de seguridad



Para permitir la salida del gas es necesario realizar algunos agujeros de 5 mm de diámetro aproximadamente a unos 4cm de la tapa del recipiente.

6.4.3. Acumulador de gas

El acumulador de gas es un recipiente donde se almacena el gas producido. Para la construcción del modelo de verificación, se utilizó un flotador de vinilo como se muestra en la figura 28.

Figura 28: Acumulador de gas



Para el consumo del biogás, se insertó una T entre la válvula de seguridad y el acumulador de gas, donde se conectó una válvula de media vuelta para permitir el paso del biogás al equipo de consumo.

6.5. Puesta en marcha

Una vez construido el modelo de verificación, se procedió al llenado del tanque digestor con desechos provenientes de ganado vacuno y agua, en una proporción de 2 a 1, es decir que por un kilogramo de desechos, se colocó 2 litros de agua. (Ver figuras 29 y 30)

Figura 29: Elaboración de la mezcla



Figura 30: Llenado del tanque



La cantidad de mezcla que se introdujo en el tanque, fue igual a un tercio del volumen total.

Finalmente se tapó el digestor y transcurridos aproximadamente 35 días, considerando una temperatura de 17°C promedio de la ciudad de Quito, de acuerdo a la tabla 13, se empieza a generar el biogás para su posterior consumo. (Ver figura 31)

Figura 31: Combustión del biogás



CONCLUSIONES

- Mediante los cálculos realizados, se puede establecer que el diseño del biodigestor anaeróbico tipo cúpula fija para generación de biogás, planteado en esta tesis, garantiza el abastecimiento de biogás para la pasteurización diaria de 200 litros de leche dentro del proceso de elaboración de quesos, sustituyendo así el uso de tanques domésticos de GLP.
- Los planos del biodigestor de tipo cúpula fija, elaborados a partir de los cálculos de diseño, contienen en lo posible todas las especificaciones y detalles constructivos, que permitirán la implementación de esta tecnología.
- De los resultados obtenidos a partir del análisis de costo – beneficio del proyecto, se arroja como conclusión que el proyecto es factible y que en efecto, su implementación permite sustituir de forma total el uso actual de tanques de GLP, generando así mayores ganancias a la empresa.
- La construcción del modelo de verificación del proceso de digestión anaeróbica, permitió comprobar de manera práctica, que el biogás que se obtiene es una fuente de energía que al combustionar, genera el calor suficiente para el calentamiento de la leche.
- La implementación del biodigestor propuesto en esta tesis, persiguió no solo el abastecimiento energético, sino también resolver en parte el problema de la eliminación de los desechos y lo que esto conlleva para la salud y el medio ambiente. Al tratar los desechos no solo se obtendrá energía, también se podrá aprovechar el fertilizante obtenido en el proceso para mejorar la calidad de los suelos.
- Los criterios de mantenimiento y seguridad industrial expuestos en el cuarto capítulo, asegurarán que la operación del biodigestor se realice de forma segura y correcta, permitiendo el funcionamiento óptimo del sistema.

RECOMENDACIONES

- Es importante realizar un monitoreo permanente de las diferentes variables que están involucradas en la generación del biogás como el pH, la temperatura, los compuestos inhibidores como el oxígeno y el hidrógeno, entre otros. Así mismo efectuar un muestreo del efluente para su análisis químico respectivo, ya que de esta manera se puede determinar y monitorear el funcionamiento del digestor.
- Se considera una buena práctica para acelerar el proceso de obtención de biogás, inocular el digestor mediante lodos ya activados de otro digestor que se encuentre generando biogás.
- Debido a que las vacas de la propiedad en cuestión son alimentadas con el suero proveniente de la elaboración de quesos, se recomienda efectuar un estudio sobre el impacto que esta alimentación produce en la generación de biogás, para de ser necesario tratar a los desechos.
- La tecnología para generación de biogás, puede contribuir de forma importante a la conservación del medio ambiente y al desarrollo industrial a pequeña y a gran escala. Sin embargo, el monto de dinero requerido para la instalación de las plantas puede ser en muchos casos prohibitivo para la población rural. Por ello, se deben concentrar los esfuerzos en desarrollar sistemas más baratos y en proveer de créditos u otras formas de financiación, que a largo plazo permiten reducir gastos relacionados con la importación de derivados del petróleo, fertilizantes inorgánicos y contribuyen a la salud y la higiene.
- Es necesario que se capacite al personal que estará a cargo del mantenimiento y operación del biodigestor, con todos los conocimientos necesarios, así se

asegurará no solo un buen funcionamiento, sino una prolongada durabilidad del sistema.

- Se recomienda dotar a los trabajadores con los implementos de seguridad como guantes, gafas, botas, entre otros utensilios, necesarios para asegurar que al operar el biodigestor, no exista ningún riesgo.

GLOSARIO

Fuentes renovables: Son las fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

Combustibles fósiles: Los combustibles fósiles son aquellos que se formaron hace millones de años a partir de la descomposición de restos orgánicos de plantas y animales.

Investigación inductiva: Consiste en establecer enunciados universales ciertos a partir de la experiencia, es decir, ascender lógicamente a través del conocimiento científico, desde la observación de los fenómenos o hechos de la realidad a la ley universal que los contiene.

Método hipotético deductivo: Es el procedimiento que sigue el investigador para hacer de su actividad una práctica científica. Consiste en 4 pasos esenciales:

- Observación del fenómeno a estudiar
- Planteamiento de una hipótesis
- Deducción de las consecuencias
- Verificación de los enunciados

Oleaginosas: Las plantas oleaginosas son vegetales de cuya semilla o fruto puede extraerse aceite tanto comestible como para uso industrial. Las oleaginosas más comunes son la soya, la palma, el maní, el girasol, el maíz y el lino.

Lignocelulósicos: Son residuos considerados sobrantes o subproductos de bajo valor, para la obtención de energía.

Chopo: Nombre que se da a varias especies de álamos, caracterizados por estar provistos de numerosos abultamientos.

Cardo: Semilla de la cual, una vez prensada, se puede obtener un aceite que funciona como base del combustible biológico.

Gasógeno: Es un aparato que funciona usando la gasificación, para obtener combustible gaseoso a partir de combustibles sólidos como el carbón, la leña o casi cualquier residuo combustible.

Efluente: Junto con el biogás es el producto que se obtiene de la digestión anaeróbica, el cual se considera en excelente biofertilizante.

Acido acético: Es un líquido que se obtiene por oxidación a partir del alcohol etílico.

Metanol: El metanol es un combustible que puede ser fabricado fácilmente a partir del metano, principal componente del gas natural, así como por la pirólisis de materiales orgánicos.

Microorganismos: Son organismos que a diferencia de las plantas y los animales, presentan una organización biológica elemental. En su mayoría son unicelulares,

Enzimas: Son moléculas de naturaleza proteica que catalizan reacciones bioquímicas. Una enzima hace que una reacción química que es energéticamente posible, pero que transcurre a una velocidad muy baja, sea cinéticamente favorable, es decir, transcurra a mayor velocidad que sin la presencia de la enzima.

Despolimerizar: El proceso de despolimerización consiste en transformar las moléculas de cadena larga, en cadenas cortas o sencillas.

Acido acético: El ácido acético es de origen natural, está presente en cantidades pequeñas en muchos alimentos. En altas concentraciones se presenta a consecuencia de la actividad de las bacterias en los alimentos fermentados.

Acetato: el acetato es la sal que se forma a través de la mezcla del ácido acético con una base.

Amoniaco: Es un compuesto químico cuya molécula consiste en un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de hidrógeno (H) de acuerdo a la fórmula NH_3 . El amoníaco, a temperatura ambiente, es un gas incoloro de olor muy penetrante y nauseabundo. Se produce naturalmente por descomposición de la materia orgánica y se fabrica industrialmente.

Celulosa: La celulosa es un hidrato de carbono polimérico que se encuentra en las paredes de las células de las plantas. Se obtiene de la madera, el algodón, el lino, el yute, el cáñamo, la paja, y de plantas de crecimiento rápido.

Octanaje: Es una medida de la calidad y capacidad antidetonante de los combustibles, para evitar las detonaciones o explosiones en las máquinas de combustión interna, de tal manera que se libere o se produzca la máxima cantidad de energía útil.

Alcanoamina: Es un compuesto nitrogenado con estructura piramidal, similar al amoníaco.

Reformado: El reformado es un proceso químico utilizado para refinar un combustible, mediante la transformación de hidrocarburos parafínicos y nafténicos en isoparafínicos.

Oxidación parcial: Es la reacción que se produce cuando una mezcla sub-estequiométrica, aire-combustible, se quema parcialmente, creando un gas sintético rico en hidrógeno, que puede ser usado posteriormente.

Reacción exotérmica: Se denomina reacción exotérmica a cualquier reacción química que desprende calor.

Composta: La composta (también llamada humus), se forma por la descomposición de productos orgánicos y sirve para abonar la tierra.

PLANOS ANEXOS

Anexo 2: Valores de propiedades del aire a presión atmosférica

| $T,$ F | $\rho,$ lb/pie ³ | $c_p,$ Btu/lb F | $\mu,$ lb/seg pie | $\nu,$ pie ² /seg | $k,$ Btu/h pie°F | $\alpha,$ pie ² /h | Pr |
|-----------|--------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------|-------|
| Aire | | | | | | | |
| -280 | 0.2248 | 0.2452 | 0.4653 | 2.070 | 0.005342 | 0.09691 | 0.770 |
| -190 | 0.1478 | 0.2412 | 0.6910 | 4.675 | 0.007936 | 0.2226 | 0.753 |
| -100 | 0.1104 | 0.2403 | 0.8930 | 8.062 | 0.01045 | 0.3939 | 0.739 |
| -10 | 0.0882 | 0.2401 | 1.074 | 10.22 | 0.01287 | 0.5100 | 0.722 |
| 80 | 0.0735 | 0.2402 | 1.241 | 16.88 | 0.01516 | 0.8587 | 0.708 |
| 170 | 0.0623 | 0.2410 | 1.394 | 22.38 | 0.01735 | 1.156 | 0.697 |
| 260 | 0.0551 | 0.2422 | 1.536 | 27.88 | 0.01944 | 1.457 | 0.689 |
| 350 | 0.0489 | 0.2438 | 1.669 | 31.06 | 0.02142 | 1.636 | 0.683 |
| 440 | 0.0440 | 0.2459 | 1.795 | 40.80 | 0.02333 | 2.156 | 0.680 |
| 530 | 0.0401 | 0.2482 | 1.914 | 47.73 | 0.02519 | 2.531 | 0.680 |
| 620 | 0.0367 | 0.2520 | 2.028 | 55.26 | 0.02692 | 2.911 | 0.680 |
| 710 | 0.0339 | 0.2540 | 2.135 | 62.98 | 0.02862 | 3.324 | 0.682 |
| 800 | 0.0314 | 0.2568 | 2.239 | 71.31 | 0.03022 | 3.748 | 0.684 |
| 890 | 0.0294 | 0.2593 | 2.339 | 79.56 | 0.03183 | 4.175 | 0.686 |
| 980 | 0.0275 | 0.2622 | 2.436 | 88.58 | 0.03339 | 4.631 | 0.689 |
| 1070 | 0.0259 | 0.2650 | 2.530 | 97.68 | 0.03483 | 5.075 | 0.692 |
| 1160 | 0.0245 | 0.2678 | 2.620 | 106.9 | 0.03628 | 5.530 | 0.696 |
| 1250 | 0.0232 | 0.2704 | 2.703 | 116.5 | 0.03770 | 6.010 | 0.699 |
| 1340 | 0.0220 | 0.2727 | 2.790 | 126.8 | 0.03901 | 6.502 | 0.702 |
| 1520 | 0.0200 | 0.2772 | 2.955 | 147.8 | 0.04178 | 7.536 | 0.706 |
| 1700 | 0.0184 | 0.2815 | 3.109 | 169.0 | 0.04410 | 8.514 | 0.714 |
| 1880 | 0.0169 | 0.2860 | 3.258 | 192.8 | 0.04641 | 9.602 | 0.722 |
| 2060 | 0.0157 | 0.2900 | 3.398 | 216.4 | 0.04880 | 10.72 | 0.726 |
| 2240 | 0.0147 | 0.2939 | 3.533 | 240.3 | 0.05098 | 11.80 | 0.734 |
| 2420 | 0.0138 | 0.2982 | 3.668 | 265.8 | 0.05348 | 12.88 | 0.741 |
| 2600 | 0.0130 | 0.3028 | 3.792 | 291.7 | 0.05550 | 14.00 | 0.749 |
| 2780 | 0.0123 | 0.3075 | 3.915 | 318.3 | 0.05750 | 15.09 | 0.759 |
| 2960 | 0.0116 | 0.3128 | 4.029 | 347.1 | 0.0591 | 16.40 | 0.767 |
| 3140 | 0.0110 | 0.3196 | 4.168 | 378.8 | 0.0612 | 17.41 | 0.783 |
| 3320 | 0.0105 | 0.3278 | 4.301 | 409.9 | 0.0632 | 18.36 | 0.803 |
| 3500 | 0.0100 | 0.3390 | 4.398 | 439.8 | 0.0646 | 19.05 | 0.831 |
| 3680 | 0.0096 | 0.3541 | 4.513 | 470.1 | 0.0663 | 19.61 | 0.863 |
| 3860 | 0.0091 | 0.3759 | 4.611 | 506.9 | 0.0681 | 19.92 | 0.916 |
| 4160 | 0.0087 | 0.4031 | 4.750 | 546.0 | 0.0709 | 20.21 | 0.972 |

Fuente: Karlekar B. V., Transferencia de Calor, 1995

Anexo 3: Especificaciones del tanque tipo botella de pie

TANQUE TIPO BOTELLA DE PE

PARA ALMACENAR EXCLUSIVAMENTE AGUA

- ✓ Elaborado en polietileno con materia prima 100% virgen.
- ✓ Higiénico, paredes lisas evitan el crecimiento de bacterias.
- ✓ Hermético, tapa de traba con seguro giratorio.



Especificaciones Técnicas



| Nominal | Capacidad | | A | B | H |
|---------|-----------|--------|-----|------|------|
| | Total* | Útil** | | | |
| | litros | | mm | mm | mm |
| 5000 | 5500 | 5350 | 636 | 2320 | 1580 |
| 2500 | 2540 | 2400 | 550 | 1568 | 1460 |
| 1100 | 1170 | 1100 | 550 | 1120 | 1390 |
| 500 | 568 | 546 | 550 | 870 | 1082 |
| 250 | 280 | 260 | 550 | 690 | 880 |

* Capacidad Total: Lleno hasta rebosar.

** Capacidad Útil: Lleno hasta donde el flotador permite.

IMPORTANTE:

La base de los tanques deberá apoyarse obligatoriamente sobre una superficie plana, horizontal, dura, uniforme, indeformable y limpia.

Anexo 4: Lista de precios / Materiales de construcción (Revista “CONSTRUCCION” Cámara de la construcción de Quito 2012)

| COD. | RUBRO | UND. | TOTAL | MATERIAL | M. OBRA | EQUIPO |
|------|---|------|--------|----------|---------|--------|
| | AUXILIARES | | | | | |
| 1 | AUX: HORMIGON SIMPLE F'C=90 KG/CM2 | m3 | 51,29 | 51,29 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | AUX: HORMIGON SIMPLE F'C=140 KG/CM2 | m3 | 62,55 | 62,55 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | AUX: HORMIGON SIMPLE F'C=180KG/CM2 | m3 | 66,16 | 66,16 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | AUX: HORMIGON SIMPLE F'C=210 KG/CM2 | m3 | 70,05 | 70,05 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | AUX: HORMIGON SIMPLE F'C=240 KG/CM2 | m3 | 74,13 | 74,13 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | AUX: HORMIGON SIMPLE F'C=250 KG/CM2 | m3 | 76,57 | 76,57 | 0,00 | 0,00 |
| 7 | AUX: MORTERO CEMENTO:ARENA 1:3 | m3 | 84,52 | 84,52 | 0,00 | 0,00 |
| 8 | AUX: MORTERO CEMENTO:ARENA 1:4 | m3 | 76,12 | 76,12 | 0,00 | 0,00 |
| 9 | AUX: MORTERO CEMENTO:ARENA 1:5 | m3 | 66,48 | 66,48 | 0,00 | 0,00 |
| 10 | AUX: MORTERO CEMENTO:ARENA 1:6 | m3 | 58,36 | 58,36 | 0,00 | 0,00 |
| 11 | AUX: MORTERO CEMENTO:ARENA 1:7 | m3 | 51,80 | 51,80 | 0,00 | 0,00 |
| 12 | AUX: MORTERO CEMENTO:ARENA 1:8 | m3 | 45,52 | 45,52 | 0,00 | 0,00 |
| 13 | AUX: MORTERO CEMENTO:ARENA 1:10 | m3 | 38,55 | 38,55 | 0,00 | 0,00 |
| 14 | AUX: MORTERO CEMENTO:ARENA 1:12 | m3 | 35,06 | 35,06 | 0,00 | 0,00 |
| 15 | AUX: MORTERO CEMENTO : CEMENTINA : ARENA 1:1:4 | m3 | 71,45 | 71,45 | 0,00 | 0,00 |
| 16 | AUX: MORTERO CEMENTO : CEMENTINA : ARENA 1:1:6 | m3 | 63,23 | 63,23 | 0,00 | 0,00 |
| 17 | AUX: MORTERO CEMENTO : CEMENTINA : ARENA 1:1:8 | m3 | 55,46 | 55,46 | 0,00 | 0,00 |
| 18 | AUX: MORTERO CEMENTO : CEMENTINA : ARENA 1:1:10 | m3 | 49,63 | 49,63 | 0,00 | 0,00 |
| 19 | AUX: MORTERO CEMENTO : CEMENTINA : ARENA 1:1:12 | m3 | 44,42 | 44,42 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | AUX: MODULO TIPO I(1.22X0.30) | u | 2,29 | 1,51 | 0,74 | 0,04 |
| 21 | AUX: MODULO TIPO II (1.22 X 0.40) | u | 2,75 | 1,85 | 0,86 | 0,04 |
| 22 | AUX: MODULO TIPO III (1.22 X 0.60) | u | 3,90 | 2,82 | 1,03 | 0,05 |
| 23 | AUX: MODULO TIPO IV (1.22 X 1.22) | u | 6,14 | 5,11 | 0,98 | 0,05 |
| 24 | AUX: ENCOFRADO CADENA 0.30 X 0.30 | m3 | 95,35 | 95,35 | 0,00 | 0,00 |
| 25 | AUX: ENCOFRADO CADENA 0.40 X 0.40 | m3 | 65,40 | 65,40 | 0,00 | 0,00 |
| 26 | AUX: ENCOFRADO COLUMNA 0.40 X 0.40 | m3 | 114,14 | 114,14 | 0,00 | 0,00 |
| 27 | AUX: ENCOFRADO COLUMNA 0.60 X 0.60 | m3 | 60,29 | 60,29 | 0,00 | 0,00 |
| 28 | AUX: ENCOFRADO VIGA 0.20 X 0.30 | m3 | 258,08 | 258,08 | 0,00 | 0,00 |
| 29 | AUX: ENCOFRADO VIGA 0.20 X 0.40 | m3 | 220,72 | 220,72 | 0,00 | 0,00 |
| 30 | AUX: ENCOFRADO VIGA 0.30 X 0.40 | m3 | 156,19 | 156,19 | 0,00 | 0,00 |
| 31 | AUX: ENCOFRADO VIGA 0.30 X 0.60 | m3 | 117,69 | 117,69 | 0,00 | 0,00 |
| 32 | AUX: ENCOFRADO VIGA 0.50 X 0.60 | m3 | 86,20 | 86,20 | 0,00 | 0,00 |
| 33 | AUX: ENCOFRADO LOSA E=0.20 - 0.30 | m2 | 19,78 | 19,78 | 0,00 | 0,00 |
| 34 | AUX: ENCOFRADO MURO E=0.2 - 1 LADO | m3 | 38,05 | 38,05 | 0,00 | 0,00 |
| 35 | AUX: ENCOFRADO MURO E=0.2-2 LADOS | m3 | 87,72 | 87,72 | 0,00 | 0,00 |
| 36 | AUX: ENCOFRADO MURO E=0.3-1LADO | m3 | 29,55 | 29,55 | 0,00 | 0,00 |
| 37 | AUX: ENCOFRADO MURO E=0.3-2 LADOS | m3 | 57,81 | 57,81 | 0,00 | 0,00 |
| 38 | AUX: ENCOF. ESCALERA H=2.34 | m3 | 140,41 | 140,41 | 0,00 | 0,00 |

| COD. | MATERIAL | UNI. | PROV. | Abril |
|---------------|---|-------|-------|--------|
| 100810 | Gavión triple torsión 3x1x0.5 | u | P55 | 44.04 |
| 100811 | Gavión triple torsión 3x1x1 | u | P55 | 59.86 |
| 100801 | GAVIONES | | | |
| 1008011 | Gavion caja plastificado 5x1x1m c/d | u | P112 | 109.56 |
| 1008012 | Gavion caja plastificado 3x1x1m c/d | u | P112 | 67.04 |
| 1008013 | Gavion caja plastificado 1x1x1m c/d | u | P112 | 35.36 |
| 1008014 | Sistema Terramesh para suelo reforzado Alambre 3.70mm (Galfán + PVC) 0.5x1x3m c/d | u | P112 | 71.32 |
| 1008015 | Sistema Terramesh para suelo reforzado Alambre 3.70mm (Galfán + PVC) 0.5x1x5m c/d | u | P112 | 94.17 |
| 1008016 | Sistema Terramesh para suelo reforzado Alambre 3.70mm (Galfán + PVC) 1x1x4m c/d | u | P112 | 104.83 |
| 1008017 | Sistema Terramesh para suelo reforzado Alambre 3.70mm (Galfán + PVC) 1x1x5m c/d | u | P112 | 116.26 |
| 1008018 | Terramesh Verde Alambre 3.70 mm (Galfán + PVC) 70x0.60x4.10m | u | P112 | 114.05 |
| 1008019 | Colchones reno Plastificado 3x2x0.30m c/d | u | P112 | 69.36 |
| 1008020 | Colchones reno Plastificado 4x2x0.30m c/d | u | P112 | 91.00 |
| 1008021 | Colchones reno Plastificado 5x2x0.30m c/d | u | P112 | 115.38 |
| 1008022 | Gavion saco Plastificado 2x0.65 m | u | P112 | 21.36 |
| 1008023 | Gavion saco Plastificado 3x0.65 m | u | P112 | 29.23 |
| 1008024 | Gavion saco Plastificado 4x0.65 m | u | P112 | 37.18 |
| 1008025 | Gavion saco Plastificado 5x0.65 m | u | P112 | 45.07 |
| 1008026 | Alambre de amarre Plastificado 25 kg | rollo | P112 | 81.76 |
| 1008027 | Malla Hexagonal plastificada 2x25m | u | P112 | 193.48 |
| 1008028 | Wirand-Fibras de Acero FF1 PISO (Galfán) 50/1.00 mm | u | P112 | 44.80 |
| 1008029 | Wirand-Fibras de Acero FF1 PISO (Galfán) 30/0.75 mm | u | P112 | 53.76 |
| 1008030 | Fibromac 12 Fibra palstica Polipropileno 12 mm | u | P112 | 5.38 |
| 1009 | ACERO DE REFUERZO | | | |
| 100901 | Varilla corrugada antisísmica A-42S. D=8mm | qq | P31 | 49.27 |
| 100902 | Varilla corrugada antisísmica A-42S. D=8mm | kg | P31 | 1.09 |
| 100903 | Varilla corrugada antisísmica A-42S. D=10mm | qq | P31 | 49.27 |
| 100904 | Varilla corrugada antisísmica A-42S. D=10mm | kg | P31 | 1.09 |
| 100905 | Varilla corrugada antisísmica A-42S. D=12mm | qq | P31 | 49.27 |
| 100906 | Varilla corrugada antisísmica A-42S. D=12mm | kg | P31 | 1.09 |
| 100907 | Varilla corrugada antisísmica A-42S. D=14-16mm | qq | P31 | 49.27 |

| COD. | MATERIAL | UNI. | PROV. | Abril |
|-------------|--|------|-------|-------|
| 1106 | LADRILLOS ESTRUCTURALES | | | |
| 110505 | Ladrillo ESTRUCTURAL 8 CM, 43 x m2, 14X08X29 | m2 | P114 | 17.36 |
| 1107 | LADRILLOS SEMIMACIZOS | | | |
| 110701 | Semimacizo 8 CM, 43 x m2, 14x08x29 | m2 | P114 | 19.04 |
| 1108 | FACHALETAS | | | |
| 110801 | Fachaleta LISA 7 CM x 29 x m2, 47, 07x29 | m2 | P114 | 8.40 |
| 110802 | Fachaleta SEMIMACIZA, 43 x m2, 04X7X29 | m2 | P114 | 13.44 |
| 1109 | ADOQUINES | | | |
| 110901 | Adoquín CUADRADO, 100 x m2, 10x10X04 | m2 | P114 | 15.68 |
| 110902 | Adoquín RECTANGULAR 4CM, 50 x m2, 10x20x04 | m2 | P114 | 15.68 |
| 1110 | RUSTI GRES | | | |
| 111001 | Rustigres 30 CM, 12 x m2, 30X30 | m2 | P114 | 7.84 |
| 111002 | Tejuelo 20 CM, 25 x m2, 20X20 | m2 | P114 | 7.84 |
| 1111 | TEJAS | | | |
| 111001 | Teja COLONIAL NATURAL, 24 x m2, 06x17x38 | m2 | P114 | 7.84 |
| 111002 | Teja RECTANGULAR NATURAL, 24 x m2, 06x17x38 | m2 | P114 | 7.84 |
| 12 | MATERIAL DE AGUA POTABLE | | | |
| 1201 | ABRAZADERAS | | | |
| 120101 | Abrazadera A. inoxidable 1 1/4" a 2" | u | P2 | 1.63 |
| 120102 | Abrazadera A. inoxidable 1 1/2" a 2 1/2" | u | P2 | 1.70 |
| 120103 | Abrazadera A. Inoxidable 2 1/2" a 3" | u | P2 | 2.22 |
| 1202 | ACCESORIOS PVC | | | |
| 120203 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 1" | u | P79 | 8.03 |
| 120204 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 1/2" | u | P79 | 6.22 |
| 120205 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 3/4" | u | P79 | 6.36 |
| 120206 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 1 1/2" | u | P79 | 18.92 |
| 120207 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 1 1/4" | u | P79 | 12.31 |
| 120208 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 2" | u | P79 | 22.34 |

| DD. | MATERIAL | UNI. | PROV. | Abril |
|------|--|-------|-------|-------|
| | AGLOMERANTES | | | |
| | 02 CEMENTINA | | | |
| 0202 | Cementina (saco=25 kg) | kg. | P33 | 0.11 |
| | 03 CEMENTO | | | |
| 0301 | Cemento Chimborazo | 50 kg | P20 | 7.00 |
| 0302 | Cemento Rocafuerte | 50 kg | P33 | 6.80 |
| 0304 | Cemento Selva Alegre | 50 kg | P103 | 6.58 |
| 0305 | Cemento blanco | 50 kg | P59 | 22.96 |
| 0306 | Cemento de Aluminato de calcio electroland | Kg | P93 | 1.50 |
| | 04 VARIOS | | | |
| 0401 | Albalux | 25 kg | P33 | 3.54 |
| 0402 | Litopón | kg. | P60 | 0.96 |
| 0403 | Yeso | kg. | P60 | 0.49 |
| | AGREGADOS | | | |
| | 0A ARENAS | | | |
| 0201 | Arena no lavada (0-5mm) en cantera (1.43 Ton/m3) | m3 | P33 | 5.64 |
| 0213 | Arena lavada de río | m3 | P16 | 10.00 |
| 0223 | Arena cribada (para hormigones) | m3 | P16 | 7.00 |
| 0401 | Arena (en cantera) | m3 | P101 | 2.80 |
| | 0AF AGREGADOS FINOS | | | |
| 0222 | Polvo de piedra (para enlucidos) | m3 | P16 | 3.00 |
| 0402 | Polvo de piedra azul o rosado (en cantera) | m3 | P101 | 2.80 |
| 0403 | Polvo de piedra azul (en cantera o fábrica) | m3 | P8 | 2.80 |
| 0404 | Polvo de piedra rosado (en cantera o fábrica) | m3 | P8 | 2.23 |

| 1705 | PINTURAS CUBIERTA | | | |
|-------------|--|---------|-----|--------|
| 170501 | Pint.p/ tech Pinternit Wesco Lad europ. caf, neg teja es | 4000 cc | P76 | 18.72 |
| 170502 | Pint.p/asbesto cemento Cóndor Eternacril | 4000 cc | P74 | 23.08 |
| 170503 | Recubrimiento multiuso Multimax | 1 gal | P63 | 10.08 |
| 170504 | Resina para impermeabilizar losas Impertec | 5 gal | P63 | 89.40 |
| 170505 | Repelente de humedad para toda superficie Sealtec | 1 gal | P63 | 178.75 |
| 170506 | Pintura Cubierta Uniteja | 4000 cc | P75 | 15.27 |
| 170507 | Súper elite pintura para techos | 4000 cc | P57 | 16.22 |
| 170508 | Resina Resintex 50 | 4000 cc | P57 | 8.01 |
| 1706 | PINTURAS VARIAS | | | |
| 170601 | Pint.impermeab. d/losas Agua Stop Cóndor | 1000 cc | P74 | 17.62 |
| 170602 | Imperseal (impermeabilizante) | 4000 cc | P75 | 18.95 |
| 170608 | Pintura tráfico amarillo-blanca Indualca | 4000 cc | P25 | 21.28 |
| 170609 | Caucho clorado Pinturas Américas | 4000 cc | P25 | 21.33 |
| 170610 | Caucho clorado Pintuco amarillo y blanco | 4000 cc | P25 | 27.44 |
| 170611 | Pintura tráfico acrílico Sherwin Williams | 4000 cc | P25 | 20.57 |
| 170612 | Suvinil pintura para pisos | 4000 cc | P25 | 20.00 |
| 170613 | Pintura industrial epóxica Pintu Coat | 4000 cc | P25 | 34.72 |
| 170614 | Catalizador poliamina 1x10 | 1/8gl | P25 | 5.54 |
| 170615 | Aeroflex para canchas,cisternas alta resistencia | 4000cc | P25 | 29.71 |
| 170616 | Bucanero epóxico Kit | 2 GL | P25 | 78.97 |
| 170617 | Sherwin Williams esmalte epóxico | 4000cc | P25 | 36.96 |
| 170618 | Sherwin Williams catalizador epóxico | 4000cc | P25 | 36.69 |
| 170619 | Sherwin Wiliams primer epóxico | 4000cc | P25 | 35.28 |
| 170620 | MARKA (Pintira de tráfico) | 4000cc | P74 | 28.42 |

| 1403 | TUBERÍA PVC | | | |
|-------------|---|---|-----|--------|
| 140301 | Tubo PVC 50 mm x 3 m desagüe | u | P79 | 5.33 |
| 140302 | Tubo PVC 75 mm x 3 m desagüe | u | P79 | 11.96 |
| 140303 | Tubo PVC 110 mm x 3 m desagüe | u | P79 | 13.35 |
| 140304 | Tubo PVC 160 mm x 3 m desagüe | u | P79 | 32.60 |
| 140305 | Tubo PVC 200 mm x 6 m desagüe | u | P79 | 83.96 |
| 140306 | Tubo PVC 250 mm x 6 m desagüe (bajo pedido) | u | P79 | 185.26 |
| 140307 | Tubo PVC 315 mm x 6 m desagüe (bajo pedido) | u | P79 | 301.95 |
| 140308 | Tubo PVC 50 mm x 3 m ventilación tipo A | u | P48 | 3.48 |
| 140309 | Tubo PVC 75 mm x 3 m ventilación tipo A | u | P48 | 6.28 |
| 140310 | Tubo PVC 110 mm x 3 m ventilación tipo A | u | P48 | 10.34 |
| 140311 | Tubo PVC 50 mm x 3 m desagüe tipo B | u | P48 | 4.12 |
| 140312 | Tubo PVC 75 mm x 3 m desagüe tipo B | u | P48 | 6.93 |
| 140313 | Tubo PVC 110 mm x 3 m desagüe tipo B | u | P48 | 11.30 |

| 1211 | TUBERÍA PVC | | | |
|--------|--|----|-----|-------|
| 121103 | Tubería PVC (presión roscable) 1" | 6m | P79 | 24.02 |
| 121104 | Tubería PVC (presión roscable) 1/2" (420 PSI) | 6m | P79 | 8.13 |
| 121105 | Tubería PVC (presión roscable) 3/4" | 6m | P79 | 11.09 |
| 121106 | Tubería PVC (presión roscable) 1 1/2" | 6m | P79 | 38.44 |
| 121107 | Tubería PVC (presión roscable) 1 1/4" | 6m | P79 | 31.77 |
| 121108 | Tubería PVC (presión roscable) 2" | 6m | P79 | 47.59 |
| 121109 | Tub.1/2" polipropileno roscab. L. Dorada ag.cal. 1/2" | 6m | P79 | 8.96 |
| 121110 | Tub. 3/4"polipropileno roscab. L. Dorada ag. cal. 3/4" | 6m | P79 | 13.36 |
| 121111 | Tub. 1" polipropileno roscab. L. Dorada ag. cal. 1" | 6m | P79 | 20.99 |
| 121112 | Tubería hidroTubo PVC (presión roscable) 1/2" | 6m | P46 | 4.24 |
| 121113 | Tubería hidroTubo PVC (presión roscable) 3/4" | 6m | P46 | 6.06 |
| 121114 | Tubería hidroTubo PVC (presión roscable) 1" | 6m | P46 | 11.07 |
| 121115 | Tubería hidroTubo PVC (presión roscable) 1 1/4" | 6m | P46 | 16.92 |
| 121116 | Tubería hidroTubo PVC (presión roscable) 1 1/2" | 6m | P46 | 20.31 |
| 121117 | Tubería hidroTubo PVC (presión roscable) 2" | 6m | P46 | 23.03 |
| 121120 | Tubería hidroTubo PVC sanitario 36 mm | 3m | P46 | 3.33 |
| 121121 | Tubería hidroTubo PVC sanitario 75 mm | 3m | P46 | 9.03 |
| 121122 | Tubería hidroTubo PVC sanitario 110 mm | 3m | P46 | 12.49 |
| 121123 | Tubería hidroTubo PVC sanitario 160 mm | 3m | P46 | 28.49 |
| 121124 | Tubería hidroTubo PVC sanitario 200 mm | 3m | P46 | 87.53 |

| 02 | ACCESORIOS PVC | | | |
|------|---|---|-----|-------|
| 0203 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 1" | u | P79 | 8.03 |
| 0204 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 1/2" | u | P79 | 6.22 |
| 0205 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 3/4" | u | P79 | 6.36 |
| 0206 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 1 1/2" | u | P79 | 18.92 |
| 0207 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 1 1/4" | u | P79 | 12.31 |
| 0208 | Codo PVC 45 CED 80 (p/presión) roscable 2" | u | P79 | 22.34 |
| 0209 | Codo PVC 90 CED 40 (p/presión) roscable 1" | u | P79 | 2.96 |
| 0210 | Codo PVC 90 CED 40 (p/presión) roscable 1/2" | u | P79 | 0.59 |
| 0211 | Codo PVC 90 CED 40 (p/presión) roscable 3/4" | u | P79 | 1.10 |
| 0212 | Codo PVC 90 CED 40 (p/presión) roscable 1 1/2" | u | P79 | 4.74 |
| 0213 | Codo PVC 90 CED 40 (p/presión) roscable 1 1/4" | u | P79 | 3.17 |
| 0216 | Reductor PVC (presión) CED 40 rosca 1" a 1/2" | u | P79 | 1.85 |
| 0217 | Reductor PVC (presión) CED 40 rosca 2" a 1" | u | P79 | 3.48 |
| 0218 | Reductor PVC (presión) CED 40 rosca 3/4" a 1/2" | u | P79 | 1.00 |
| 0219 | Reductor PVC (presión) CED 40 rosca 1 1/4" a 3/4" | u | P79 | 2.46 |

| COD. | RUBRO | UND. | TOTAL | MATERIAL | M. OBRA | EQUIPO |
|---------|---|------|-------|----------|---------|--------|
| | Estructuras | | | | | |
| EXC. 1 | EXCAVACION A MANO CIMIENTOS Y PLINTOS | M3 | 7,40 | 0 | 7,05 | 0,35 |
| | Zanjas | | | | | |
| EXC. 2 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN CONGLOMERADO H=0.00-2.75M | M3 | 7,97 | 0 | 7,59 | 0,38 |
| EXC. 3 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN TIERRA H=0.00-2.75M | m3 | 6,94 | 0 | 6,61 | 0,33 |
| EXC. 4 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN ROCA H=0.00-2.75M | M3 | 13,82 | 0 | 13,37 | 0,45 |
| EXC. 5 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN SUELO ALTAMENTE CONSOLIDADO H=0.00-2.75M | M3 | 11,54 | 0 | 10,99 | 0,55 |
| EXC. 6 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN CONGLOMERADO H=2-76-3.99M | M3 | 13,73 | 0 | 13,08 | 0,65 |
| EXC. 7 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN TIERRA H=2-76-3.99M | M3 | 6,94 | 0 | 6,61 | 0,33 |
| EXC. 8 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN SUELO ALTAMENTE CONSOLIDADO H=2-76-3.99M | M3 | 15,91 | 0 | 15,15 | 0,76 |
| EXC. 9 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN CONGLOMERADO H=4-6M | M3 | 17,88 | 0 | 17,03 | 0,85 |
| EXC. 10 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN TIERRA H=4-6M | M3 | 10,95 | 0 | 10,43 | 0,52 |
| EXC. 11 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN SUELO ALTAMENTE CONSOLIDADO H=4-6M | M3 | 19,87 | 0 | 18,92 | 0,95 |
| EXC. 12 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN SUELO CONGLOMERADO H>6M | M3 | 13,89 | 0 | 13,23 | 0,66 |
| EXC. 13 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN TIERRA H>6M | M3 | 11,56 | 0 | 11,01 | 0,55 |
| EXC. 14 | EXCAVACION DE ZANJAS A MANO EN ROCA H>6M | M3 | 14,00 | 0 | 2,59 | 11,41 |

| CATEGORIAS OCUPACIONALES | | SUELDO UNIFICADO | DÉCIMO TERCER | DÉCIMO CUARTO | TRANSPORTE | APORTE PATRONAL | FONDO RESERVA | TOTAL ANUAL | JORNAL REAL | COSTO HORARIO |
|---|--|-------------------|-------------------|-------------------|------------|-------------------|-------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| REMUNERACIÓN BÁSICA UNIFICADA MÍNIMA CONSTRUCCIÓN Y SERVICIOS TÉCNICOS Y ARQUITECTÓNICOS | | 264,00 | | | | | | | | |
| PRIMERA - SEGUNDA CATEGORIA | ESTRUCTURA OCUPACIONAL E1 | | | | | | | | | |
| | Conserje o mensajero | | | | | | | | | |
| | ESTRUCTURA OCUPACIONAL E2 | 281,16 | 281,16 | 264,00 | | 409,93 | 281,16 | 4.610,17 | 19,62 | 2,45 |
| | Peón | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| | Guardián | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| | Ayudante de albañil | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| | Ayudante de operador de equipo | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| | Ayudante de fierro | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| | Ayudante de carpintero | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| | Ayudante de encofrador | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| | Ayudante de carpintero de ribera | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| | Ayudante de plomero | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| | Ayudante de electricista | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| | Ayudante de instalador de revestimiento en general | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 |
| Machetero | 279,84 | 279,84 | 264,00 | | 408,01 | 279,84 | 4.589,77 | 19,53 | 2,44 | |
| TERCERA CATEGORIA | ESTRUCTURA OCUPACIONAL D2 | | | | | | | | | |
| | Albañil | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Operador de equipo liviano | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Pintor | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Fierro | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Carpintero | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Encofrador | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Carpintero de ribera | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Plomero | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Electricista | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Instalador de revestimiento en general | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Ayudante de perforador | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Cadenero | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| | Mampostero | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 |
| Enlucidor | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 | |
| Hojalatero | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 | |
| ESTRUCTURA OCUPACIONAL C2 | 282,81 | 282,81 | 264,00 | | 412,34 | 282,81 | 4.635,68 | 19,73 | 2,47 | |

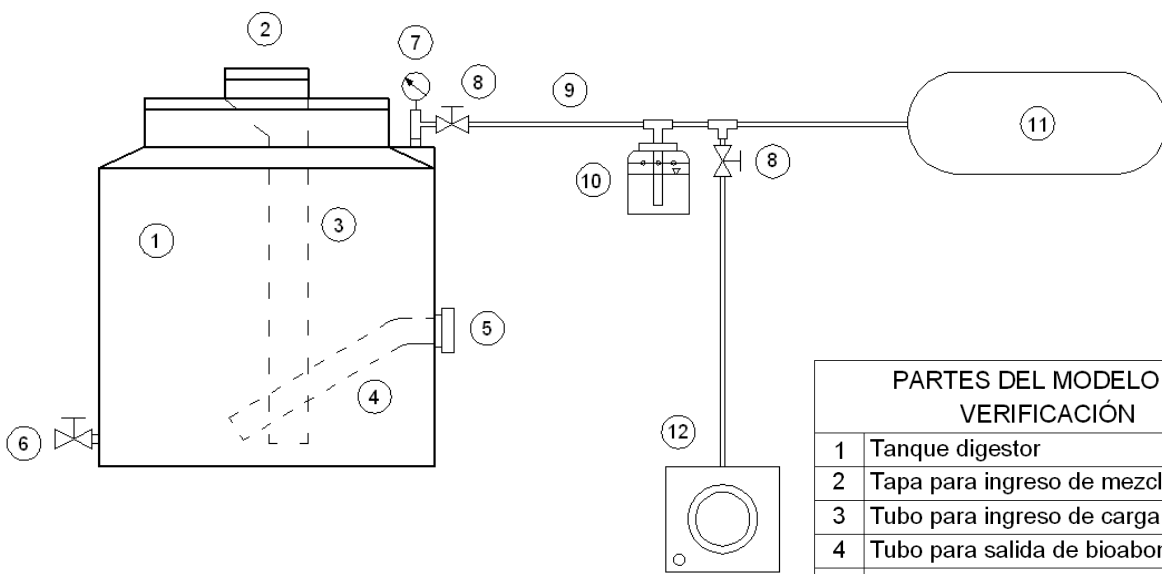
ANEXO
PROTOCOLO DE PRUEBAS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROTOCOLO DE PRUEBAS

TEMA: “DISEÑO DE UN BIODIGESTOR TIPO CÚPULA FIJA PARA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS”

El protocolo de pruebas del modelo de verificación del proceso de biodigestión, contemplado en el alcance de esta tesis, tiene como objetivo comprobar que el uso de biogás generado por desechos orgánicos provenientes de ganado vacuno, produce calor al combustionar.

1. Comprobación de las partes del modelo de verificación



| PARTES DEL MODELO DE VERIFICACIÓN | | VERIFICAR |
|-----------------------------------|-------------------------------|-----------|
| 1 | Tanque digestor | |
| 2 | Tapa para ingreso de mezcla | |
| 3 | Tubo para ingreso de carga | |
| 4 | Tubo para salida de bioabono | |
| 5 | Tapón para salida de bioabono | |
| 6 | Válvula para lodos pesados | |
| 7 | Manómetro | |
| 8 | Válvula de media vuelta | |
| 9 | Manguera para flujo de biogás | |
| 10 | Válvula de seguridad de agua | |
| 11 | Acumulador de gas | |
| 12 | Quemador | |

2. Comprobación del nivel de la mezcla de desechos orgánicos vacunos y agua en una proporción de 3 a 1 respectivamente.

Instrumento de medición: flexómetro

| Variable | Cantidad |
|-----------|----------|
| Nivel (m) | |

3. Volumen de desechos orgánicos

Instrumento de medición: flexómetro

| Area base del tanque (m ²) | Nivel (m) | Volumen (m ³) |
|--|-----------|---------------------------|
| | | |

4. Volumen de biogás producido

De acuerdo al tipo de biomasa, la producción típica de biogás que se obtiene de los desechos vacunos es de 0.04 m³ por cada Kg.

Nota: La cantidad de kilogramos de estiércol será una cuarta parte del volumen de la mezcla.

| | Cantidad |
|---|----------|
| Estiércol (Kg) | |
| Total de biogás producido (m ³) | |

Nota: El biogás obtenido de los desechos provenientes de ganado vacuno tiene una concentración de 60% de metano (NH₄) y 40% de dióxido de carbono (CO₂).

5. Presión

La presión manométrica ideal dentro del digestor debe ser de 10 cm de columna de agua y nunca debe exceder los 40 cm de columna de agua debido a que el proceso de producción de biogás se inhibe.

| Presión manométrica del biogás | |
|--------------------------------|--|
| Presión (psi) | |

La presión hidrostática del agua en la trampa de agua debe ser mayor a la presión manométrica.

| Presión hidrostática en la trampa de agua | |
|--|--|
| Altura (m) | |
| Densidad agua (Kg/m³) | |
| Gravedad (m/s²) | |
| Presión (Pa) | |

$$P_H = \rho * g * h$$

6. Encendido del quemador utilizando biogás como combustible

La temperatura real que alcanza la llama del biogás es de 870°C.

| Variable | Cantidad |
|-------------------------------------|-----------------|
| Temperatura de la llama (°C) | |

7. Temperatura de la leche

La temperatura que 1 litro de leche debe alcanzar con la llama generada por el biogás, debe ser de 65°C (temperatura de pasteurización), partiendo de una temperatura ambiente en la ciudad de Quito de 20 a 25°C aproximadamente.

| Variable | Cantidad |
|--------------------------------------|-----------------|
| Temperatura de la llama (°C) | |
| Tiempo de calentamiento (min) | |