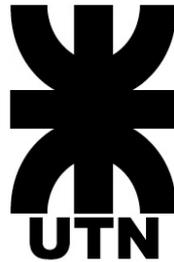


PABLO MAZZA



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Facultad Regional Reconquista

**DISEÑO DE EQUIPO DE ENSAYO PARA
DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE
GENERACIÓN DE BIOGÁS DE DISTINTOS
TIPOS DE BIOMASA**

Reconquista
Año 2017

PABLO MAZZA



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Facultad Regional Reconquista

**DISEÑO DE EQUIPO DE ENSAYO PARA
DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE
GENERACIÓN DE BIOGÁS DE DISTINTOS
TIPOS DE BIOMASA**

Proyecto Final presentado en cumplimiento de las exigencias de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Facultad Regional Reconquista, realizado por el estudiante Pablo Mazza.

Asesores: Prof: Ing. Iván Talijancic
Prof: Ing. Silvina Zamar

Reconquista, Santa Fe
República Argentina
Año 2017

DEDICATORIA

Dedico este esfuerzo personal y este logro académico y profesional, en primera instancia a mis padres, quienes siempre me apoyaron y dieron todo lo que estuvo a su alcance y mucho más para que pueda alcanzar mi sueño de ser ingeniero.

En segunda instancia al resto de mi familia, hermana, tíos, abuelos quienes fueron fundamentales y estuvieron siempre presentes en este recorrido.

Y por último a mis amigos que fueron un puntal esencial para enfrentar y concluir este anhelo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme salud y perseverancia.

A mis padres y familia por acompañarme y apoyarme en todas las decisiones y desafíos que encaro en mi vida.

A la Universidad Tecnológica Nacional y más específicamente a la Facultad Regional Reconquista, por darme la posibilidad de formarme como Ingeniero Electromecánico.

Al ingeniero Fernando Nadalich por su constante asesoramiento en lo que respecta al diseño mecánico del equipo.

A todos y cada uno de los docentes quienes influyeron en mi formación profesional.

A todas aquellas personas que han colaborado conmigo de alguna u otra manera a lo largo de esta etapa de mi vida.



ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1: MEMORIA DESCRIPTIVA | 9 |
| CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN | 11 |
| 2.1 Surgimiento de la Idea | 11 |
| 2.2 Definición del Problema | 12 |
| 2.3 Reactor | 12 |
| 2.4 Gasómetro | 12 |
| 2.5 Sistema de Medición..... | 13 |
| 2.6 Sistema de Control..... | 13 |
| 2.7 Hardware y Software | 14 |
| 2.8 Objetivo | 14 |
| 2.9 Antecedentes..... | 15 |
| CAPÍTULO 3: BIOMASA | 17 |
| 3.1 Definición | 17 |
| 3.2 Energía de Biomasa | 18 |
| 3.3 Procesos de Conversión de la Biomasa en Energía | 19 |
| 3.3.1 Biomasa Seca..... | 20 |
| 3.3.2 Biomasa Húmeda..... | 20 |
| CAPÍTULO 4: DIGESTIÓN ANAERÓBICA | 21 |
| 4.1 Introducción..... | 21 |
| 4.2 Etapas de la digestión anaeróbica | 22 |
| 4.3 Composición del biogás..... | 24 |
| 4.4 Usos del Biogás | 26 |
| 4.5 Factores que Regulan el Proceso | 26 |
| 4.6 Clasificación de los Biodigestores | 28 |
| 4.6.1 Según Sistema de Carga | 28 |



| | |
|---|-----------|
| 4.6.2 Según su Intensidad de Mezcla..... | 30 |
| 4.6.3 Según el Manejo del Substrato | 31 |
| 4.6.4 Según el Manejo Bioquímico | 33 |
| 4.7 Modelos de Biodigestores más Difundidos | 34 |
| 4.7.1 Modelo Chino | 34 |
| 4.7.2 Modelo Hindú | 35 |
| CAPÍTULO 5: REACTOR..... | 36 |
| 5.1 Conceptos..... | 36 |
| 5.2 Características del Proceso | 36 |
| 5.3 Carga Diaria..... | 37 |
| 5.4 Volumen del Reactor | 39 |
| 5.5 Velocidad de Carga Orgánica | 40 |
| 5.6 Dimensiones..... | 41 |
| 5.7 Ejemplo | 43 |
| 5.8 Análisis de Estructura | 44 |
| 5.8.1 Tapa Reactor | 44 |
| 5.8.2 Reactor | 45 |
| CAPÍTULO 6: GASÓMETRO..... | 48 |
| 6.1 Introducción | 48 |
| 6.2 Diseño | 48 |
| 6.3 Cilindro Superior (Móvil)..... | 49 |
| 6.3.1 Dimensionamiento | 49 |
| 6.3.2 Presión de Trabajo | 51 |
| 6.3.3 Análisis de Estructura | 52 |
| 6.4 Cilindro Inferior (Fijo)..... | 53 |
| 6.4.1 Tasa de Evaporación..... | 54 |



| | |
|---|-----------|
| 6.4.2 Dimensiones..... | 57 |
| 6.4.3 Variación de Nivel..... | 58 |
| 6.4.4 Sello Hidráulico..... | 60 |
| 6.4.5 Análisis de Estructura..... | 61 |
| CAPÍTULO 7: AGITADOR..... | 64 |
| 7.1 Selección..... | 64 |
| 7.2 Dimensiones..... | 64 |
| 7.2 Como Prevenir el Flujo Circulatorio..... | 65 |
| 7.3 Cálculo de Potencia en el Agitador..... | 66 |
| 7.3.1 Número de Reynolds (Re)..... | 66 |
| 7.3.2 Número de Froude (Fr)..... | 67 |
| 7.3.3 Número de Potencia (Np)..... | 68 |
| 7.4 Diámetro del eje..... | 70 |
| 7.5 Chaveta y Chavetero..... | 71 |
| 7.6 Presiones Sobre las Paletas..... | 74 |
| 7.7 Análisis de Estructura..... | 76 |
| 7.8 Análisis de Velocidad Crítica..... | 77 |
| CAPÍTULO 8: AJUSTES..... | 79 |
| 8.1 Ajustes Recomendados por ISO..... | 79 |
| 8.2 Ajustes Reactor..... | 79 |
| 8.2.1 Eje-Buje..... | 81 |
| 8.2.2 Buje-Porta Buje..... | 81 |
| CAPÍTULO 9: ELEMENTO CALEFACTOR..... | 83 |
| 9.1 Introducción..... | 83 |
| 9.2 Cálculo de la Potencia Calorífica Necesaria (PT)..... | 83 |
| CAPÍTULO 10: CONTROL DE TEMPERATURA Y AGITACIÓN..... | 86 |



| | | |
|--|---|-----|
| 10.1 | Introducción | 86 |
| 10.2 | Modulación por ancho de pulso (PWM)..... | 86 |
| 10.3 | Calculo de Corrientes..... | 87 |
| 10.3.1 | Manta Calefactora..... | 87 |
| 10.3.2 | Motorreductor | 88 |
| CAPÍTULO 11: SOFTWARE Y HARDWARE | | 90 |
| 11.1 | Introducción | 90 |
| 11.2 | Conceptos..... | 90 |
| 11.2.1 | EAGLE Cadsoft | 90 |
| 11.2.2 | Lenguaje C | 91 |
| 11.2.3 | MPLAB X IDE | 92 |
| 11.2.4 | ModBus Serie | 92 |
| 11.2.5 | RS232..... | 93 |
| 11.2.6 | SCADA..... | 94 |
| 11.2.7 | LabVIEW y OPC | 95 |
| 11.3 | Sensores | 97 |
| 11.3.1 | Temperatura | 97 |
| 11.3.2 | pH..... | 97 |
| 11.3.3 | Presión | 98 |
| 11.3.4 | Potencial Redox (ORP)..... | 98 |
| 11.3.5 | Sensor de Distancia..... | 99 |
| 11.3.6 | Final de Carrera | 99 |
| 11.4 | Diseño y Desarrollo de Hardware..... | 100 |
| 11.5 | Diseño y Desarrollo de Software Embebido..... | 101 |
| 11.6 | Diseño y Desarrollo del Sistema Scada | 101 |
| CAPÍTULO 12: FUNCIONAMIENTO | | 102 |



| | |
|--|-----|
| 12.1 Introducción | 102 |
| 12.2 Funcionamiento | 102 |
| CAPÍTULO 13: PRESUPUESTO | 105 |
| 13.1 Introducción | 105 |
| 13.2 Costo del Equipo..... | 105 |
| 13.3 Comparación con Biodigestor | 106 |
| 13.4 Comparación con Equipo ARCIS..... | 106 |
| CAPÍTULO 14: CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORAS..... | 108 |
| 14.1 Conclusiones | 108 |
| 14.2 Propuestas de Mejoras | 108 |
| BIBLIOGRAFÍA | 109 |
| ANEXO I: CATÁLOGOS | 111 |
| ANEXO II: PLANOS | 112 |
| ANEXO III: INFORME DE SIMULACIONES | 113 |



CAPÍTULO 1: MEMORIA DESCRIPTIVA

El presente proyecto final de carrera consiste en la aplicación de conceptos y desarrollos ingenieriles con el fin de diseñar un equipo de ensayos para la determinación del potencial de generación de biogás de distintos tipos de biomasa.

El biodigestor diseñado es una instalación de laboratorio o planta piloto que funcionara de forma similar a un biodigestor de tamaño considerable. En el equipo se podrá hacer dos tipos de ensayos (batch y continuo) y tendrá incorporado sensores que permitirán obtener y archivar los valores de los parámetros más importantes del proceso. Los mismos son:

- Producción de Biogás
- Temperatura de la mezcla
- Redox
- pH
- Tiempo de Retención
- Presión

Mediante un lazo de control se podrá regular la temperatura del reactor, por lo tanto, se conseguirá controlar la temperatura del proceso. Además, el usuario podrá seleccionar los siguientes parámetros de funcionamiento para el desarrollo del ensayo:

- Tiempos de agitación
- Velocidad de agitación

Con todo lo descrito anteriormente se obtiene el punto óptimo de funcionamiento para el tipo de biomasa ensayado, es decir, la combinación de parámetros (pH, temperatura, agitación, carga diaria y porcentaje de dilución) que genera la mayor producción de biogás. Lo que sería el paso previo para el diseño de un biodigestor de grandes dimensiones.

En cuanto al desarrollo, en primera instancia se dará una breve introducción al proyecto (surgimiento de la idea y el planteo del problema concretamente), luego se proporciona conceptos básicos sobre biomasa, energía de biomasa, digestión anaeróbica, sistemas utilizados en la actualidad para la digestión y tipos de biodigestores.

A continuación, se realiza un cálculo promedio de producción de biogás teniendo en cuenta que el equipo puede funcionar con diferentes tipos de sustratos.

Con la producción promedio de biogás se procede al diseño mecánico del reactor y gasómetro y a la selección de componentes mediante datos recabados de distintas bibliografías (ver “Bibliografía”), teniendo presente el código ASME.



Como complemento se utilizó el software Autodesk Inventor 2016 para verificar la resistencia y rigidez de los componentes mediante simulación por elementos finitos. Adicionalmente, al agitador se le realiza un análisis de velocidad crítica con el software antes mencionado a fin de comprobar su estabilidad frente a las revoluciones que estará sometido.

Las dimensiones finales del equipo se muestran en el Anexo II “Planos” y los componentes seleccionados en el Anexo I “Catálogos”.

En segunda instancia se realiza una breve introducción teórica sobre microcontroladores y los softwares utilizados para el diseño del sistema SCADA.

Posteriormente se procede a describir lo que es un software embebido y las funcionalidades que tendrá el que se usara para el presente proyecto.

Cabe mencionar que si bien existen dispositivos similares, los mismos no se encuentran en el mercado nacional y su costo para adquirirlos resulta muy elevado. Por esta razón, para finalizar, se efectúa una comparación entre el costo final del equipo y el precio de un biodigestor de tamaño promedio, luego entre el equipo y un dispositivo con similares características.

Como anexo se presentan todos los planos, catálogos, hojas de datos (Data Sheets) y la bibliografía consultada.



CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN

2.1 Surgimiento de la Idea

La idea surge de un curso de capacitación en la UTN Santa Fe, al cual asistimos alumnos de la UTN Reconquista junto con la Ing. Silvina Zamar y el Ing. Iván Talijancic, la empresa que lo dicto es Grupo Ifes (que se dedica a la fabricación de biodigestores complejos para generar energía eléctrica y térmica).

Durante su exposición explicaron que antes de dimensionar cualquier biodigestor se deben hacer pruebas de laboratorio con el tipo de sustrato que utilizara el equipo en cuestión. Estos ensayos permiten determinar el potencial de generación de biogás de la materia orgánica.

Los ensayos que realiza la empresa son del tipo batch y continuo, como se observa en las Figuras 2.1 y 2.2 respectivamente, aunque como se puede apreciar, son bastantes rudimentarios y sin la posibilidad de un control exacto de los parámetros que intervienen en el proceso.



Figura 2.1 – Equipos Para Ensayos Tipo Batch

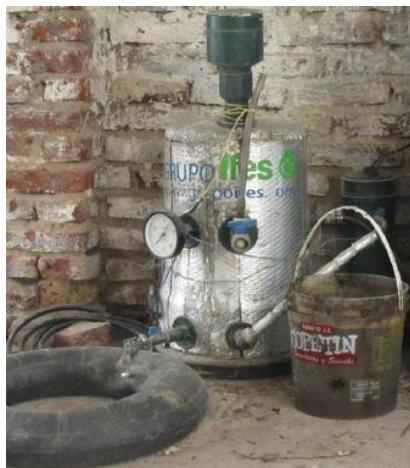


Figura 2.2 - Equipo Para Ensayo Tipo Continuo



2.2 Definición del Problema

El problema que se plantea en el presente proyecto final de carrera, consiste en diseñar un equipo de ensayos para simular el funcionamiento de un biodigestor y recabar datos que permitan obtener el punto óptimo de funcionamiento (combinación de parámetros que generan la mayor cantidad de biogás) para cada sustrato ensayado.

Otra posibilidad que se desprende de lo anterior es ensayar un sustrato con las condiciones de proceso (temperatura, agitación, etc.) que tendrá el biodigestor a construir y así obtener la producción de biogás que se generará en la instalación.

Para ello se deben diseñar los siguientes componentes fundamentales:

1. Reactor o Cámara de digestión
2. Gasómetro
3. Sistema de Medición.
4. Sistema de Control.
5. Hardware y Software

2.3 Reactor

El reactor es el “alma máter” del biodigestor. Es el recinto en donde el material permanece el tiempo necesario para producir la degradación de la materia orgánica y como consecuencia de esa degradación se forma el biogás.

Los materiales y la forma que puede adoptar el reactor son variables.

2.4 Gasómetro

El gasómetro es el dispositivo donde se almacena el gas producido en el reactor. Tiene como función equilibrar las fluctuaciones de generación, consumo y cambios de volumen producidos por las variables externas.

Además de almacenar el biogás, el gasómetro permite regular la presión del sistema, que queda definida por la fuerza que ejerce su peso y el área donde este se apoya. Es por ello que cuando se utiliza materiales livianos como gasómetro, es necesario aumentar su carga para que la presión del gas sea mayor. Esta se recomienda que sea 10 cm de columna de agua, como mínimo.

Para el presente proyecto, el gasómetro también se utilizara para medir la producción de biogás por unidad de tiempo. Esta medición se hará en forma indirecta teniendo en cuenta su elevación respecto a un punto de referencia donde se ubicara el medidor de distancia.



2.5 Sistema de Medición

Existen parámetros propios del proceso que son indicadores del normal funcionamiento y otros que permiten ser modificados durante el ensayo para así obtener aquella combinación de ellos que mayor volumen de biogás por unidad de tiempo produzca. A esta combinación la podremos denominar “punto óptimo de funcionamiento”, que será único para cada tipo de sustrato. Los parámetros más significativos que se medirán se nombran a continuación:

- Producción de Biogás: m^3/h de biogás que se producen con una cierta cantidad y tipo de biomasa en un rango de temperatura. Se utilizara un gasómetro y un sensor de distancia para así obtener el parámetro buscado de forma indirecta. Lo que abarata significativamente el costo final del dispositivo.
- Nivel de pH de la Mezcla: La medición se hará con un sensor de pH con salida analógica. Ver Anexo I “Catálogos”.
- Temperatura de la Mezcla: Para medir la temperatura del proceso se utilizara un sensor PT100 con salida analógica. Ver Anexo I “Catálogos”.
- Redox (ORP): Su medición se hará con un sensor de ORP (Potencial de óxido-reducción) con salida analógica. Ver Anexo I “Catálogos”.
- Presión: Su medición se realizara con un sensor de presión con salida analógica. Ver Anexo I “Catálogos”.

Si bien algunas palabras pueden resultar confusas, en los siguientes capítulos se dará una teoría general sobre biomasa, digestión anaeróbica y tipos de digestores.

2.6 Sistema de Control

Para encontrar el punto óptimo de funcionamiento es necesario poder modificar algunos parámetros propios del proceso de digestión dentro del reactor, el equipo permitirá controlar:

- La temperatura de la mezcla mediante un lazo de control (PID). La misma se podrá regular hasta $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Los tiempos de actuación del agitador.
- La velocidad de rotación del agitador.



2.7 Hardware y Software

Para cumplir con el propósito de equipo de ensayo se deberá desarrollar lo siguiente:

- Hardware y software embebido encargado de las tareas de adquisición de datos (pH, flujo volumétrico, temperatura, redox y presión), control de la temperatura de la mezcla y del agitador. Para este proyecto final de carrera, se hará la selección de los componentes más importantes (Microcontrolador y sensores) y una descripción de los softwares utilizados para el futuro desarrollo.

Para obtener los fondos necesarios para la construcción, el proyecto fue inscripto como un PID (Proyecto de Investigación y Desarrollo) el cual fue aprobado en el presente año (2017). Código del Proyecto: ENUTIRQ0004633TC. Para proseguir con el desarrollo es fundamental saber con qué fondos se cuenta ya que no sirve de nada crear un software de control y adquisición de datos teniendo en cuenta un elemento que quizás no se pueda comprar (Ej: Sensor de Redox). Para el desarrollo se contara con el apoyo del grupo de investigación “GIPEC” que es supervisado por el Ing. Ivan Talijancic.

- Un software de computadora, en el cual se podrán visualizar los datos en tiempo real, durante la operación del biodigestor de ensayo. También hará las veces de servidor en el cual se almacenaran los datos resultantes de los ensayos. Y será la interface hombre máquina, para el control y operación del equipo. Este punto se tercerizará completamente debido a que escapa mucho de las especificidades de la carrera, por lo que hacerlo por cuenta propia demandaría demasiado tiempo de investigación y desarrollo.

2.8 Objetivo

Con el desarrollo de este proyecto final de carrera se obtendrá el diseño de una planta piloto generadora de biogás que permitirá obtener datos relevantes para analizar la factibilidad y potencial que tendrá un biodigestor en la zona donde se desee instalarlo y con el tipo de biomasa que se disponga para alimentarlo.

Además permitirá experimentar con distintos parámetros, por ejemplo:

- Temperatura
- Cantidad de Carga
- Agitación
- Tipo de Biomasa



Y con ellos conseguir valores óptimos, como ser el tiempo de retención de materia, entre otros.

2.9 Antecedentes

A nivel nacional no se encuentra ningún equipo con similares características. La empresa alemana ARCIS ofrece un equipo como el que se ve en la figura 2.3 y cuyas características se observan en la figura 2.4.



Figura 2.3 – Equipo Arcis



| Especificaciones técnicas | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------|--|
| Medidor de caudal de biogás | Modelo | - | Ritter TG 05 |
| | Rango de medición mín.-máx. | [litros/hora] | 1-60 |
| | Precisión de medición | [%] | ±0,2 a 50 litros/hora ±0,5 en todo el rango |
| | Presión máx. de entrada | [mbar] | 50 |
| Sensor de pH | Rangos de medición | [pH] | 0-14 |
| | Cadena de medidas | - | Vidrio relleno de gel |
| Sensor de temperatura | Rango de medición | [°C] | 0-100 |
| | Precisión de medición | [°C] | ±0,3°C en el rango 10-90°C |
| Registrador de datos | Modelo | - | LogTrans6 |
| | Parámetros | - | <ul style="list-style-type: none">• pH• temperatura• cantidad de gas• velocidad y torque del agitador^(*) |
| | Modelo | - | SENSOlog |
| Software | Sistema operativo | - | Windows XP and 7 |
| | Visualización de datos | - | tabular y grafica |
| | Resolución de pantalla | Píxeles | 1024x768 o superior |

(*) Equipo opcional

Figura 2.4 – Especificaciones Técnicas

El costo aproximado para importar el equipo es de USD 21.000 y en gran parte se debe al alto costo del medidor de caudal de biogás. Además, este equipo no posee sensores de Potencial de Oxido-Reducción (ORP) y presión, tampoco determina el punto óptimo de funcionamiento del sustrato ensayado.

El volumen del reactor es de 15 litros, la idea en este proyecto es utilizar un reactor de al menos 30 litros lo que permitirá trabajar con mayor cantidad de sustrato y así obtener información más representativa sobre la biomasa ensayada.



CAPÍTULO 3: BIOMASA

3.1 Definición

Para la mayoría de la población, las formas más conocidas de energía renovable son las que provienen del sol y del viento. Sin embargo existen fuentes de biomasa, como leña, carbón de leño, cascarilla de arroz, que proveen un alto porcentaje de la energía consumida en el mundo y tienen potencial para suplir mayores volúmenes.

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego.

Desde la prehistoria, la forma más común de utilizar la energía de la biomasa ha sido por medio de la combustión directa: quemándola en hogueras a cielo abierto, en hornos y cocinas artesanales e, incluso, en calderas; convirtiéndola en calor para suplir las necesidades de calefacción, cocción de alimentos, producción de vapor y generación de electricidad.

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de procesos más eficientes y limpios para la conversión de biomasa en energía; transformándola, por ejemplo, en combustibles líquidos o gaseosos, los cuáles son más convenientes y eficientes. Así aparte de la combustión directa, se pueden distinguir otros dos tipos de procesos: el termo-químico y el bio-químico.

Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas pues en ellos se producen residuos (rastros) que normalmente son dejados en el campo al consumirse sólo un bajo porcentaje de ellos con fines energéticos. En la agroindustria, los procesos de secado de granos generan subproductos que son usados para generación de calor en sistemas de combustión directa; tal es el caso del bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de café y la de arroz. Por otro lado, los centros urbanos generan grandes cantidades de basura compuestas en gran parte, por materia orgánica que puede ser convertida en energía, después de procesarla adecuadamente.

En economías de orientación agrícola el uso apropiado de la biomasa ofrece una alternativa para reducir los costos de operación por concepto de insumos energéticos; además,



es una solución para los problemas higiénico-ambientales que, en muchos casos, presentan los desechos orgánicos.

Las denominadas “granjas energéticas” pueden suplir un porcentaje significativo de los requerimientos energéticos mundiales y, al mismo tiempo, revitalizar las economías rurales, proveyendo energía en forma independiente y segura y logrando importantes beneficios ambientales. Las comunidades rurales pueden ser, entonces, energéticamente auto suficientes en un alto grado, a partir del uso racional de los residuos y administrando inteligentemente la biomasa disponible en la localidad.

Actualmente, los procesos modernos de conversión solamente suplen 3% del consumo de energía primaria en países industrializados. Sin embargo, gran parte de la población rural en los países subdesarrollados que representa cerca del 50% de la población mundial, aún depende de la biomasa tradicional, principalmente de leña, como fuente de energía primaria. Esta suple, aproximadamente, 35% del consumo de energía primaria en países subdesarrollados y alcanza un 14% del total de la energía consumida en el nivel mundial.

3.2 Energía de Biomasa

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 verdes mediante reacciones químicas en las células, las que toman CO₂ del aire y lo transforman en sustancias orgánicas, según una reacción del tipo: $CO_2 + H_2O \rightarrow (H-COH) + O_2$. En estos procesos de conversión la energía solar se transforma en energía química que se acumula en diferentes compuestos orgánicos (polisacáridos, grasas) y que es incorporada y transformada por el reino animal, incluyendo al ser humano, el cual invierte la transformación para obtener bienes de consumo. Lo mencionado anteriormente se muestra en la figura 3.1

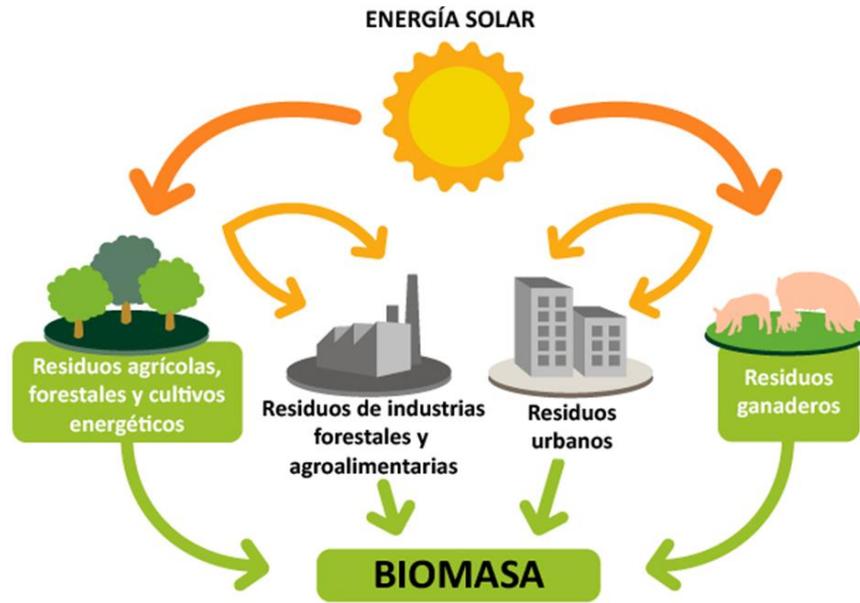


Figura 3.1 – Origen de la energía de biomasa

3.3 Procesos de Conversión de la Biomasa en Energía

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles. Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo C_nH_m , y presencia de CO_2 , CO e H_2) son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa. El poder calorífico de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad. Así normalmente estos valores de poder calorífico se pueden dar en base seca o en base húmeda.

En general se puede considerar que el poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre los 3000 – 3500 kcal/kg para los residuos ligno - celulósicos, los 2000 – 2500 kcal/kg para los residuos urbanos y finalmente los 10000 kcal/kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos. Estas características, juntamente con el bajo contenido de azufre de la biomasa, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente.

Desde el punto de vista energético resulta conveniente dividir la biomasa en dos grandes grupos como se ve en la figura 3.2.

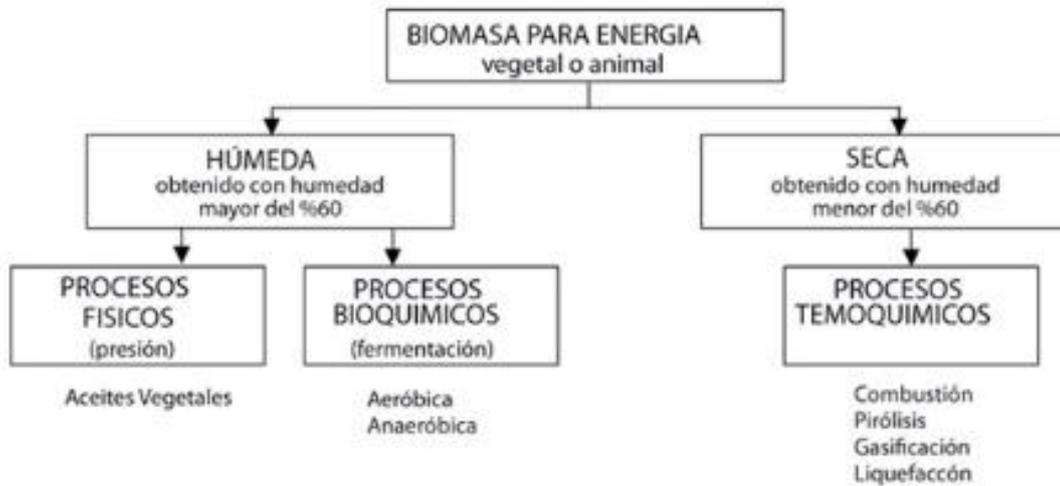


Figura 3.2 – Tipos de Biomasa

3.3.1 Biomasa Seca

Aquella que puede obtenerse en forma natural con un tenor de humedad menor al 60%, como la leña, paja, etc. Este tipo se presta mejor a ser utilizada energéticamente mediante procesos termoquímicos o fisicoquímicos, que producen directamente energía térmica o productos secundarios en la forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.

3.3.2 Biomasa Húmeda

Se denomina así cuando el porcentaje de humedad supera el 60%, como por ejemplo en los restantes vegetales, residuos animales, vegetación acuática, etc. Resulta especialmente adecuada para su tratamiento mediante procesos químicos, o en algunos casos particulares, mediante simples procesos físicos, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos.



CAPÍTULO 4: DIGESTIÓN ANAERÓBICA

4.1 Introducción

La digestión anaeróbica es un proceso natural que corresponde al ciclo anaeróbico del carbono; mediante una acción coordinada y combinada de diferentes grupos bacterianos en ausencia de oxígeno, estos pueden utilizar la materia orgánica para alimentarse y reproducirse.

Cuando se acumula materia orgánica (compuesta por polímeros naturales, como carbohidratos, proteínas, celulosa, lípidos, etc.) en un ambiente acuático, los microorganismos aeróbicos actúan primero tratando de alimentarse de este sustrato, para lo cual consumen el oxígeno disuelto que pueda existir. Luego de esta etapa inicial, si el oxígeno se agota, aparecerán las condiciones necesarias para que la flora natural anaeróbica se pueda desarrollar consumiendo también la materia orgánica disponible; como consecuencia, la característica respiratoria de las bacterias genera una cantidad importante de metano (CH_4), anhídrido carbónico (CO_2); y trazas de nitrógeno (N_2), hidrogeno (H_2) y ácido sulfhídrico (SH_2).

El proceso global es el resultado de la acción de diferentes tipos de microorganismos (bacterias, protozoarios, hongos), cada uno de los cuales lleva a cabo un proceso bioquímico. Se logra una cooperación entre ellos de modo tal que los productos intermedios necesarios como alimento para un cierto tipo de microorganismo son producidos como consecuencia de la actividad metabólica de otra comunidad microbiana.

La heterogénea flora que habita en un biodigestor no solo provee sustratos para fases subsecuentes y consecutivas del proceso de conversión, sino que también contribuye con la anaerobiosis, dado que una porción de los microorganismos son “anaeróbicos facultativos”, los cuales tienen la posibilidad de que en caso de entrada de oxígeno pueden reducir la concentración de este hasta estabilizar los potenciales de óxido-reducción a valores más convenientes para las bacterias metanógenas, que es de -300 mV aproximadamente.

En la puesta en marcha de un biodigestor se desarrollan y actúan primeramente dos tipos de bacterias:

- Bacterias desnitrificantes: De la amplia variedad de grupos fisiológicos de microorganismos que tienen la capacidad de realizar “desnitrificación”. Las bacterias desnitrificantes son básicamente aerobios, pero tienen la alternativa de reducir los óxidos de nitrógeno cuando el oxígeno se vuelve limitante. Esto determina que sean importantes en la puesta en marcha de los biodigestores anaeróbicos, dado que cumplen la función inicial de remover el oxígeno



disuelto que pueda existir en la mezcla a digerir, y crear las condiciones de anaerobiosis necesarias para que se desarrollen las bacterias productoras del biogás.

- Bacterias sulfato-reductoras: Este de tipo microorganismo produce ácido sulfhídrico a partir del azufre que existe en las proteínas o por la reducción del sulfato que se encuentra disuelto en el agua. Pero como el biodigestor se encuentra a pH neutro, el 50% del sulfuro estará en forma de ácido sulfhídrico, responsable del mal olor. Estas bacterias están siempre presentes en los biodigestores, por lo que también el biogás producido tendrá algún porcentaje de ácido sulfhídrico, lo que significa que “tendrá siempre mal olor”, lo cual sirve para detectar pérdidas en la instalación.

4.2 Etapas de la digestión anaeróbica

Si bien tratar de subdividir el proceso en etapas es conveniente desde el punto de vista de su estudio, es realidad la biología es mucho más compleja. Entre los microorganismos se producen interrelaciones tan estrechas que por ejemplo, la actividad de los microorganismos metanogénicos influye decididamente sobre los productos de las primeras etapas de fermentación e hidrólisis. La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, hidratos de carbono y lípidos) que son hidrolizados por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que son fermentados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrogeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de acético, H₂ y CO₂. En la Figura 4.1 se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaerobia, así como los productos intermedios generados.

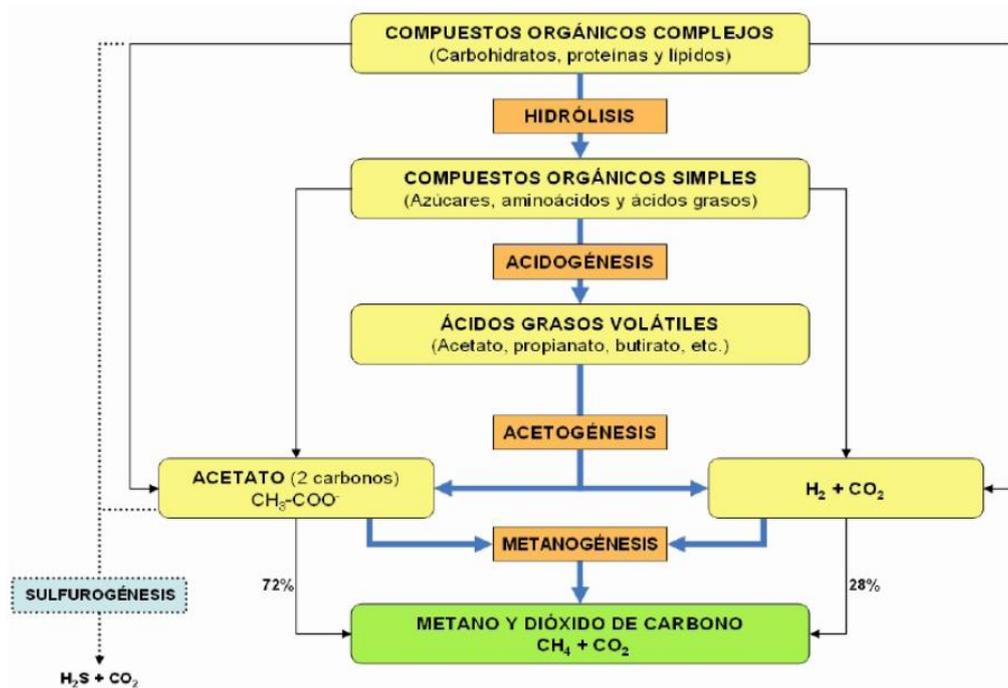


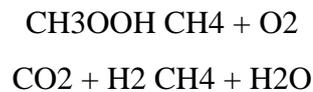
Figura 4.1 - Etapas de la digestión anaeróbica

1. **Hidrólisis:** La hidrólisis de la materia orgánica polimérica a compuestos solubles o monómeros es el paso inicial para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos, ya que los microorganismos únicamente pueden utilizar materia orgánica soluble que pueda atravesar su pared celular. Por lo tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. Como ya se ha comentado, la hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por los microorganismos hidrolíticos.

La etapa hidrolítica puede ser un proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan de residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (carbohidratos, grasas, porcentaje de lignina y proteínas), del tamaño de las partículas, del pH, de la concentración de NH₄ (amonio) y de la concentración de los productos de la hidrólisis.



2. Fermentativa o acidogénica: Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂), y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso.
3. Etapa acetogénica: En la etapa de acetogénesis, los ácidos y alcoholes que provienen de la acidogénesis se van transformando por la acción de bacterias en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
4. Etapa metanogénica: La metanogénesis, última etapa, consiste en la transformación bacteriana del ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno.



Las bacterias responsables de este proceso son anaeróbicas estrictas. Se distinguen dos tipos de microorganismos, los que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y los que reducen el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas).

La principal vía de producción de metano es la correspondiente a la transformación del ácido acético, con alrededor del 70% del metano producido. Este es un proceso lento y constituye la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica.

4.3 Composición del biogás

La composición química del biogás depende primordialmente de dos factores: los materiales empleados en la digestión y la tecnología utilizada para el proceso. En la figura 4.2 se muestra los rangos en que varían los compuestos que forman el biogás.



| Compuesto | Concentración |
|--|---------------|
| Metano (CH ₄) (%) | 50 - 70 |
| Dióxido de Carbono (CO ₂) (%) | 30 - 50 |
| Hidrogeno (H ₂) (%) | 1- 10 |
| Nitrógeno (N ₂) (%) | < 3 |
| Oxígeno (O ₂) (%) | < 0.1 |
| Ácido Sulfhídrico (H ₂ S) (ppm) | 0 – 8000 |

Tabla 4.2 – Composición del biogás

Debido a su alto contenido en metano, tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural. Un biogás con un contenido en metano del 60% tiene un poder calorífico de unas 5.500 kcal/m³.

Es decir, salvo por el contenido en H₂S (ácido sulfhídrico), es un combustible ideal, con unas equivalencias que se muestran en la figura 4.3.



Figura 4.3 - Equivalencias del biogás con otras fuentes de energía



4.4 Usos del Biogás

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos:

- En una caldera para generación de calor o electricidad.
- En motores o turbinas para generar electricidad.
- En pilas de combustible, previa realización de una limpieza de H₂S y otros contaminantes de las membranas.
- Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural.
- Uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol o el gas natural licuado.
- Combustible de automoción.

4.5 Factores que Regulan el Proceso

Para que pueda desarrollarse el proceso se debe mantener unas condiciones ambientales y operacionales adecuadas, para ello se controlan diversos parámetros ambientales:

- pH y alcalinidad: El rango aceptable de trabajo de las bacterias metanogénicas se encuentra entre 6,5 y 7,5, es decir, un medio prácticamente neutro.
El pH se mantendrá en ese rango solo si el biodigestor está operando correctamente. Si se pierde el equilibrio y los valores superan un pH mayor de 8 indicara una acumulación excesiva de compuestos alcalinos. Un pH inferior a 6 indicara una descompensación entre la fase acidogénica (más rápida) productora de ácidos, y la metanogénica consumidora fundamentalmente de ácido acético, pudiéndose en consecuencia bloquear esta última. Los biodigestores acidificados pueden volverse a estabilizar luego de un prolongado periodo sin alimentación a fin de que se pueda consumir toda la acidez generada. Por esta razón se aconseja no aumentar repentinamente la velocidad de carga. Para ayudar a mantener y/o corregir un pH ácido más rápidamente se puede adicionar cal o agua de cal.
- Potencial Redox (ORP): El potencial redox, es un indicador de la oxidación o potencial de reducción de materia. El proceso de digestión anaeróbico, ocurre únicamente en medios acuosos con un potencial redox que se ubica en un rango de -330 mV a -550 mV siendo -300 mV el valor óptimo.



- **Nutrientes:** Con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos. Una de las ventajas inherentes al proceso de digestión anaerobia es su baja necesidad de nutrientes como consecuencia de su pequeña velocidad de crecimiento. El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimento de las bacterias formadoras de metano. Por tanto, la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) tiene una gran importancia para el proceso fermentativo recomendándose un rango de 20-30 como el óptimo.
- **Tóxicos e Inhibidores:** Las sustancias inhibidoras son compuestos que bien están presentes en el residuo antes de su digestión o bien se forman durante el proceso fermentativo anaerobio. Estas sustancias reducen el rendimiento de la digestión e incluso pueden llegar a causar la desestabilización completa del proceso. A determinados niveles los AGV (ácidos grasos volátiles) generan serios problemas de inhibición sobre todo en combinación con niveles bajos de pH. Otros problemas de inhibición son los causados por el amonio, el ácido sulfhídrico, o los ácidos grasos de cadena larga. Los pesticidas, desinfectantes o antibióticos presentes en algunos subproductos también pueden llegar a afectar el proceso según su concentración.
- **Temperatura:** El proceso se lleva a cabo satisfactoriamente en dos rangos bien definidos: entre 10 °C y 37 °C, para la flora de bacterias mesofílicas, y entre 55 °C y 60 °C para el rango termofílico. También se ha reconocido la existencia de bacterias que se desarrollan en un intervalo de 6 °C y 20 °C, denominadas psicrófilicas; pero la cinética de degradación determina que este tipo de flora no tenga interés práctico para el diseño de biodigestores. Sin embargo para que las bacterias trabajen en forma óptima, se requiere mantener la temperatura lo más constante posible, es decir sin saltos bruscos. El proceso fermentativo anaeróbico no genera una cantidad apreciable de calor, por lo tanto las temperaturas mencionadas anteriormente deben lograrse desde el exterior. El proceso mesofílico es más estable y más adecuado para utilizar en el medio rural, con biodigestores de pequeño volumen y bajo costo. El proceso termofílico presenta ventajas para los casos de grandes instalaciones, donde el volumen del material a digerir es muy grande; en consecuencia, con mayores temperaturas se obtiene mayor conversión de materia orgánica en biogás y



velocidad de generación. Se obtienen así tamaños menores de digestores y se compensa la mayor tecnificación para el control de temperatura. Como regla general *una variación de unos dos grados en pocas horas influye negativamente en la producción y estabilidad del biodigestor.*

A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión dando lugar a mayores producciones de biogás.

- **Agitación:** En función de la tipología de reactor debe transferirse al sistema el nivel de energía necesario para favorecer la transferencia de sustrato a cada población de bacterias, siendo necesaria un equilibrio entre la buena homogeneización y la correcta formación de agregados bacterianos.
- **Tiempo de Retención Hidráulico (TRH):** Es el cociente entre el volumen del digestor y el caudal de alimentación, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos, para alcanzar los niveles de energía y/o reducción de la carga contaminante que se hayan prefijado.
- **Carga Orgánica Volumétrica (COV):** Es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el digestor, expresada normalmente en sólidos volátiles, por unidad de volumen y tiempo.

4.6 Clasificación de los Biodigestores

A continuación se hará una clasificación de biodigestores según distintos criterios

4.6.1 Según Sistema de Carga

4.6.1.1 Sistema Batch o Discontinuo

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. Normalmente consiste en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás.

Este sistema es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente. En este tipo de sistemas se usa una batería de digestores que se cargan a diferentes tiempos para que la producción de biogás sea constante. Este tipo de digestor es también ideal a nivel de laboratorio si se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellas. Con o sin agitación. Requieren para acelerar su



arranque de una proporción de inóculo 20%. Su curva de producción de gas sigue la característica (arranque-estabilización-agotamiento). En la Figura 4.4 se muestra un biodigestor tipo batch.

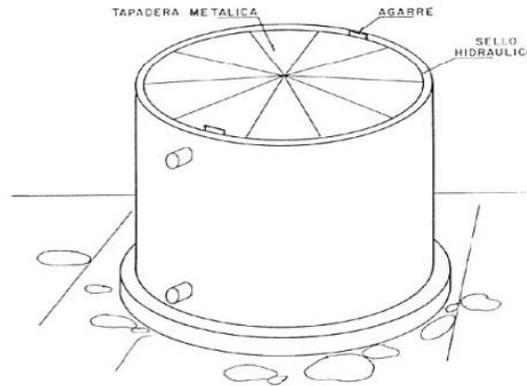


Figura 4.4 - Biodigestor Batch

Este tipo de digestores son eficaces para la digestión de materiales celulósicos que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida. Su utilización no está muy difundida.

4.6.1.2 Sistema Semicontinuo

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. El gasómetro está integrado al sistema, en la parte superior del pozo se tiene una campana flotante donde se amacena el gas, balanceada por contrapesos, y de ésta sale el gas para su uso; en esta forma la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de menos de 20 cm de columna de agua. Por lo general el volumen del gasómetro es del orden de 1/3 del biogás generado al día.

Este tipo de digestores presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generándose entre 0,5 a 1 volumen de gas por volumen de digestor, y aún más.

En lo que respecta a los digestores tipo chino, estos son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo, y se construyen totalmente enterrados.



En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogás 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 en los tubos de entrada y salida a subir, y llegándose a alcanzar presiones internas de hasta más de 100 cm de columna de agua. La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0,1 a 0,4 m³ de biogas/m³ de digestor.

A pesar de que el digestor tipo chino es poco eficiente para generar biogás, es excelente en la producción de bioabono, ya que los tiempos de retención son en general extensos.

4.6.1.2 Sistema Continuo

Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales. En general son plantas muy grandes, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control. Por lo tanto este tipo de plantas son más bien instalaciones tipo industriales, donde se genera una gran cantidad de biogás el que a su vez se aprovecha en aplicaciones industriales.

4.6.2 Según su Intensidad de Mezcla

4.6.2.1 Mezclado Parcial o Nulo

En este grupo se encuentran los pequeños digestores rurales en los cuales los métodos de agitación son muy rudimentarios (agitadores del tipo manual o rotación de la campana gasométrica).

En otros casos como los digestores tipo horizontal la agitación se logra mediante la circulación del substrato dentro de la cámara de digestión provista de una serie de tabiques.

El flujo puede ser también ascendente o descendente, lo que dependerá de la ubicación de las cañerías de entrada y salida.

4.6.2.2 Mezclado Completo o Perfecto

En este tipo de diseño, el substrato que ingresa al biodigestor se dispersa inmediatamente en todo el volumen del mismo. La composición de la corriente de descarga es de características similares a la mezcla interna del biodigestor. Esto ocurre siempre que existan buenas condiciones de mezclado. En estos digestores se busca que el substrato dentro de la cámara se mezcle en forma total. En el caso de los reactores calefaccionados, esta acción asegura una distribución uniforme de la temperatura en todo el volumen.

Se debe tener mucho cuidado con la intensidad y periodicidad de la agitación, para no afectar el delicado equilibrio bacteriano.



Para este modelo es necesario contar con una superficie cilíndrica o esférica, y dotar al mismo de agitadores (mecánicos o neumáticos) para que se produzca la mezcla anteriormente mencionada.

4.6.3 Según el Manejo del Substrato

4.6.3.1 Contacto Anaeróbico

Tanto en este como en los siguientes sistemas se ha buscado algún medio para retener la mayor cantidad de bacterias activas dentro de la cámara de digestión a fin de lograr menores tiempos de retención y consecuentemente menores volúmenes de digester para tratar la misma cantidad de biomasa. En la figura 4.5 representa un reactor con el sistema anteriormente mencionado.

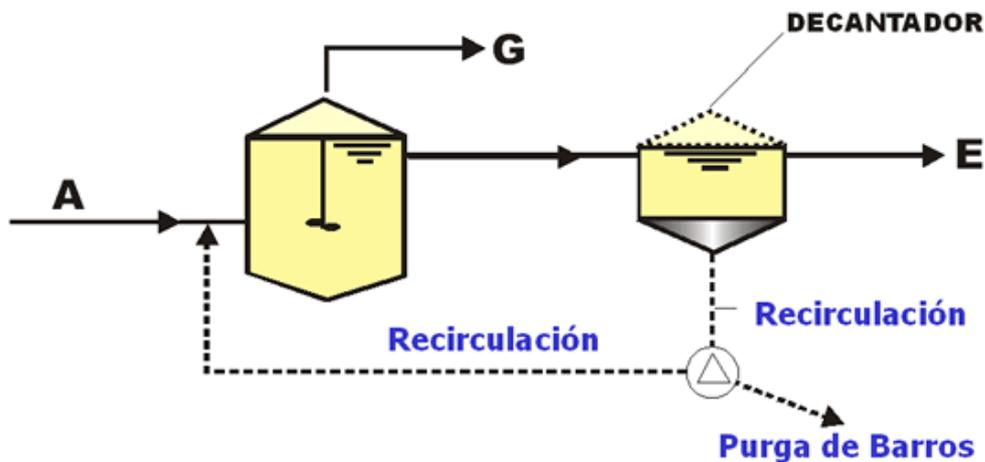


Figura 4.5 – Contacto Anaeróbico

En estos digestores la pileta de sedimentación a la salida de los mismos le da la posibilidad a las bacterias que han salido con el efluente a asentarse y decantar para luego ser reintroducidas en forma de lodo, mezclado con el material de carga como inóculo.

4.6.3.2 Lecho de Lodos

En este sistema se favorece la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos o consorcios, de forma que por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre que en la parte superior exista un buen separador sólido (biomasa) / líquido / gas. El diseño más común es el Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), el cual está siendo extensamente aplicado al tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria. Es el diseño más simple de entre los



sistemas con retención de biomasa y el único limitante para su aplicación es que la biomasa activa granule, esto es, que forma agregados de alta densidad. Para ello es determinante la composición del agua a tratar y mantener una operación adecuada. En la figura 4.6 representa un reactor de tipo U.A.S.B.

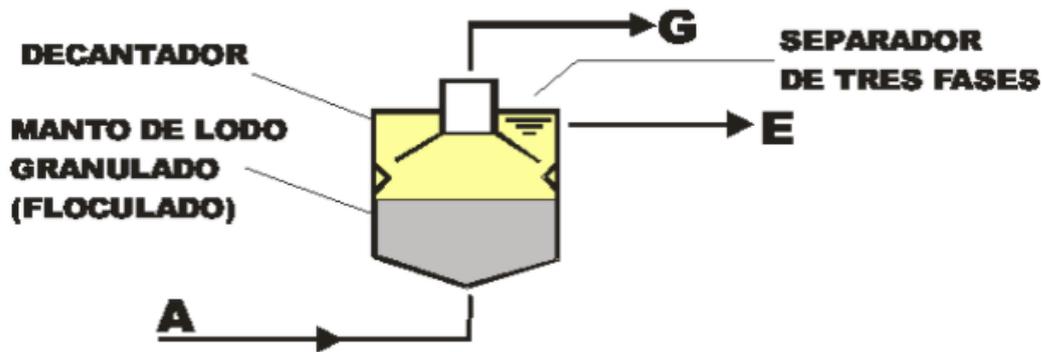


Figura 4.6 – U.A.S.B

4.6.3.3 Lecho Fluidizado

En este sistema las bacterias se encuentran fijadas, formando una biopelícula, sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante el flujo ascendente adecuado del fluido. Para mantener el caudal adecuado, que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación.

Puede ser aplicado a aguas residuales, especialmente de la industria agroalimentaria, y a fracciones líquidas o sobrenadante de residuos ganaderos, aunque las experiencias en este ámbito son muy limitadas. En la figura 4.7 representa un reactor de tipo lecho fluidizado.

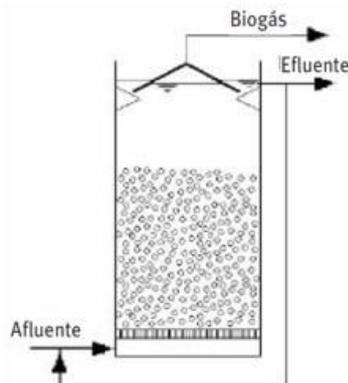


Figura 4.7 – Lecho Fluidizado



4.6.3.4 Filtro Anaeróbico

Un Filtro Anaeróbico es un reactor biológico de cama fija. Al fluir las aguas residuales por el filtro, se atrapan las partículas y se degrada la materia orgánica por la biomasa que está adherida al material del filtro. El Filtro Anaeróbico puede ser operado ya sea con flujo ascendente o descendente. Se recomienda el modo de flujo ascendente porque hay un menor riesgo de que la biomasa fijada sea arrastrada.

Este sistema ha sido extensamente aplicado para el tratamiento de aguas residuales de industria agroalimentaria, y existen experiencias piloto para la fracción líquida de residuos ganaderos. El coste de inversión es un limitante importante para su implantación. En la figura 4.8 representa un reactor de tipo filtro anaeróbico.

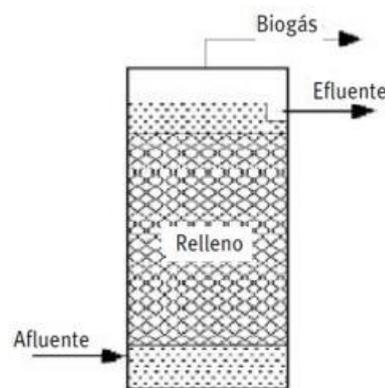


Figura 4.8 – Filtro Anaeróbico

4.6.4 Según el Manejo Bioquímico

4.6.4.1 Una Etapa

Todos los tipos de digestores vistos hasta ahora se agrupan en esta categoría debido a que todas las etapas de digestión anaeróbicas se efectúan en una única cámara, en la cual todas las bacterias están sometidas a las mismas condiciones.

4.6.4.2 Dos Etapas

Estos consisten en un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa.

Si la primera etapa consiste en un reactor discontinuo, el líquido tratado en la segunda es el obtenido por percolación en la primera una vez recirculado el efluente de la segunda. Este



sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor.

Ha sido aplicado con éxito para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, de ganado vacuno.

4.7 Modelos de Biodigestores más Difundidos

Más del 80% de las plantas de biogás difundidas en el mundo pertenecen a dos tipos de diseños, cuyos nombres derivan de los países en los cuales se realizaron los primeros modelos y posteriormente se les dio una difusión masiva. Los modelos son el tipo chino e hindú.

4.7.1 Modelo Chino

Este modelo utiliza el principio de “prensa hidráulica”, concebido en un diseño que no utiliza partes móviles. Se conforman únicamente de una sola cámara, cerrada por un fondo cónico y una cúpula esférica. El biogás se almacena dentro del biodigestor, provocando una presión variable. A medida que esta aumenta, fuerza a subir el nivel del líquido interno en la cámara de carga y de descarga. Es por este motivo que el volumen de estos compartimientos de ser mayor a que en el modelo hindú.

Si bien el modelo chino es más sencillo de construir pues tiene menos partes; se deben evitar la formación de fisuras para que no se produzcan pérdidas de biogás. Por otro lado, al existir presión variable, se deberá contar con algún dispositivo de regulación de caudal de biogás, caso contrario, se estaría perdiendo eficiencia en su uso. La figura 4.9 muestra un biodigestor modelo chino.

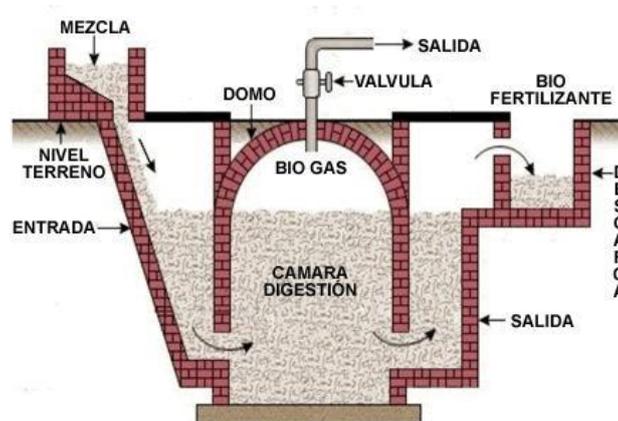


Figura 4.9 – Modelo Chino



4.7.2 Modelo Hindú

El modelo hindú se compone por una cámara de carga, una de descarga y una cilíndrica donde se realiza la digestión. Esta última puede estar compuesta por un tabique que la divide en dos partes, de forma que el material a degradarse cumpla con el tiempo de residencia calculado. Sobre la cámara cilíndrica se coloca el gasómetro, donde se almacena el biogás generado. Este se ajusta a la forma de dicha cámara, de forma que varíe su volumen a medida que aumenta la producción de biogás o bien, se consuma el mismo.

Una alternativa a estos diseños es colocar el gasómetro separado del biodigestor, lo que incrementa el costo del equipo, pero facilita cuestiones de diseño.

En la figura 4.10 se muestra un biodigestor modelo hindú con el gasómetro incorporado en la cámara de digestión.

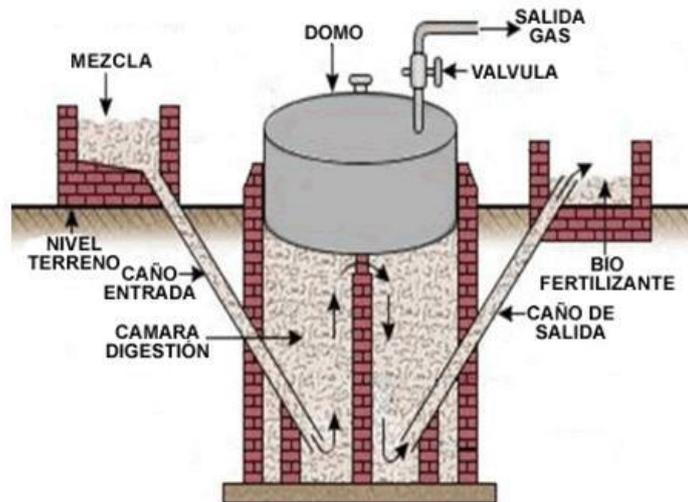


Figura 4.7.2 – Modelo Hindú



CAPÍTULO 5: REACTOR

5.1 Conceptos

Sólidos totales (ST): Peso de la materia sólida que permanece después de haber secado una muestra de materia orgánica a una temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, hasta peso constante. Generalmente se da como porcentaje (%ST) de la materia sólida.

Sólidos volátiles (SV): Porción de los sólidos totales que se volatilizan al llevarlos a una temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Generalmente se da como porcentaje (%SV) de los ST.

Vale aclarar que los cálculos que se realizarán son de carácter general y tratan de abarcar las características de los tipos de biomasa que más abundan en nuestra región. De esta manera se obtendrá un reactor cuyo tamaño permitirá flexibilidad en las condiciones de los ensayos.

En caso de que las características de los sustratos a ensayar discrepen mucho de las utilizadas para el diseño o bien se trabaje con otra temperatura, lo único que debe hacerse es recalcular las proporciones de la mezcla a utilizar. A modo de ejemplo, más adelante se analizarán diferentes casos.

5.2 Características del Proceso

Los procesos anaeróbicos se puede clasificar de tres formas según la temperatura con la que se realicen, la misma determinará el tipo de bacteria actuante sobre la materia orgánica, como se ve en la tabla 5.1¹

| Fermentación | Mínimo | Óptimo | Máximo | Tiempo de fermentación |
|--------------|----------|---------|---------|------------------------|
| Psicrofílica | 4-10 °C | 15-18°C | 20-25°C | Sobre 100 días |
| Mesofílica | 15-20 °C | 25-35°C | 35-45°C | 30-60 días |
| Termofílica | 25-45°C | 50-60°C | 75-80°C | 10-15 días |

Tabla 5.1 – Rangos de Temperatura y Tiempos de Fermentación

Hasta el momento, el rango psicrófilico ha sido poco estudiado y, en general, se plantea como poco viable debido a que necesita un reactor de gran tamaño para lograr una producción

¹ VARNERO MORENO, M. T. (2011). *Manual de biogás*. Santiago, Chile. Página 39.



de biogás considerable. El régimen mesofílico de operación es el más utilizado, a pesar de que en la actualidad se está implementando cada vez más el rango termofílico, para conseguir una mayor velocidad del proceso, lo que implica, a la vez, un aumento en la eliminación de organismos patógenos.

El dispositivo debe replicar el funcionamiento de un biodigestor a escala real para así recopilar datos cuyos valores sean representativos. El tamaño del reactor se calculará teniendo en cuenta un proceso mesofílico, ya que el mismo requiere un tiempo de retención mayor al termofílico y por lo tanto necesita un reactor de mayor volumen.

Las condiciones adoptadas son:

- Temperatura: 25 °C
- Tiempo de fermentación: 30 días

5.3 Carga Diaria

La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. Mediciones realizadas utilizando mezclas de estiércoles animales en agua han determinado que para digestores continuos el porcentaje de sólidos óptimo oscila entre el 8% y el 12%.

Para calcular el volumen de agua que se debe agregar en la mezcla para dar la dilución adecuada es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia prima fresca. Dicho valor se extrae de la tabla 5.2².

² VARNERO MORENO, M. T. (2011). *Manual de biogás*. Santiago, Chile. Página 37.



| Materias primas | % Sólidos totales |
|---------------------------|-------------------|
| Residuos animales | |
| Bovinos | 13.4 – 56.2 |
| Porcinos | 15.0 – 49.0 |
| Aves | 26.0 – 92.0 |
| Caprinos | 83.0 – 92.0 |
| Ovejas | 32.0 – 45.0 |
| Conejos | 34.7 – 90.8 |
| Equinos | 19.0 – 42.9 |
| Excretas humanas | 17.0 |
| Residuos vegetales | |
| Hojas secas | 50.0 |
| Rastrojo maíz | 77.0 |
| Paja trigo | 88.0 – 90.0 |
| Paja arroz | 88.8 – 92.6 |
| Leguminosas (paja) | 60.0 – 80.0 |
| Tubérculos (hojas) | 10.0 – 20.0 |
| Hortalizas (hojas) | 10.0 – 15.0 |
| Aserrín | 74.0 – 80.0 |

Tabla 5.2 - Datos promedios sobre el contenido de solidos totales de diversos residuos

Para el cálculo suponemos una materia prima con un % Solidos Totales (%ST) de 30, este valor es representativo de las excretas producidas por las especies ganaderas que más se crían en la zona.

Además se considerara que se dispone de 0,5Kg de excreta fresca diaria para alimentación del reactor.

Datos:

- Materia Prima: 0,5Kg/día
- %ST: 30

Se calcula cantidad de agua que se necesita agregar por Kg de materia prima

$$\%Dilución = \frac{1Kg \text{ de excreta fresca} \times \%ST}{1Kg \text{ de excreta fresca} + \text{Agua Agregada}}$$

Por lo mencionado anteriormente, se adopta % Dilución = 10% para el cálculo.



$$0,1 = \frac{1\text{Kg de excreta fresca} \times 0,3}{1\text{Kg de excreta fresca} + \text{Agua Agregada}}$$

$$\text{Agua Agregada} = \frac{1\text{Kg de excreta fresca} \times 0,3}{0,1} - 1\text{Kg de excreta fresca}$$

$$\text{Agua Agregada} = 2\text{lt/Kg}$$

$$\text{Agua Diara} = 2 \frac{\text{lt}}{\text{Kg}} \times 0,5 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$$

$$\text{Agua Diara} = 1 \frac{\text{lt}}{\text{día}}$$

Como en la mayoría de las excretas frescas la cantidad de agua contenida ronda el 80%, se puede suponer sin cometer mucho error que $1\text{dm}^3=1\text{Kg}$ de excreta fresca. Por lo tanto $0,5\text{Kg}$ de excreta= $0,5 \text{ lt}$.

$$\text{Carga diaria} = 1\text{lt Agua} + 0,5\text{lt de excreta fresca}$$

$$\text{Carga Diara} = 1,5 \frac{\text{lt}}{\text{día}}$$

5.4 Volumen del Reactor

Para determinar el volumen del reactor se debe tener en cuenta la carga diaria y el tiempo de retención o fermentación con el que se trabaje. Anteriormente se adoptó un tiempo de fermentación de 30 días. Por lo tanto el volumen del reactor será:

$$\text{Vol. Reactor} = \text{Carga Diaria} \times \text{Tiempo de fermentación}$$

$$\text{Vol. Reactor} = 1,5 \frac{\text{lt}}{\text{día}} \times 30\text{días}$$

$$\text{Vol. Reactor} = 45\text{lt}$$



5.5 Velocidad de Carga Orgánica

La misma debe encontrarse entre 1 y 6 $\frac{\text{Kg de SV}}{\text{día m}^3}$ según la bibliografía³ consultada.

$$\text{Vel. Carga} = \frac{\text{Material degradable} \left(\frac{\text{Kg de SV}}{\text{día}} \right)}{\text{Vol. Digestor} (\text{m}^3)}$$

El material degradable se calcula como:

$$\text{Material degradable} = \text{cant. excreta fresca} \times \%ST \times \%SV$$

De la bibliografía⁴ utilizada se obtiene un valor promedio de %SV=85.

$$\text{Material degradable} = \frac{0,5\text{Kg}}{\text{día}} \times 0,30 \times 0,85$$

$$\text{Material degradable} = 0,128 \frac{\text{Kg de SV}}{\text{día}}$$

La velocidad de carga será:

$$\text{Vel. Carga} = \frac{0,128 \frac{\text{Kg de SV}}{\text{día}}}{0,045\text{m}^3}$$

$$\text{Vel. Carga} = \frac{0,128 \frac{\text{Kg de SV}}{\text{día}}}{0,045\text{m}^3}$$

$$\text{Vel. Carga} = 2,84 \frac{\text{Kg de SV}}{\text{m}^3 \text{ día}}$$

³ HUERGA, I. R., BUTTI, M., & VENTURELLI, L. (2013). *Biodigestores de pequeña escala. un análisis práctico sobre su factibilidad*. Página 16.

⁴ GROPELLI, E., & GIAMPAOLI, O. (2012). *Biodigestores: una propuesta sustentable*. Ediciones UNL, Universidad Nacional del Litoral. Página 42.



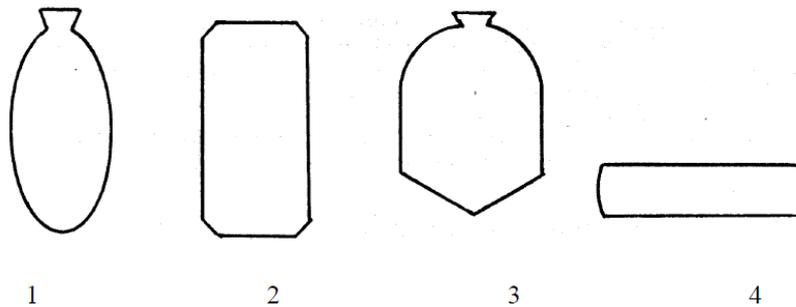
El valor obtenido se encuentra dentro del rango recomendado.

5.6 Dimensiones

En cuanto a la geometría de reactor, los formatos son muy variables pero existen cinco formas básicas⁵ de las cuales derivan las restantes.

Cada forma tiene sus ventajas y desventajas, por ejemplo los digestores del tipo horizontal se adaptan mejor a las zonas con algún tipo de impedimento en el subsuelo.

Con respecto a la producción de gas no existen hasta el momento evidencias de peso que demuestren que la forma de la cámara de carga tenga importancia en la producción de gas, sin embargo los digestores de última generación, de mayores rendimientos, son propensos a las formas de cilindros o paralelepípedos verticales. La figura 5.1 muestra diferentes formas de reactores.



Formas de digestores. 1 Ovoide; 2 Cilindro o Paralelepípedo vertical; 3 Domo; 4 Cilindro o Paralelepípedo Horizontal.

Figura 5.1 – Modelos de Reactores

De lo expuesto anteriormente, se adopta la forma cilíndrica cuyo volumen está dado por:

$$\text{Vol. cilindro} = \frac{\pi \times d^2 \times h}{4}$$

Donde:

H: altura del cilindro

D: diámetro

⁵ HILBERT, J. A. (2003). *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural, INTA Castelar, Morón, Argentina. Página 32.



Este volumen representa la máxima carga que tendrá el reactor, se le debe adicionar de 20 a 25% de capacidad, que sirve para depósito de lodos, compensar el volumen ocupado por el agitador y facilitar la captación del biogás.

$$\text{Vol. Reactor Final} = \text{Vol. Reactor} \times 1,2$$

$$\text{Vol. Reactor Final} = 45\text{lt} \times 1,2$$

$$\text{Vol. Reactor Final} = 54\text{lt}$$

Determinado el volumen final, se adopta un diámetro de 32 cm, la altura se obtiene mediante:

$$h = \frac{4 \times \text{Vol. cilindro}}{\pi \times d^2}$$

$$h = \frac{4 \times 54000 \text{ cm}^3}{\pi \times (35\text{cm})^2}$$

$$h = 67 \text{ cm}$$

La figura 5.2 es un bosquejo simple del reactor. Para más detalles remitirse al Plano N°4, “Cuerpo Cilíndrico Reactor” del Anexo II “Planos”.

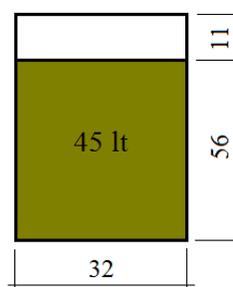


Figura 5.2 - Reactor (Medidas en cm)



5.7 Ejemplo

A modo de ejemplo se plantea un caso en donde las condiciones de ensayo cambian a las utilizadas para el diseño. Vale aclarar que cualquiera sea el substrato con el que trabaje el reactor, debe respetarse los 45lt de carga ya que la descarga del material degradado se realiza por diferencia de niveles. Para este ejemplo tenemos:

- Volumen 45lt
- Tiempo de retención: 25 días
- Materia Prima: Desechos de ponedoras (aviar)
- %ST: 53
- %SV: 66
- Densidad: 0,572 Kg/lt
- Dilución: 10%

$$\%Dilución = \frac{1\text{Kg de excreta fresca} \times \%ST}{1\text{Kg de excreta fresca} + \text{Agua Agregada}}$$

$$0,1 = \frac{1\text{Kg de excreta fresca} \times 0,53}{1\text{Kg de excreta fresca} + \text{Agua Agregada}}$$

$$\text{Agua Agregada} = \frac{1\text{Kg de excreta fresca} \times 0,53}{0,1} - 1\text{Kg de excreta fresca}$$

$$\text{Agua Agregada} = \frac{4,3\text{lt}}{\text{Kg}} = \frac{2,47 \text{ lt de agua}}{\text{lt de excreta}}$$

$$\text{Vol. Reactor} = \text{Carga Diaria} \times \text{Tiempo de fermentación}$$

$$45\text{lt} = \text{Carga Diaria} \times 25 \text{ día}$$

$$\text{Carga Diara} = \frac{45 \text{ lt}}{25 \text{ día}} = 1,8 \frac{\text{lt}}{\text{día}}$$

Luego se plantea:

$$a + b = 1,8 \text{ lt}$$



$$\frac{b}{a} = 2,47$$

Siendo a y b las cantidades en litros de estiércol y agua respectivamente de la mezcla.

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtiene que:

- $a = 0,519 \text{ lt/día} = 0,297 \text{ Kg/día}$
- $b = 1,281 \text{ lt/día}$

$$\text{Material degradable} = \frac{0,297 \text{Kg}}{\text{día}} \times 0,53 \times 0,66$$

$$\text{Material degradable} = 0,104 \frac{\text{Kg de SV}}{\text{día}}$$

La velocidad de carga será:

$$\text{Vel. Carga} = \frac{0,104 \frac{\text{Kg de SV}}{\text{día}}}{0,045 \text{m}^3} = 2,31 \frac{\text{Kg de SV}}{\text{m}^3 \text{ día}}$$

Que está dentro de los valores recomendados.

5.8 Análisis de Estructura

5.8.1 Tapa Reactor

Para verificar la resistencia y rigidez de este componente se recurrió a una simulación por elementos finitos del programa Autodesk Inventor 2016. El informe se puede ver en el Anexo III- "Informes de Simulaciones". La presión utilizada para la simulación es de 0,51 Kg/cm², que es la máxima admisible antes de que active la válvula de seguridad.

En base a este análisis se puede comprobar que este componente tiene una excelente resistencia y rigidez, como se observa en la Figura 5.3 y la tabla 5.3.

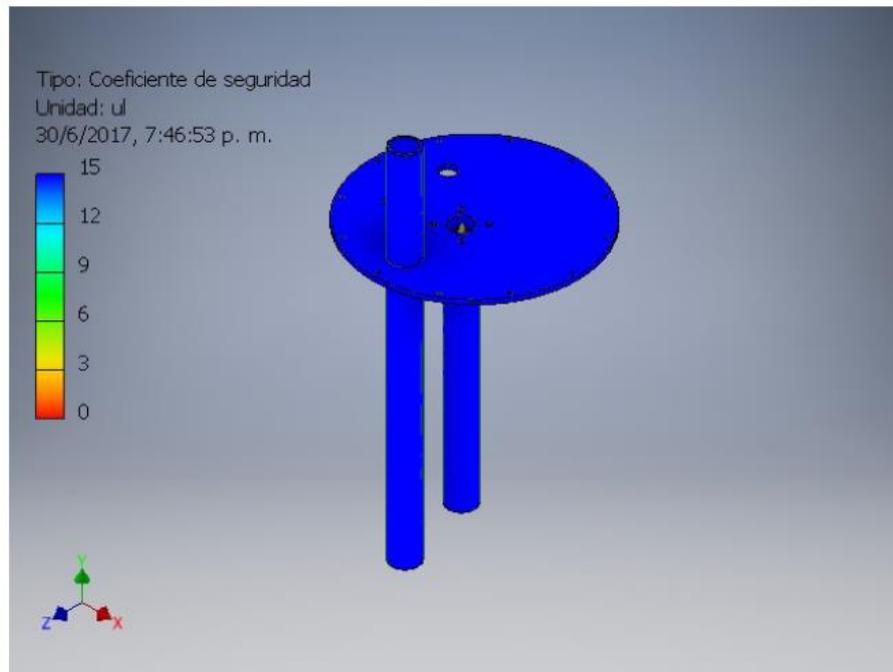


Figura 5.3 – Coeficiente de Seguridad

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|---------------------------|-------------------------|------------------|
| Volumen | 1435510 mm ³ | |
| Masa | 11,4841 kg | |
| Tensión de Von Mises | 0,0000000184189 MPa | 0,154641 MPa |
| Primera tensión principal | -0,0612552 MPa | 0,0639817 MPa |
| Desplazamiento | 0 mm | 0,00000446015 mm |
| Coeficiente de seguridad | 15 su | 15 su |

Tabla 5.3 – Resumen Simulación

5.8.2 Reactor

Para verificar la resistencia y rigidez de este componente se recurrió a una simulación por elementos finitos del programa Autodesk Inventor 2016. El informe se puede ver en el Anexo III- “Informes de Simulaciones”.

La presión utilizada para la simulación será:

$$\text{Presión} = P_{\text{gas}} + P_{\text{hid}}$$

Donde:

- P_{gas} : Presión ejercida por el biogás almacenado. Su valor es 0,51 Kg/cm² (Presión que activa la válvula de seguridad).



-Phid: Presión hidrostática ejercida por la mezcla.

Para el análisis se considera que ambas presiones toman sus máximos valores al mismo tiempo, lo cual es una condición muy improbable. Dicho esto, los valores son:

$$P_{\text{gas}} = 0,51 \text{ Kg/cm}^2$$

$$P_{\text{hid}} = 746,3 \text{ mmH}_2\text{O} = 0,074 \text{ Kg/cm}^2$$

La presión para el análisis estructural resulta:

$$\text{Presión} = P_{\text{gas}} + P_{\text{hid}}$$

$$\text{Presión} = 0,51 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} + 0,074 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Presión} = 0,584 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

En base a este análisis se puede comprobar que este componente tiene una excelente resistencia y rigidez, como se observa en la figura 5.4 y la tabla 5.4.

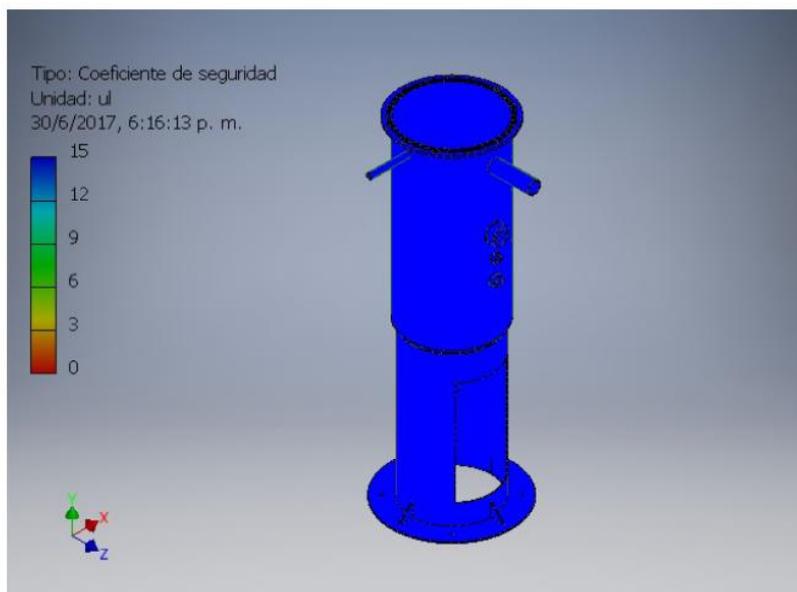


Figura 5.4 – Coeficiente de Seguridad



| Nombre | Mínimo | Máximo |
|---------------------------|-------------------------|---------------|
| Volumen | 4746290 mm ³ | |
| Masa | 37,9569 kg | |
| Tensión de Von Mises | 0 MPa | 11,0798 MPa |
| Primera tensión principal | -1,44483 MPa | 11,8271 MPa |
| Desplazamiento | 0 mm | 0,0210604 mm |
| Coefficiente de seguridad | 15 su | 15 su |

Tabla 5.4 – Resumen Simulación



CAPÍTULO 6: GASÓMETRO

6.1 Introducción

La primera opción que surge para medir la producción de biogás por unidad de tiempo es la utilización de un medidor de caudal, pero su costo ronda los US\$7000 (Dato aportado por la empresa SILA). Lo que prácticamente hace inviable la construcción del prototipo.

Como solución se recurre a un sistema de medición indirecta de caudal, el mismo dispone de un gasómetro y un medidor de distancia. Este sistema permitirá reducir significativamente los costos de construcción.

6.2 Diseño

Para el diseño se debe tener en cuenta que el gasómetro como se ve en la figura 6.1 se compone de dos recipientes cilíndricos, un fijo (verde) cuya función es contener el agua que sirve de sello hidráulico y otro móvil (amarillo) en el cual se almacena el biogás para su medición y posterior descarga.



Figura 6.1-Gasómetro para Medición



6.3 Cilindro Superior (Móvil)

6.3.1 Dimensionamiento

Para dimensionar el cilindro móvil del gasómetro, primero hay que calcular un estimativo de cuanto biogás se producirá por unidad de tiempo.

Los valores de producción estimada de biogás según el tipo de materia orgánica se muestran en la tabla 6.1⁶

| ESPECIE | PESO VIVO | kg ESTIERCOL/día | l/kg.S.V. | %CH ₄ |
|----------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| Cerdos | 50 | 4,5 - 6 | 340 - 550 | 65 - 70 |
| Vacunos | 400 | 25 -40 | 90 - 310 | 65 |
| Equinos | 450 | 12 - 16 | 200 - 300 | 65 |
| Ovinos | 45 | 2,5 | 90 - 310 | 63 |
| Aves | 1.5 | 0,06 | 310 - 620 | 60 |
| Caprinos | 40 | 1,5 | 110 - 290 | -- |

Tabla 6.1 – Producción de Biogás

Como el equipo es para distintos tipos de excretas, se toma un valor promedio de todas las que conforman el cuadro y el cual resulta 294 lt/Kg SV.

Del dimensionamiento del reactor tenemos que nuestra carga diaria de Solidos Volátiles es:

$$\text{Material degradable} = 0,128 \frac{\text{Kg de SV}}{\text{día}}$$

Por lo tanto nuestra producción de biogás será:

$$\text{Prod. Biogas} = 294 \frac{\text{lt}}{\text{Kg de SV}} \times 0,128 \frac{\text{Kg de SV}}{\text{día}}$$

$$\text{Prod. Biogas} = 37,63 \frac{\text{lt}}{\text{día}}$$

$$\text{Prod. Biogas} = 1,57 \frac{\text{lt}}{\text{h}}$$

⁶ HILBERT, J. A. (2003). *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural, INTA Castelar, Morón, Argentina. Página 7.



Para tener una aproximación a las dimensiones finales, se escoge un gasómetro de 10lt de capacidad, teniendo en cuenta que si el reactor trabaja en el rango termofílico, la producción de biogás será mucho mayor. No es necesario que el gasómetro tenga 10 lt exactamente ya que el censado de datos se realiza cuando el cilindro móvil llega al tope máximo (acumulo 10 lt de gas) y por cada hora transcurrida de la prueba (difícilmente coincida con la condición anterior).

La forma del gasómetro es cilíndrica y se adopta un diámetro $d=19,2$ cm (Diámetro interior de un caño de PVC estándar), la altura se obtiene mediante:

$$h = \frac{4 \times \text{Vol. cilindro}}{\pi \times d^2}$$

$$h = \frac{4 \times 10000 \text{ cm}^3}{\pi \times (19,2\text{cm})^2}$$

$$h = 34,5 \text{ cm}$$

A esta altura se le adiciona 44 cm los cuales sirven de sello hidráulico y para ingreso de los tubos de carga y descarga del biogás.

La figura 6.2 es un bosquejo simple del cilindro móvil o superior del gasómetro. Para más detalles remitirse al Plano N°14 - “Cilindro Móvil” del Anexo II - “Planos”.

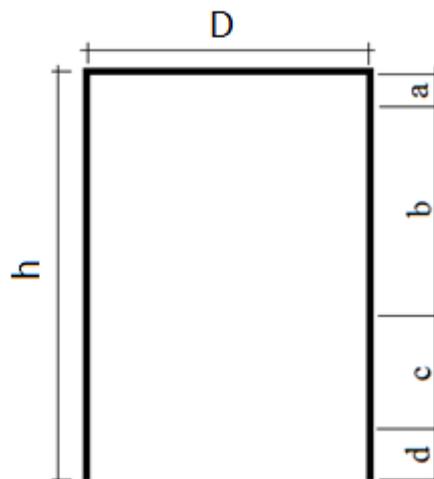


Figura 6.2 – Cilindro Móvil



A continuación se describe que representa cada letra de la figura 6.2:

-D: Diámetro interno del caño (192 mm).

-h: Altura total del cilindro móvil (752 mm).

-a: Parte que no se sumerge en el agua contenida en el recipiente fijo y su función es brindar el espacio para la ubicación de los tubos de carga y descarga de biogás (25 mm).

-b: Volumen para almacenamiento del biogás a medir (345 mm).

-c: Sello hidráulico (347 mm).

-d: Espacio para ingreso de los tubos de carga y descarga (35 mm).

La figura 6.3 muestra el diseño final del cilindro móvil.

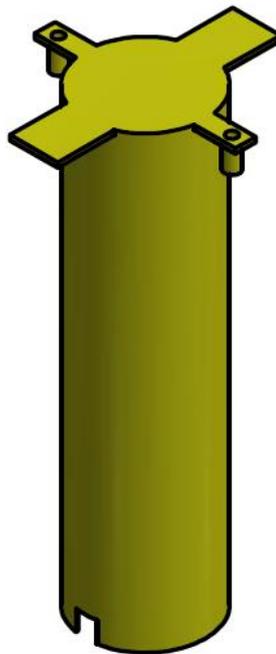


Figura 6.3 – Cilindro Móvil

6.3.2 Presión de Trabajo

Se recomienda⁷ una presión de trabajo de 0,010 a 0,030 kg/cm² y una máxima de 0,050 kg/cm².

⁷ GROPELLI, E., & GIAMPAOLI, O. (2012). *Biodigestores: una propuesta sustentable*. Ediciones UNL, Universidad Nacional del Litoral.



6.3.2.1 Volumen del Cilindro (Vcil)

Utilizando el “iProperties” del software Autodesk Inventor, tenemos que el volumen del cilindro móvil es:

$$\text{Vol.cil} = 2263,1 \text{ cm}^3$$

6.3.2.2 Calculo de la Presión de Trabajo

Con el volumen total (Vol.cil) como dato, se procede a calcular el peso del cilindro móvil del gasómetro (Pcm) y posteriormente la presión ejercida sobre el biogás. Se adopta de material PVC Rígido con densidad de $1,45 \text{ g/cm}^3$ (Dato del fabricante).

$$\text{Pcm} = \text{Vol.cil} \times 1,45 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Pcm} = 2263,1 \text{ cm}^3 \times 1,45 \text{ g/cm}^3 = 3281,5 \text{ g} = 3,3\text{Kg}$$

Para el cálculo de la presión se supone que Pcm está aplicado en la parte superior del cilindro, más precisamente en el área determinada por el diámetro interior del caño de PVC. Resultando:

$$\text{Presión} = \frac{3,3 \text{ Kg}}{\pi \times (9,6 \text{ cm})^2}$$

$$\text{Presión} = 0,0114 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 11,18 \text{ mBar}$$

Presión que se encuentra dentro del rango aceptable.

6.3.3 Análisis de Estructura

Para verificar la resistencia y rigidez de este componente se recurrió a una simulación por elementos finitos del programa Autodesk Inventor 2016. El informe se puede ver en el Anexo III “Informes de Simulaciones”. La presión utilizada para la simulación es de $0,51 \text{ Kg/cm}^2$, que es la máxima admisible antes de que active la válvula de seguridad.

En base a este análisis se puede comprobar que este componente tiene una excelente resistencia y rigidez, como se observa en la Figura 6.4 y la Tabla 6.2.



| Nombre | Mínimo | Máximo |
|-------------------------------|-------------------------|---------------|
| Volumen | 2263030 mm ³ | |
| Masa | 2,91931 kg | |
| Tensión de Von Mises | 0,0000163283 MPa | 1,87478 MPa |
| Tercera tensión principal | -0,988093 MPa | 0,391128 MPa |
| Coefficiente de seguridad | 15 su | 15 su |
| Deformación equivalente | 0,0000000225079 su | 0,00250858 su |
| Primera deformación principal | -0,00000000596237 su | 0,00272184 su |

Tabla 6.2 – Resumen Simulación

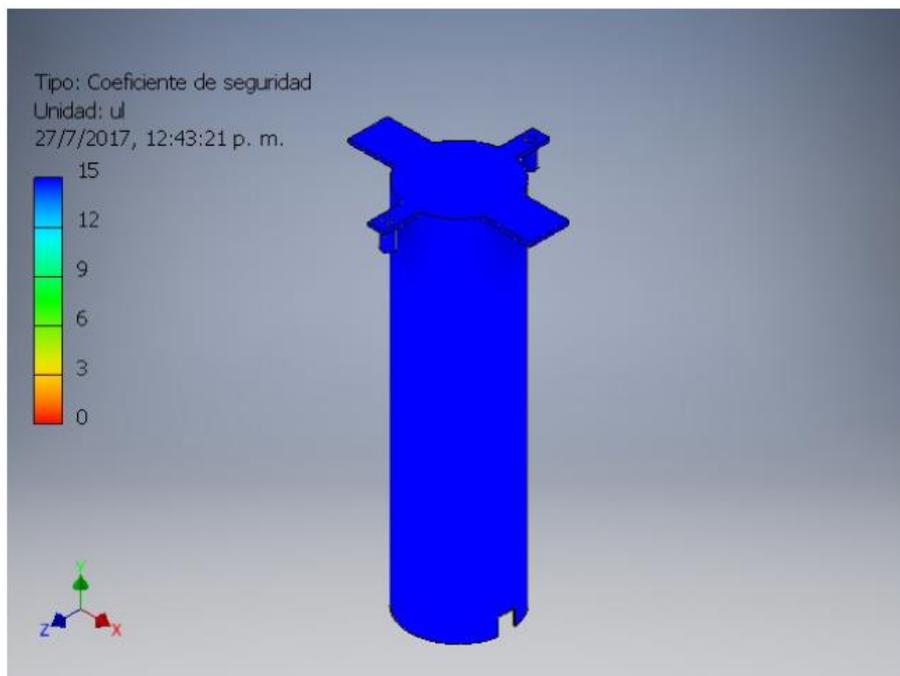


Figura 6.4 – Coeficiente de Seguridad

6.4 Cilindro Inferior (Fijo)

El mismo sirve como contenedor del cilindro móvil, además permite obtener el sello hidráulico para lograr la presión deseada y retener el biogás antes de su medición y posterior descarga al exterior a través de la válvula de escape.

Resulta de gran interés conocer la disminución del nivel de agua que se obtiene por su evaporación y el que se produce debido a la elevación del cilindro móvil, para de esta forma, garantizar la eficacia del sello hidráulico.



6.4.1 Tasa de Evaporación

Para obtener un valor lo más realista posible se utilizaran dos métodos para la obtención de la tasa de evaporación diaria, los mismos se describen a continuación.

6.4.1.1 Método Analítico

El equipo de ensayo es para uso interior, es decir, no se tiene en cuenta el efecto del viento. El método utilizado para el cálculo es el de “Balance de Energía”.

$$Er = \frac{Rn}{lv \times \rho_w}$$

Donde:

- Er: Tasa de evaporación diaria
- Rn: Flujo neto de radiación (W/m^2)
- lv: Calor latente de vaporización del agua
- ρ_w : Densidad del agua

El flujo neto de radiación se obtiene de la figura 6.5 que se muestra a continuación.



Figura 6.5 - Carta de radiación global diaria media anual en kWh/m^2 día



Para nuestra zona se tiene un $R_n=4500 \text{ Wh / m}^2\text{día}$.

El calor latente de vaporización se obtiene de la Tabla 6.3.

| Sustancia | Punto de fusión (°C) | Calor latente de fusión (J/kg) | Punto de ebullición | Calor Latente de vaporización |
|-----------------|----------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Helio | -269.65 | 5.23×10^5 | -268.93 | 2.09×10^4 |
| Nitrógeno | -209.97 | 2.55×10^4 | -195.81 | 2.01×10^5 |
| Oxígeno | -218.79 | 1.38×10^4 | -182.97 | 2.13×10^5 |
| Alcohol etílico | -114 | 1.04×10^5 | 78 | 8.54×10^5 |
| Agua | 0.00 | 3.33×10^5 | 100.00 | 2.26×10^6 |
| Azufre | 119 | 3.81×10^4 | 444.60 | 3.26×10^5 |
| Plomo | 327.3 | 2.45×10^4 | 1750 | 8.70×10^5 |
| Aluminio | 660 | 3.97×10^5 | 2450 | 1.14×10^7 |
| Plata | 960.80 | 8.82×10^4 | 2193 | 2.33×10^6 |
| Oro | 1063.00 | 6.44×10^4 | 2660 | 1.58×10^6 |
| Cobre | 1083 | 1.34×10^5 | 1187 | 5.06×10^6 |

Tabla 6.3 – Calores Latentes de Vaporización

En este caso para el agua tenemos que:

$$l_v = 2,26 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} = 627,78 \frac{\text{Wh}}{\text{Kg}}$$

Se procede al cálculo de la tasa de evaporación diaria:

$$E_r = \frac{R_n}{l_v \times \rho_w}$$

$$E_r = \frac{4500 \text{ Wh/ m}^2\text{día}}{627,78 \frac{\text{Wh}}{\text{Kg}} \times 1000 \text{ Kg/ m}^3}$$

$$E_r = 7,16 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{día}} = 7,16 \frac{\text{mm}}{\text{día}}$$



6.4.1.2 Método Empírico

El experimento consistió en utilizar diferentes tipos de recipientes, los cuales fueron cargados con agua para luego, transcurrido un tiempo, medir la variación de nivel producido por la evaporación.

En la figura 6.6 se muestra los contenedores empleados.



Figura 6.6 – Recipientes Utilizados

La experiencia duró 6 horas, las condiciones climáticas de inicio y fin se muestran en las figuras 6.7 y 6.8 respectivamente.



Figura 6.7 - Condiciones Climáticas Iniciales



Figura 6.8 - Condiciones Climáticas Finales



Los datos que se obtuvieron se muestran en la Tabla 6.4. Se deben hacer las siguientes observaciones:

- El recipiente 3 tuvo incidencia directa del sol.
- Todos los recipientes estuvieron expuestos al viento.

| DATOS OBTENIDOS | | | | | |
|-----------------|---------------|-------------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| Recipiente | Diámetro (mm) | Vol. Cargado (lt) | Nivel Inicio (mm) | Nivel Final (mm) | Variación de Nivel (mm/h) |
| 1 | 225 | 3,34 | 84 | 83 | 0,1667 |
| 2 | 280 | 4,74 | 77 | 76 | 0,1667 |
| 3 | 300 | 21,2 | 300 | 298 | 0,333 |

Tabla 6.4 - Valores Obtenidos del Ensayo de Evaporación

La tasa de evaporación promedio será:

$$E_r = \frac{(0,1667 + 0,1667 + 0,333) \text{ mm/h}}{3} = 0,222 \text{ mm/h}$$

La disminución de nivel transcurrido las 24hs será:

$$H. \text{ Evap} = 0,222 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \times 24 \text{ h} = \mathbf{5,33 \text{ mm}}$$

Como se observa los resultados obtenidos por ambos métodos son bastante similares.

6.4.2 Dimensiones

El cilindro inferior o fijo del gasómetro posee una altura de 758 mm y un diámetro interior de 220 mm, esto permite que cilindro móvil se introduzca sin mayores inconvenientes.

La figura 6.9 es un bosquejo simple del cilindro fijo. Para más detalles remitirse al Plano N°13 - "Cilindro Fijo" del Anexo II – "Planos".

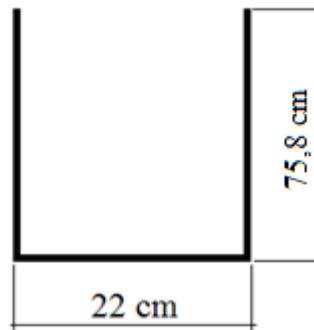


Figura 6.9 - Bosquejo Cilindro Fijo

La figura 6.10 representa el diseño final de este componente

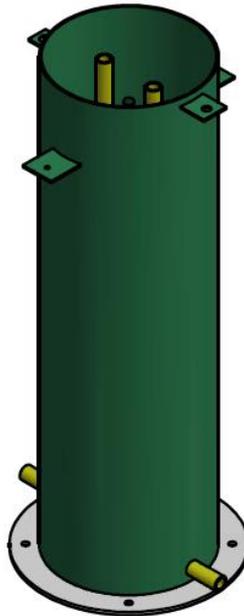


Figura 6.10 – Cilindro Fijo

6.4.3 Variación de Nivel

La elevación del cilindro móvil produce una disminución del nivel de agua en el recipiente fijo. La altura del nivel agua con el cilindro móvil en su punto más bajo es de 733 mm. Se debe calcular a cuanto se reduce ese nivel cuando el cilindro móvil se encuentre elevado a su mayor capacidad, para luego comprobar la eficacia del sello hidráulico.

Se calcula la variación de volumen:



$$\Delta Vol = \frac{\pi \times (D^2 - d^2) \times h}{4}$$

Donde:

- D (diámetro exterior del recipiente móvil) = 20 cm
- d (diámetro interior del recipiente móvil) = 19,2 cm
- h (altura del recipiente móvil que se sumerge) = 73,3 cm

Reemplazando los valores:

$$\Delta Vol = \frac{\pi \times [(20 \text{ cm})^2 - (19,2 \text{ cm})^2] \times 73,3 \text{ cm}}{4} = 1805,4 \text{ cm}^3$$

Se calcula la variación de nivel:

$$\Delta niv = \frac{4 \times \Delta Vol}{\pi \times d^2}$$

Donde:

- d (diámetro interior del recipiente fijo) = 22 cm

$$\Delta niv = \frac{4 \times 1805,4 \text{ cm}^3}{\pi \times (22 \text{ cm})^2} = 4,75 \text{ cm}$$

Este valor representa la disminución del nivel del agua cuando el recipiente móvil este en su punto más alto. Además suponemos que en 3 días no se controló el nivel por evaporación.

Tomando de referencia la figura 6.2 de la página 51, los niveles máximo y mínimo serán:

$$\text{Niv. max} = d + c + b$$

$$\text{Niv. max} = 35 \text{ mm} + 380 \text{ mm} + 318 \text{ mm} = \mathbf{733 \text{ mm}}$$

$$\text{Niv. min} = \text{Niv. max} - \Delta niv$$



$$\text{Niv. min} = 733\text{mm} - 47,5\text{mm} - 21,48\text{mm} = \mathbf{664\text{ mm}}$$

En la figura 6.11 se representan los niveles anteriormente calculados.

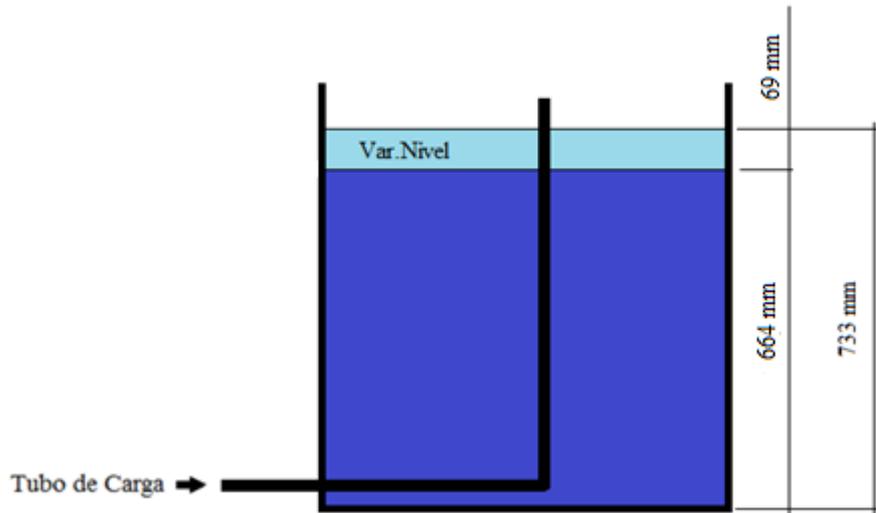


Figura 6.11 - Niveles Cilindro Fijo

6.4.4 Sello Hidráulico

Para evitar que el biogás se fugue por el espacio existente entre el cilindro fijo y el móvil, se debe comprobar que la altura del sello hidráulico (SH) sea mayor a 12 cm. Para el cálculo se considerara al cilindro móvil en su punto más alto ya que es en ese momento donde se tiene el nivel de agua más bajo en el cilindro fijo.

Además se descontará 35 mm al cilindro móvil, los mismo se utilizan para el ingreso de los tubos de carga y descarga. En la figura 6.12 se observan las dimensiones utilizadas para el cálculo.

$$\text{SH} = 758\text{ mm} - 318\text{ mm} - 94\text{ mm} - 35\text{ mm}$$

$$\text{SH} = 311\text{ mm} = \mathbf{31,1\text{ cm}}$$



Como $SH > 12$ cm, el sello hidráulico es efectivo para la presión normal de trabajo y además deja un margen de seguridad para suplir los efectos de la fricción debida al desplazamiento.

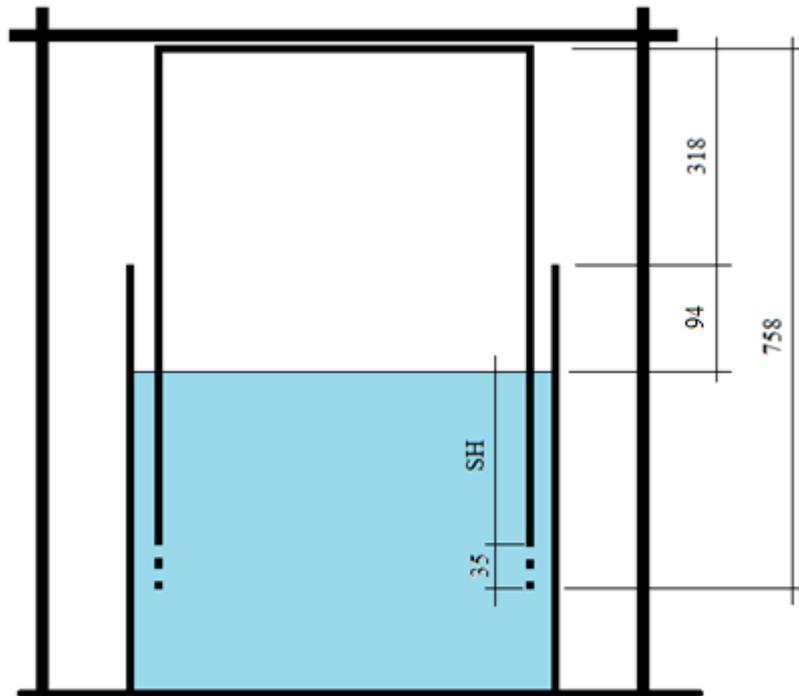


Figura 6.12 - Medidas en mm

6.4.5 Análisis de Estructura

Para verificar la resistencia y rigidez de este componente se recurrió a una simulación por elementos finitos del programa Autodesk Inventor 2016. El informe se puede ver en el Anexo III - “Informes de Simulaciones”.

La presión utilizada para la simulación será:

$$\text{Presión} = P_{\text{gas}} + P_{\text{hid}}$$

Donde:

- P_{gas} : Presión ejercida por el biogás almacenado en el recipiente fijo. 0,51 Kg/cm² (Presión que activa la válvula de seguridad)
- P_{hid} : Presión hidrostática ejercida por el agua sobre el fondo del recipiente.



Para el análisis se considera que ambas presiones toman sus máximos valores al mismo tiempo, lo cual es una condición muy improbable. Dicho esto, los valores son:

$$P_{\text{gas}} = 0,51 \text{ Kg/cm}^2$$

$$P_{\text{hid}} = 546,3 \text{ mmH}_2\text{O} = 0,0733 \text{ Kg/cm}^2$$

La presión para el análisis estructural resulta:

$$\text{Presión} = P_{\text{gas}} + P_{\text{hid}}$$

$$\text{Presión} = 0,51 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} + 0,0733 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Presión} = 0,5833 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

En base a este análisis se puede comprobar que este componente tiene una excelente resistencia y rigidez, como se observa en la figura 6.13 y la tabla 6.5.

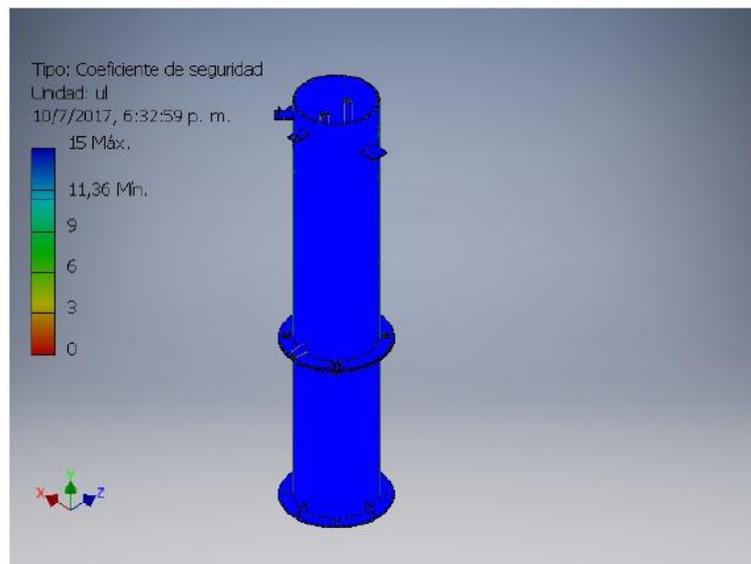


Figura 6.13 – Coeficiente de Seguridad



| Nombre | Mínimo | Máximo |
|---------------------------|-------------------------|---------------|
| Volumen | 3648230 mm ³ | |
| Masa | 29,182 kg | |
| Tensión de Von Mises | 0,000000232416 MPa | 22,0098 MPa |
| Primera tensión principal | -5,78511 MPa | 13,786 MPa |
| Desplazamiento | 0 mm | 0,058203 mm |
| Coefficiente de seguridad | 11,3586 su | 15 su |
| Desplazamiento X | -0,00208214 mm | 0,00208805 mm |
| Desplazamiento Y | -0,058203 mm | 0,00370833 mm |
| Desplazamiento Z | -0,0331989 mm | 0,0349519 mm |

Tabla 6.5 – Resumen Simulación



CAPÍTULO 7: AGITADOR

7.1 Selección

Se elige un agitador de palas o paletas como se muestra en la figura 7.1. Los mismos poseen las siguientes características de operación:

- Flujo radial
- Velocidades bajas y moderadas (20-150 rpm)
- $Da = 0,5$ a $0,8 \times Dt$
- $W = 1/6$ a $1/10 \times Da$
- $E = 0,17$ a $0,34 \times Dt$
- $\alpha \leq 45^\circ$

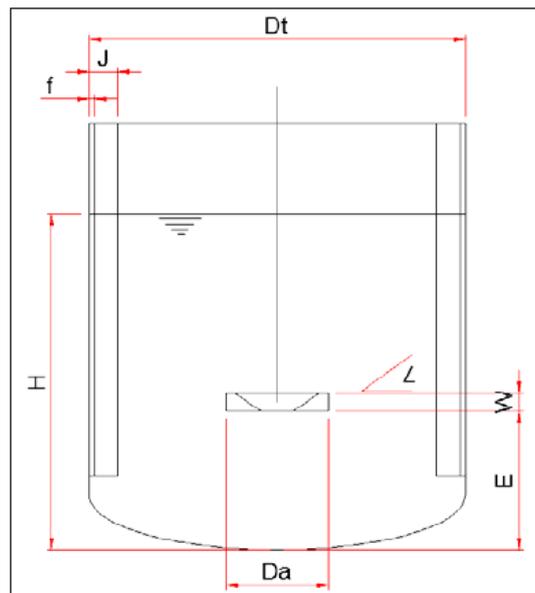


Figura 7.1 – Agitador de Paletas

Los agitadores de paleta pueden clasificarse como:

- Palas verticales (no hay flujo axial).
- Palas inclinadas (flujo axial).

7.2 Dimensiones

Teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, se procede al cálculo de las dimensiones:



$$Da = 0,6 \times Dt = 0,6 \times 32 \text{ cm} = 19,2 \text{ cm}$$

$$W = 1/7 \times Da = 1/7 \times 19,2 \text{ cm} = 2,74 \text{ cm}$$

$$E = 0,34 \times Dt = 0,34 \times 32 \text{ cm} = 10,88 \text{ cm}$$

$$\alpha = 20^\circ$$

Para simplificar su construcción, se adopta:

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

$$W = 3 \text{ cm}$$

$$E = 12 \text{ cm}$$

$$\alpha = 20^\circ$$

$$\text{Espesor} = 3 \text{ mm}$$

7.2 Como Prevenir el Flujo Circulatorio

Cuando el impulsor entra al estanque lateralmente, está inclinado, o desplazado del centro, no son necesarias placas deflectoras figura 7.2, de esta forma se evita la formación de costras y no se quita espacio útil al reactor.

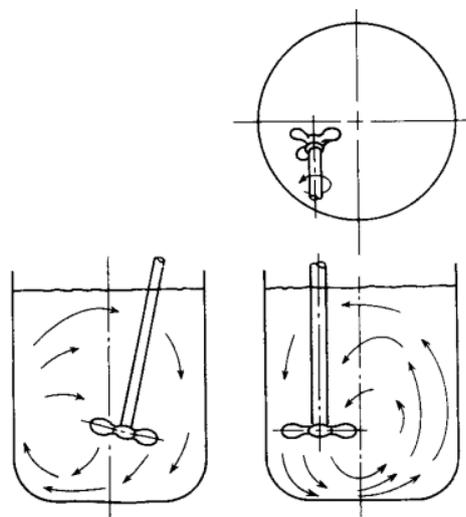


Figura 7.2 - Agitador No Centrado

Es por esta razón que para el presente proyecto se adopta un agitador desplazado levemente del centro del reactor.



7.3 Cálculo de Potencia en el Agitador

Para que el proceso de agitación sea eficaz, el volumen del fluido agitado debe ser capaz de llegar hasta las partes más lejanas del recipiente, donde la velocidad de circulación no es el único factor importante, sino que la turbulencia del fluido puede llegar a determinar la eficacia de la operación. La turbulencia es una consecuencia de que las corrientes estén adecuadamente dirigidas y que logren generar grandes gradientes de velocidad en el líquido. Todos estos parámetros consumen energía y por lo tanto es de gran importancia conocer la potencia consumida con el fin de cumplir a cabalidad los objetivos deseados.

Se puede conocer la potencia consumida por el agitador a través de números adimensionales, relacionando por medio del número de Reynolds (Re), de Froude (Fr) y de potencia (Np). Estos números adimensionales dependen de las características geométricas del agitador y de la presencia o no de placas deflectoras.

7.3.1 Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds es una expresión adimensional que permite caracterizar el movimiento de un fluido. Relaciona densidad, viscosidad, velocidad y la dimensión típica de un flujo. La presencia o ausencia de turbulencia en un fluido que se agita se puede relacionar con un número de Reynolds. Su ecuación es:

$$Re = \frac{N \times Da^2 \times \rho}{\mu}$$

Donde:

N = Velocidad de rotación [rps]

Da = Diámetro del agitador [m]

ρ = Densidad del fluido [kg/m³]

μ = Viscosidad [Pa·s]

El valor del número de Reynolds define si el carácter del fluido es turbulento o laminar. Además se considera que el paso entre el régimen laminar y el turbulento no es inmediato, pasando por una zona de transición. Se define de la siguiente manera:

Régimen laminar: $Re < 10$

Régimen transitorio: $300 < Re < 10000$



Régimen turbulento: $Re > 10000$

Para este proyecto, usando valores promedio:

$$N = 100 \text{ rpm} = 1,67 \text{ rps}$$

$$Da = 0,2 \text{ m}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,02 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$Re = \frac{1,67 \text{ rps} \times (0,2 \text{ m})^2 \times 1000 \text{ kg/m}^3}{0,02 \text{ Pa}\cdot\text{s}}$$

$$Re = 3340$$

7.3.2 Número de Froude (Fr)

El número de Froude es una medida que relaciona la fuerza de inercia y la fuerza gravitacional por unidad de área que actúa sobre el fluido. Se utiliza en el cálculo del consumo de potencia cuando el fluido del recipiente mantenga un movimiento de ondas importante a causa de la falta de placas deflectoras.

$$Fr = \frac{Da \times N^2}{g}$$

Donde:

N = Velocidad de rotación [rps]

d = Diámetro del agitador [m]

g = Aceleración de gravedad

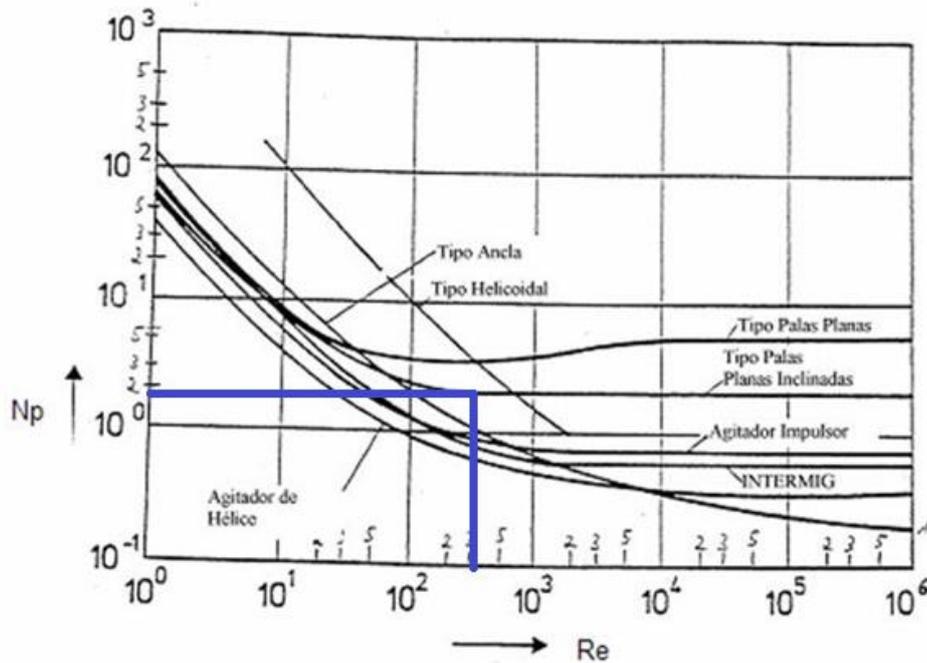
$$Fr = \frac{0,2 \text{ m} \times (1,67 \text{ rps})^2}{9,8 \text{ m/seg}^2}$$

$$Fr = 0,057$$



7.3.3 Número de Potencia (Np)

El número de Potencia es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del impulsor y la fuerza de inercia. El valor se lo obtiene de la gráfica 7.1.



Grafica 7.1 - Característica de la potencia frente el Reynolds

Se adopta $N_p = 12$

Para $Re > 300$ sin placas deflectoras:

En esta región de los números de Reynolds, se forma un vórtice y tiene influencia el número de Froude. Es por eso, que en la ecuación de consumo de potencia es:

$$P = \frac{N_p \times Fr^m \times N^3 \times Da^5 \times \rho}{gc}$$

Donde:

$$m = \frac{a - \log Re}{b}$$

Los valores de a y b se obtienen de la tabla 7.1:



| Figura | Línea | a | b |
|--------|-------|-----|------|
| 9.13 | D | 1,0 | 40,0 |
| 9.14 | B | 1,7 | 18,0 |
| 9.14 | c | 0 | 18,0 |
| 9.14 | D | 2,3 | 18,0 |

Tabla 7.1 - Constantes a y b

Se tomara un promedio de los valores ya que la tabla no contempla el mecanismo utilizado, resultando a=1,25 y b=23,5.

$$m = \frac{1,25 - \log 334}{23,5} = -0,0542$$

La potencia por el fluido será:

$$P = \frac{12 \times 0,057^{-0,0542} \times (1,67\text{rps})^3 \times (0,2\text{m})^5 \times 1000 \text{ kg/m}^3}{1 \text{ Kgm/Nseg}^2}$$

$$P = 20,9 \frac{\text{Nm}}{\text{seg}} = 0,03\text{hp}$$

Consideraciones:

Eficiencia del motor = 0.7

Pérdidas por fricción= 25%

$$P_{\text{motor}} = \frac{0,03 \text{ hp} \times 1,35}{0,7} = 0,054 \text{ hp}$$

Luego se calcula la cupla necesaria para la selección

$$P_{\text{motor}} = \frac{\text{Cupla (Kgf. cm)} \times \text{Velocidad(rpm)}}{71600}$$

$$\text{Cupla} = \frac{P_{\text{motor}} \times 71600}{\text{Velocidad}}$$



$$\text{Cupla} = \frac{0,054 \text{ Hp} \times 71600}{100 \text{ rpm}} = 38,7 \text{ Kgf. cm}$$

Datos para la selección:

- Alimentación: 12 o 24 Vcc
- Cupla: 38,7 Kgf.cm
- Velocidad: 100 rpm

Se selecciona el motorreductor MR10B-024056 de la marca Ignis, cuyas características son:

- Alimentación: 24 Vcc
- Cupla: 39,42 Kgf.cm
- Velocidad: 154 rpm

Codificación: MR10B-024056-154

7.4 Diámetro del eje

Mediante la utilización del código ASME se calcula el diámetro del eje en base a la siguiente ecuación:

$$d_o^3 = \frac{16}{\pi \times \tau_t} \times \sqrt{\left[K_m \times M + \frac{\alpha \times F_a \times d_o \times (1 + K^2)}{8} \right]^2 + (K_t \times M_t)^2 \times \left(\frac{1}{1 - K^4} \right)}$$

Donde:

d_o = diámetro exterior del eje, cm

F_a = esfuerzo axial de tracción o compresión, Kg.

K = relación entre los diámetros interior a exterior en ejes huecos

K_m = factor combinado de choque y fatiga a aplicar al momento flector calculado

K_t = factor combinado de choque y fatiga a aplicar al momento torsor calculado

M = momento flector máximo, kgcm

M_t = momento torsor máximo, kgcm

τ_t = máxima tensión tangencial admisible, kg/cm²



α = relación entre la tensión máxima producida por pandeo debido a la carga axial a la tensión de compresión simple.

Para este caso se puede considerar que el árbol está sometido solo a esfuerzos de torsión, entonces α , F y M, se anulan, además se usara un árbol macizo, entonces, la ecuación pasa a ser:

$$d_o^3 = \frac{16}{\pi \times \tau_t} \times \sqrt{(Kt \times Mt)^2}$$

Donde:

$\tau_t = 422 \text{ kg/cm}^2$ (código ASME)

$Kt = 2$ (código ASME)

$Mt = 39,42 \text{ Kg.cm}$ (datos del motor)

$$d_o^3 = \frac{16}{\pi \times 422 \text{ kg/cm}^2} \times \sqrt{(2,5 \times 39,42 \text{ Kg.cm})^2}$$

$$d_o = \sqrt[3]{1,19 \text{ cm}^3}$$

$$d_o = 1,06 \text{ cm}$$

Se selecciona $d_o = 2,54 \text{ cm}$, si bien es un diámetro muy superior al resultante, es el mínimo aceptado por el fabricante de sellos mecánicos, además este diámetro permite utilizar el sistema de fijación elegido para las paletas. Las dimensiones del eje se pueden ver en el Plano N°11 – “Eje y Paletas Agitador” del Anexo II – “Planos”.

7.5 Chaveta y Chavetero

Para el cálculo se recurre al procedimiento expuesto en la bibliografía⁸ consultada. Además, el mismo, se hará respetando las unidades del libro para de este modo poder utilizar las tablas que brinda.

⁸ SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., BOCANEGRA, F. P., & CORREA, C. O. (1990). *Diseño en ingeniería mecánica* (Vol. 8). London: McGraw-Hill.



De la tabla 7.2 se selecciona una chaveta estándar, y luego se calcula su longitud en función de su resistencia.

| Árbol <i>d</i> | Cuñas | | | | | | Aplana- miento del árbol | | | Cuñas cóncavas | | |
|-------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|----------|-----------------------|----------------|----------|-----------------------|
| | <i>b</i> | <i>h</i> | <i>t</i> ₁ | <i>t</i> ₂ | <i>t</i> ₂ | <i>h</i> ₂ | <i>b</i> | <i>h</i> | <i>t</i> ₁ | <i>b</i> | <i>h</i> | <i>t</i> ₂ |
| 10...12 | 4 | 4 | 2,5 | 1,2 | 1,8 | 7 | | | | | | |
| 12...17 | 5 | 5 | 3,0 | 1,7 | 2,3 | 8 | | | | | | |
| 17...22 | 6 | 6 | 3,5 | 2,1 | 2,8 | 10 | | | | | | |
| 22...30 | 8 | 7 | 4,0 | 2,4 | 3,3 | 11 | 8 | 5 | 1,3 | 8 | 3,5 | 3,2 |
| 30...38 | 10 | 8 | 5,0 | 2,4 | 3,3 | 12 | 10 | 6 | 1,8 | 10 | 4 | 3,7 |
| 38...44 | 12 | 8 | 5,0 | 2,4 | 3,3 | 12 | 12 | 6 | 1,8 | 12 | 4 | 3,7 |
| 44...50 | 14 | 9 | 5,5 | 2,9 | 3,8 | 14 | 14 | 6 | 1,4 | 14 | 4,5 | 4,0 |
| 50...58 | 16 | 10 | 6,0 | 3,4 | 4,3 | 16 | 16 | 7 | 1,9 | 16 | 5 | 4,5 |
| 58...65 | 18 | 11 | 7,0 | 3,4 | 4,4 | 18 | 18 | 7 | 1,9 | 18 | 5 | 4,5 |
| 65...75 | 20 | 12 | 7,5 | 3,9 | 4,9 | 20 | 20 | 8 | 1,9 | 20 | 6 | 5,5 |
| 75...85 | 22 | 14 | 9,0 | 4,4 | 5,4 | 22 | 22 | 9 | 1,8 | 22 | 7 | 6,5 |
| 85...95 | 25 | 14 | 9,0 | 4,4 | 5,4 | 22 | 25 | 9 | 1,9 | 25 | 7 | 6,4 |
| 95...110 | 28 | 16 | 10,0 | 5,4 | 6,4 | 25 | 28 | 10 | 2,4 | 28 | 7,5 | 6,9 |
| 110...130 | 32 | 18 | 11,0 | 6,4 | 7,4 | 28 | 32 | 11 | 2,3 | 32 | 8,5 | 7,9 |
| 130...150 | 36 | 20 | 12,0 | 7,1 | 8,4 | 32 | 36 | 12 | 2,8 | 36 | 9 | 8,4 |
| 150...170 | 40 | 22 | 13,0 | 8,1 | 9,4 | 36 | 40 | 14 | 4,0 | | | 9,1 |
| 170...200 | 45 | 25 | 15,0 | 9,1 | 10,4 | 40 | 45 | 16 | 4,7 | | | 10,4 |

Tabla 7.2 – Dimensiones Chavetas y Chaveteros

El par de torsión se obtiene de los datos del motorreductor el cual es:

$$T = 39,42 \text{ Kgf. cm} = 34,21 \text{ lb. pulg}$$

La resistencia a la fluencia para el acero inoxidable según el libro es:

$$S_y = 55 \text{ kpsi}$$

Teniendo como referencia la figura 7.3, la fuerza F en la superficie del eje es:

$$F = \frac{T}{r} = \frac{34,21 \text{ lb. pulg}}{0,236 \text{ pulg}} = 145 \text{ lb}$$

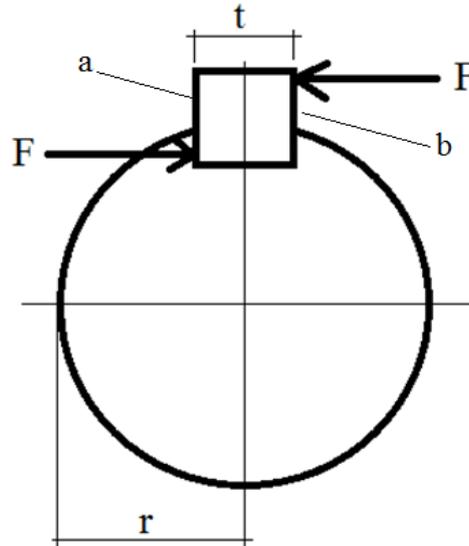


Figura 7.3 – Eje y Chaveta

Por la teoría de la energía de distorsión, la resistencia al cortante es:

$$S_{sy} = 0,577 \times S_y = 55 \text{ kpsi} \times 0,577 = 31,7 \text{ kpsi}$$

La falla por corte a través del área ab originará un esfuerzo $\tau = \frac{F}{t \times l}$. Sustituyendo la resistencia dividida entre el factor de seguridad (Adopto $C_s = 4$), tenemos que:

$$\frac{S_{sy}}{C_s} = \frac{F}{t \times l}$$

Despejando se tiene:

$$l = \frac{C_s \times F}{t \times S_{sy}} = \frac{4 \times 145 \text{ lb}}{0,157 \text{ pulg} \times 31700 \text{ psi}} = 0,117 \text{ pulg} = 3 \text{ mm}$$

La resistencia al aplastamiento se determina con un área igual a la mitad de la cara de la cuña, entonces:

$$\frac{S_y}{C_s} = \frac{F}{(t \times l)/2}$$



$$l = \frac{2 \times C_s \times F}{t \times S_y} = \frac{2 \times 4 \times 145 \text{ lb}}{0,157 \text{ pulg} \times 55000 \text{ psi}} = 0,134 \text{ pulg} = 3,4 \text{ mm}$$

Se adopta una chaveta normalizada de 4 x 4 x 6 mm.

7.6 Presiones Sobre las Paletas

Para realizar el análisis de tensiones como así también de velocidad crítica, es necesario conocer las presiones ejercidas sobre el agitador. En la figura 7.4 se muestra las presiones en juego y las dimensiones de las paletas.

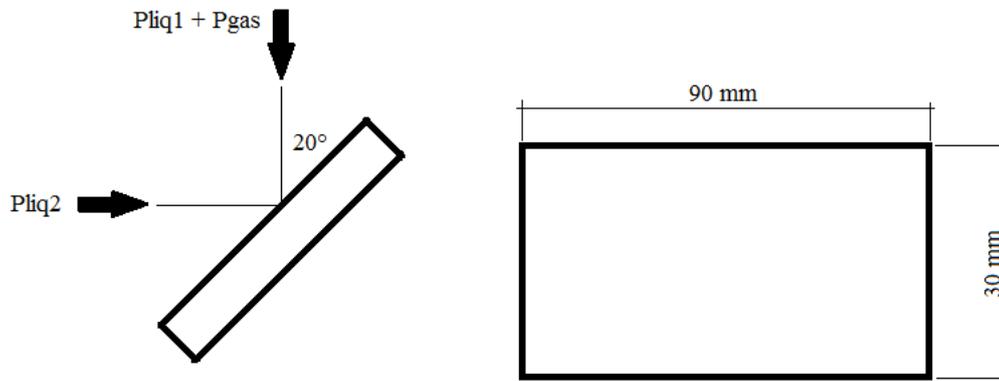


Figura 7.4 - Paletas Agitador

Donde:

Pliq1: Presión hidrostática ejercida por el líquido sobre las paletas.

Pgas: Presión del biogás.

Pliq2: Presión debida volumen de líquido que desplazan las paletas al girar.

$$P_{liq1} = (56\text{cm} - 13\text{cm}) \times 1 \text{ g/cm}^3$$

$$P_{liq1} = 43 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} = 0,043 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{gas} \text{ (de trabajo)} = 0,0158 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$



$$P_{liq2} = \frac{0,001 \frac{Kg}{cm^3} \times \frac{\pi \times (4,5cm)^2 \times 3cm}{2}}{9cm \times 3cm} = 0,00353 \frac{Kg}{cm^2}$$

Como la presión total sobre las paletas es debida a una fuerza resultante perpendicular a sus superficies, se debe descomponer las presiones parciales en sistemas de fuerzas para luego hallar la presión total. En la Figura 7.5 se ven las proyecciones horizontal (Shor) y perpendicular (Sper) de la superficie de una paleta.

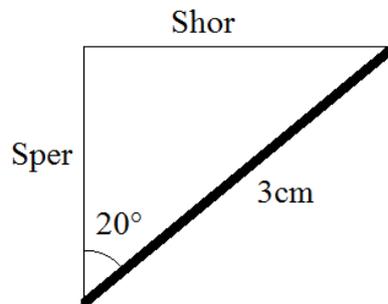


Figura 7.5 – Proyecciones de Superficies

$$Shor = 3cm \times \text{sen}(20^\circ) \times 9cm = 9,24 \text{ cm}^2$$

$$Sper = 3cm \times \text{cos}(20^\circ) \times 9cm = 25,37 \text{ cm}^2$$

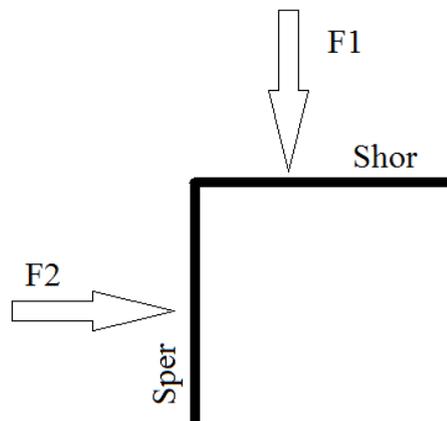


Figura 7.6 – Fuerzas Actuante

$$F1 = (P_{liq1} + P_{gas}) \times Shor$$



$$F1 = 0,0588 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \times 9,24 \text{ cm}^2 = 0,543\text{Kg}$$

$$F2 = (\text{Pliq1} + \text{Pgas}) \times \text{Sper} + \text{Pliq2} \times \text{Sper}$$

$$F2 = 0,0588 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \times 25,37 \text{ cm}^2 + 0,00353 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \times 25,37 \text{ cm}^2 = 1,58\text{Kg}$$

$$F_{\text{tot}} = \sqrt{F1^2 + F2^2}$$

$$F_{\text{tot}} = \sqrt{(0,543\text{Kg})^2 + (1,58\text{Kg})^2} = 1,67\text{Kg}$$

La presión total (Ptot) será:

$$P_{\text{tot}} = \frac{F_{\text{tot}}}{\text{Sup. paleta}} = \frac{1,67\text{Kg}}{3\text{cm} \times 9\text{cm}} = 0,062 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 0,0061 \text{ MPa}$$

7.7 Análisis de Estructura

Para verificar la resistencia y rigidez de este componente se recurrió a una simulación por elementos finitos del programa Autodesk Inventor 2016. El informe se puede ver en el Anexo III - "Informes de Simulaciones". La presión utilizada para la simulación es de $0,062 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$ por cada paleta.

En base a este análisis se puede comprobar que este componente tiene una excelente resistencia y rigidez, como se observa en la figura 7.7 y en la tabla 7.3.

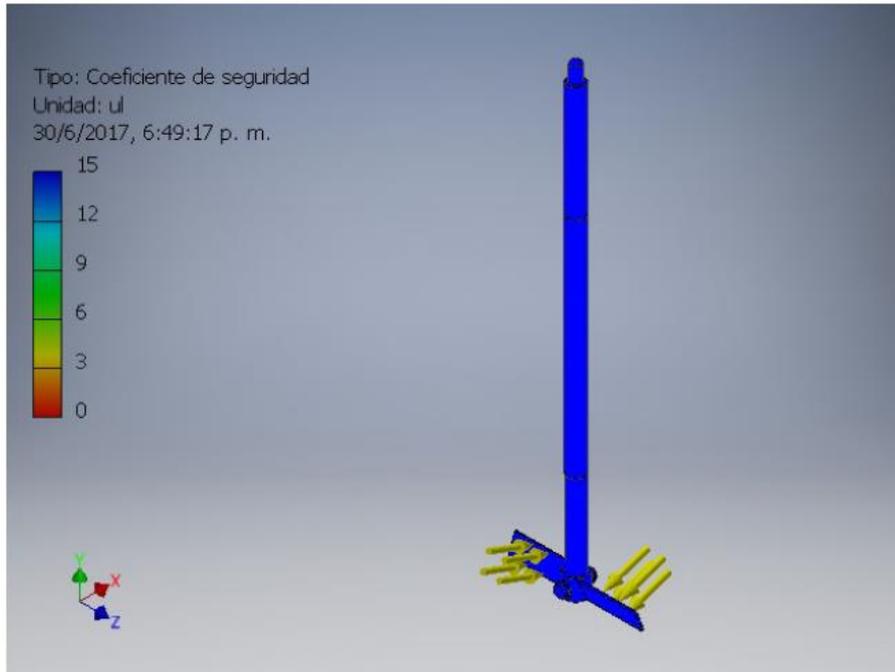


Figura 7.7 - Análisis de Tensión Agitador

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|---------------------------|------------------------|--------------|
| Volumen | 370599 mm ³ | |
| Masa | 2,96378 kg | |
| Tensión de Von Mises | 0,0000000631438 MPa | 8,46004 MPa |
| Primera tensión principal | -1,90537 MPa | 9,16889 MPa |
| Tercera tensión principal | -9,4249 MPa | 0,824617 MPa |
| Desplazamiento | 0 mm | 0,0798254 mm |
| Coeficiente de seguridad | 15 su | 15 su |

Tabla 7.3 - Resumen Análisis de Tensión Agitador

7.8 Análisis de Velocidad Crítica

Con el fin de evitar que el eje rotatorio se vuelva dinámicamente inestable se le realizará un análisis de la velocidad crítica con el programa Autodesk Inventor 2016. El criterio de diseño es evitar operar con velocidades cercanas a la crítica. El informe se puede ver en el Anexo III - “Informes de Simulaciones”. En este caso la velocidad de operación máxima es de 125 rpm. Los resultados del análisis se observan en la tabla 7.4.



| | |
|----|------------|
| F1 | 354,57 Hz |
| F2 | 365,82 Hz |
| F3 | 380,49 Hz |
| F4 | 389,75 Hz |
| F5 | 999,21 Hz |
| F6 | 1036,40 Hz |
| F7 | 1921,63 Hz |
| F8 | 2009,61 Hz |

Tabla 7.4 - Resumen Análisis de Velocidades Críticas Agitador

La primera velocidad crítica es de 354,57 Hz lo que equivale a 21240 rpm, por lo tanto, se puede concluir que para el rango de velocidades con el que se trabajara, el sistema es estable.



CAPÍTULO 8: AJUSTES

8.1 Ajustes Recomendados por ISO

Se toma como referencia la norma ISO 286:1988. Los ajustes recomendados se muestran en la tabla 8.1 que se muestra a continuación.

Los ajustes preferentes, en negrita en la tabla, son: H8/x8, H8/u8, H7/r6, H7/h6, H8/h9, H7/f7, F8/h6, H8/f7, F8/h9, E9/h9, D10/h9, C11/h9.

| AGUJERO ÚNICO | | EJE ÚNICO | | CARACTERÍSTICAS DE ASIENTO | EJEMPLOS |
|---------------|-----------|------------|-----------|--|-------------------------------------|
| H8 | x8 | | | Prensado duro. Montaje a prensa. No necesita seguro. | Coronas de bronce, ruedas. |
| H8 | u8 | | | | |
| H7 | s6 | | | Prensado. Montaje a prensa. | Piñón motor. |
| H7 | r6 | | | Prensado ligero. Necesita seguro. | Engranajes de máquinas. |
| H7 | n6 | | | Muy forzado. Montaje a martillo. | Casquillos especiales. |
| H7 | k6 | | | Forzado. Montaje a martillo. | Rodamientos a bolas. |
| H7 | j6 | | | Forzado ligero. Montaje a mazo. | Rodamientos a bolas. |
| H7 | h6 | | | Deslizante con lubricación. | Ejes de lira. |
| H8 | h9 | | | Deslizante sin lubricación. | Ejes de contrapunto. |
| H11 | h9 | | | Deslizante. Ajuste corriente. | Ejes de colocaciones. |
| H11 | h11 | | | Deslizante. Ajuste ordinario. | Ejes-guías atados. |
| H7 | g6 | G7 | h6 | Giratorios sin juego apreciable. | Émbolos de freno. |
| H7 | f7 | F8 | h6 | Giratorios con poco juego. | Bielas, cojinetes. |
| H8 | f7 | F8 | h9 | Giratorios con poco juego. | Bielas, cojinetes. |
| H8 | e8 | E9 | h9 | Giratorios con gran juego. | Cojinetes corrientes. |
| H8 | d9 | D10 | h9 | Giratorios con mucho juego. | Soportes múltiples. |
| H11 | c11 | C11 | h9 | Libre, con holgura. | Cojinetes de máquinas agrícolas. |
| H11 | a11 | A11 | h11 | Muy libre | Avellanados. Taladros de tornillos. |

Tabla 8.1 – Ajustes recomendados

8.2 Ajustes Reactor

En la figura 8.2 se indican los componentes que requieren un ajuste en el reactor.

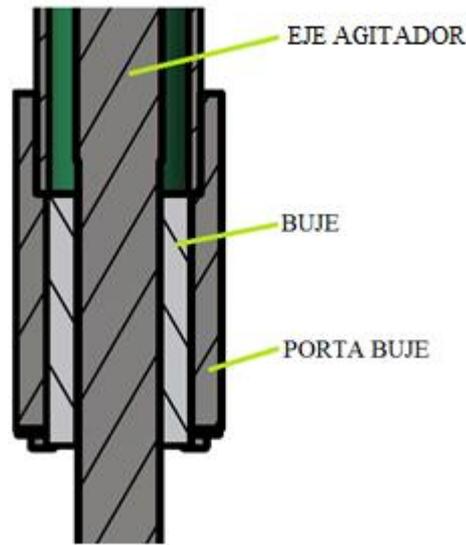


Figura 8.2 – Referencias Reactor

Teniendo en cuenta la tabla 8.1, se adopta:

- Eje-Buje: E9/h9 (Eje Base)
- Buje-Porta buje: H7/j6 (Agujero Base)

Los diámetros correspondientes a cada elemento se muestran en las figuras 8.3, 8.4 y 8.5.

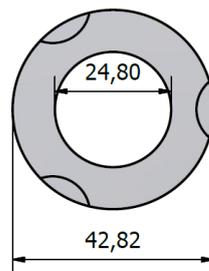


Figura 8.3 – Buje

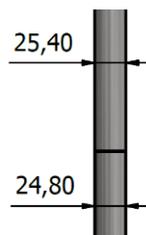


Figura 8.4 – Eje

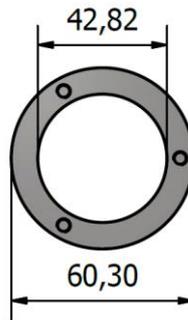


Figura 8.5 – Porta Buje

8.2.1 Eje-Buje

En la tabla 8.2 se muestran los valores de las tolerancias de los ajustes recomendados por ISO de eje base.

| Calidad | h6 | G7 | F8 | h9 | F8 | E9 | D10 | C11 | h11 | A11 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| d ≤ 3 | 0 | +12 | +20 | 0 | +20 | +39 | +60 | +120 | 0 | +330 |
| | -6 | +2 | +6 | -25 | +6 | +14 | +20 | +60 | -60 | +270 |
| 3 < d ≤ 6 | 0 | +16 | +28 | 0 | +28 | +50 | +78 | +145 | 0 | +345 |
| | -8 | +4 | +10 | -30 | +10 | +20 | +30 | +70 | -75 | +270 |
| 6 < d ≤ 10 | 0 | +20 | +35 | 0 | +35 | +61 | +98 | +170 | 0 | +370 |
| | -9 | +5 | +13 | -36 | +13 | +25 | +40 | +80 | -90 | +280 |
| 10 < d ≤ 14 | 0 | +24 | +43 | 0 | +43 | +75 | +120 | +205 | 0 | +400 |
| | -11 | +6 | +16 | -43 | +16 | +32 | +50 | +95 | -110 | +290 |
| 14 < d ≤ 18 | 0 | +28 | +53 | 0 | +53 | +92 | +149 | +240 | 0 | +430 |
| | -13 | +7 | +20 | -52 | +20 | +40 | +65 | +110 | -130 | +300 |
| 18 < d ≤ 24 | 0 | +28 | +53 | 0 | +53 | +92 | +149 | +240 | 0 | +430 |
| 24 < d ≤ 30 | -13 | +7 | +20 | -52 | +20 | +40 | +65 | +110 | -130 | +300 |

Tabla 8.2 – Ajustes ISO para eje base

$$D_{eje} = 24,8_{-0,052}^0 \text{ mm}$$

$$D_{int-buje} = 24,8_{0,040}^{0,092} \text{ mm}$$

8.2.2 Buje-Porta Buje

En la tabla 8.3 se muestran los valores de las tolerancias de los ajustes recomendados por ISO de agujero base.



| Calidad | H7 | s6 | r6 | n6 | k6 | j6 | h6 | g6 | f7 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $d \leq 3$ | +10 | +20 | +16 | +10 | +6 | +4 | 0 | -2 | -6 |
| | 0 | +14 | +10 | +4 | 0 | -2 | -6 | -8 | -16 |
| $3 < d \leq 6$ | +12 | +27 | +23 | +16 | +9 | +6 | 0 | -4 | -10 |
| | 0 | +19 | +15 | +8 | +1 | -2 | -8 | -12 | -22 |
| $6 < d \leq 10$ | +15 | +32 | +28 | +19 | +10 | +7 | 0 | -5 | -13 |
| | 0 | +23 | +19 | +10 | +1 | -2 | -9 | -14 | -28 |
| $10 < d \leq 14$ | +18 | +39 | +34 | +23 | +12 | +8 | 0 | -6 | -16 |
| | 0 | +28 | +23 | +12 | +1 | -3 | -11 | -17 | -34 |
| $14 < d \leq 18$ | +21 | +48 | +41 | +28 | +15 | +9 | 0 | -7 | -20 |
| | 0 | +35 | +28 | +15 | +2 | -4 | -13 | -20 | -41 |
| $18 < d \leq 24$ | +21 | +48 | +41 | +28 | +15 | +9 | 0 | -7 | -20 |
| | 0 | +35 | +28 | +15 | +2 | -4 | -13 | -20 | -41 |
| $24 < d \leq 30$ | +21 | +48 | +41 | +28 | +15 | +9 | 0 | -7 | -20 |
| | 0 | +35 | +28 | +15 | +2 | -4 | -13 | -20 | -41 |
| $30 < d \leq 40$ | +25 | +59 | +50 | +33 | +18 | +11 | 0 | -9 | -25 |
| | 0 | +43 | +34 | +17 | +2 | -5 | -16 | -25 | -50 |
| $40 < d \leq 50$ | 0 | +43 | +34 | +17 | +2 | -5 | -16 | -25 | -50 |

Tabla 8.3 – Ajustes ISO para agujero base

$$D_{porta\ buje} = 42,82 \begin{matrix} 0,025 \\ 0 \end{matrix} mm$$

$$D_{ext-buje} = 42,82 \begin{matrix} 0,011 \\ -0,0050 \end{matrix} mm$$



CAPÍTULO 9: ELEMENTO CALEFACTOR

9.1 Introducción

El elemento calefactor permitirá regular la temperatura del reactor mediante el lazo de control PID. Para lograr este objetivo se implementarán resistencias flexibles adhesivas, estas se adaptan a la geometría del reactor y lo que es más importante actúan externamente. En la figura 9.1 se observa una resistencia de este tipo.

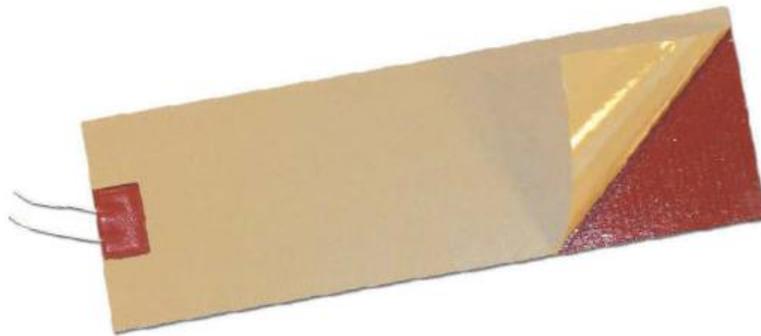


Figura 9.1 – Resistencia Flexible

9.2 Cálculo de la Potencia Calorífica Necesaria (PT)

La misma se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$PT = (PA + PB) \times FS$$

Donde:

-PA = Potencia necesaria para aumentar la temperatura del material en el tiempo deseado.

-PB = Potencia necesaria para fundir o vaporizar el material en el tiempo deseado.

-FS = Factor de seguridad. Normalmente entre el 10% y el 30% dependiendo de la aplicación.

$$PA \text{ (kW)} = \frac{\text{Masa (Kg)} \times \text{Calor específico (KJ/Kg } ^\circ\text{C)} \times \Delta T \text{ (} ^\circ\text{C)}}{\text{Tiempo de calentamiento (Seg)}}$$



$$PB \text{ (kW)} = \frac{\text{Masa (Kg)} \times \text{Calor de fusión o vaporización (KJ/Kg)}}{\text{Tiempo de calentamiento (Seg)}}$$

Para el equipo de ensayos tenemos:

-Masa = 45 Kg

-Tiempo de calentamiento = 3 h = 10800 seg

-Calor específico = Como la sustancia a calentar está compuesta mayormente de agua, se puede utilizar un calor específico de 4,18 kJ/Kg °C.

- $\Delta T = T_f - T_i = 60^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 35^\circ\text{C}$

-PB = 0

-FS = 10 %

-Superficie = $2 \times \pi \times (0,16\text{m})^2 + 2 \times \pi \times 0,16\text{m} \times 0,67\text{m} = 0,835\text{m}^2$

Reemplazando los valores, se tiene que:

$$PA \text{ (kW)} = \frac{45 \text{ (Kg)} \times 4,18 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right) \times 35 \text{ (}^\circ\text{C)}}{10800 \text{ (Seg)}} = 0,609 \text{ kW}$$

$$PT = (0,609 \text{ kW} + 0 \text{ kW}) \times 1,1 = 0,67 \text{ kW}$$

Otro dato importante para la selección es la carga superficial, que se calcula como:

$$\text{Carga Superficial} = \frac{PT \text{ (W)}}{\text{Superficie}(\text{cm}^2)} = \frac{670\text{W}}{8350 \text{ cm}^2} = 0,08 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Se seleccionan siete resistencias planas flexibles de silicona de 100 W cada una, esto permitirá distribuir el calor de forma más uniforme por la superficie del reactor. Todas las características de estas resistencias se muestran en el Anexo I – “Catálogos”. El modelo elegido se muestra en la tabla 9.1.



| Dimensiones (mm) | | Potencia (Watts) | Estándar |
|------------------|----------|------------------|-------------|
| Anchura | Longitud | | |
| 100 | 150 | 50 | SIL10X15X5 |
| | 150 | 100 | SIL10X15X10 |
| 150 | 200 | 100 | SIL15X20X10 |
| | 200 | 200 | SIL15X20X20 |
| 200 | 300 | 200 | SIL20X30X20 |
| | 300 | 400 | SIL20X30X40 |
| | 400 | 267 | SIL20X40X26 |
| | 400 | 533 | SIL20X40X53 |

Tabla 9.1-Resistencias Estándar

$$\text{Carga Superficial} = \frac{PT (W)}{\text{Superficie}(\text{cm}^2)} = \frac{100W}{(10 \times 15) \text{ cm}^2} = 0,667 \frac{W}{\text{cm}^2}$$



CAPÍTULO 10: CONTROL DE TEMPERATURA Y AGITACIÓN

10.1 Introducción

En el presente capítulo se describe, técnicamente, la metodología utilizada para operar el motorreductor, así como la manta calefactora flexible y así lograr controlar a gusto el estado del biodigestor. Ambos dispositivos, la manta y el motor, se seleccionaron en CC, para poder ser fácilmente controlados, efectuando modulación de ancho de pulso sobre la tensión de operación de los mismos.

10.2 Modulación por ancho de pulso (PWM)

La modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) de una señal es una técnica que logra producir el efecto de una señal analógica sobre una carga, a partir de la variación de la frecuencia y ciclo de trabajo de una señal digital. El ciclo de trabajo describe la cantidad de tiempo que la señal está en un estado lógico alto, como un porcentaje del tiempo total que esta toma para completar un ciclo completo. La frecuencia determina que tan rápido se completa un ciclo (por ejemplo: 1000 Hz corresponde a 1000 ciclos en un segundo), y por consiguiente que tan rápido se cambia entre los estados lógicos alto y bajo. *Al cambiar una señal del estado alto a bajo a una tasa lo suficientemente rápida y con un cierto ciclo de trabajo, la salida parecerá comportarse como una señal analógica constante cuanto esta está siendo aplicada a algún dispositivo.*

Señales de PWM son utilizadas comúnmente en el control de aplicaciones. Su uso principal es el control de motores de corriente continua, aunque también pueden ser utilizadas para controlar válvulas, bombas, sistemas hidráulicos, y algunos otros dispositivos mecánicos. La frecuencia a la cual la señal de PWM se generará, dependerá de la aplicación y del tiempo de respuesta del sistema que está siendo controlado. A continuación se muestran algunas aplicaciones y sus respectivas frecuencias:

- Calentar elementos o sistemas con tiempos de respuesta lentos.
- Motores eléctricos de corriente continua.
- Fuentes de poder o amplificadores de audio.

En la figura 10.1 se representa gráficamente el concepto de PWM.

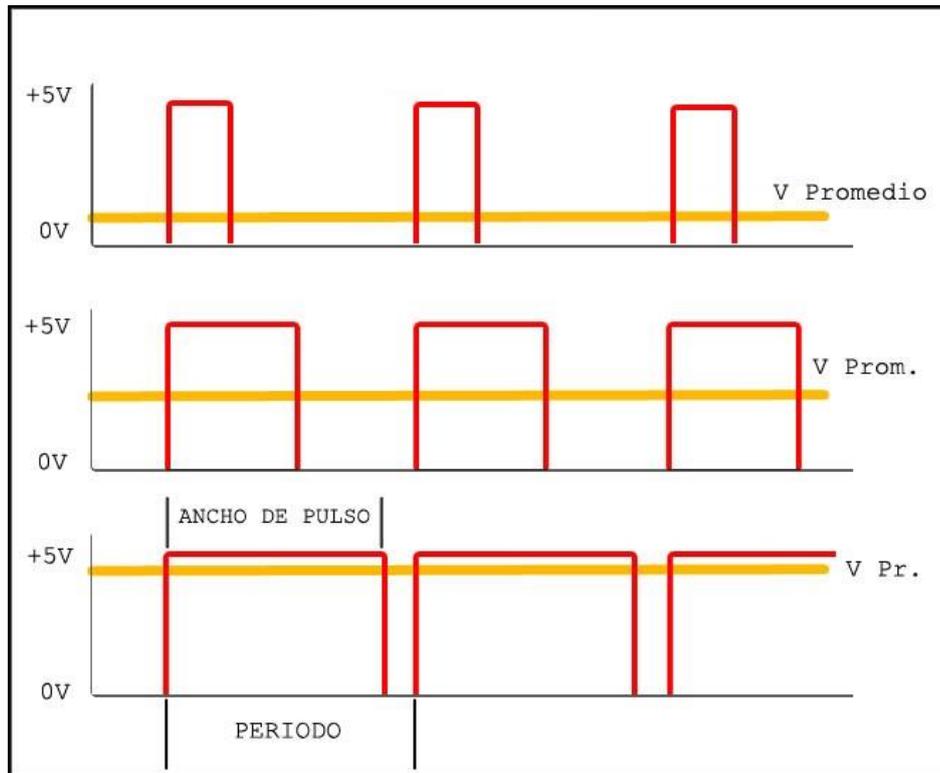


Figura 10.1 – Modulación por Ancho de Pulso

10.3 Calculo de Corrientes

La PWM se realiza mediante el uso de transistores de potencia los cuales deben seleccionarse en función de la corriente máxima a la que estarán expuestos (Corriente que circulara por el colector).

10.3.1 Manta Calefactora

La corriente que demanda cada manta será:

$$I(A) = \frac{P (W)}{V_{cd} (V)}$$

Donde:

- P = 100 W
- V_{cd} = 24 V



$$I(A) = \frac{100 (W)}{24 (V)} = 4,17A$$

De acuerdo con el valor calculado anteriormente, se selecciona el transistor TIP41C el cual soporta una corriente de colector de 6 A. Para más detalles remitirse al Anexo I - “Catálogos”.

La figura 10.2 representa el esquema de conexión para el control de temperatura.

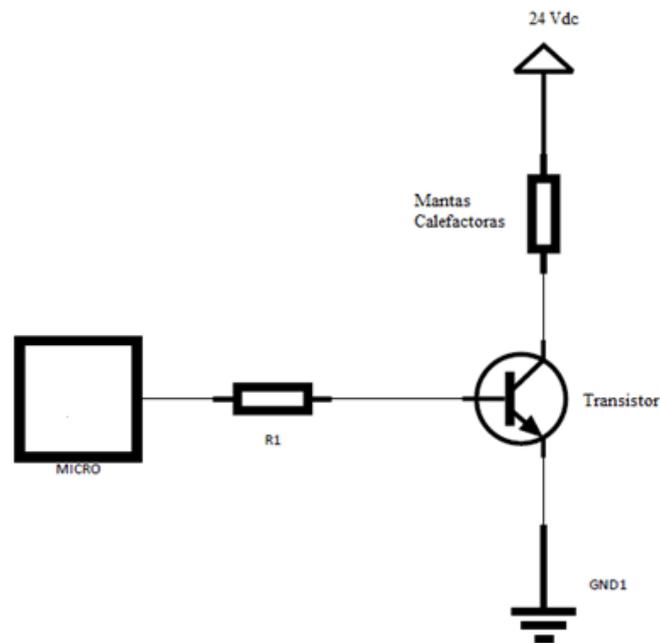


Figura 10.2 – Control de Temperatura

10.3.2 Motorreductor

La corriente demandada por el motorreductor es dato del fabricante como se ve en la tabla 10.1.



| MR10B-024056 |
|----------------|
| -- |
| Normal |
| 0,085 . 0,076 |
| 24 Vcc |
| 1,1 . 3,5 . 13 |
| 95 |
| 3700 . 4000 |
| 1,5 . 0,050 |
| 180 . 7 |

Tabla 10.1 – Datos Motorreductor

Para seleccionar el transistor se debe tener en cuenta la máxima corriente que circulara por el mismo, por esto, se adopta 13A que corresponde a la corriente de arranque del motorreductor.

De acuerdo con lo anterior se selecciona el transistor MJL3281A el cual soporta una corriente de colector de 15 A. Para más detalles remitirse al Anexo I - “Catálogos”.

La figura 10.3 representa el esquema de conexión para el control de agitación.

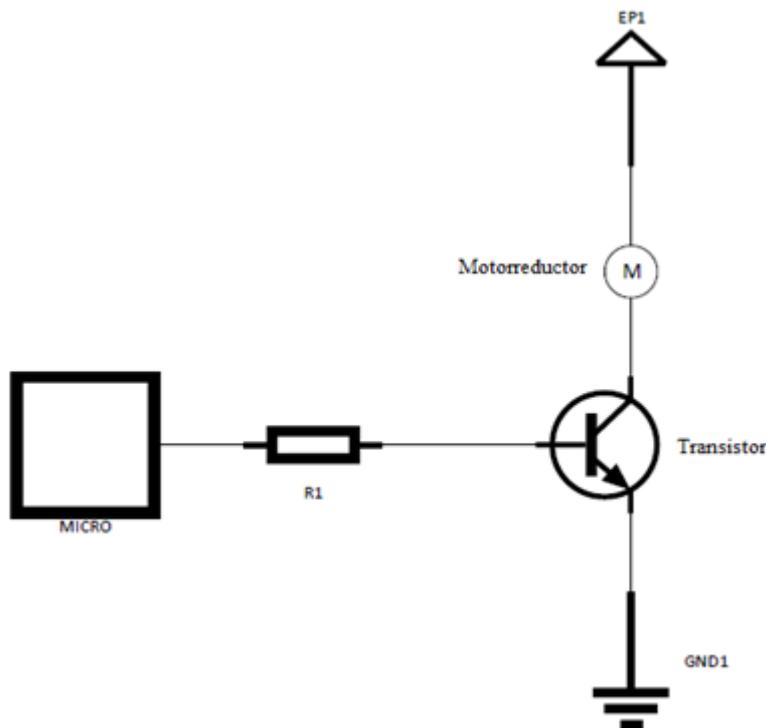


Figura 10.4 – Control Agitador



CAPÍTULO 11: SOFTWARE Y HARDWARE

11.1 Introducción

En el presente capítulo se hará una breve descripción de los software y hardware empleados para el control y recopilación de datos del equipo. Cabe aclarar que esta sección se encuentra en una etapa de pre desarrollo debido a que se está esperando el ingreso de fondos para la adquisición de los componentes necesarios para el comienzo del desarrollo propiamente dicho.

En la figura 11.1 se observa un esquema con los componentes y software utilizados en el equipo de ensayo.

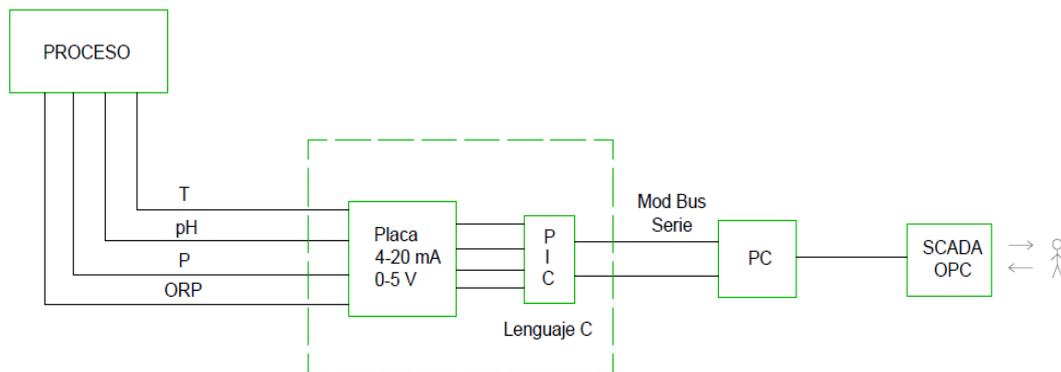


Figura 11.1 – Hardware y Software

11.2 Conceptos

11.2.1 EAGLE Cadsoft

Este software nos permitirá realizar esquemas de circuitos electrónicos y luego de realizados llevarlos a un diseño de circuito impreso. Está muy bien diseñado y es bastante fácil de usar, podemos obtener el programa de dos maneras: una versión paga, que es full, o una versión limitada que es freeware.

Al ser un programa ampliamente utilizado en el mundo, es muy sencillo encontrar material de ayuda y ejemplos prácticos en internet.

En la figura 11.2 se muestra las dos interfaces del programa, en sus dos entornos de trabajo, esquemático y placa.

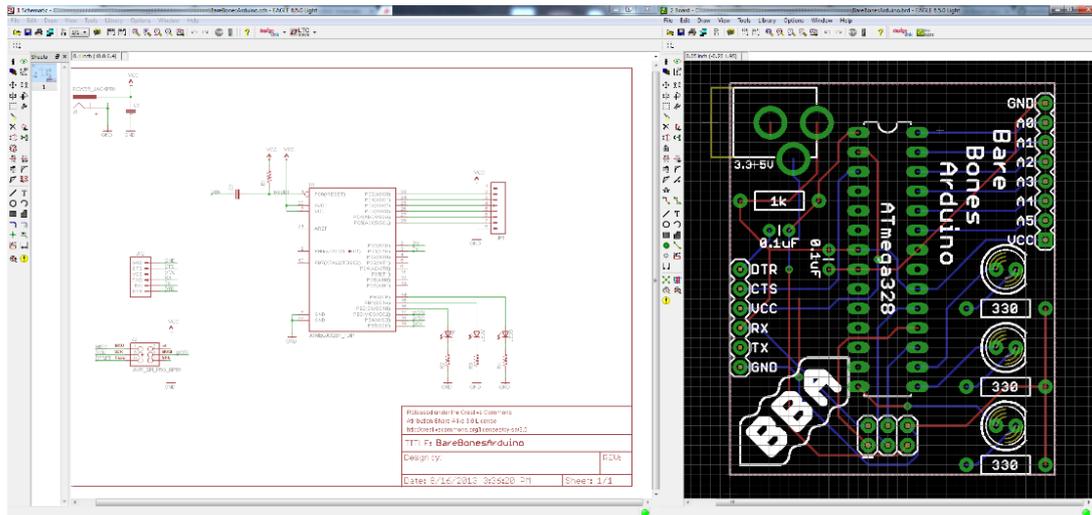


Figura 11.2 – Interfaces del Programa

11.2.2 Lenguaje C

Es el lenguaje que se utilizara para programar el microcontrolador que maneja los datos e instrucciones del equipo. C es un lenguaje compilado, lo que significa que los archivos fuentes que contienen el código C se traducen a lenguaje máquina por el compilador. Todas estas características hicieron al C uno de los lenguajes de programación más populares.

Para aprender la teoría del lenguaje C utilice y utilizo un libro⁹ recomendado por el ingeniero Talijancic. La practica la llevo a cabo con el programa “NetBeans IDE 8.2”. NetBeans es un entorno de desarrollo integrado libre. NetBeans IDE es un producto libre y gratuito sin restricciones de uso. En las figura 11.3 se observa la interface del programa.

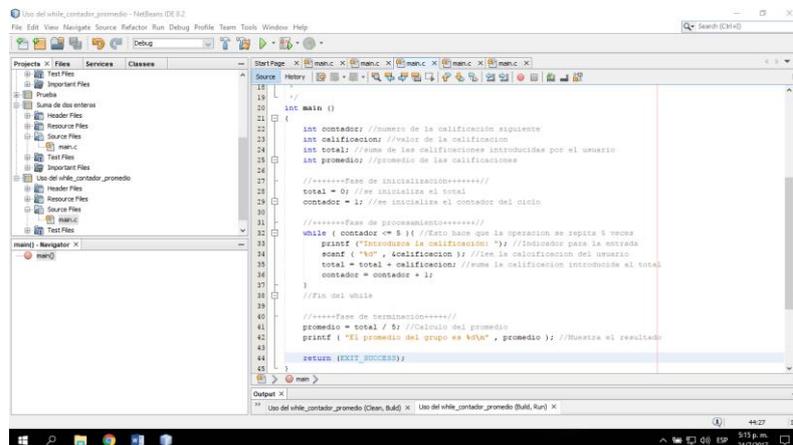


Figura 11.3 – NetBeans: Uso del While

⁹ DEITEL, H. M. (2004). Cómo programar en C/C++ y Java. Pearson educación.



11.2.3 MPLAB X IDE

MPLAB X IDE es un programa de software que se ejecuta en una PC para desarrollar aplicaciones para microcontroladores Microchip y controladores de señales digitales. Se llama un entorno de desarrollo integrado (IDE), ya que proporciona un único "entorno" integrado para el desarrollo del software embebido, desde la escritura del código y la compilación del mismo a la programación del micro y simulación en tiempo real del programa generado. En la figura 11.4 se muestra la interface del programa.

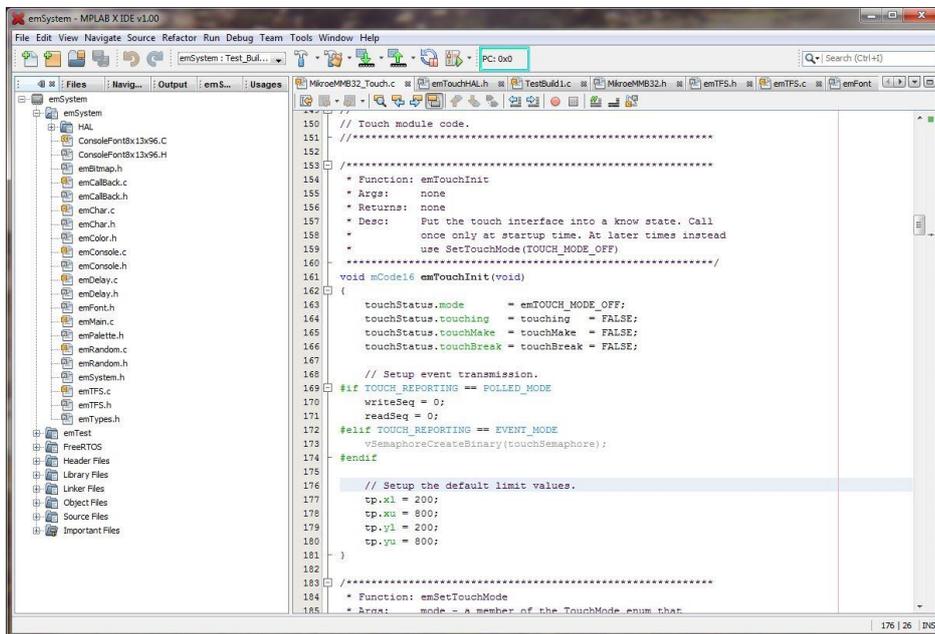


Figura 11.4 – Interface MPLAB X IDE

11.2.4 ModBus Serie

Modbus es un protocolo de comunicaciones basado en la arquitectura maestro/esclavo (RTU o ASCII) o cliente/servidor (TCP/IP), diseñado en 1979 por Modicon para su gama de controladores lógicos programables (PLCs). Convertido en un protocolo de comunicaciones estándar en la industria, es el que goza de mayor disponibilidad para la conexión de dispositivos electrónicos industriales.

Las principales razones por las cuales el uso de Modbus en el entorno industrial se ha impuesto a otros protocolos de comunicaciones son:

- Se diseñó teniendo en cuenta su uso para aplicaciones industriales
- Es público y gratuito



- Es fácil de implementar y requiere poco desarrollo
- Maneja bloques de datos sin suponer restricciones

Modbus permite el control de una red de dispositivos, por ejemplo un sistema de medida de temperatura y humedad, y comunicar los resultados a un ordenador. Modbus también se usa para la conexión de un ordenador de supervisión con una unidad remota (RTU) en sistemas de supervisión adquisición de datos (SCADA). Una Unidad Terminal Remota (UTR o, más conocida por sus siglas en inglés, RTU) es un dispositivo basado en microprocesadores, el cual permite obtener señales independientes de los procesos y enviar la información a un sitio remoto donde se procese. Generalmente este sitio remoto es una sala de control donde se encuentra un sistema central SCADA el cual permite visualizar las variables enviadas por la RTU.

Existen versiones del protocolo Modbus para puerto serie y Ethernet (Modbus/TCP). Cada dispositivo de la red Modbus posee una dirección única. Cualquier dispositivo puede enviar órdenes Modbus, aunque lo habitual es permitirlo sólo a un dispositivo maestro. Cada comando Modbus contiene la dirección del dispositivo destinatario de la orden. Todos los dispositivos reciben la trama pero sólo el destinatario la ejecuta (salvo un modo especial denominado "Broadcast"). Cada uno de los mensajes incluye información redundante que asegura su integridad en la recepción. Los comandos básicos Modbus permiten controlar un dispositivo RTU para modificar el valor de alguno de sus registros o bien solicitar el contenido de dichos registros.

Existen distintos protocolos dentro de ModBus en este caso se opta por RTU, el mismo es un protocolo abierto, en serie (RS-232 o RS-485) derivado de la arquitectura maestro / esclavo. Es un protocolo ampliamente aceptado debido a su facilidad de uso y confiabilidad. Modbus RTU es ampliamente utilizado dentro de Sistemas de Gestión de Edificios (BMS) y Sistemas de Automatización Industrial (IAS). Esta amplia aceptación se debe en gran parte a la facilidad de uso de MODBUS RTU.

11.2.5 RS232

RS-232 (Recommended Standard 232 o Estándar Recomendado 232), es una interfaz que designa una norma para el intercambio de datos binarios serie entre un DTE (Data Terminal Equipment o Equipo Terminal de Datos), como por ejemplo una computadora, y un DCE (Data Communication Equipment o Equipo de Comunicación de Datos), por ejemplo un módem.



El RS-232 consiste en un conector tipo DB-25 (de 25 pines), aunque es normal encontrar la versión de 9 pines (DE-9, o popularmente mal denominados DB-9), más barato e incluso más extendido para cierto tipo de periféricos. En la figura 11.5 se observa los dos tipos de conectores RS-232.

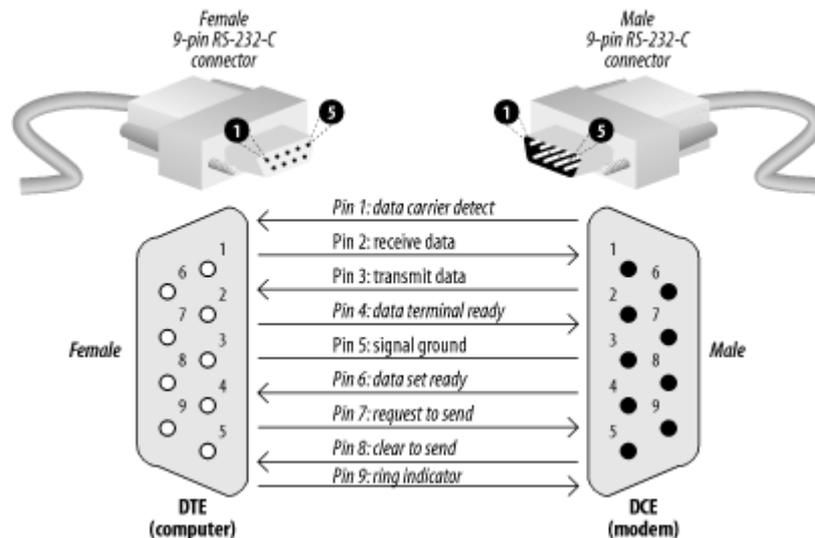


Figura 11.5 – Conectores Hembra y Macho

11.2.6 SCADA

Los sistemas SCADA se conocen en español como Control Supervisor y Adquisición de Datos, permite la gestión y control de cualquier sistema local o remoto gracias a una interfaz gráfica que comunica al usuario con el sistema.

Un sistema SCADA es una aplicación o conjunto de aplicaciones de software especialmente diseñadas para funcionar sobre ordenadores de control de producción, con acceso a la planta mediante la comunicación digital con instrumentos y actuadores, e interfaz gráfica de alto nivel para el operador.

Aunque inicialmente solo era un programa que permitía la supervisión y adquisición de datos en procesos de control, en los últimos tiempos ha surgido una serie de productos de hardware y buses especialmente diseñados o adaptados para este tipo de sistemas. La interconexión de los sistemas SCADA también es propia, y se realiza mediante una interfaz del PC a la planta centralizada, cerrando el lazo sobre el ordenador principal de supervisión.

El sistema permite comunicarse con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, sistemas de dosificación, etc.) para controlar el proceso



en forma automática desde la pantalla del ordenador, que es configurada por el usuario y puede ser modificada con facilidad. Además, provee a diversos usuarios de toda la información que se genera en el proceso productivo.

Las características principales de un SCADA son las siguientes:

- Adquisición y almacenado de datos para recoger, procesar y almacenar la información recibida en forma continua y confiable.
- Representación gráfica y animada de variables de proceso y su monitorización por medio de alarmas.
- Ejecutar acciones de control para modificar la evolución del proceso, actuando ya sea sobre los reguladores autónomos básicos (consignas, alarmas, menús, etc.) o directamente sobre el proceso mediante las salidas conectadas.
- Arquitectura abierta y flexible con capacidad de ampliación y adaptación.
- Conectividad con otras aplicaciones y bases de datos, locales o distribuidas en redes de Tecnología en Marcha.
- Supervisión, para observar desde un monitor la evolución de las variables de control.
- Transmisión de información con dispositivos de campo y otros PC.
- Base de datos, gestión de datos con bajos tiempos de acceso.
- Presentación, representación gráfica de los datos. Interfaz del Operador o HMI.
- Explotación de los datos adquiridos para gestión de la calidad, control estadístico, gestión de la producción y gestión administrativa y financiera.
- Alertar al operador sobre cambios detectados en la planta, tanto aquellos que no se consideren normales (alarmas) como los que se produzcan en su operación diaria (eventos). Estos cambios son almacenados en el sistema para su posterior análisis.

11.2.7 LabVIEW y OPC

LabVIEW

LabVIEW (Banco de Trabajo de Ingeniería de Instrumentación Virtual de Laboratorio) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas,



control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no sólo en ámbitos de Pruebas, Control y Diseño) y el permitir la entrada a la informática a profesionales de cualquier otro campo. LabVIEW consigue combinarse con todo tipo de software y hardware, tanto del propio fabricante como de otros fabricantes.

Su principal característica es la facilidad de uso, válido para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer programas relativamente complejos, imposibles para ellos de hacer con lenguajes tradicionales. También es muy rápido hacer programas con LabVIEW y cualquier programador, por experimentado que sea, puede beneficiarse de él. Los programas en LabView son llamados instrumentos virtuales (VIs) Para los amantes de lo complejo, con LabVIEW pueden crearse programas de miles de VIs (equivalente a millones de páginas de código texto) para aplicaciones complejas, programas de automatizaciones de decenas de miles de puntos de entradas/salidas, proyectos para combinar nuevos VIs con VIs ya creados, etc. Incluso existen buenas prácticas de programación para optimizar el rendimiento y la calidad de la programación.

OPC

El OPC (Open Protocol Control – Protocolo de Control Abierto) es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos industriales, basado en una tecnología Microsoft, que ofrece una interfaz común para comunicación que permite que componentes software individuales interactúen y compartan datos. La comunicación OPC se realiza a través de una arquitectura cliente-servidor. El servidor OPC es la fuente de datos (como un dispositivo hardware a nivel de planta) y cualquier aplicación basada en OPC puede acceder a dicho servidor para leer/escribir cualquier variable que ofrezca el servidor. Es una solución abierta y flexible al clásico problema de los drivers propietarios. Prácticamente todos los mayores fabricantes de sistemas de control, instrumentación y de procesos han incluido OPC en sus productos.



11.3 Sensores

Para la adquisición de datos relacionados con las variables más significativas del proceso se utilizarán sensores con salida analógica (4-20 mA y 0-5 V). A continuación se hará una breve descripción de los elementos seleccionados, para más detalles remitirse al Anexo I - “Catalogos”.

11.3.1 Temperatura

La máxima temperatura a la que estará expuesto el sustrato será de 60 °C, por lo tanto se elige un sensor pt-100 como se ve en la figura 11.6. El módulo de transmisión se alimenta en 24 Vcd y posee una salida de 4-20 mA. El rango de temperatura es de 0 a 250 °C.



Figura 11.6 – Sensor se Temperatura

11.3.2 pH

El pH debe mantenerse entre 6,5 y 7,5, siendo 7 el valor ideal. Para realizar su medición se opta por el sensor SKU: FIT0348, el mismo se muestra en la figura 11.7 y el módulo de transmisión con salida 4-20 mA que se muestra en la figura 11.8.



Figura 11.7 – Sensor de pH

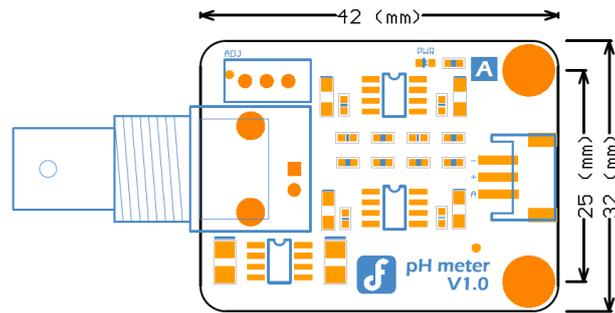


Figura 11.8 – Modulo de Transmisión pH

11.3.3 Presión

Si bien la presión queda determinada por el peso del cilindro móvil del gasómetro, es importante llevar un control para detectar alguna falla en el circuito de gas. Para ello se selección el sensor CS-PT100 con salida 4-20 mA y alimentación de 24 Vcd. La figura 11.9 muestra el sensor antes mencionado.



Figura 11.9 – Sensor de Presión

11.3.4 Potencial Redox (ORP)

El proceso de digestión anaeróbico, ocurre únicamente en medios acuosos con un potencial redox que se ubica en un rango de -330 mV a -550 mV siendo -300 mV el valor óptimo. Para ello se selección el sensor SD7420CD-ORP con salida 4-20 mA y alimentación de 24 Vcd. La figura 11.10 muestra el sensor antes mencionado.



Figura 11.10 – Sensor de ORP

11.3.5 Sensor de Distancia

Para medir el caudal de biogás producido en forma indirecta se debe conocer la elevación del cilindro móvil del gasómetro. Para ello se selecciona un sensor ultrasónico de distancia LV-MaxSonar®-EZ1™ con salida analógica de 0 a 5 V. La figura 11.11 muestra el dispositivo antes mencionado.

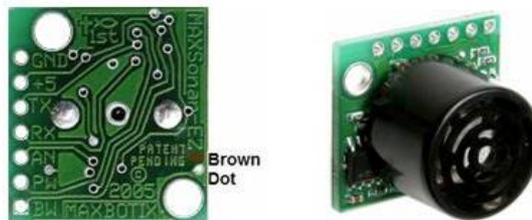


Figura 11.11 – Sensor de Distancia

11.3.6 Final de Carrera

Para el control de las válvulas solenoides que se encargan de cargar y descargar el gasómetro, es fundamental implementar dos finales de carreras que funcionen de testigos de la posición del cilindro móvil del gasómetro. El modelo seleccionado es Z-15GQ-B el cual se observa en la figura 11.12.



Figura 11.12 – Final de Carrera

11.4 Diseño y Desarrollo de Hardware

En lo que a diseño de hardware respecta, todavía se está trabajando en ello, mediante la plataforma de EAGLE Cadsoft, para el diseño de la placa y teniendo en cuenta los requerimientos de interfaz con el “mundo real” que la misma necesita satisfacer, con respecto a este último punto, la placa debe ser capaz de:

- Alojar el microcontrolador (se utilizará un microcontrolador PIC de 8 bits).
- Leer el conjunto de sensores analógicos requeridos para todas las variables que necesitamos conocer, las cuales fueron descritas en puntos anteriores.
- También debe ser capaz de leer entradas digitales, (por ejemplo, pulsador de parada de emergencia, entre otras entradas de este tipo).
- Manejar salidas digitales para accionar el agitador y también contará con salidas digitales de tipo PWM (permiten modulación por ancho de pulsos) para energizar las resistencias térmicas, que hacen las veces de elemento final de control en el lazo PID que se encargará de mantener constante la temperatura del biodigestor.

Con respecto al microcontrolador seleccionado para esta aplicación, el mismo es de la marca Microchip y el modelo es PIC16F1713 que se muestra en la figura 11.13 y cuyas características pueden verse su hoja de dato en el Anexo I - “Catálogos”.



Figura 11.13 – PIC16F1713

11.5 Diseño y Desarrollo de Software Embebido

El software embebido, es decir el programa que va a grabarse en el microcontrolador anteriormente descrito, se está desarrollando en lenguaje C, y mediante herramientas de compilación y desarrollo que el fabricante del microcontrolador nos brinda como ser MPLAB X IDE.

Con respecto a las funcionalidades del software embebido, el mismo debe ser capaz de manejar la comunicación con un servidor o PC, mediante el protocolo de bus de campo industrial ModBus Serie, en su especificación RTU y sobre RS232 en su capa física.

Además de gestionar la comunicación con la PC, el microcontrolador y su programa, deben ser capaz de leer los sensores digitales y analógicos del biodigestor, así como el algoritmo del lazo de control PID que se encargara de mantener constante la temperatura del reactor.

11.6 Diseño y Desarrollo del Sistema Scada

El sistema SCADA que hace de interfaz hombre máquina, se desarrollará en LabVIEW. El motivo de selección de esta plataforma es la facilidad con la que la misma puede gestionar la comunicación con el microcontrolador, ya que LabVIEW cuenta con un OPC que maneja en background (segundo plano) las cuestiones referidas a la comunicación. Esto permite que el programador se olvide de estas cuestiones y se aboque únicamente a desarrollar la interfaz de usuario o VI (de Virtual Instrument ó Instrumento Virtual), resultando esto en una drástica disminución de los tiempos de desarrollos para aplicaciones de este tipo.



CAPÍTULO 12: FUNCIONAMIENTO

12.1 Introducción

En este capítulo se tratara de explicar de forma sencilla el funcionamiento del dispositivo como así también las opciones que tendrá el usuario a la hora de encarar un ensayo.

12.2 Funcionamiento

Para hacer más sencillo la explicación se usara como referencia la figura 12.1 la cual se muestra a continuación:

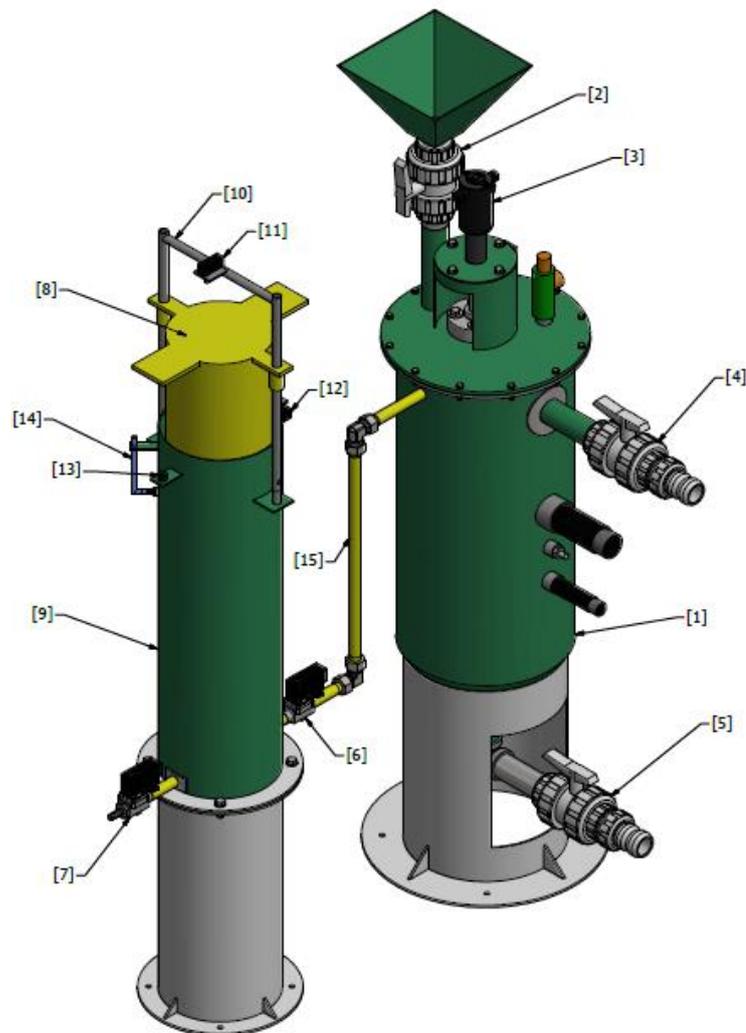


Figura 12.1 – Referencias



El primer paso es la puesta en marcha del biodigestor, lo cual se puede realizar de distintas maneras:

- Cargar $\frac{1}{4}$ del biodigestor con estiércol fresco de animales y el resto con agua.
- Cargar el volumen total con efluente proveniente de un sistema de producción pecuaria cercana.
- Cargar el biodigestor con inóculo de otro biodigestor.

Para esto, el software de control tendrá la opción de elegir la temperatura y las condiciones de agitación hasta que el biodigestor entre en régimen (produciendo biogás con las condiciones establecidas para el ensayo). Entrado en régimen se da la orden para que comience la adquisición de datos.

La carga del sustrato diluido se realiza por la válvula [2] y el exceso de material ya digerido se evacua por la válvula [4]. El proceso de carga y descarga se realiza por diferencia de nivel.

Una vez que el equipo entre en régimen el biogás producido pasara al gasómetro [9] a través del tubo de conexión [15] y por la válvula solenoide NA (Normal Abierta) [6].

El gasómetro cuenta con un cilindro móvil [8] que sirve para retener el biogás hasta su medición y posterior descarga a través de la válvula solenoide NC (Normal Cerrada) [7].

El control de las válvulas se realiza mediante dos finales de carrera [11] y [12] que asociados a relés eléctricos, cambian la posición de las válvulas solenoides en función de la posición del cilindro móvil. Cuando el cilindro llega al tope superior se activa el final de carrera [11], la válvula [7] abre y permite la descarga del biogás, en cambio, la válvula [6] cierra para que el biogás contenido en el reactor no escape al exterior sin ser medido. Cuando el cilindro llega al punto inferior, activa el segundo final de carrera [12] y en ese momento las válvulas [6] y [7] pasan a sus estados normales reanudándose el ciclo.

La medición se realiza en forma indirecta mediante un sensor ultrasónico de distancia [13] teniendo en cuenta que el volumen del cilindro móvil esta función de su elevación, la medición se hace antes de producirse la descarga. Además, independientemente de la elevación que tenga el cilindro móvil, al finalizar cada hora de ensayo el gasómetro se descarga. Esto permite llevar un control más preciso de producción de biogás (m^3/h).

Vale recordar que el equipo puede regular la temperatura del proceso hasta $60\text{ }^\circ\text{C}$, la velocidad de agitación y los tiempos en que actuara el agitador.



Las características del software para control y adquisición de datos al que tendrá acceso el usuario se describen a continuación:

- Control del proceso (Temperatura y Agitación).
- Adquisición de datos en tiempo real (Temperatura, pH, Redox, Presión y Producción de biogás).
- Permite al usuario cambiar las condiciones del proceso (Temperatura, Agitación y Alimentación) estando el biodigestor en régimen.
- Terminado el ensayo, el usuario tendrá acceso a los datos resultantes mostrados en tablas y gráficas.
- El programa dará el valor promedio de mayor producción de biogás y los parámetros con los que se logró el mismo (Temperatura, pH, Redox, Presión y Alimentación).
- Si bien el equipo cuenta con una válvula de seguridad por sobrepresión, el software también incorpora una alarma “virtual” que se activa al detectar una elevación de presión por encima de los rangos normales.



CAPÍTULO 13: PRESUPUESTO

13.1 Introducción

En este capítulo se hará un presupuesto general del equipo teniendo en cuenta materiales y mano de obra. Para finalizar, se comparará el costo final del mismo con el de un biodigestor construido para generar energía eléctrica y un equipo de similares características.

13.2 Costo del Equipo

El costo final y los detalles del mismo se pueden observar en la tabla 13.1 que se muestra a continuación:

| PRESUPUESTO | | | | |
|-------------|--|----------|----------------|-------------|
| Ítem | Descripción | Cantidad | Costo Unitario | Costo Total |
| 1 | Pt 100-Conexión 1/2" BSP | 1 | \$1.700 | \$1.700 |
| 2 | Sensor Redox -Conexión 1-1/2" NPT | 1 | \$11.000 | \$11.000 |
| 3 | Sensor de PH - Conexión 3/4 " NPT | 1 | \$2.100 | \$2.100 |
| 4 | Transductor Transmisor de Presión Salida 4-20ma - Conexión 1/2 " NPT | 1 | \$3.200 | \$3.200 |
| 5 | Válvulas de seguridad por alivio de presión 1/2 bar - Modelo 1800 - 1/2" NPT | 1 | \$1.500 | \$1.500 |
| 6 | Sensor de distancia ultrasónico LV-MaxSonar®-EZ1™ | 1 | \$800 | \$800 |
| 7 | Final de carrera Z-15GQ-B | 2 | \$150 | \$300 |
| 8 | Manta Térmica Fibra Cerámica - 7620 x 610mm - 13 mm de espesor | 1 | \$2.000 | \$2.000 |
| 9 | Válvula Solenoide NA - Conexión 1/2" BSP | 1 | \$1.300 | \$1.300 |
| 10 | Válvula Solenoide NC - Conexión 1/2" BSP | 1 | \$1.300 | \$1.300 |
| 11 | Motoreductor 1/8 hp 125 rpm - Modelo MR10B-024056 | 1 | \$2.500 | \$2.500 |
| 12 | Acople Miniatura 5 Nm - Modelo 2AA971010016 | 1 | \$1.000 | \$1.000 |
| 13 | Sello Simple de Cartucho D=25 mm - Modelo 150 | 1 | \$13.000 | \$13.000 |
| 14 | Calefactor Plano de Silicona 100 W - Modelo SIL10X15X10 | 7 | \$500 | \$3.500 |
| 15 | Software y Hardware (*) | 1 | \$35.000 | \$35.000 |
| 16 | Reactor y Gasómetro (**) | 1 | \$100.000 | \$100.000 |
| TOTAL | | | | \$180.200 |

Tabla 13.1 – Destalle Costo Final

Aclaraciones:

- (*): En el monto se incluye mano de obra (becarios y terceros) y elementos electrónicos cuyos costos son muy pequeños en comparación con el resto de los elementos descriptos en la tabla.



- (**): Incluye materiales (componentes de acero inoxidable) y mano de obra (fabricación y montaje).

13.3 Comparación con Biodigestor

Según la información brindada por la empresa GRUPO IFES (dedicada a la construcción de biodigestores para generación de energía eléctrica), el costo aproximado por kVA instalado es de USD 7000. Supongamos que se debe diseñar un biodigestor para un establecimiento agropecuario que requiere una potencia instalada de 10 kVA.

Para llevar todo a pesos se toma un dólar a \$18. El costo final del biodigestor y generador (CF) será:

$$CF = \frac{7.000 \text{ USD}}{\text{kVA}} \times \frac{18 \$}{\text{USD}} \times 10 \text{ kVA} = \$1.260.000$$

Con el dato anterior se calcula la relación de costos (RC):

$$RC = \frac{\$180.200}{\$1.260.000} \times 100 = 14,3 \%$$

Es decir, que el costo del equipo de ensayos es menor al 15% del costo de una instalación relativamente chica teniendo en cuenta que hoy en día ya se trabaja con potencias superiores a los 100kVA. Además, hay que tener en cuenta que el equipo es reutilizable y al ser mayormente de acero inoxidable, presenta gran resistencia y durabilidad.

13.4 Comparación con Equipo ARCIS

Como se mencionó en capítulos anteriores, el costo del equipo que ofrece la empresa ARCIS ronda los USD 21.000.

Para llevar todo a pesos se toma un dólar a \$18. El costo final del equipo ARCIS (CA) será:

$$CA = 21.000 \text{ USD} \times \frac{18 \$}{\text{USD}} = \$378.000$$

Con el dato anterior se calcula la diferencia de costos (DC):



$$DC = \$378.000 - \$180.200 = \$197800$$

Es decir, que el costo de equipo diseñado en el presente proyecto es \$197800 menor al ofrecido por la empresa alemana ARCIS.

Cabe destacar que el costo para fabricar el reactor y gasómetro se maximizó debido a que todavía no se tuvo respuestas de la empresa a la cual se pidió cotización, por lo tanto, el costo final para la fabricación del equipo seguramente será inferior al mostrado en la tabla 13.1.



CAPÍTULO 14: CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORAS

14.1 Conclusiones

Como conclusión puedo decir que estoy satisfecho con el resultado obtenido ya que, en primera instancia, lo tome como un desafío personal debido a que en nuestra carrera solo se menciona la biodigestión como una fuente renovable de energía. Lo que me demando un tiempo considerable de recopilación de información e interiorización en el proceso de biodigestión y producción de biogás.

El otro gran desafío fue la programación de microcontroladores que hasta el día de hoy sigo aprendiendo y profundizando en el tema.

En lo que respecta el equipo para ensayos, se obtuvo un modelo teórico que cumple con los objetivos perseguidos, quedando para un futuro la construcción de un prototipo a escala para corroborar el funcionamiento, es decir, contrastar valores medidos con datos certeros de otra fuente o método de ensayo para luego realizar ajustes y/o mejoras.

La idea en un futuro, con el apoyo de la secretaria de ciencia y técnica de la UTN-Facultad Regional Reconquista, es construir (luego del prototipo) un modelo final que pueda ser utilizado para brindar servicios a terceros.

14.2 Propuestas de Mejoras

A continuación mencionare lo que considero son posibles mejoras al equipo diseñado en este proyecto:

- Como se dijo anteriormente, la construcción de un prototipo a escala con materiales más económicos para realizar pruebas y ajustes de campo.
- Disminuir el tamaño del equipo pero aumentar la cantidad (Por ejemplo: un equipo compuesto por tres reactores de 20 o 25 litros y tres gasómetros) comandados por la misma PC, esto permitiría disminuir los tiempos del ensayo.
- Si bien el rango en el que oscila poder calorífico del biogás se conoce (depende de la cantidad de metano), sería interesante diseñar un equipo que permita determinar el poder calorífico que tiene el biogás del sustrato ensayado.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Groppelli, E., & Giampaoli, O. (2012). Biodigestores: una propuesta sustentable. Ediciones UNL, Universidad Nacional del Litoral.
- [2] Varnero, M. T. (2011). Manual de biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- [3] Hilbert, J. A. (2003). Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural, INTA Castelar, Morón, Argentina.
- [4] Castillo, Vladimir. (2013). Diseño y cálculo de un agitador de fluidos.
- [5] ANSI/ASME B106.1M-1985. Norma para el diseño de árboles de transmisión.
- [6] <http://www.at.fcen.uba.ar/materias/evapora.pdf>
- [7] <http://www.microchip.com/>
- [8] <https://es.wikipedia.org/wiki/OPC>
- [9] <https://es.wikipedia.org/wiki/Modbus>
- [10] <https://es.wikipedia.org/wiki/RS-232>
- [11] Vizcaíno, J. R. L., & Sebastiá, J. P. (2011). LabView: entorno gráfico de programación. Marcombo.
- [12] <https://es.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>
- [13] Pérez-López, E. (2015). Los sistemas SCADA en la automatización industrial. Revista Tecnología en Marcha, 28(4), 3-14.
- [14] Brito-Espino, S., Ramos Martín, A., Mendieta-Pino, C., & Pérez Báez, S. O. (2016). Diseño y construcción de un biodigestor a escala de laboratorio para el estudio y el aprendizaje del comportamiento de un microorganismo anaerobio.
- [15] Hernández, J. A. V., Aguilar, H. A. N., Ramos, J. M. G., Lárraga, T. G. H., & Ortiz, A. F. V. (2017). Generación, caracterización y uso del biogás, producto de la digestión anaerobia de las excretas de ganado bovino. Lacandonia, 5(2), 149-158.
- [16] Guevara Vera, A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales: Producción de gas y saneamiento de efluentes. In Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales: producción de gas y saneamiento de efluentes. CEPIS.
- [17] Arce Cabrera, J. J. (2011). Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del litoral (Bachelor's thesis).



[18] Ortega, N. M. (2006). Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process. Universal-Publishers.

[19] Deitel, H. M. (2004). Cómo programar en C/C++ y Java. Pearson educación.

[20] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Bocanegra, F. P., & Correa, C. O. (1990). Diseño en ingeniería mecánica (Vol. 8). London: McGraw-Hill.



ANEXO I: CATÁLOGOS

Lista:

- Acople Miniatura.
- Motorreductor.
- Barras Acero Inoxidable 1
- Barras Acero Inoxidable 2
- Chapas Acero Inoxidable
- Espiga Acanalada
- Espigas PVC
- Junta Selladora
- Manta Aislante
- Microcontrolador
- Niples y Cuplas
- Caños PVC
- Barras PVC
- Planchas PVC
- Resistencia Plana Flexible
- Sello Mecánico
- Final de Carrera
- Sensor pH
- Sensor Temperatura
- Sensor ORP
- Sensor Presión
- Sensor Distancia
- Válvula Esférica PVC
- Válvula de Seguridad
- Caños y Tubos Inoxidables
- Válvula Solenoide
- Transistor 1
- Transistor 2



ANEXO II: PLANOS

Lista:

- Plano N°1: GENERAL
- Plano N°2: REACTOR
- Plano N°3: GASÓMETRO
- Plano N°4: CUERPO CILÍNDRICO REACTOR
- Plano N°5: SOPORTE REACTOR
- Plano N°6: REFUERZOS REACTOR
- Plano N°7: TUBO PARA DESCARGA
- Plano N°8: TAPA REACTOR
- Plano N°9: BUJE Y PORTA BUJE DE AGITADOR
- Plano N°10: SOPORTE MOTORREDUCTOR Y TAPA
- Plano N°11: EJE Y PALETAS AGITADOR
- Plano N°12: EMBUDO PARA CARGA
- Plano N°13: CILINDRO FIJO GASÓMETRO
- Plano N°14: CILINDRO MÓVIL
- Plano N°15: SOPORTE GASÓMETRO
- Plano N°16: TOPE CILINDRO MÓVIL
- Plano N°17: COMPONENTES GASÓMETRO



ANEXO III: INFORME DE SIMULACIONES

Lista:

- CUERPO CILÍNDRICO REACTOR
- TAPA REACTOR
- GASÓMETRO: CILINDRO FIJO
- GASÓMETRO: CILINDRO MÓVIL
- AGITADOR (TENSIÓN)
- AGITADOR (VELOCIDAD CRÍTICA)