

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

“DISEÑO DE UN TANQUE PRESURIZADO PARA TRABAJAR COMO
BIODIGESTOR”

Tesis

Que para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico



Presenta:

Ramón Cázares Martínez

Directora de Tesis:

M.I. Rosa Itzel Flores Luna

Noviembre 2013.

Agradecimientos

A mis padres y a mi hermana, por todo su apoyo a lo largo de mi vida.

A mi directora de tesis y a todos mis profesores, por mi formación académica.

A todos mis amigos, por haber estado conmigo en éste trayecto.

Tabla de Contenido

Lista de tablas	2
Lista de figuras	3
Objetivo General	5
Objetivos Particulares	5
Introducción.....	6
Metas Logradas.....	7
Capítulo1. Estado del arte	8
1.1 Digestión Anaerobia.....	8
Definición	8
Las fases de la digestión anaerobia	8
1.1.3 Parámetros que influyen en la digestión anaerobia	11
1.2 Biogás	13
1.2.1 Definición	13
1.2.2 Composición y propiedades.....	13
1.3 Tanques biodigestores.....	14
1.3.1 Definición	14
1.3.2 Tipos de biodigestores.....	15
1.3.3 Biodigestores comerciales	19
1.3.4 Condiciones y normas de trabajo de los biodigestores.....	20
Capítulo 2. Especificaciones de diseño del tanque biodigestor diseñado en el CDMIT	22
2.1 Especificaciones	27
2.1.1 Diseño (Megyesy, 1992)	27
2.1.2 Fabricación	32
2.2 Descripción del sistema de degradación de la planta piloto para la generación de biogás a partir de desechos orgánicos de restaurantes	37
2.2.1 Tanque de degradación	37
2.2.2 Chaqueta de Calefacción.....	38
2.2.3 Agitación	40
2.2.4 Alimentación	40
2.2.5 Drenado de lodos.....	41
2.3 Normas sobre recipientes sometidos a presión	41

Capítulo 3. Análisis de esfuerzos y pruebas físicas	44
3.1 Prueba hidrostática	44
3.2 Prueba de rayos X	46
3.3 Análisis por elementos finitos.....	47
3.3.1 Cuerpo del tanque	47
Malla, restricciones y cargas.....	47
Resultados.....	49
Tiempo de vida esperado	51
3.3.2 Brida	54
Malla, restricciones y cargas.....	54
Resultados.....	55
3.3.3 Silleta	57
Malla, restricciones y cargas.....	58
Resultados.....	59
Discusión y conclusiones	61
Discusión	61
Conclusiones	63
Bibliografía	66

Lista de tablas

Tabla 1.1 Porcentaje de sustancias que componen el biogás.

Tabla 1.2 Propiedades físicas del biogás.

Tabla 2.1 Especificaciones de diseño de la empresa SUEMA para el tanque biodigestor.

Tabla 2.2. Datos para el cálculo del esfuerzo longitudinal.

Tabla 2.3 Datos obtenidos del *American Standar Code for Pressure Piping* correspondientes a aceros inoxidable austeníticos 18Cr8Ni.

Tabla 2.4 Datos para el cálculo de las tapas.

Tabla 2.5. Datos para el cálculo del espesor de las tapas.

Tabla 2.6. Datos para el cálculo de las silletas.

Tabla 2.7. Datos para el cálculo de la fuerza horizontal sobre la silleta.

Tabla 2.8. Datos para el cálculo del calor suministrado al interior del tanque.

Tabla 2.9 Datos para el cálculo del flujo de calor máximo en la chaqueta de calefacción.

Tabla 2.10 Datos para el cálculo del flujo de calor total necesario para estabilizar el proceso.

Tabla 2.11. Datos para el cálculo del gasto másico de agua necesario para el sistema de calefacción.

Tabla 2.12 Resistencia química de algunos materiales al contacto con el gas natural de acuerdo a la norma ASME sección VIII.

Tabla 2.13 Resistencia química de materiales de algunos recubrimiento al contacto con el gas natural de acuerdo con la norma ASME sección VIII.

Tabla 3.1. Criterios para factor de diseño de diseño.

Tabla 3.2 Resultados del análisis por elementos finitos del cuerpo del tanque.

Tabla 3.3 Resultados del análisis por elementos finitos de la brida.

Tabla 3.4 Resultados del análisis por elementos finitos de la silleta.

Lista de figuras

Figura 1.1 Fases del proceso de digestión anaerobia

Figura 1.2 Esquema de un biodigestor de régimen estacionario.

Figura 1.3 Biodigestor de régimen estacionario.

Figura 1.4 Biodigestor Chino.

Figura 1.5 Biodigestor Hindú.

Figura 1.6 Biobolsa o biodigestor Taiwanés.

Figura 2.1 Dibujo de la propuesta del tanque. Con permiso de SUEMA.

Figura 2.2 Diagrama del proceso de diseño y fabricación del tanque biodigestor.

Figura 2.3 Diseño de la tapa para el biodigestor

Figura 2.4 Posición de las silletas que soportan al biodigestor.

Figura 2.5 Diseño de la silleta.

Figura 2.6 Tolerancias de fabricación de los recipientes sometidos a presión.

Figura 2.7 CAD del biodigestor

Figura 2.8 Clasificación de los recipientes sometidos a presión.

Figura 3.1 Biodigestor en prueba hidrostática.

Figura 3.2 Comportamiento de la temperatura ambiental y la presión manométrica en el biodigestor durante la prueba hidrostática.

Figura 3.3 Fotografía del biodigestor mientras se realiza la radiografía.

Figura 3.4 Visualización de las restricciones (en azul) y cargas (en rojo) en el análisis por elementos finitos en el cuerpo del tanque.

Figura 3.5 Visualización de los esfuerzos elementales máximos en el cuerpo del tanque bajo el criterio de Von Mises.

Figura 3.6 Visualización de las restricciones (en azul) y cargas (en rojo) en el análisis por elementos finitos en la brida. A) Vista Isométrica. B) Vista Lateral.

Figura 3.7 Visualización de los esfuerzos elementales máximos en la brida bajo el criterio de Von Mises.

Figura 3.8 Diagrama de cuerpo libre del tanque soportado por las silletas.

Figura 3.9 Visualización de las restricciones (en azul) y cargas (en rojo) en el análisis por elementos finitos en la silleta.

Figura 3.10 Visualización de los esfuerzos elementales máximos en la silleta bajo el criterio de Von Mises.

Objetivo General

Diseñar y fabricar un tanque presurizado para un biodigestor utilizando CAE.

Objetivos Particulares

- Generar las especificaciones de diseño y fabricación de un tanque presurizado.
- Realizar un análisis de esfuerzos utilizando software de elemento finito.
- Analizar los resultados obtenidos a través de las pruebas mecánicas efectuadas al tanque.

Introducción

En el presente trabajo se analiza el diseño realizado en el CDMIT de un tanque biodigestor, el cual cumple con las especificaciones hechas por la empresa SUEMA, y se compara con los equipos existentes en el mercado y utilizados con el mismo propósito, con la finalidad de determinar si dicho diseño es el adecuado para las condiciones de trabajo del sistema.

Se da a conocer un panorama general del funcionamiento de los equipos de generación de biogás en el que se incluyen los tipos de biodigestores existentes, el proceso de descomposición anaerobia y las variables físicas involucradas en él.

Se analizaron los resultados de las pruebas hidrostática y de rayos x realizadas al tanque para comprobar que cumple con la norma ASME sección VIII para recipientes sometidos a presión. Se realizó el análisis por elementos finitos simulando condiciones de fatiga en el cuerpo del tanque, con lo que se puede predecir el comportamiento estructural del dispositivo y evaluar un posible rediseño del tanque que permita una mejora.

Metas Logradas

Los alcances del presente trabajo son:

- Se definieron las especificaciones de diseño del tanque biodigestor a partir de la propuesta de la empresa SUEMA.
- Se realizó el análisis por elementos finitos de la estructura del tanque simulando condiciones de operación bajo carga cíclica para verificar su correcto funcionamiento y que no se presentara falla bajo las condiciones de trabajo predeterminadas.
- Se analizaron los datos obtenidos de las pruebas realizadas por el fabricante.

Capítulo1. Estado del arte

1.1 Digestión Anaerobia

Definición

La digestión anaerobia o biometanización es un proceso mediante el cual la materia orgánica es degradada por acción de determinado tipo de bacterias bajo condición anaerobia (sin oxígeno), generándose como productos biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.), y digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

Las fases de la digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia consta de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato (alimento de los microorganismos), interviniendo diferentes poblaciones de microorganismos con diferentes velocidades de crecimiento y diferente sensibilidad a cada compuesto intermedio como inhibidor. Esto quiere decir que cada etapa tiene una velocidad de reacción diferente según la composición del sustrato y que el desarrollo del proceso de manera estable requiere que se evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o de ácidos grasos volátiles (AGV), ya que esto podría alterar el pH.

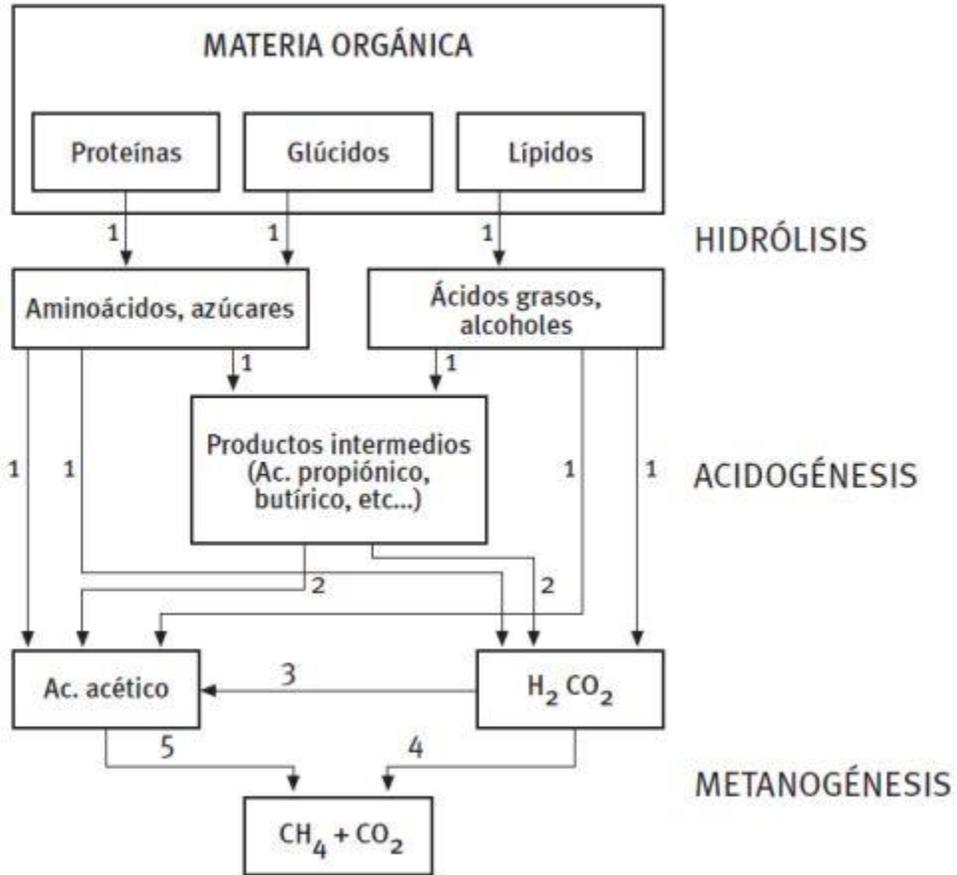


Figura 1.1 Fases del proceso de digestión anaerobia (A., 2008).

- Fase de hidrólisis

En esta primera etapa se lleva a cabo la transformación enzimática de moléculas con alto peso molecular en compuestos más simples y aptos para estar disponibles como fuente de energía y de carbono. En esta etapa: predominan bacterias Gram+ incluidas en los géneros *Clostridium* y *Staphylococcus*, y *Bacteroides* Gram.

- Fase de acidificación

La segunda etapa consiste en la fermentación de aminoácidos y azúcares, predominando bacterias Gram+ del ácido láctico y relacionadas: Lactobacillus, Streptococcus, Staphylococcus, Micrococcus; Gram -: Escherichia, Salmonella, Veillonelay reductoras de sulfato, y además la oxidación β de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes, en donde se involucran las bacterias Clostridium y Syntrophomonas.

- Fase de metanización

En la etapa final se presenta la transformación de acetato e hidrógeno a metano, interviniendo sintrofobacterias tales como Syntrophobacterwoliniy S. wolfei⁴ en la descomposición del acetato, y Methanobacterium, Methanobrevibacter, Methanosarcinay en la generación del metano.

Para poder llevar a cabo algunas de las reacciones durante el proceso, se requiere la asociación sintrófica (transferencia de hidrógeno entre especies) entre bacterias acetogénicas y metanogénicas, por lo que poner en marcha un reactor es un proceso lento que puede llevar meses.

Para incrementar la velocidad de las reacciones existen varias técnicas que se pueden aplicar tales como el pretratamiento para disminuir el tamaño de las partículas o incrementar la solubilización mediante maceración, ultrasonidos, tratamientos térmicos, alta presión o combinación de altas presiones y temperaturas.

1.1.3 Parámetros que influyen en la digestión anaerobia

Para evitar fallas durante el proceso es necesario tomar medidas de control en los siguientes aspectos (A., 2008):

- pH

El intervalo de pH en que puede llevarse a cabo la digestión anaerobia está comprendido entre 6.2 y 7.8, presentándose el rango óptimo entre 7 y 7.2. En un valor de pH menor a 6.2 las bacterias metanogénicas se ven afectadas severamente, con lo que el proceso falla.

- Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad de un sistema de mantener un pH determinado; es una medida de la capacidad amortiguadora del sistema. Mientras mayor sea la alcalinidad, se podrá mantener un pH a pesar de la generación de iones H^+ . En los sistemas de digestión anaerobia, la alcalinidad se debe a la presencia de carbonatos.

Debido a la mayor actividad de las bacterias acidogénicas, ante sobrecargas de materia orgánica el sistema puede acidificarse, lo que puede evitarse manteniendo una óptima alcalinidad con la presencia del ion bicarbonato o utilizando sosa.

- Temperatura

La predominancia de especies en sistemas anaerobios está dada por la temperatura. Los distintos tipos de bacterias que intervienen en el proceso tienen intervalos de temperatura óptima de crecimiento y actividad definidos.

La temperatura del sistema afecta también otros parámetros como la alcalinidad, el pH, las precipitaciones o redisoluciones de compuestos inorgánicos y cambios en la composición del gas debido a la diferente solubilidad.

- Ácidos grasos volátiles (AGV)

La concentración de AGV producto de la fermentación puede llegar a afectar la acidez del sistema, provocando el fallo del proceso. En condiciones normales, la concentración de AGV debe ser inferior a 100 mg/L. Niveles superiores pueden inhibir a las bacterias formadoras de metano.

- Agitación

La agitación de la mezcla durante el proceso permite la homogenización de la misma, con lo que se mantienen bajos los niveles de inhibidores.

- Tiempo de retención

Es el cociente entre el volumen y el caudal que se somete a tratamiento, es decir, el tiempo medio de permanencia de la materia orgánica en el reactor, en que se encuentra sometida a la acción de los microorganismos.

- Velocidad de carga orgánica

Es la cantidad de materia orgánica que se introduce al reactor por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos implican baja concentración de materia y/o un valor alto del tiempo de retención. El incremento en la velocidad de carga orgánica implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida, lo que obliga a buscar un valor óptimo técnico/económico para cada instalación y residuo a tratar.

1.2 Biogás

1.2.1 Definición

Se da el nombre de biogás a la mezcla gaseosa producida por la descomposición de materia orgánica en condiciones anaerobias con una composición muy similar a la del gas natural. La diferencia entre el biogás y el gas natural, es que este último, es un combustible fósil que se encuentra normalmente en el subsuelo.

1.2.2 Composición y propiedades

La composición típica del biogás se indica en la tabla 1.1, donde se observa que la alta proporción de metano permite su utilización con fines energéticos.

Componente	Porcentaje
Metano (CH ₄)	50 -70 (normalmente mayor a 60)
Dióxido de carbono (CO ₂)	30 - 50
Nitrógeno (N ₂)	0 - 3
Hidrógeno (H ₂)	0 - 1
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	0 -1
Monóxido de carbono (CO)	0 - 1.5
Agua (H ₂ O)	Resto

Tabla 1.1 Porcentaje de sustancias que componen el biogás.

Algunas de las propiedades físicas del biogás se muestran en la tabla 1.2.

Densidad	1.09 [Kg/m ³]
Solubilidad en agua	Baja
Presión Crítica	4.64 [MPa]*
Temperatura Crítica	82.5 [°C]*
Poder calorífico	4500 – 6500 [Kcal/m ³]

* Corresponden al metano

Tabla 1.2 Propiedades físicas del biogás.

1.3 Tanques biodigestores

1.3.1 Definición

De forma simple, un biodigestor o reactor es un contenedor cerrado, hermético e impermeable, en el que se introduce materia orgánica (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, etc.) para que por medio de la descomposición anaerobia se produzca gas metano y materia fertilizante rica en nitrógeno, fosforo y potasio, y además se disminuya el potencial contaminante de los excrementos.

El sistema puede incluir una cámara de carga y nivelación del líquido residual antes del reactor, sistema o dispositivo para la captación y almacenamiento del biogás y cámaras de hidrogenación y postratamiento a la salida del reactor.

Los pozos sépticos representan el digestor anaerobio más antiguo y sencillo que se conoce, utilizado para disponer de aguas residuales domésticas. Se piensa que de allí derivó el uso de los gases producidos de la descomposición anaerobia para el uso doméstico.

1.3.2 Tipos de biodigestores

Existen diferentes tipos de biodigestores. A continuación se presenta una clasificación basada en el régimen de carga de la materia orgánica.

- Régimen estacionario

Este tipo de digestor se carga una sola vez en forma total y se descarga una vez que se detiene la generación de biogás (figura 1.2). Consiste en un tanque hermético con una sola entrada/salida para la materia orgánica y una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás. Normalmente se aplica cuando la materia a procesar está disponible de manera intermitente.

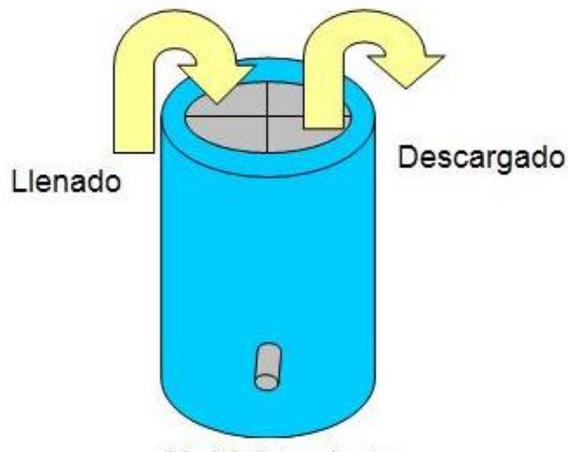


Figura 1.2 Esquema de un biodigestor de régimen estacionario. (Torre Guillén D., 2009)

Dentro de este tipo de biodigestores, el más usado es el Olade-Guatemala, el cual se muestra en la figura 1.3. Es un sistema de fácil construcción y produce una mayor cantidad de biogás en comparación con biodigestores de otro tipo. Cada metro cúbico de materia orgánica produce alrededor de medio metro cúbico de biogás.



Figura 1.3 Biodigestor de régimen estacionario. (Torre Guillén D., 2009)

- Régimen semicontinuo

Este tipo de biodigestor es más pequeño que los de régimen estacionario, lo que los hace ideales para uso doméstico en el medio rural. Generalmente, cuentan con tres orificios: uno central que se utiliza para realizar la carga inicial y cuando se requiere limpiar el tanque (descarga total); un segundo orificio de entrada que permita cargar el tanque periódicamente con pequeñas cantidades de materia orgánica nueva; finalmente un orificio de salida que permite retirar de manera periódica el material orgánico degradado.

El modelo de digester de régimen semicontinuo más usado, es el tipo chino (de estructura fija) por su durabilidad, funcionabilidad y seguridad como el mostrado en la figura 1.4. Consiste en una cámara de gas firme construida de ladrillos, piedra u hormigón. La cima y el fondo son semiesféricos y los lados son rectos. La superficie interior se sella con varias

capas de mortero. Se cuenta con un tapón de inspección en la cima del digestor para facilitar el limpiado. A medida que incrementa el volumen de gas en el domo, el incremento de presión obliga al líquido en los tubos de entrada y salida a subir, llegándose a alcanzar presiones de hasta 1.5 m de columna de agua. A pesar de ser poco eficiente en la producción de biogás, es excelente para la producción de bioabono debido a los extensos tiempos de retención.

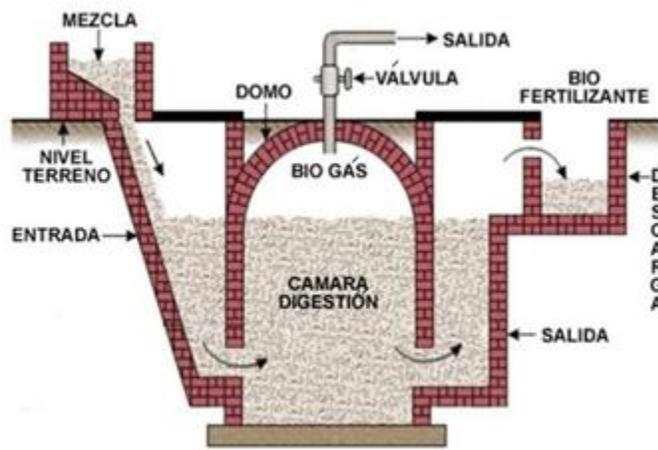


Figura 1.4 Biodigestor Chino. (Torre Guillén D., 2009)

Otro digestor de régimen semicontinuo es el modelo hindú que se muestra en la figura 1.5. Normalmente son verticales y enterrados. Se cargan una vez al día por efecto de la gravedad con un volumen de mezcla que depende del tiempo de retención. Producen una cantidad más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación. En la parte superior se cuenta con una campana flotante donde se almacena el biogás, balanceada por contrapesos, de manera que sólo sale de ésta una pequeña cantidad de gas para su uso; de esta manera la presión de gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, menor a 20 cm de columna de agua.

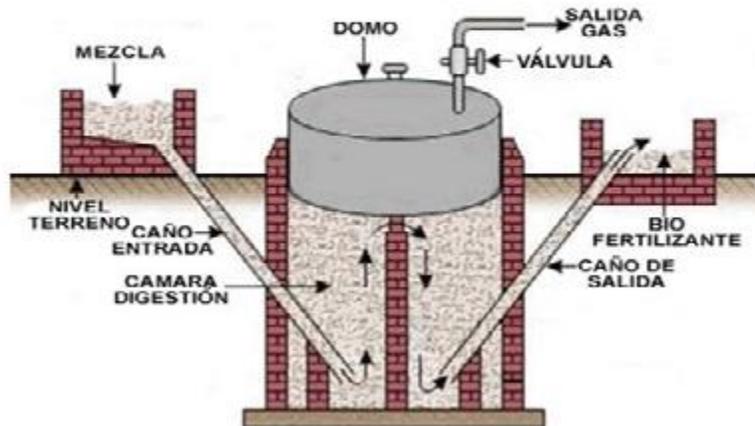


Figura 1.5 Biodigestor Hindú. (Torre Guillén D., 2009)

Finalmente se cuenta con el digestor Taiwanés o tipo balón como se muestra en la figura 1.6. Este tipo de digestor está hecho de material flexible, generalmente una bolsa y es mucho más económico que un digestor de estructura. La bolsa-reactor debe estar aislada y contener un sistema de calefacción y agitación. El gas generado se acumula en la parte superior de la bolsa-reactor, parcialmente llena de materia orgánica. La bolsa se infla lentamente con una presión baja. Para calentarse se recubre con una estructura de plástico por encima de 60 cm a modo de invernadero. Cuenta con cuatro tuberías: una para la alimentación, una más para la descarga de la materia orgánica, una para la extracción del biogás y una más para la limpieza. Además se cuenta con un sistema de seguridad para prevenir la ruptura de la bolsa. Dicho sistema consta de una botella plástica de al menos 10 cm de profundidad insertada en el tubo de salida. Cuando la presión del digestor sobrepasa 10 cm de columna de agua el gas se libera.

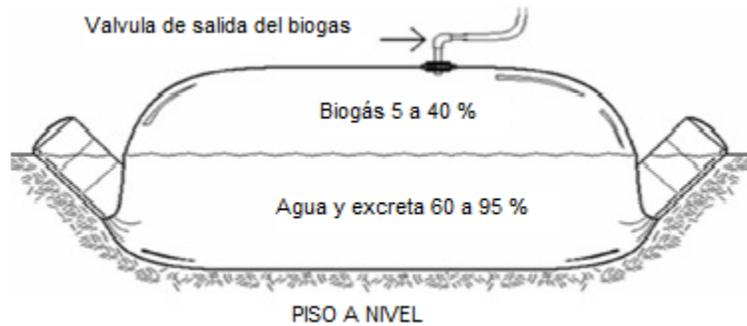


Figura 1.6 Biobolsa o biodigestor Taiwanés. (Torre Guillén D., 2009)

- Régimen continuo

Este tipo de digestores se utilizan principalmente para el tratamiento de aguas residuales en plantas de gran tamaño, donde se utilizan equipos comerciales para la alimentación, la calefacción y la agitación, así como para el control. Al ser instalaciones industriales la cantidad de biogás generada es grande y se aprovecha en aplicaciones de la industria.

De este tipo de digestores, el más sencillo es el de desplazamiento horizontal. Este tipo de reactor tiene una cámara alargada con un perfil cuadrado, rectangular o en V. los residuos orgánicos se van degradando a medida que pasan a lo largo del biodigestor, lo que lo hace útil en el procesamiento y aprovechamiento de residuos que requieren un tratamiento prolongado.

1.3.3 Biodigestores comerciales

Existen en el mercado diversas marcas que ofrecen al público un tanque biodigestor autolimpiable construido de polietileno, sin embargo, el propósito de dichos tanques no es la generación de biogás si no el tratamiento de aguas residuales.

Existen también equipos pre-armados para la industria agropecuaria y para la experimentación en laboratorios, además de los modelos fabricados por algunas entidades académicas con fines de experimentación. Dichos equipos cuentan con un reactor fabricado con plástico reforzado con fibra de vidrio o acero inoxidable. Este tipo de equipos cuenta con sensores y control para la temperatura y el pH, e incorporan un sistema para la extracción y medición de la cantidad de biogás obtenido. Se diseñan para manejar tiempos de retención bajos para los líquidos y altos para la materia sólida, con lo que aseguran el máximo aprovechamiento del proceso de descomposición anaerobia.

Estos equipos no manejan altas presiones en el interior del tanque biodigestor, ya que el gas solo se genera allí, el almacenamiento se lleva a cabo en un equipo separado. Se utilizan gasómetros para el almacenamiento del biogás extraído del biodigestor, los cuales se auxilian de compresores. Estos gasómetros pueden ser de baja presión, entre 7.5 y 30 cm de columna de agua, o de alta presión en un rango de 1.5 a 3.5 atmósferas.

1.3.4 Condiciones y normas de trabajo de los biodigestores

De acuerdo a la verificación de proyectos biodigestores en función a las especificaciones técnicas, realizado por SAGARPA en 2013, las condiciones de seguridad que debe cumplir el reactor son las siguientes:

- Cerco perimetral.
- Ubicación y requerimientos de seguridad del quemador.
- Señalizaciones de acuerdo a la normatividad por área, sistema u operación de proceso.
- Seguridad en sistemas de tubería.

- Instalación de válvulas de alivio.
- Prevención y control de incendios.
- Equipos de protección y seguridad personal.
- Hoja de seguridad del metano (CH₄).

Adicionalmente, se plantea como recomendación mantener un registro de la producción de biogás y corroborar el rendimiento del sistema, además de la instalación de un quemador de gas para eliminar el exceso de biogás en el sistema.

Las normas que rigen dichos proyectos son:

- NOM-001-SEMARNAT-1996 (límites máximos permisibles de contaminantes de descargas en aguas residuales y bienes nacionales).
- De acuerdo al uso final del agua residual NOM-002 y 003 –SEMARNAT-1997.
- NOM-004-SEMARNAT-2002 (Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento de disposición final).

Capítulo 2. Especificaciones de diseño del tanque biodigestor diseñado en el CDMIT

La empresa SUEMA (Sustentabilidad en Energía y Medio Ambiente) solicitó al CDMIT (centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica) el diseño de un tanque biodigestor para una planta piloto de generación de biogás a partir de desechos orgánicos de restaurantes. Las especificaciones iniciales de diseño propuestas por la empresa SUEMA fueron las que se muestran en la tabla 2.1:

Volumen interno aproximado	0.6 m ³
Relación longitud/diámetro	2
Diámetro	75 cm
Longitud	150 cm
Presión máxima	15 atmosferas
Material de construcción	Acero inoxidable AISI 304
Soporte	Silletas
Equipo de calefacción	Chaqueta
Sistema de mezclado	Hélices
Sistema de control de pH	Inyección de sosa

Tabla 2.1 Especificaciones de diseño de la empresa SUEMA para el tanque biodigestor.

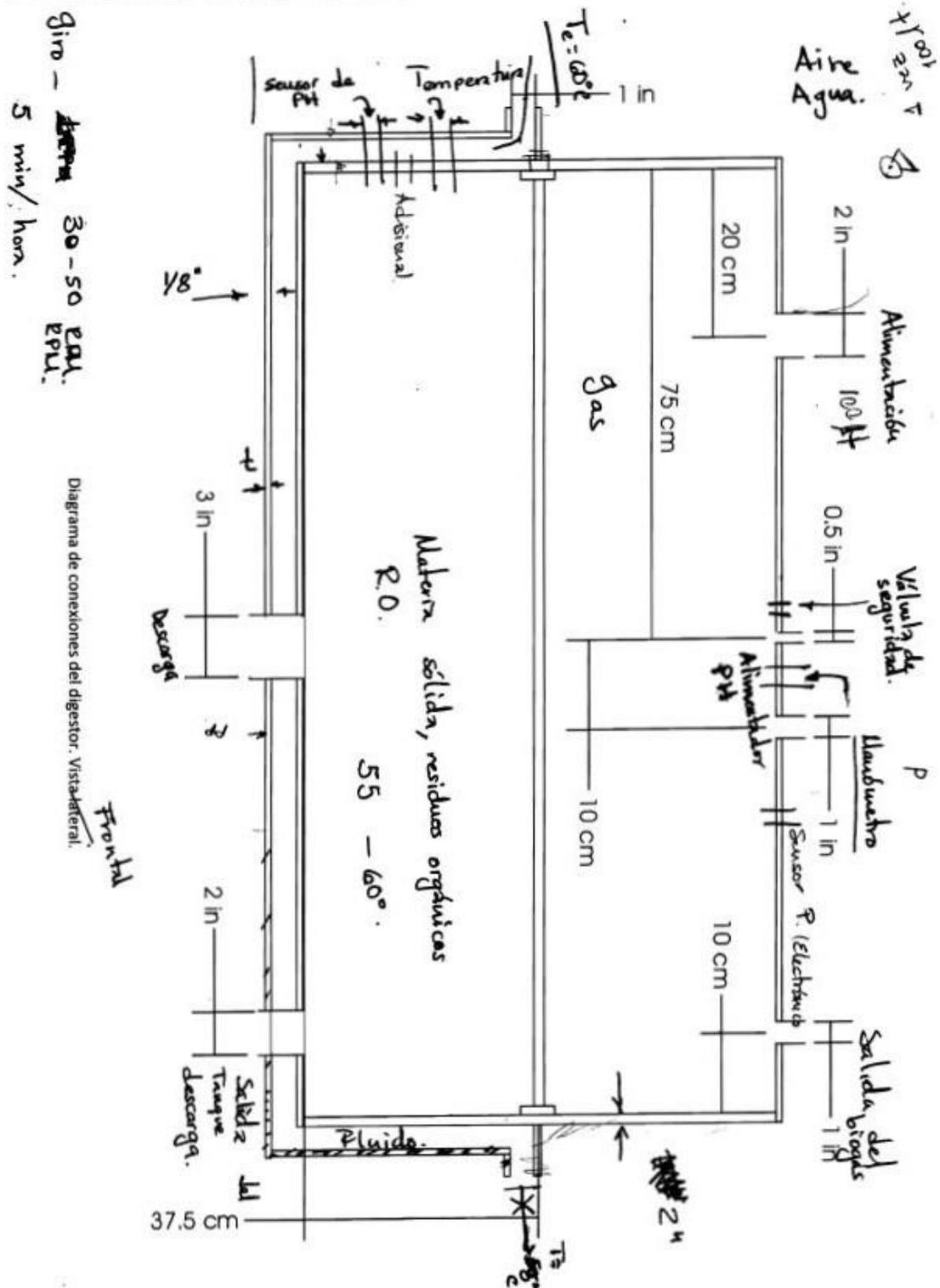


Figura 2.1 Dibujo de la propuesta del tanque. Con permiso de SUEMA.

De acuerdo con los datos de la cepa de bacterias con que se contaba para el proyecto, por cada 100 litros de desechos orgánicos que se ingresaran al reactor, se produciría una cantidad de biogás que elevaría la presión en el tanque en una atmosfera. Al evaluarse ésta información se llegó a la conclusión de que el tanque no llegaría a las 15 atmosferas propuestas, ya que el volumen no permitía manejar una cantidad de desechos suficiente para generar las 15 atmosferas de presión (1500 litros de desechos orgánicos), y tampoco se podría ingresar la materia paulatinamente ya que se requería de equipo robusto para vencer la presión del tanque, con lo cual se elevaban los costos.

El equipo comercial más adaptable a las necesidades de la empresa SUEMA eran los tanques estacionarios para almacenamiento de gas de la marca TATSA, los cuales cumplen con la norma oficial mexicana y que están fabricados en acero que cumple la especificación A.S.T.M. y NMX B-243 y B-275. Dichos tanques soportan una presión superior a las 16 atmosferas, sin embargo, debido a la presencia de ácidos durante el proceso de descomposición anaerobia, requieren de la aplicación de recubrimientos especiales, además de la dificultad que representaba la colocación de un equipo de calefacción y los sensores para el control del proceso, así como la entrada y salida de los desechos.

Finalmente, la empresa SUEMA acepto disminuir la presión máxima a 8 atmosferas, y utilizar el tanque con una presión de trabajo de 2 atmosferas. Se agregó al sistema una válvula de alivio de 6 atmosferas.

La chaqueta de calefacción fue modificada, ya que la idea original era que cubriera al tanque en la mitad de su circunferencia pero a todo lo largo, sin embargo, dicho diseño interfería con las silletas. El diseño final de la chaqueta se adaptó a un espacio de 60 cm

ubicado entre las dos silletas, y para minimizar las pérdidas de calor el tanque se cubrió completamente con lana mineral.

La figura 2.2 muestra un diagrama del proceso de diseño y fabricación del tanque biodigestor.

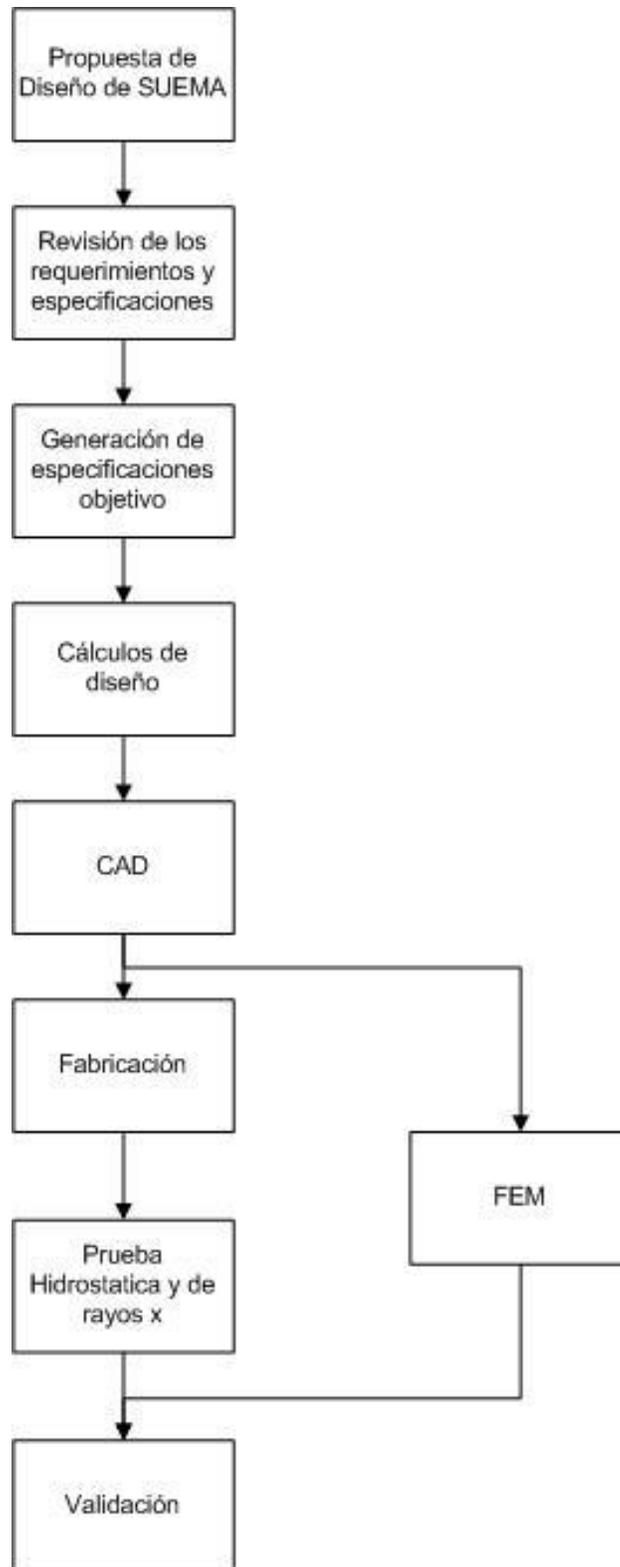


Figura 2.2 Diagrama del proceso de diseño y fabricación del tanque biodigestor.

2.1 Especificaciones

2.1.1 Diseño (Megyesy, 1992)

1. Tanque horizontal de 1.5 metros de longitud incluyendo las tapas y un diámetro de 0.75 metros.
2. Presión interna máxima de 8 bar. Presión de trabajo 2 bar.

El esfuerzo longitudinal debido a la presión se determinó de la siguiente forma,

$$\sigma_L = \frac{P * Dm}{4t} = \frac{(440.8785 \text{ PSI}) \left(\frac{75}{2.54} + \frac{3}{16} \right)}{4 \left(\frac{3}{8} \text{''} \right)} = 8773.82 \text{ PSI}$$

σ_L	Esfuerzo longitudinal	8773,82 PSI	60,5 Mpa
Dm	Diámetro medio del recipiente	29.715 pulg	0,75 m
P	Presión interna	440.9 PSI	3 Mpa
t	Espesor del casco sin margen por corrosión	3/8 pulg	9,5 mm

Tabla 2.2. Datos para el cálculo del esfuerzo longitudinal.

El esfuerzo de aro se calculó con la siguiente ecuación,

$$\sigma_r = \frac{\sigma_L}{2} = 4386.91 \text{ PSI}$$

Se consideró una presión de 30 atmosferas; t = 3/8 [pulg].

Cálculo del tanque horizontal.

$$P_{\max} = 15 \text{ atm} = 220 \text{ PSI}$$

$$P_0 = 2 \text{ atm} = 29.8919 \text{ PSI}$$

$$P_d = P_0 + 30 \text{ lb/pulg}^2 = 60 \text{ PSI} = 4 \text{ atm}; \text{ puesto que } P_0 \leq 300 \text{ lb/pulg}^2$$

Esfuerzo térmico.

En un inicio se no se contempló la colocación de un recubrimiento térmico para el tanque, por lo que fue necesario considerar que se podía presentar fatiga térmica debido a los cambios de temperatura del ambiente. La planta se ubica en Querétaro, donde se han registrado temperaturas hasta de $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, y ya que el tanque debía estar trabajando a $50 \text{ }^\circ\text{C}$, para los cálculos del esfuerzo térmico se utilizó un ΔT de $60 \text{ }^\circ\text{C}$, con 5° más como margen de seguridad. Los datos utilizados para el cálculo del esfuerzo térmico se muestran en la tabla 2.2.

Temp		Dilatacion	
[°F]	[°C]	[in/100ft]	[m/m]
50	10	-0,21	-1,75E-04
68	20	-0,021	1,75E-05
70	21,11	0	0
175	79,44	1,18	9,83E-04
176	80	1,1912	9,93E-04
200	93,33	1,46	1,22E-03

Tabla 2.3 Datos obtenidos del *American Standar Code for Pressure Piping* correspondientes a aceros inoxidables austeniticos 18Cr8Ni.

La dilatación térmica se expresa:

$$\delta_T = \alpha \Delta T L$$

Donde

α – coeficiente de dilatación lineal.

ΔT – diferencia de temperaturas.

L – longitud del material.

La deformación térmica está dada por:

$$\varepsilon = \frac{\delta_T}{L} = \alpha \Delta T$$

Por lo tanto el esfuerzo térmico queda:

$$\sigma = E \frac{\delta_T}{L}$$

Como se consideró un ΔT de 60 °C, de la tabla 2.2 se tomaron 20 y 80 °C, el valor de $\delta_T = 1.2122 \text{ in}/100\text{ft} = 1.01 \times 10^{-3} \text{ m/m}$. La longitud del tanque es de 1.4 m, por lo que la dilatación correspondiente es 1.414×10^{-3} metros y la deformación térmica debida al diferencial de temperatura establecido es:

$$\varepsilon = \frac{\delta_T}{L} = \frac{1.414 \times 10^{-3}}{1.4} = 1.01017 \times 10^{-3} \left[\frac{m}{m} \right]$$

Para el acero AISI 304, el módulo elástico es de 190 GPa, por lo tanto el esfuerzo térmico es:

$$\sigma = 190 \times 10^9 \text{ Pa} * 1.01017 \times 10^{-3} = 191.9 \text{ [MPa]}$$

El esfuerzo térmico se encuentra debajo del límite de elástico del material (300 MPa), sin embargo, posteriormente al cálculo se decidió colocar un recubrimiento de lana minera por lo que se descartó la fatiga térmica.

3. Tapas elipsoidales con las siguientes características:

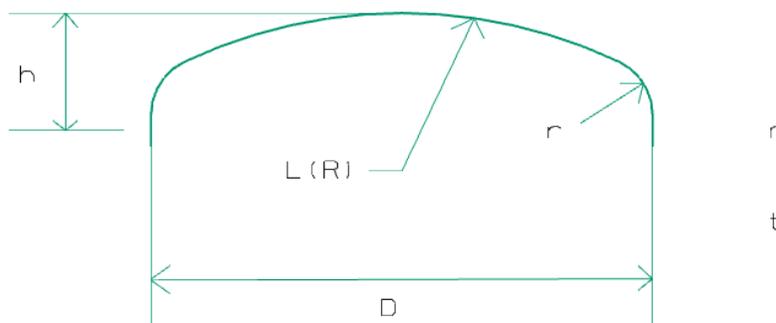


Figura 2.3 Diseño de la tapa para el biodigestor. (Megyesy, 1992)

D	Diámetro exterior de las cabezas ASME bridadas y alabeadas	30 pulg	0,762 m
h	Profundidad interior del alabeamiento	4,875 pulg	123,83 mm
L (R)	Radio interior del alabeamiento de las cabezas ASME bridadas y alabeadas como se usa en las fórmulas para presión interna o externa	30 pulg	0,762 m
M	Factor que se utiliza en las fórmulas para presión interna	1,75	1,75
r	Radio interior de la corona de las cabezas ASME bridadas y alabeadas	1,875 pulg	47,63 mm
t	Espesor de pared, nominal o mínimo	3/8 pulg *	9,5 mm

* Valor Comercial Seleccionado

Tabla 2.4 Datos para el cálculo de las tapas.

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$$

P	Presión de diseño	330 PSI	2,27 Mpa
D	Diámetro exterior	29,5 pulg	0,75 m
S	Esfuerzo permitido del material, resistencia	30000 PSI	206,84 Mpa
E	Eficiencia de la junta	0,85	0,85

Tabla 2.5. Datos para el cálculo del espesor de las tapas.

Con estos datos, el espesor resultante es $t = 0.109$ in.

4. El tanque está soportado por dos silletas con las siguientes características:

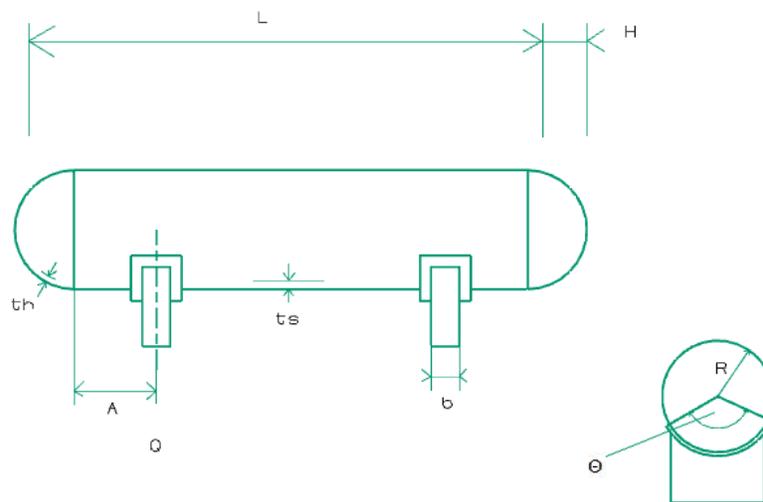


Figura 2.4 Posición de las silletas que soportan al biodigestor. (Megyesy, 1992)

A	Distancia de la línea de tangencia de la cabeza al centro de la silleta	6,25 pulg	158,75 mm
b	Ancho de la silleta	7 pulg	177,8 mm
H	Profundidad de la concavidad de la cabeza	7,4 pulg	188 mm
L	Longitud del recipiente, tangente a tangente	44 pulg	1,12 m
P	Presión interna de diseño	330 PSI	2,27 Mpa
Q	Carga sobre una silleta	11000 lb	49 KN
R	Radio exterior del casco	14,82 pulg	376,4 mm
ts	Espesor del casco	5/16 pulg	7,9 mm
θ	Ángulo de contacto	120°	120°

Tabla 2.6. Datos para el cálculo de las silletas.

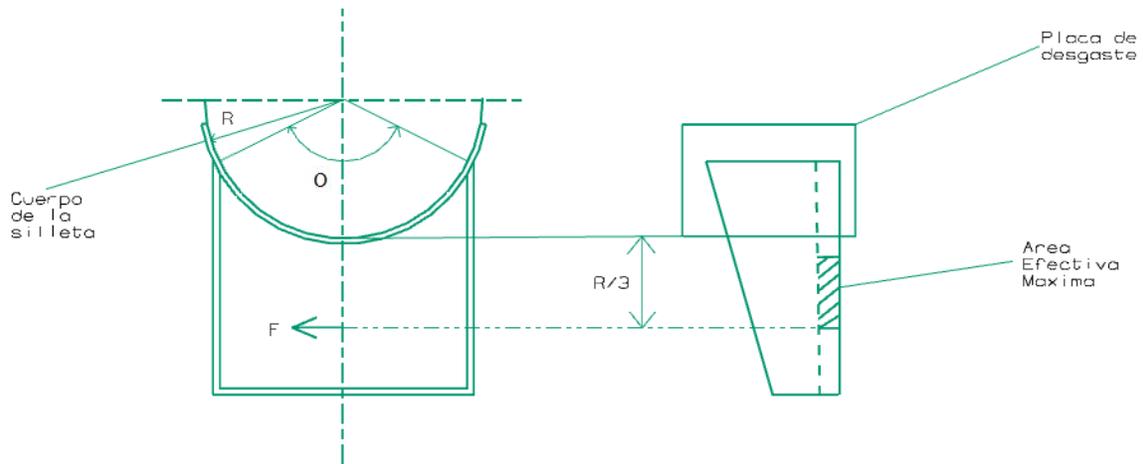


Figura 2.5 Diseño de la silleta. (Megyesy, 1992)

F	Fuerza horizontal	2244 lb	10 KN
K	Constante tabulada en función del ángulo de contacto ¹	0,204	0,204

Tabla 2.7. Datos para el cálculo de la fuerza horizontal sobre la silleta.

2.1.2 Fabricación

1. Material: Acero 304
2. Espesor de placa (casco) – 1/4 in (valor comercial seleccionado)
3. Soldadura, eficiencia de 85%.
4. Aberturas

El tanque cuenta con las siguientes aberturas:

- 2 de ½ pulgada de diámetro, ubicadas en una de las tapas para la colocación de sensores de pH y temperatura.

¹ Manual de recipientes a presión diseño y cálculo, Eugene F. Megyesy, Limusa, 1992, pag. 96.

- 2 de ½ pulgada de diámetro, ubicadas en la parte superior del tanque para la colocación de un sensor de presión y una válvula de seguridad.
- 2 de 1 pulgada de diámetro, ubicadas lateralmente sobre la chaqueta como entrada y salida del líquido de trabajo del sistema de calefacción.
- 1 de 1 pulgada de diámetro, ubicada en la parte superior del tanque como salida para el gas.
- 1 de 2 pulgada de diámetro, ubicada en la parte superior del tanque para la alimentación.
- 1 de 3 pulgadas de diámetro, ubicada en la parte inferior del tanque para la extracción de los desechos.

Todas las aberturas llevan bridas de cuello soldable.

5. Elementos internos

Sistema de agitación.

Soportes del sistema de agitación

6. Accesorios

Sistema de calefacción tipo chaqueta.

Orejas para la instalación.

El taque cuenta con dos orejas en la parte superior para facilitar su instalación.

7. Tolerancias de fabricación

No deberán rebasar los límites indicados en la figura 2.6

TOLERANCIAS DE FABRICACION DE LOS RECIPIENTES

Las tolerancias dimensionales de esta tabla, excepto que se indique otra cosa, están basadas en la práctica seguida ampliamente por usuarios y fabricantes de recipientes sujetos a presión.

Todas las tolerancias están expresadas en pulgadas, excepto que se indique lo contrario.

Las tolerancias no anotadas en esta tabla deberán mantenerse dentro de un límite práctico.

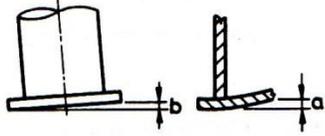
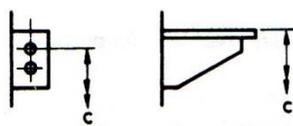
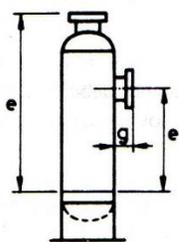
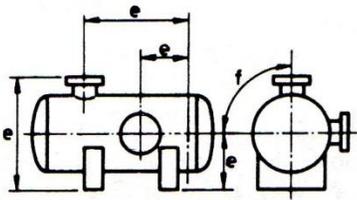
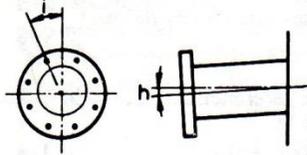
	Anillo de base
	a. Igualdad en la superficie..... $\pm 1/16$
	b. Desnivel..... $\pm 1/8$
Grapas, soportes	
	c. Distancia a la línea de referencia..... $\pm 1/4$
	d. Desviación medida circunferencialmente en la junta de la estructura..... $\pm 1/4$
	Distancia entre dos grapas adyacentes..... $\pm 1/16$
Registro de inspección	
	e. Distancia de la cara de la brida o de la línea de centros del registro a la línea de referencia, a la oreja de soporte del recipiente, a la parte inferior de la silleta, a la línea de centros del recipiente, la que sea aplicable... $\pm 1/2$
	f. Desviación medida circunferencialmente sobre la superficie exterior del recipiente... $\pm 1/2$
	g. Saliente; distancia más corta de la superficie exterior del recipiente a la cara del registro de inspección..... $\pm 1/2$
	h. Desviación respecto a la horizontal, la vertical o la posición requerida en cualquier dirección..... $\pm 1^\circ$
	i. Desviación de los agujeros de tornillos en cualquier dirección..... $\pm 1/4$
Boquillas, acoplamientos que no van conectados a otras tuberías.	
Deben aplicarse las tolerancias para registros de inspección.	
Boquillas, acoplamientos que van conectados a otras tuberías.	
	Distancia de la cara de la brida o del eje de la abertura a la línea de referencia, a la oreja de soporte del recipiente, a la parte inferior de la silleta, al eje del recipiente, lo que sea aplicable..... $\pm 1/4$
	f. Desviación medida circunferencialmente sobre la superficie exterior del recipiente... $\pm 1/4$
	g. Saliente; distancia más corta de la superficie exterior del recipiente a la cara de la abertura..... $\pm 1/4$

Figura 2.6 Tolerancias de fabricación de los recipientes sometidos a presión. (Megyesy, 1992)

TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN DE LOS RECIPIENTES (Continuación)

Boquillas (Continuación)

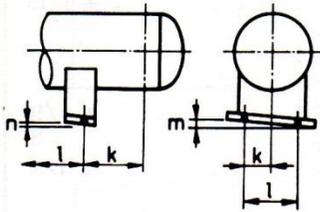


- h. Desviación respecto a la horizontal, la vertical o la posición requerida en cualquier dirección. $\pm 1/2^\circ$
- i. Desviación de los agujeros de tornillos en cualquier dirección..... $\pm 1/8$

Boquillas, coples utilizados para indicadores de nivel, control de nivel, etc.

Distancia entre líneas de centros de aberturas.. $\pm 1/16$

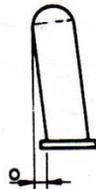
Silleta



- k. Distancia de la línea de centros de los agujeros de tornillos a la línea de referencia..... $\pm 1/8$
- k. Distancia de la línea de centros de los agujeros de tornillos a la línea de centros del casco..... $\pm 1/8$
- l. Distancia entre los agujeros de tornillos de la placa de base o entre agujeros de tornillos o ranuras de dos silletas..... $\pm 1/8$
- m. Inclinación transversal de la placa de base... $\pm 1/32$ por pie
- n. Inclinación longitudinal de la placa de base... $\pm 1/8$

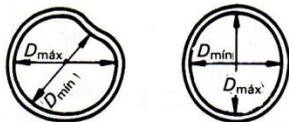
Casco

- o. Desviación de la vertical para recipientes de hasta 30 pies de altura total..... $\pm 1/2$
- para recipientes de más de 30 pies de altura total $\pm 1/8$ por 10 pies máximo 1-1/2



- p. Recipientes para presión interna. La diferencia entre los diámetros interiores máximo y mínimo en cualquier sección transversal no debe exceder del uno por ciento del diámetro nominal en la sección transversal..... $\pm 1\%$

Desviación del diámetro interior nominal según se determina haciendo franjas..... $\pm 1/32$ por pie



$$D_{máx} - D_{mín} = P$$

Ovalamiento Norma UG-80

Presión externa. Norma UG-80

Cabezas formadas, Norma UG-81

Instalación de la artesa



- r. Desnivel en cualquier dirección..... $\pm 1/32$ por pie

Soporte de la artesa

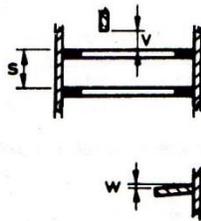
- r. Desnivel en cualquier dirección..... $\pm 1/32$ por pie

Figura 2.6 Tolerancias de fabricación de los recipientes sometidos a presión (Continuación).

(Megyesy, 1992)

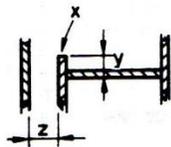
TOLERANCIAS DE FABRICACION DE LOS RECIPIENTES (Continuación)

Soporte de la artesa (Continuación)



- s. Distancia entre soportes adyacentes de artesa $\pm 1/8$
- t. Distancia a la línea de referencia. $\pm 1/4$
- s. Distancia a la charola del sello. $\pm 1/8$
- v. Distancia al soporte descendente. $\pm 1/8$
- w. Inclinación para cualquier ancho de anillo de soporte. $\pm 1/16$

Placa vertedora



- x. Desnivel $\pm 1/16$
- y. Altura $\pm 1/8$
- z. Distancia al interior de la pared del recipiente $\pm 1/4$

Figura 2.6 Tolerancias de fabricación de los recipientes sometidos a presión (Continuación).
(Megyesy, 1992)

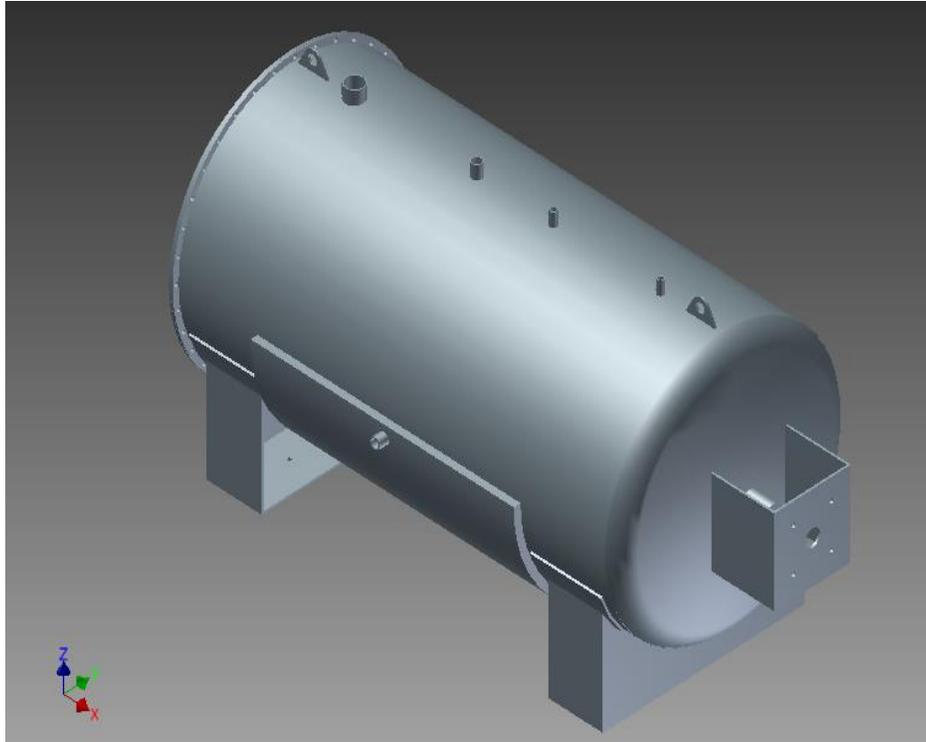


Figura 2.7 CAD del biodigestor.

2.2 Descripción del sistema de degradación de la planta piloto para la generación de biogás a partir de desechos orgánicos de restaurantes

2.2.1 Tanque de degradación

Tanque presurizado horizontal de tapas parabólicas. El tanque está equipado con sistema de hélices para la agitación de los residuos orgánicos y de sensores para presión, temperatura y PH. Se dispone de válvulas para la alimentación y drenado de los desechos además de la descarga del biogás.

Los residuos orgánicos ingresan al tanque digester donde se acelera el proceso de descomposición al incrementar la presión y la temperatura llevándose a cabo el proceso de manera natural y obteniendo como producto biogás. Posteriormente se retiran los desechos del tanque para reiniciar el ciclo.

La presión de máxima es de 8 atmósferas, mientras que la presión de operación es de 2 atmósferas. El tanque está hecho en acero inoxidable 304, el espesor de pared de 1/4 de pulgada y el espesor de las tapas 3/8 pulgadas.

La eficiencia de las juntas soldadas es de 85% y todas las entradas para alimentación, drenado y sensores están diseñadas para el uso de bridas de cuello soldable.

2.2.2 Chaqueta de Calefacción

El tanque está equipado con una chaqueta que lo cubre hasta la mitad de su circunferencia y en una longitud de 60 centímetros a lo largo del tanque. La chaqueta funciona como intercambiador de calor con agua como fluido de trabajo. Adicionalmente, el tanque está cubierto en su totalidad por una capa de fibra de vidrio como aislante para reducir las pérdidas de calor.

El sistema de calefacción proporciona calor al interior del tanque para elevar rápidamente la temperatura hasta un valor preestablecido y mantenerla dentro de un rango de trabajo. La capa de aislante térmico mantiene las pérdidas de calor hacia el ambiente en valores bajos para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. El interior del tanque debe permanecer entre 50 y 60 °C.

El diseño de la chaqueta cumple con las siguientes características:

La mezcla de desechos ingresa al tanque a 30°C, y es necesario elevar su temperatura a 55 °C rápidamente, por lo que el calor necesario para llevar a cabo este proceso es:

$$Q_{sum} = m * C_e * \Delta T$$

Qsum	Calor que se debe suministrar para el proceso	41 275 000 J
m	Masa de la mezcla que se debe calentar	100 Kg.
Ce	Calor específico de la mezcla	16 510 J/Kg°C
ΔT	Diferencia de temperaturas	(55-30°C) 25°C

Tabla 2.8. Datos para el cálculo del calor suministrado al interior del tanque.

El flujo máximo de calor hacia el tanque que se tendrá en la chaqueta de 60 cm de longitud y cubre sólo la mitad de la circunferencia del tanque será:

$$Q_{\dot{max}} = \frac{\Delta T}{\frac{2Ln(\frac{Re}{Ri})}{\pi kL}}$$

Re	Radio externo del tanque	38.135 cm
Ri	Radio interno del tanque	37.5 cm
K	Conductividad térmica del acero	14.9 W/m°C
L	Longitud de la chaqueta	60 cm
Qmax	Flujo de calor máximo en el área de la chaqueta	Promedio 25089.2 W

Tabla 2.9 Datos para el cálculo del flujo de calor máximo en la chaqueta de calefacción.

Por lo que el flujo de calor total necesario para estabilizar el proceso en un tiempo máximo de 30 minutos, con pérdidas de calor máximas de 1000W bajo condiciones climáticas extremas y considerando que el tanque estará aislado será:

$$Q_{total} = \frac{Q_{sum}}{tiempo} + Q_{perdidas}$$

Tiempo		1800 s
Qperdidas		1000 W
Qttotal	Flujo de calor necesario para estabilizar la temperatura de la mezcla en 30 minutos	23930.56 W

Tabla 2.10 Datos para el cálculo del flujo de calor total necesario para estabilizar el proceso.

El fluido de trabajo del intercambiador de calor es agua. El gasto de agua necesario para el proceso es:

$$\dot{m} = \frac{Q_{total}}{C_{e_{h_2o}} * \Delta T_{h_2o} * \rho}$$

C _{e_{h_{2o}}}	Calor específico del agua	4183 J/Kg°C
ΔT _{h_{2o}}	Diferencia de temperaturas del agua	entrada 60°C, salida 55°C
ρ	Densidad del agua	985.2 Kg/m ³ a 60°C
ṁ	Gasto de agua necesario	0.00116 m ³ /s, 1.16 litros/s

Tabla 2.11. Datos para el cálculo del gasto másico de agua necesario para el sistema de calefacción.

2.2.3 Agitación

Se cuenta con un par de hélices en contrasentido (derecha e izquierda) dispuestas a todo lo largo del cuerpo del tanque sobre un mismo eje. Dichas hélices se activarán durante 5 minutos cada hora para mezclar los residuos orgánicos con un motor de 1 hp.

2.2.4 Alimentación

Los residuos orgánicos ingresan a través de un sistema de tubería conectado en la parte superior del tanque. La materia orgánica es triturada previamente hasta obtener partículas de 5 mm de diámetro máximo. Se ingresarán diariamente 100 Kg de materia orgánica previamente triturada.

2.2.5 Drenado de lodos

En la parte inferior del tanque se localiza la tubería para la descarga de los residuos orgánicos. La descarga diaria será de 100 Kg, igual que la alimentación, con lo que se garantiza que el tanque siempre tenga la misma cantidad de materia en su interior. La descarga puede ser manual o programada por tiempo. Los residuos orgánicos pasan a un proceso de clarificado de agua.

2.3 Normas sobre recipientes sometidos a presión

El código ASME, en su sección VIII norma el diseño y fabricación de recipientes sometidos a presión. De acuerdo a dicho código, este tipo de recipientes se clasifican de la siguiente manera:

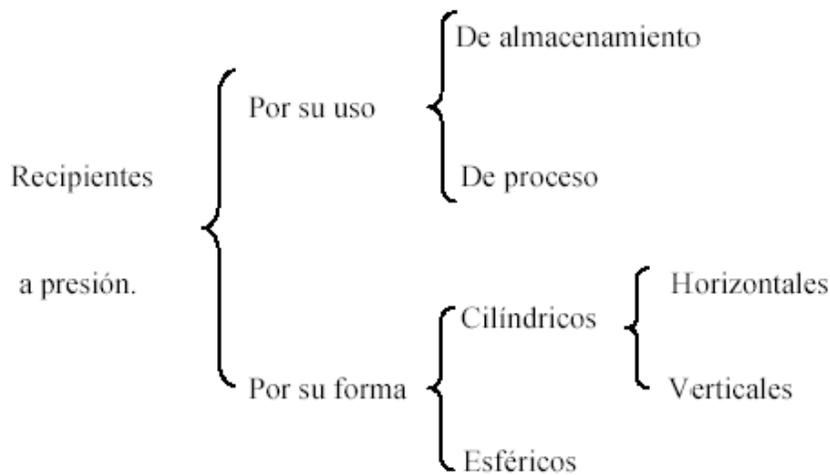


Figura 2.8 Clasificación de los recipientes sometidos a presión.

El reactor diseñado por el CDMIT para la empresa SUEMA, a diferencia de otros equipos tanto comerciales como experimentales existentes, mantiene el gas dentro del reactor y no en un reservorio separado, de tal forma que el incremento de presión en su interior hace más eficiente el proceso de degradación anaerobia. Por dicha razón, el reactor entra

en la clasificación de recipiente a presión cilíndrico horizontal de almacenamiento y de proceso.

De acuerdo con la norma antes mencionada, los materiales aceptables para el diseño de un tanque sometido a presión son los hierros, aceros, aleaciones de aluminio, de cobre o de níquel, aleaciones a base de cromo y aceros inoxidable principalmente, a considerarse de acuerdo al contenido químico del tanque.

De acuerdo al manual de recipientes a presión, basado en la norma ASME sección VIII, la resistencia química de los metales al contacto con el gas natural se clasifica como se muestra en la tabla 2.12.

Material	Resistencia química al gas natural
Hierro y acero	Bueno
Latón rojo	Precaución, depende de las condiciones
Bronce comercial	Precaución, depende de las condiciones
Plomo	Bueno
Cobre	Precaución, depende de las condiciones
Aluminio	No se recomienda
Níquel	Bueno
Inconel	Bueno
Metal Monel	Bueno
Ac. Inox. Tipo 304	Bueno
Ac. Inox. Tipo 316	Bueno
Ac. Inox. Tipo 347	Bueno
Ac. Inox. Carpenter "20"	Bueno
Hastelloy "B" o "C"	Bueno

Tabla 2.12 Resistencia química de algunos materiales al contacto con el gas natural de acuerdo a la norma ASME sección VIII.

De acuerdo con la tabla, la cual muestra los materiales que se pueden utilizar para la construcción de tanques a presión de acuerdo a la norma ASME, para el diseño del biodigestor los materiales recomendados son el hierro y los aceros comerciales, el plomo, el níquel, el inconel (familia de superaleaciones austeníticas de base níquel-cromo), el metal monel (aleaciones comerciales con razones níquel-cobre de aproximadamente 2:1 de peso), los aceros inoxidable y el hastelloy (familia de aceros inoxidable con altos porcentajes de Ni y Co con altas prestaciones químicas y de temperatura).

La resistencia química de algunos materiales de recubrimiento a las sustancias presentes durante el proceso de descomposición anaerobia se presenta en la tabla 2.13

	Caucho natural	Butadieno estireno	Neopreno	Fenólicos	Furanos	Epóxicos	Oleorresinosos	Vinilos	Cloruro de vinilideno	Caucho clorinado	Estireno-butadieno	Polietileno	Asfálticos
Hidroxido de sodio 40%	1	2	1	4	2	2	4	1	1	2	2	1	3
Ácido acético 10%	1	2	1	1	1	1	4	3	3	4	4	3	4
Sulfuro de hidrogeno	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	2

Tabla 2.13 Resistencia química de materiales de algunos recubrimiento al contacto con el gas natural de acuerdo con la norma ASME sección VIII.

- 1: Contacto directo y continuo con sustancias corrosivas
- 2: Alta concentración de humos corrosivos y sometido a salpicadura y derrame constantes
- 3: Concentraciones de humos relativamente altas pero con poco o nada de salpicadura ni derrame, ni contacto directo con la sustancia corrosiva.
- 4: Concentraciones débiles de humos corrosivos. Intemperismo.

Durante el proceso de digestión anaerobia se produce ácido acético y sulfuro de hidrógeno, además de que se utiliza hidróxido de sodio (sosa cáustica) para equilibrar el PH, por lo que un buen recubrimiento para el interior del reactor sería el caucho natural y el neopreno, considerando que el contacto entre la superficie y las sustancias es directo y prolongado. Con base en estos datos, se puede decir que el reactor podría construirse de acero comercial y recubrirse internamente para evitar la corrosión, con lo que se reduciría el elevado costo que representa construirlo totalmente en acero inoxidable, como lo solicito SUEMA, y se cumplirían con las normas establecidas para este tipo de equipo. El producto generado en un biodigestor es biogás, pero la norma ASME solo presenta datos para gas natural, los cuales se consideraron en este trabajo debido a su semejanza química con el biogás.

Capítulo 3. Análisis de esfuerzos y pruebas físicas

La empresa encargada de la fabricación del tanque biodigestor (Tanques y Tapas ASME, S. A. de C. V) envió al CDMIT un reporte conteniendo los resultados de la prueba hidrostática y las radiografías realizadas al tanque, así como las pruebas para calificar a los soldadores. Los resultados se reportaron como satisfactorios.

3.1 Prueba hidrostática

Se realizaron pruebas estáticas al tanque fabricado basándose en la norma ASME VIII para tanques a presión. Las pruebas hidrostáticas se encuentran incluidas en los ensayos no destructivos y específicamente en los de hermeticidad. Consiste en la verificación de la integridad física de una estructura herméticamente cerrada, en la cual, se introduce un fluido a una presión superior a la presión de operación y se mantiene así durante un tiempo establecido.

La norma ASME sección VIII contempla utilizar un fluido en el interior del tanque a una presión 4 veces mayor a la presión de trabajo para garantizar que no existan fugas. La prueba hidrostática se llevó a cabo con vapor de agua con una presión inicial de 8.5 Kg/cm manométrica. Se consideró que la presión atmosférica cambia a lo largo del día, de manera que estos cambios afectan de alguna manera la medición del manómetro. La figura 3.1 muestra el tanque biodigestor durante la prueba hidrostática.



Figura 3.1 Biodigestor en prueba hidrostática.

Los resultados de la prueba hidrostática se muestran en la figura 3.2.

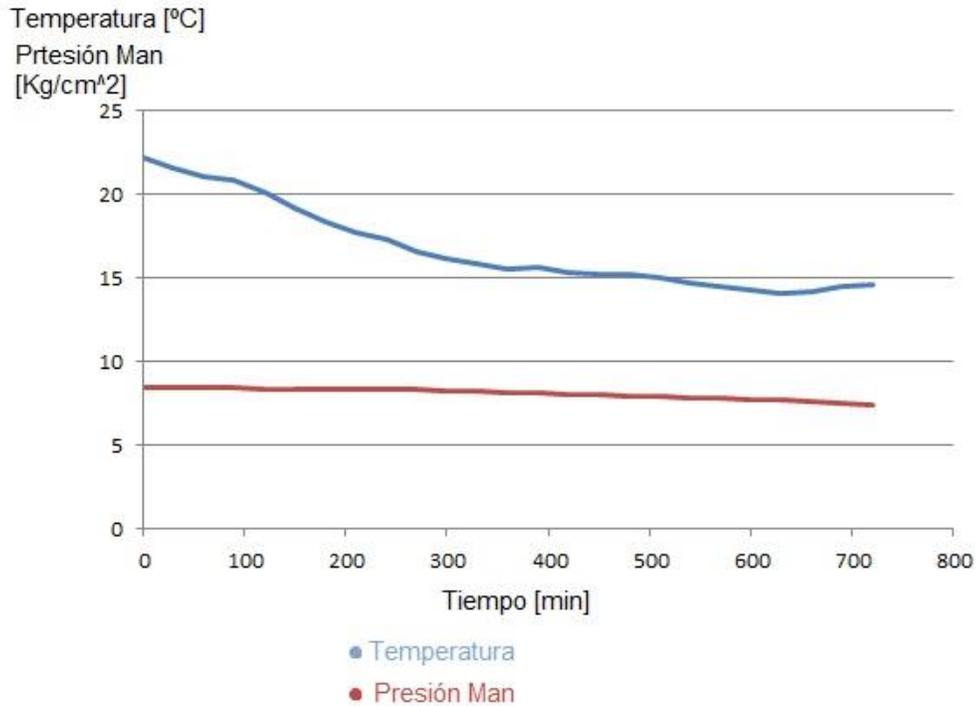


Figura 3.2 Comportamiento de la temperatura ambiental y la presión manométrica en el biodigestor durante la prueba hidrostática.

La prueba se llevó a cabo durante la noche, por lo que se presenta una tendencia en la temperatura a disminuir. Debido a esta disminución en la temperatura ambiente, la presión del medio también disminuye, por lo que la medición del manómetro utilizada se ve afectada por estos cambios, lo cual se ve reflejado en la disminución de presión presente en la gráfica de la figura 3.2.

La empresa que realizó la prueba hidrostática (Consultoría de Ingeniería en Energía, S. A. de C. V.) concluyó que el resultado de la prueba fue satisfactorio al no presentarse ninguna fuga.

3.2 Prueba de rayos X

El tanque se sometió a pruebas de rayos x para verificar que no existieran fugas en el casco, como se ve en la figura 3.3. La empresa encargada (Radiografías Industriales de

Oriente S. A. de C. V.) entregó un reporte radiográfico y un reporte de inspección con líquidos penetrantes en los que indica que no se presentan fugas o indicaciones relevantes de estas, además de aprobar que todas las secciones del tanque están dentro de norma.



Figura 3.3 Fotografía del biodigestor mientras se realiza la radiografía.

La empresa encargada de la fabricación (Tanque y Tapas ASME, S. A. de C. V.), no presentó ningún análisis de esfuerzos en el tanque, por lo que los únicos datos de este tipo con los que se cuenta son los cálculos de diseño y los resultados del análisis por elementos finitos.

3.3 Análisis por elementos finitos

Para llevar a cabo el análisis por elementos finitos se utilizó el software NX, especializado en CAE, además del solver Nastran para análisis estructural.

3.3.1 Cuerpo del tanque

Malla, restricciones y cargas

El modelo del tanque se simplificó para facilitar el análisis, considerándose solamente el cuerpo del tanque y las tapas con las entradas y salidas correspondientes. Se omitieron

las orejas para la instalación, los soportes del eje de mezclado y la chaqueta de calefacción, ya que eran elementos que complicaban el modelo y que no eran de importancia en el análisis al no estar sometidos a la presión interna, al contrario de las tuberías de entradas y salidas.

El tanque se simuló con acero AISI 304, como el modelo real, aplicándose una presión de 8 atmósferas (4 veces la presión de trabajo) para simular fatiga, de acuerdo a las siguientes condiciones:

Forma de carga	Factor de Diseño
Estática	N = 2
Repetida	N = 4
Impacto	N = 8

Tabla 3.1. Criterios para factor de diseño de diseño. (Mott, Resistencia de Materiales, 2009)

La presión se aplicó en las caras internas del tanque y las tapas, además de las tuberías. Se restringió el movimiento en los 6 grados de libertad de los nodos correspondientes a la ubicación de las silletas, sobre las que descansa el tanque. El mallado se realizó con elementos tetraédricos de 4 nodos. Se utilizaron mallas de 10 y 8 mm, y se refino en las zonas de los barrenos utilizando entre 20 y 30 elementos sobre el perímetro. Los valores obtenidos fueron muy cercanos para ambas simulaciones. Para mallas más pequeñas se generaron errores en la conectividad, por lo que el software no produjo resultados. Mallas mayores generan una distorsión de la forma en las zonas donde se cuenta con barrenos, por lo que no garantizan un análisis adecuado de esas regiones.

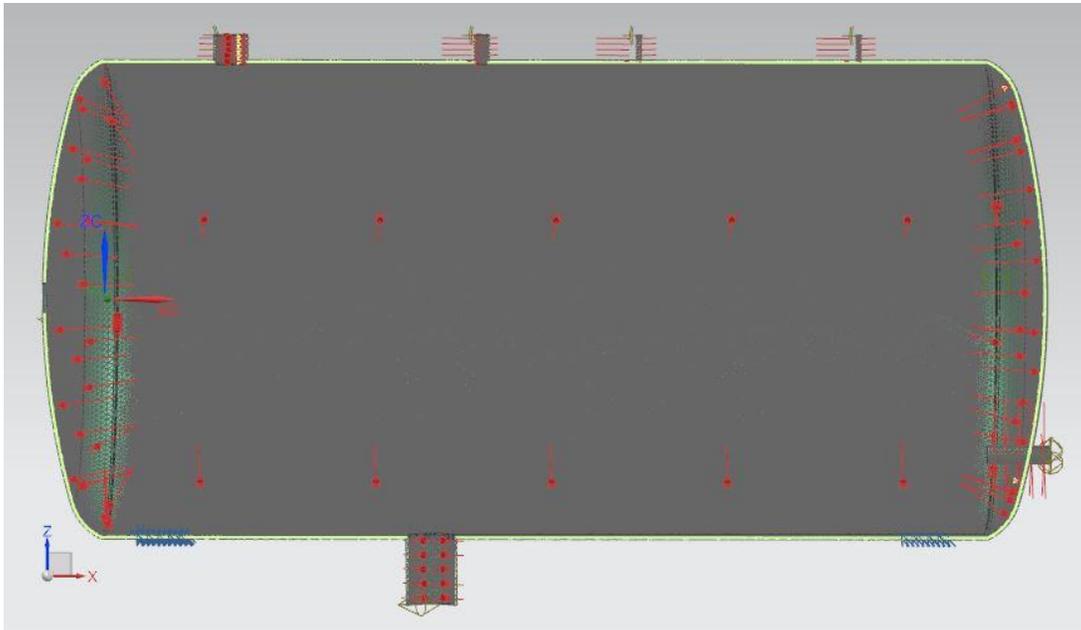


Figura 3.4 Visualización de las restricciones (en azul) y cargas (en rojo) en el análisis por elementos finitos en el cuerpo del tanque.

Resultados

Los resultados obtenidos del análisis por elementos finitos arrojaron los siguientes resultados:

Malla [mm]	Esfuerzo Máximo [Mpa]	Deformación Máxima
8	203.83	1.073E-09
10	204	1.074E-09

Tabla 3.2 Resultados del análisis por elementos finitos del cuerpo del tanque.

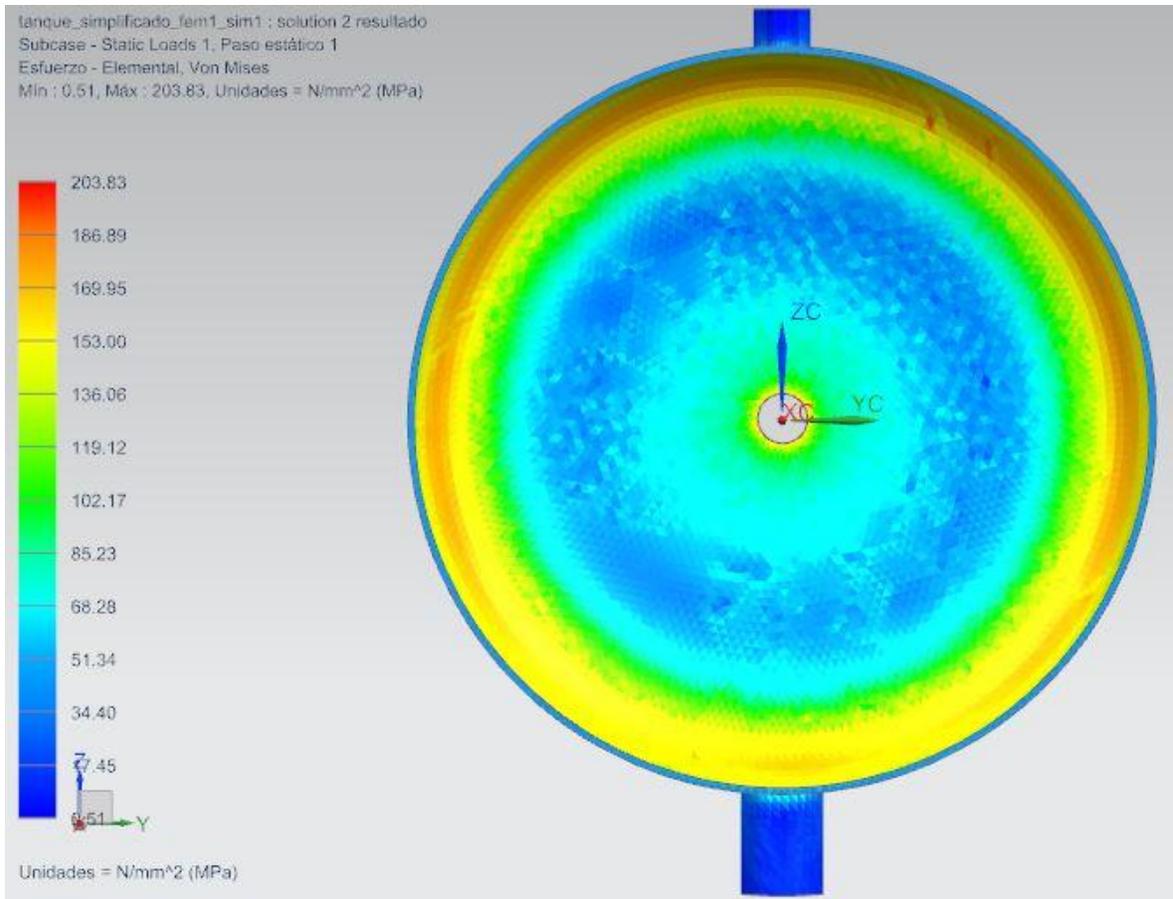


Figura 3.5 Visualización de los esfuerzos elementales máximos en el cuerpo del tanque bajo el criterio de Von Mises.

El valor de esfuerzo máximo alcanzado en el análisis es de 203.83 MPa, pero se presenta en elementos donde hubo error de malla, por lo que el máximo real tiende aproximadamente a 175 MPa en las tapas. Los alrededores de los barrenos alcanzaron un máximo de 150 MPa. Si comparamos el esfuerzo máximo obtenido con el valor del límite de resistencia a fatiga $Se' = 0.5S_{ut}$, para el acero AISI 304 ($S_{ut} = 620$ MPa), se comprueba que el tanque resiste los esfuerzos a fatiga aplicados con un factor de seguridad n de:

$$n = \frac{Se'}{\sigma_{Max}} = \frac{0.5 * (620 MPa)}{175 MPa} = 1.77$$

Para el caso del acero AISI 304, el límite de resistencia a la fatiga Se' , corresponde al límite de sedencia Sy , que es el valor en que se considera la falla en la teoría esfuerzo normal máxima. Está teoría de aplicación simple conduce a diseños fiables de recipientes a presión, y se aplica en la norma ASME (Megyesy, 1992).

Tiempo de vida esperado

Para el cálculo de los ciclos de vida a fatiga para el tanque biodigestor se utilizó la ecuación de la recta, que se ajusta para diseño a ciclos altos de fatiga en los que falla un elemento sujeto a un esfuerzo Sf :

$$Sf = aN^b$$

Donde los coeficientes son respectivamente:

$$a = \frac{(0.9S_{ut})^2}{Se}$$

Y

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0.9S_{ut}}{Se}$$

Y N representa el número de ciclos de trabajo.

Para nuestro caso:

$$a = \frac{(0.9 * 620 MPa)^2}{310 MPa} = 1 \times 10^9$$

Y

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{0.9 * 620MPa}{310MPa} = -85.09 \times 10^{-3}$$

Con estos valores en la ecuación de la recta obtenemos un valor de $N=136 \times 10^6$ ciclos de trabajo para que se presenta la falla por fatiga en el tanque.

Sin embargo, es necesario considerar que la variación de los esfuerzos en el cuerpo del tanque es de naturaleza semi aleatoria, ya que los cambios en las condiciones climatológicas afectan directamente el valor de la presión absoluta sin ninguna periodicidad particular. Al no poderse predecir dichos cambios, tampoco es posible determinar el patrón de cargas real que habrá en el tanque en el transcurso de un día, impidiéndose la determinación de los ciclos de esfuerzo reales que se experimentarán en la estructura en un determinado tiempo.

El ciclo de descarga y carga que se lleva a cabo una vez al día en el tanque provoca una fluctuación considerable en la magnitud de la presión debido al cambio de volumen que sufre el biogás. Al descargarse desechos orgánicos el gas sufre una expansión, por lo que la presión disminuye, y cuando el tanque se vuelve a cargar el volumen del gas se reduce y la presión se incrementa nuevamente. Esta variación en la presión del tanque es la carga principal que determina el comportamiento a fatiga, ya que los cambios debido a las condiciones del ambiente serán despreciables en comparación.

Considerando un comportamiento ideal del biogás a bajas presiones, podemos determinar el cambio de presión al descargarse 100 litros de desechos orgánicos de la siguiente manera:

$$\frac{PV}{T} = cte$$

Debido al sistema de calefacción, se puede considerar que la temperatura no va a variar durante el periodo de descarga. Las condiciones iniciales y finales son las siguientes:

Volumen inicial de gas – 0.3 m³.

Volumen final de gas (después de la descarga) – 0.4 m³.

Presión inicial – 2 atmósferas = 202.65 KPa.

Por lo tanto tenemos una presión final de:

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{(202.65 \text{ KPa}) * (0.3 \text{ m}^3)}{0.4 \text{ m}^3} = 152 \text{ KPa} = 1.5 \text{ atmósferas}$$

Dado que la deformación está dada por la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Donde:

σ – Esfuerzo

E – Modulo de elasticidad – 190 GPa

Para los estados de presión manejados tenemos las deformaciones correspondientes $\xi_1 = 8 \times 10^{-7}$ y $\xi_2 = 1.07 \times 10^{-6}$, cercanas entre sí en magnitud, por lo que se puede decir que al tanque no le va a pasar nada debido a la descarga de materia en un periodo de tiempo relativamente corto.

Los esfuerzos térmicos se despreciaron cuando se agregó al tanque un sistema de calefacción diseñado para mantenerlo a en un rango de temperatura estable a pesar de

los cambios en las condiciones climatológicas del medio, por lo que no se presentaran cambios de temperatura significativos que pudieran generar esfuerzos térmicos relevantes.

3.3.2 Brida

Se realizó un análisis por elementos finitos a la brida para comprobar su comportamiento ante las cargas a las que está sometida. En un principio, un error de fabricación, provocó una fuga durante la prueba estática de fluidos penetrantes en la unión de ambas bridas. El fabricante colocó tornillo de una medida menor a la especificada en los planos de fabricación (El plano indicaba barrenos de ½ in y se realizaron de ¼ pulg.). La opción que dió el fabricante para corregir dicho error fue incrementar el número de barrenos de 36 a 54, ubicando los nuevos barrenos entre los anteriores de manera alterna, es decir, un espacio si y uno no, además de incrementar el espesor de la brida.

La simulación que se presenta corresponde a la brida modificada.

Malla, restricciones y cargas

Se realizó un mallado tetraédrico con elementos de 3 mm. El material de la brida al igual que en el tanque es acero inoxidable AISI 304. Las condiciones de carga aplicadas a la brida son una presión normal de 8 atmosferas en la cara lateral, como si el fluido de prueba estuviera empujando para escapar del tanque, y se fijaron los nodos correspondientes a los barrenos.

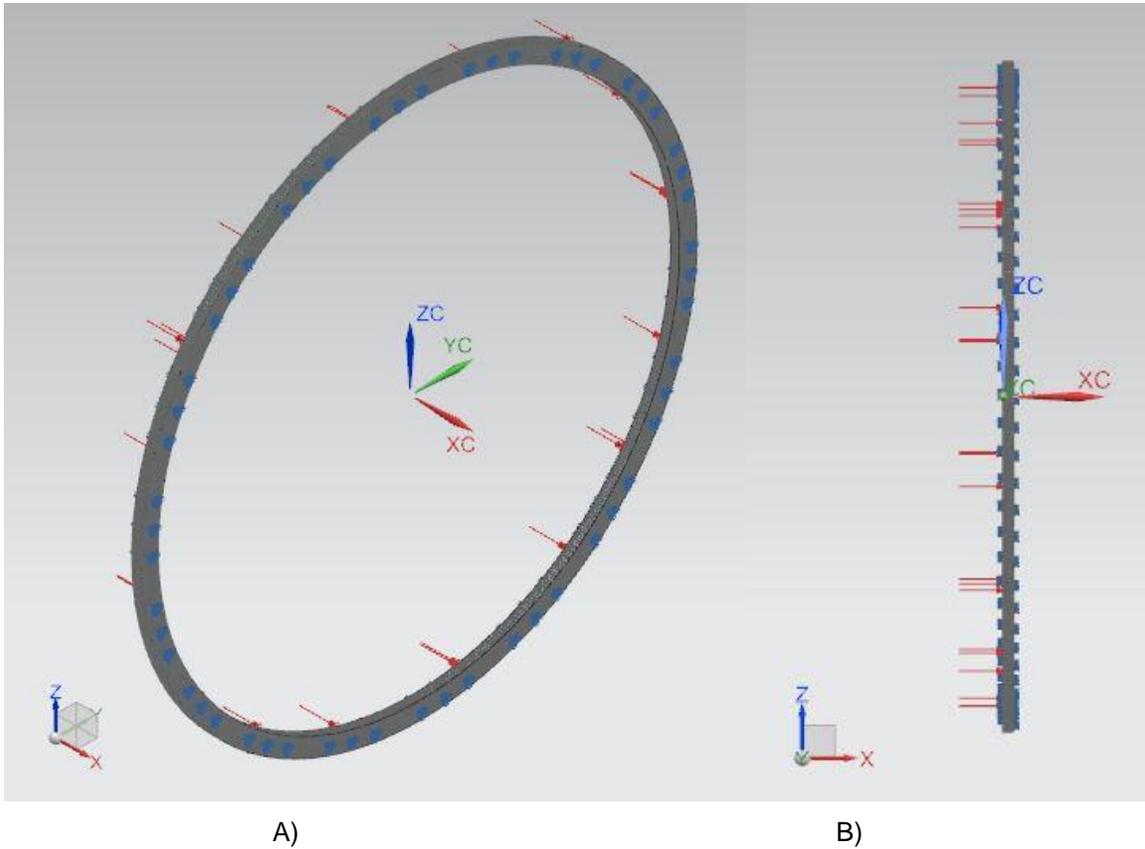


Figura 3.6 Visualización de las restricciones (en azul) y cargas (en rojo) en el análisis por elementos finitos en la brida. A) Vista Isométrica. B) Vista Lateral.

Resultados

Malla [mm]	Esfuerzo Máximo [Mpa]	Deformación Máxima
3	24.07	1.267E-10

Tabla 3.3 Resultados del análisis por elementos finitos de la brida.

Se observan desplazamientos máximos en las zonas donde no se insertaron nuevos barrenos. El resultado es esperado dada la configuración de la brida. El desplazamiento máximo estimado en el análisis es de 1.9×10^{-3} mm, y no representa una distancia significativa dada la existencia de empaques entre las dos bridas, por lo que no se espera que se presente una fuga en esta zona.

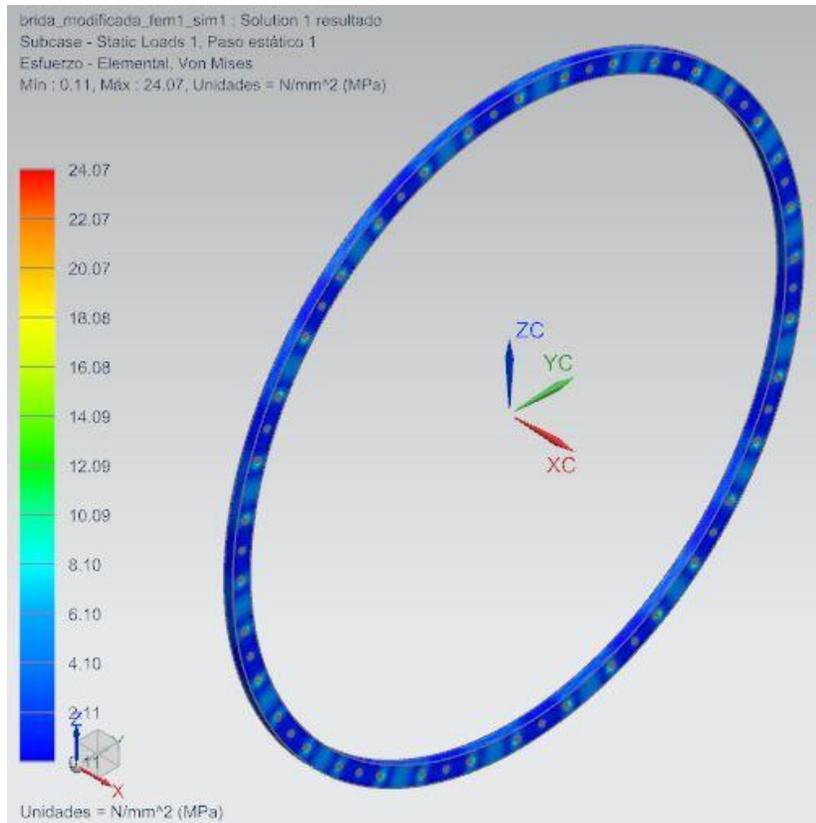


Figura 3.7 Visualización de los esfuerzos elementales máximos en la brida bajo el criterio de Von Mises.

Se alcanza un esfuerzo máximo de 24.07 MPa, en elementos donde hubo algún error de mallado. El máximo alcanzado en los alrededores de los concentradores de esfuerzo que representan los barrenos es aproximadamente de 10 MPa.

Con el valor máximo de esfuerzo obtenido de la simulación, la brida presenta un factor de seguridad N de:

$$N = \frac{Se'}{\sigma_{Max}} = \frac{0.5 * (620 \text{ MPa})}{10 \text{ MPa}} = 310$$

La brida está excesivamente sobrada, por lo que es evidente que se debe rediseñar, o en su caso se debió fabricar siguiendo el diseño original.

3.3.3 Silleta

Se efectuó un análisis por elementos finitos de la silleta que soporta al tanque para comprobar su comportamiento ante las sollicitaciones de trabajo a las que estará sometida. Las silletas están sometidas a la carga que representa el peso del tanque cargado con materia (200 Kg de desechos orgánicos). El peso del tanque es de 2100 N, y si sumamos el peso de los desechos que es de 1962 N, el peso total que soportan las silletas es de 4062 N. Mediante un diagrama de cuerpo libre se puede determinar que cada silleta carga la mitad del peso.

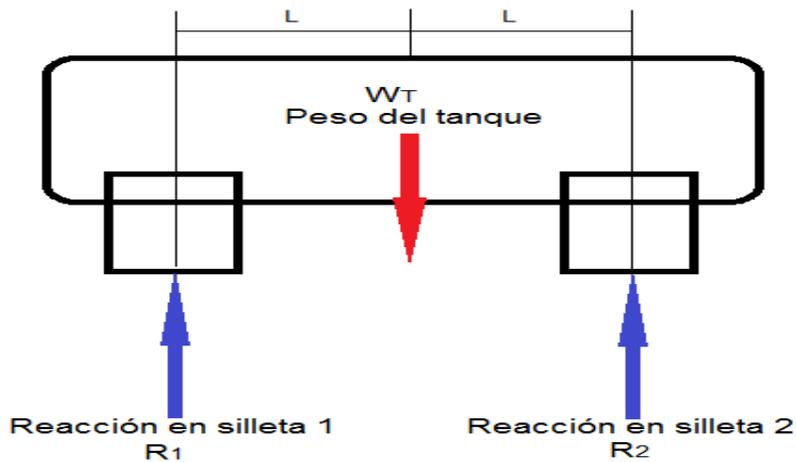


Figura 3.8 Diagrama de cuerpo libre del tanque soportado por las silletas.

Haciendo suma de fuerzas en la dirección vertical se tiene:

$$-WT + R1 + R2 = 0 \dots \dots \dots (1)$$

Y aplicando suma de momentos en el punto 1 (centro de la primer silleta):

$$-WT * L + R2 * 2 L = 0 \dots \dots \dots (2)$$

De la ecuación (2) obtenemos que:

$$WT = 2 R2$$

Y sustituyendo en la ecuación (1) se obtiene:

$$R1 = R2$$

Esto quiere decir que cada silleta carga la mitad del peso total del tanque, es decir, una carga de 2031 N.

Las silletas no se encuentran sometidas a cargas variantes, es decir, no se presenta en estas el mecanismo de falla por fatiga ya que los cambios de presión en el interior del tanque no las afectan, además de que los periodos de trabajo del mezclador no representan una afectación importante al sistema. El mezclador trabaja un lapso de 5 minutos cada hora a 30 RPM, además de que el motor que gira la flecha no trabaja a carga plena, por lo que no se esperan vibraciones considerables en la estructura.

Por lo tanto, el análisis realizado a las silletas es de carga estática.

Malla, restricciones y cargas

Se utilizó una malla tetraédrica de 5 mm. La carga de 2031 N se aplicó vertical sobre la cara de las silletas que se encuentra en contacto con el tanque. La cara inferior de las silletas, la cual está en contacto con el piso se restringió totalmente, además de los barrenos con los que se sujeta.

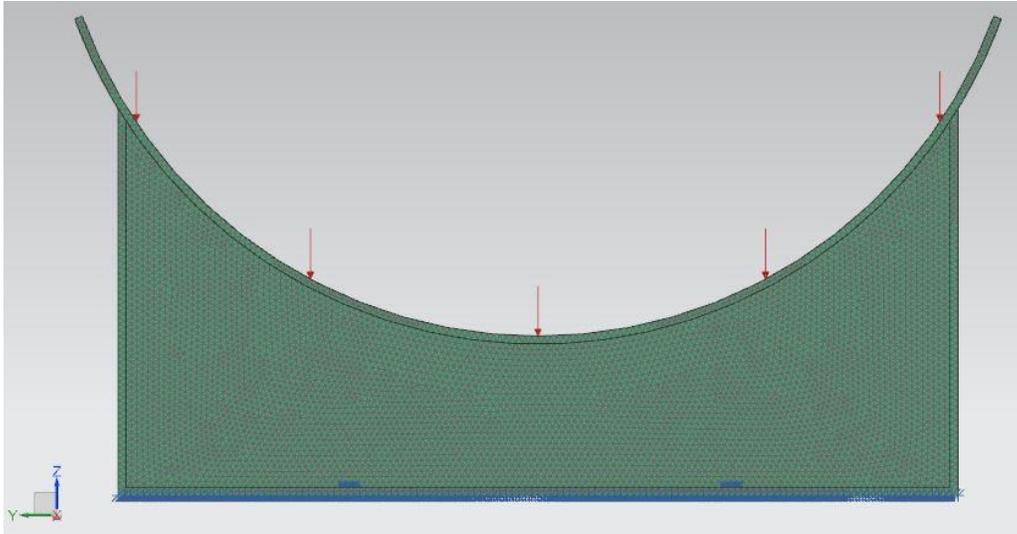


Figura 3.9 Visualización de las restricciones (en azul) y cargas (en rojo) en el análisis por elementos finitos en la silleta.

Resultados

Malla [mm]	Esfuerzo Máximo [Mpa]	Deformación Máxima
5	4.311	2.269E-11

Tabla 3.4 Resultados del análisis por elementos finitos de la silleta.

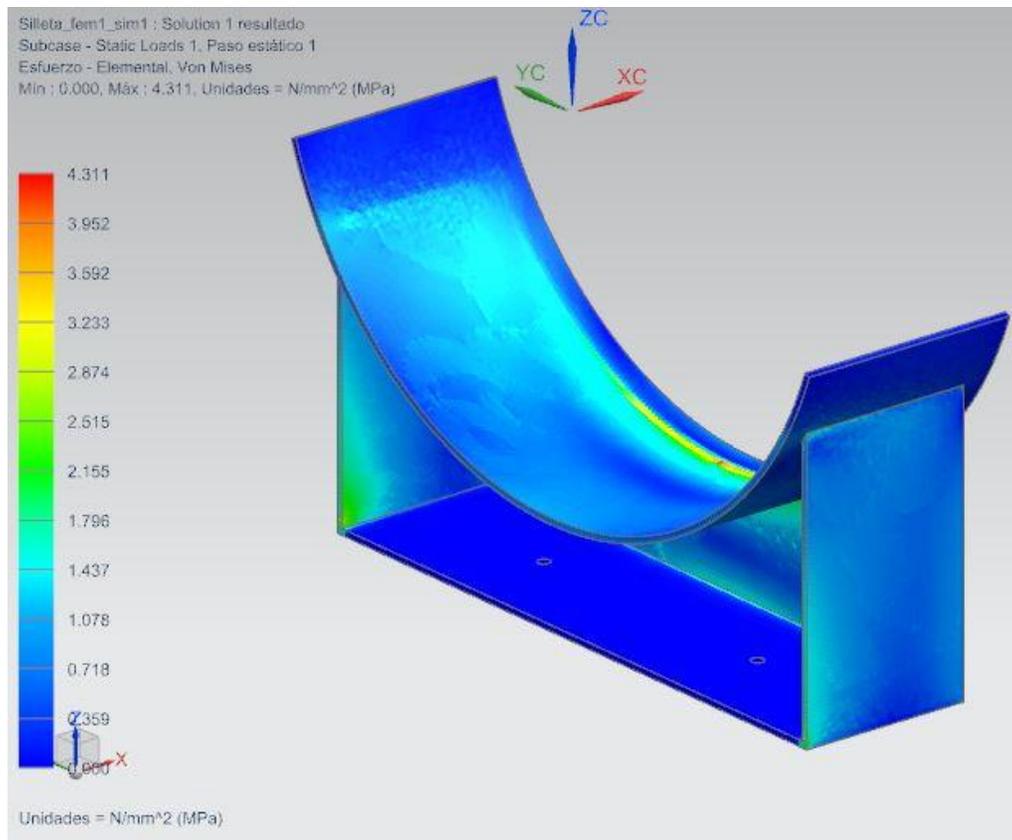


Figura 3.10 Visualización de los esfuerzos elementales máximos en la silleta bajo el criterio de Von Mises.

El resultado de la simulación muestra un esfuerzo máximo de 4.31 MPa, sin embargo dicho valor se presenta en elementos donde el mallado presento algún error. En la región donde se esperan las mayores deformaciones, y por lo tanto los mayores esfuerzos el valor máximo es de aproximadamente 1.5 MPa, con lo que obtenemos un factor de seguridad N de:

$$N = \frac{Sf}{\sigma_{Max}} = \frac{310 \text{ MPa}}{1.5 \text{ MPa}} = 206.7$$

Con este valor de N podemos concluir que la silleta no fallará por la carga estática que representa el peso del tanque ya que están demasiado sobradas y se debe realizar un rediseño.

Discusión y conclusiones

Discusión

Dado el incremento en la eficiencia del proceso de descomposición anaerobia que se presenta cuando hay un incremento en la temperatura y presión del medio, el concepto de un tanque biodigestor que no solo trabaje a temperaturas por encima de la ambiente, como varios de los equipos comerciales y de experimentación existentes, sino que también trabaje a presiones superiores a las del ambiente, resulta innovador al presentar características de trabajo que lo obligan a cumplir con una serie de normas adicionales.

De acuerdo con el reporte del fabricante y a las pruebas hidrostática y de rayos x, el tanque se encuentra dentro de norma, por lo que no debe esperarse falla alguna en la estructura del equipo.

El análisis por elementos finitos realizado a la estructura del biodigestor en una simulación de trabajo a fatiga arroja como resultado que el diseño es capaz de soportar la presión de trabajo, así como las variaciones provocadas por los cambios climáticos y la carga y descarga de materia orgánica. Se debe considerar que el código ASME maneja factores de seguridad en las fórmulas empleadas para dimensionar los recipientes a presión, de acuerdo a la geometría y material empleados, sin embargo no señala un valor preestablecido con el cual comparar el obtenido mediante el FEM (1.77). Las tapas o cabezales presentan las zonas sometidas a mayores esfuerzos. El cuerpo del tanque no

presenta complicaciones aún en las zonas de concentración de esfuerzo como las tuberías soldadas.

Los resultados son comparables a los reportados por (H. C. Sanzi) y (M. A. Guerrero, 2006) para geometrías y condiciones de carga similares a las manejadas en el presente trabajo. Los resultados de los análisis por elementos finitos en ambos casos muestran los esfuerzos máximos en los cabezales, con valores de esfuerzo a tensión admisibles, mientras que el cuerpo del tanque no presenta esfuerzos de valor considerable.

Se debe considerar que el modelo utilizado para el análisis por elementos finitos se simplificó para facilitar el proceso, de manera que no se presentaran problemas con la malla y el tiempo de cómputo fuese menor, por lo que se omitieron algunos elementos del tanque, los cuales fueron los elementos para acoplar el soporte del eje de mezclado y las orejas para izaje. Estos elementos generan concentradores de esfuerzos en sus uniones con el cuerpo del tanque, sin embargo, los resultados del FEM no muestran esfuerzos de gran magnitud en las zonas donde se localizan los elementos antes mencionados, por lo que aun considerando que el esfuerzo en esas regiones del cuerpo del tanque se incrementan en el modelo real, no representan las zonas críticas donde se puede presentar la falla.

El análisis realizado a las bridas fue de gran importancia debido a que en un inicio el fabricante cometió un error, realizando barrenos de $\frac{1}{4}$ de pulgada cuando el plano especificaba $\frac{1}{2}$. Este error provocó que se presentara una fuga en el tanque durante la prueba hidrostática. El fabricante propuso como solución agregar más barrenos a la brida para poder colocar más sujetadores. Al haberse modificado el diseño original de las bridas están quedaron demasiado sobradas.

Respecto a las silletas, debido a que el esfuerzo longitudinal sobre el recipiente es de la mitad del circunferencial, la mitad del espesor de la placa que se usa es suficiente para sostener el peso (Megyesy, 1992). El modelo de las silletas utilizado en la simulación es del mismo espesor que el cuerpo del tanque (1/4 de pulgada), debido a esto en los resultados se puede observar que están muy sobradas para la carga que van a manejar, y que hubiese bastado con 1/8 de pulgada de espesor en el cuerpo de las silletas.

Conclusiones

El análisis por elementos finitos y las pruebas hidrostáticas realizadas al tanque resultan satisfactorias para el diseño del tanque biodigestor, por lo que no se espera falla del equipo. Sin embargo es necesario cuestionar la selección de materiales en relación a la aplicación del tanque y al costo de producción.

Se utilizó acero AISI 304 debido a que el cliente solicitó que el tanque fuera de este material. El propósito del proyecto es que el equipo se instale en restaurantes grandes, de manera que puedan generar su propio combustible para la cocina mediante los desechos que ellos mismos generan. Pero se debe tener en cuenta que el tanque se instalaría en el exterior del restaurante, por lo que no se requiere que sea de acero inoxidable como exigen las normas para las instalaciones alimenticias.

De acuerdo a la norma ASME SECCION VIII, se pudo utilizar un acero de bajo contenido de carbono, mucho más económico que el acero inoxidable cuyas propiedades mecánicas podían satisfacer las solicitaciones de trabajo establecidas. Las normas también contemplan recubrimientos que se pueden utilizar para evitar la corrosión y desgaste del material de acuerdo a la materia que se va a almacenar, por lo que dicho efecto no justifica el uso de un acero inoxidable.

Respecto al punto anterior es necesario considerar que la selección de la pintura y la preparación de la superficie influyen de manera importante en los costos de fabricación. Normalmente, la pintura representa entre el 25 y 30% o menos del costo que representa pintar una estructura, de lo que se deriva la importancia de utilizar pintura de alta calidad. El 70% o más del costo de trabajo de pintura se debe a la preparación de la superficie, y varía de acuerdo al método utilizado, de manera que el costo de preparación de la superficie se debe equilibrar con el incremento en el tiempo de vida de la estructura.

Otro punto muy importante es la diferencia de trabajo entre el biodigestor diseñado para SUEMA y los equipos existentes en el mercado para llevar a cabo la misma función. Los equipos utilizados en el campo manejan grandes cantidades de desechos, sin embargo manejan presiones muy bajas, prácticamente ambiente, por lo que no requieren una gran inversión para su fabricación e instalación, como las biobolsas.

Los biodigestores diseñados para su aplicación en lugares más urbanizados o en restaurantes, tal como el equipo tema de este trabajo solo llevan a cabo en su interior la descomposición anaerobia, y no contienen el biogás. En estos equipos el biogás es almacenado en un recipiente separado al que se transporta por medio de un compresor, por lo que el reactor siempre está trabajándose a presión ambiente. Al no manejar presiones internas, estos equipos no requieren de una estructura que de alta resistencia a los esfuerzos, por lo que muchos de ellos son tanques plásticos como los utilizados comúnmente para almacenar agua. La única parte del equipo que representa una inversión mayor es el tanque de almacenamiento del gas, el cual es de dimensiones mucho menores a las del reactor, en una proporción de 1 a 6.

Debido a que el equipo diseñado es para una planta piloto, se puede aceptar el gasto que represento su fabricación como prototipo experimental para un periodo de

pruebas que permitan recolectar datos con los que se pueda llevar a cabo el proceso de descomposición anaerobia de una manera más rápida, eficiente y controlada. Sin embargo, si el proyecto pretende salir al mercado, podrían considerarse los anteriores puntos para reducir costos e incrementar la rentabilidad.

Bibliografía

- A., C. d. (2008). Digestión anaerobia de lodos residuales usando un reactor de manto de lodos no convencional (tipo UASB). México, D.F.
- bio-digestores.blogspot.mx. (27 de junio de 2013). Tipos de biodigestores.
- Biodisol.com. (27 de junio de 2013). Digestión anaerobia. Proceso de producción de biogás.
- H. C. Sanzi, C. p. (s.f.). Integridad estructural de un recipiente, resuelto mediante el método de elementos finitos.
- Institute, E. I. (2006). Manual de diseño para acero inoxidable estructural.
- Joseph E. Shigley, L. D. (s.f.). *Diseño en ingeniería mecánica*. McGraw Hill.
- M. A. Guerrero, M. C. (2006). Análisis de fractura de recipientes a presión fabricados en acero de alta resistencia "HSS". *Anales de mecánica de la fractura Vol I*.
- Megyesy, E. F. (1992). *Manual de recipientes a presión, diseño y calculo*. México: Limusa.
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de Materiales*. Pearson.
- Mott, R. L. (s.f.). *Diseño de elementos de máquinas*. Pearson.
- Norton, R. L. (1999). *Diseño de maquinas*. Pearson, Prentice Hall.
- Ricardo.Bizhat.com. (27 de junio de 2013). Los biodigestores: una tecnología que transforma sus desechos en energía.
- tecnológicas, I. d. (s.f.). *Plantas de biogás, diseño, construcción y operación*. Bogotá, Colombia: Guadalupe Ltda.
- Torre Guillén D., A. C. (2009). Desarrollo de un sistema de biodigestores y energías limpias. Lima, Peru.