



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Metodología de diseño para  
tanques contenedores altos  
sometidos a presión interna**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Emilio Javier Manrique Ambriz

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Antonio Zepeda Sánchez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## Agradecimientos

Agradezco especialmente a mis padres pues sin ellos nunca hubiera llegado a este punto de mi vida.

A mi madre por su amor y su apoyo incondicional, siempre viendo por mi bienestar y mi desarrollo personal y profesional.

A mi padre por sus enseñanzas y su cariño, por siempre esperar lo mejor de mí.

A Gris por motivarme a seguir siendo mejor cada día, por ayudarme a llegar a la meta y nunca rendirme.

A mi asesor por todo su apoyo en clases, en el proyecto y finalmente en este trabajo.

A las personas que integran el departamento de diseño con quienes trabajé, quienes me guiaron y enseñaron.

A mis amigos por hacer de esta etapa una gran experiencia.

A Armando y Griselda por su afecto y por todo su apoyo.

Gracias a todos ustedes



## Índice

### Objetivo del trabajo

#### i. Introducción

Capítulo 1. Marco de referencia.....	1
1.1 Definiciones	
1.2 Contexto histórico y social	
1.3 Código ASME BPVC Sección VIII y Sección X	
1.4 NOM-020-STPS-2011” Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y calderas de vapor”	
1.5 Manual de recipientes a presión, diseño y cálculo Eugene F. Megyesy	
Capítulo 2. Metodología de diseño: Diseño conceptual.....	9
2.1 Aplicación del diseño conceptual en tanques a presión	
2.2 Diseño basado en códigos y normas	
2.3 Metodología base George E. Dieter	
2.4 Diseño iterativo	
2.5 Metodología propuesta	
2.5.1 Comprensión del problema	
2.5.1.1 Requerimientos	
2.5.2. Recopilación de información	
2.5.3 Generación de conceptos	
2.5.4 Evaluación y selección de conceptos	
2.5.4.1 Generación de propuestas	
Capítulo 3. Metodología de diseño: Diseño paramétrico.....	35
3.1 Definición de geometría	
3.2 Definición base y tapa	
3.3 Definición de material	
3.4 Calculo de espesores por presión interna	
3.5 Cálculo de esfuerzos por eventos	
3.6 Cálculo de esfuerzos combinados	
Capítulo 4. Caso de estudio.....	60
4.1 Especificaciones del proyecto	
4.2 Identificación del problema	
4.3 Generación de conceptos	
4.4 Selección de conceptos	
4.5 Propuestas iniciales	
4.6 Diseño final	
ii. Conclusiones	

**Objetivo del trabajo:**

El presente trabajo tiene como objetivo servir como una referencia en el diseño de tanques contenedores sometidos a una presión interna en una configuración geométrica vertical, tanto en proyectos convencionales como en los cuales los requerimientos sean poco convencionales, especialmente para diseñadores con poca experiencia en el tema, presentando una metodología propuesta y un caso de estudio.

## ***i.* Introducción**

El presente trabajo desarrolla una propuesta de metodología auxiliar para el diseño de tanques contenedores sometidos a presión interna, desarrollada a partir de un proyecto de diseño del que el autor formó parte. Este método se basa en la aplicación del código *Boilers and Pressure Vessels Code* (American Society of Mechanical Engineers, 2013), en una serie de manuales de diseño de tanques sometidos a presión y en la experiencia del autor en el tema. El método abarca el diseño conceptual, generalmente obviado en la literatura existente, y el diseño paramétrico de tanques sometidos a presión y da como ejemplo el proyecto mencionado a manera de caso de estudio.

### ***i.1.* Planteamiento del problema**

El diseño de tanques sometidos a presión es una actividad frecuentemente desarrollada en el campo de la ingeniería debido a la utilización de éstos en gran variedad de industrias, por lo que existe una amplia gama de referencias de ello, sin embargo, se requiere una metodología que explique el camino a seguir para un diseñador novato en el tema.

El enfoque de este trabajo consiste en presentar una serie de pasos a seguir en el diseño de tanques a presión, buscando minimizar el tiempo requerido y optimizar el diseño final.

### ***i.2.* Justificación**

Al verse en la necesidad de realizar un diseño no convencional de un tanque sometido a presión, el autor encontró que, en la literatura referente al tema, no se suele profundizar en la raíz de los métodos de diseño y se suele acotar la información a los requerimientos más comunes. Esto genera que el diseño no convencional de tanques a presión, especialmente en un diseñador sin experiencia previa en el tema, se dificulte.

Ante esto, se busca generar un material de apoyo en la estructura del diseño de tanques a presión, especialmente con enfoques de utilización alternativos.

### ***i.3.* Alcances**

La metodología propuesta busca servir como estructura, tanto en el diseño conceptual como en el diseño paramétrico. Esto es, selección y posteriormente validación de conceptos para una posterior manufactura. Se excluyen los accesorios, ayudas, anclajes, registros y dispositivos de relevo de presión.

#### **i.4. Descripción por capítulos**

El primer capítulo marca un contexto en cuanto a las definiciones utilizadas por este trabajo, la historia y el origen de la normatividad referente a contenedores sometidos a presión, y una serie de referencias utilizadas en la realización del caso de estudio presentado, del cual, posteriormente, surgió el presente trabajo. En el segundo capítulo se inicia la descripción de la metodología de diseño propuesta, la cual se ha dividido en 2 partes, tratando lo referente al diseño conceptual en contenedores sometidos a presión en general; presenta ciertas referencias en las cuales se basa esta sección de la metodología propuesta haciendo alusión a la metodología de diseño general, propuesta por George E. Dieter, la cual se basa la estructura de ésta metodología, posteriormente presenta las 4 etapas del diseño conceptual: Comprensión del problema, recopilación de información, generación y finalmente selección de conceptos. En el tercer capítulo se finaliza la descripción de la metodología de diseño propuesta, tratando lo referente al diseño paramétrico de contenedores sometidos a presión, enfocándose en una configuración geométrica alta y debida a una presión interna; hace referencia a los factores de consideración en las etapas de selección del proceso de diseño y a las solicitaciones bajo las cuales se deberá calcular cualquier contenedor construido bajo ésta configuración. La información contenida en este capítulo se basa en el código de diseño y construcción referente a tanques contenedores sometidos a presión, publicado por la *American Society of Mechanical Engineers* y en una serie de libros y manuales de diseño y construcción de contenedores sometidos a presión. El cuarto capítulo presenta el caso de estudio de un diseño no convencional, organizado conforme a la metodología propuesta. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

---

# MARCO DE REFERENCIA

## CAPÍTULO I

---

### 1.1 Definiciones

Los contenedores sometidos a presión (*pressure vessel*), también llamados tanques a presión, se definirán para este trabajo como cualquier recipiente diseñado para contener uno o varios fluidos independientemente del o de los estados en que se encuentren y que se vean sometidos a una presión diferente a la atmosférica, ya sea manométrica o vacuométrica.

Así mismo, se definirá como contenedor alto aquel que, por su forma y disposición, su sección vertical sea considerablemente más larga que la horizontal independientemente de la geometría de su sección transversal, siendo especialmente útil su implementación en casos de limitada disponibilidad de espacio a nivel del suelo. De forma similar, un contenedor sometido a presión interna será considerado aquel cuyo interior contenga una presión mayor que el exterior.

El presente trabajo, aunque relevante para el diseño de contenedores a presión, se centra en la disposición anteriormente mencionada.

Adicionalmente, para este trabajo se tomará la definición de diseño mencionada por George E. Dieter, “El diseño es la creación de algo nuevo o el arreglo y síntesis de cosas existentes en una forma nueva buscando satisfacer necesidades reconocidas en una sociedad”<sup>1</sup>. Esta definición considera “nuevo” como algo desconocido por el diseñador.

---

<sup>1</sup> (Dieter, Engineering design, 2009, pp1.)

## 1.2 Contexto histórico y social

Los contenedores a presión han estado presentes en la sociedad por muchos años, siendo relevantes debido a la gran cantidad de aplicaciones en la industria y en nuestras vidas diarias, lo cual ha dado lugar a una gran variedad de equipos, tanto en formas y tamaños como en aplicaciones.

Su desarrollo comenzó con la era industrial y la posibilidad del aprovechamiento del vapor de agua, generado por calderas que adicionalmente fungían como contenedores, para producir trabajo mecánico. La necesidad de mejoramiento y homologación en los diseños se debió a continuas fallas en la operación, dando como resultado grandes y frecuentes explosiones en los equipos y una gran pérdida de vidas humanas.

Derivado de las continuas fallas en los equipos y la consecuente necesidad de mejorar y homologar la seguridad de las calderas y los contenedores a presión, la “Sociedad de Ingenieros Mecánicos de América” o *ASME* por sus siglas en inglés se dio a la tarea de generar un código para el diseño, construcción, pruebas y operación de calderas y recipientes a presión, la cual publicó en 1914 su primera edición.

El 10 de marzo de 1905, ocurrió la explosión de una caldera en una fábrica de zapatos en Crocktown, Massachusetts, matando a 58 personas, hiriendo a otras 117 y con pérdidas materiales de más de un cuarto de millón de dólares. Este accidente catastrófico hizo ver a las gentes de Massachusetts la imperiosa necesidad de legislar sobre la construcción de calderas para garantizar su seguridad.

Después de muchos debates y discusiones públicas, el Estado promulgó, en 1907, el primer Código legal de reglas para la construcción de calderas de vapor, al año siguiente, el Estado de Ohio aprobó un reglamento similar.

Otros Estados y Ciudades de la Unión Americana que habían padecido explosiones similares, se dieron cuenta que éstas podían evitarse mediante un buen diseño y una fabricación adecuada y también se dieron a la tarea de formular reglamentos para este propósito.

De esta manera, se llegó a una situación tal, que cada Estado y aún cada ciudad interesada en este asunto, tenía su propio reglamento.

Como los reglamentos diferían de un estado a otro, y a menudo estaban en desacuerdo, los fabricantes empezaron a encontrar difícil el fabricar un

equipo con el reglamento de un Estado que pudiera ser aceptado por otro. Debido a esta falta de uniformidad, en 1911, los fabricantes y usuarios de caldera y recipientes a presión, apelaron ante el concilio de la A.S.M.E. para corregir esta situación.

El concilio respondió a esto nombrando un comité para que formule especificaciones uniformes para la construcción de calderas de vapor y otros recipientes a presión especificados para su cuidado en servicio. El comité estaba formado por siete miembros, todos ellos de reconocido prestigio dentro de sus respectivos campos, un ingeniero de seguros para calderas, un fabricante de materiales, dos fabricantes de calderas, dos profesores de ingeniería y un ingeniero consultor.

El comité fue asesorado por otro Comité en calidad de consejero, formado de 18 miembros que representaban varias fases del diseño, construcción, instalación y operación de calderas.

Basándose en los reglamentos de Massachusetts y de Ohio y en otros datos de utilidad, el Comité presentó un informe preliminar en 1913 y envió 2,000 copias de él a los profesores de Ingeniería Mecánica a departamentos de Ingeniería de compañías de seguros de calderas, a jefes de inspectores de los departamentos de inspección de calderas de Estados y Ciudades, a fabricantes de calderas, a editores de revistas de Ingeniería y a todos los interesados en la construcción y operación de calderas, pidiendo sus comentarios.

Después de tres años de innumerables reuniones y audiencias públicas, fue adoptado en la primavera de 1925, el primer Código A.S.M.E., "Reglas para la Construcción de Calderas Estacionarias y para las Presiones Permisibles de Trabajo", conocido como la edición 1914.

Desde entonces, el Código ha sufrido muchos cambios y se han agregado muchas secciones de acuerdo a las necesidades.

Las secciones han aparecido en el siguiente orden:

Sección I Calderas de potencia	1914
Sección II Especificaciones de Materiales	1924
Sección III Calderas de Locomotoras	1921
Sección IV Calderas para Calefacción de baja presión	1923
Sección V Calderas en Miniatura	1922
Sección VI Inspección	1924
Sección VII Reglas sugeridas para el cuidado de las calderas de potencia.	1926
Sección VIII Recipientes a Presión no sometidos a fuego directo.	1925
Sección IX Requisitos de Soldadura	1940
Sección X Recipientes a Presión de Plástico Reforzado y fibra de vidrio.	
Sección XI Reglas para Inspección en Servicio de Plantas de Potencia Nuclear. <sup>2</sup>	

A partir de su publicación, el *BPVC*, por sus siglas en inglés, ha sido el referente internacional para todo lo relacionado a calderas y contenedores. Actualmente los contenedores a presión tienen nuevas aplicaciones como ejemplo su uso en la industria nuclear, en la fermentación y generación de biocombustibles, así como su uso en casos de presión externa, por lo que el código es constantemente actualizado.

Adicionalmente al código *ASME*, los diferentes países suelen tener normatividad específica para los contenedores a presión, siendo en el caso de México la norma oficial mexicana NOM 020.

---

<sup>2</sup> (León Estrada, 2001, p.81-83)

A continuación, se hará una breve descripción de las normas y trabajos considerados en el desarrollo del proyecto efectuado, del cual surge este trabajo. Se considera pertinente su descripción debido a que sirvieron como referencia inicial en el acotamiento de los límites de trabajo y fungieron como una guía y una base para el presente trabajo.

### 1.3 Descripción código ASME BPVC sección VIII y sección X

Como se mencionó previamente, "*The American Society of Mechanical Engineers*", abreviada como ASME, fue la primera institución en regular la industria de las calderas y los contenedores a presión en el Boilers and Pressure Vessel Code o código para calderas y contenedores a presión, de ahora en adelante llamado *BPVC*.

El código se divide en 12 secciones dedicadas a temas específicos del área, siendo de especial interés para el diseño la sección VIII.

Ésta presenta requisitos en el diseño, manufactura, inspección, pruebas y certificación de tanques sometidos a una presión mayor a 15 PSI independientemente si es interna o externa. De igual forma esta sección es aplicable independientemente si presenta o no un intercambiador de calor e igualmente es independiente de la forma en que se obtenga la presión.

La sección VIII presenta 3 divisiones con las siguientes características:

- La sección 1 presenta requisitos y recomendaciones para contenedores a presión en general siendo el código básico, propone valores de esfuerzos permitidos en el diseño y presenta materiales permitidos.
- La sección 2 presenta reglas alternativas siendo más estricta en el diseño, materiales y pruebas no destructivas, aunque lo compensa con una mayor holgura en valores de esfuerzos máximos permitidos mayores en el diseño. Es usada especialmente cuando los contenedores tendrán una mayor interacción con seres humanos.
- La sección 3 presenta normatividad pertinente a contenedores sometidos a una presión mayor a 10,000 PSI.

Cada una de las secciones supone diferentes certificaciones las cuales son estampadas al producto final, facilitando el conocimiento de las normas aplicadas a cualquier contenedor aprobado.

Como desventaja en la utilización de esta sección del código se encuentra que, en general, limita los materiales de construcción del tanque a metálicos con un estándar de soldabilidad, dejando fuera la aplicación de nuevos materiales.

Esto dio lugar a la creación de la sección X del código *BPVC*, la cual está destinada al diseño y construcción de contenedores a presión con materiales alternativos como polímeros y materiales compuestos como lo son los reforzados por fibras.

Una de las principales desventajas de la utilización de esta sección del código es que prohíbe la utilización de estos contenedores con fluidos considerados letales, como por ejemplo los gases inflamables o fluidos nocivos para la salud.

## 1.4 Descripción NOM-020-STPS-2011” RECIPIENTES SUJETOS A PRESIÓN, RECIPIENTES CRIOGÉNICOS Y GENERADORES DE VAPOR”.

La norma oficial mexicana NOM-020-STPS-2011 “RECIPIENTES SUJETOS A PRESIÓN RECIPIENTES CRIOGÉNICOS Y GENERADORES DE VAPOR” es la encargada de regular y certificar la correcta operación de recipientes a presión, criogénicos y calderas.

Esta norma divide los contenedores a presión en 3 categorías diferentes dependiendo el tipo de fluido/s que contengan, las presiones que manejen y el volumen referido, basando los requisitos de operación en estas características.

La norma no trata temas del diseño de los contenedores y hace referencia a que su diseño deberá cumplir las normas internacionales (ASME).

## 1.5 Descripción manual de recipientes a presión, diseño y cálculo Eugene F. Megyesy.

El manual presenta una rápida y breve guía al diseño de recipientes a presión, siendo de particular utilidad en el diseño de tanques cuyos requerimientos no sean muy particulares ni difieran del común.

En general se basa en el código ASME BPVC sección VIII-1 y en normas civiles de construcción y presenta un panorama introductorio, desafortunadamente, debido a su característica de manual, se reserva gran parte de las causas y excepciones a la aplicación de ciertos parámetros por lo que en proyectos complejos se debe de utilizar como una de varias herramientas y tomando en cuenta un criterio ingenieril, asimismo resulta compleja su utilización si no se tiene experiencia en el tema de los PV.

## Conclusiones del capítulo

El diseño de tanques sometidos a presión actual se rige generalmente por el código ASME BPVC, adicionalmente, hay una gran variedad de información al respecto de su diseño y construcción, aunque generalmente limitada a manuales técnicos basados en el código mencionado.

---

# CAPÍTULO II

## METODOLOGÍA DE DISEÑO: DISEÑO CONCEPTUAL

---

El presente capítulo presenta la primera sección de la metodología de diseño propuesta, inicialmente menciona las consideraciones que se tomaron en la estructuración de la misma y posteriormente se expone el diseño conceptual enfocado al diseño de tanques sometidos a presión, la metodología propuesta tiene como objetivo servir como apoyo en la etapa de diseño de tanques contenedores sometidos a presión interna, presenta una línea de pensamiento, consideraciones y herramientas buscando siempre un mejor diseño final, se orienta a un pensamiento ingenieril, con el objetivo de obtener soluciones funcionales óptimas.

Este trabajo divide la metodología de diseño en 2 secciones, el diseño conceptual y el diseño paramétrico.

Esta primera sección, diseño conceptual, aborda primordialmente la metodología de resolución a casos en los cuales, los requerimientos del contenedor sometido a presión inviten a una forma o concepto alternativo para su resolución.

La segunda sección, diseño paramétrico, se enfoca en los puntos a desarrollar para pasar de un concepto a un diseño funcional y que opere con seguridad. En algunos casos se mencionarán herramientas para poder llevar a cabo el cálculo de los parámetros del diseño. Esta sección también es llamada desarrollo de concepto.

## 2.1 Aplicación del diseño conceptual en tanques a presión

El diseño de tanques a presión se ha efectuado, estandarizado y normalizado por más de 100 años, por lo que, en la mayoría de las ocasiones y si la necesidad no lo requiere, se omite el desarrollo de nuevos conceptos.

Si fuese el caso, en que las necesidades a satisfacer no estén previstas dentro del común del diseño, se está hablando de la necesidad de un diseño no convencional. En este caso, se requiere generar uno o varios conceptos alternativos en la resolución del problema de diseño en cuestión, realizar un diseño conceptual. Esta situación se puede requerir en los siguientes 2 casos:

### Nuevas aplicaciones

Como se explicó en el capítulo anterior, cada vez es más común el uso de tanques sometidos a presión en aplicaciones alternativas, como lo es la digestión de biomasa para el aprovechamiento de los gases generados.

En estos casos, la presión se genera por dos fuentes, la presión estática ejercida por la biomasa y la presión ejercida por los gases generados. Adicionalmente se requiere frecuentemente mantener una temperatura interna continua superior a la ambiental, considerar equipo para recirculación interna y las protecciones pertinentes contra la corrosión por el fluido a contener.

### Solicitaciones adicionales

Adicionalmente a las nuevas aplicaciones en la industria, ciertos proyectos presentan desafíos adicionales, tanto por logística en la instalación como en la operación, y se considera pertinente la generación de soluciones alternativas desde el diseño.

En caso de que los requerimientos del tanque a presión no presenten algún desafío adicional, al de contener de manera segura un fluido sometido a presión (Diseño convencional de tanques), ésta, la primera sección, será de igual utilidad al facilitar la comprensión de los requerimientos del proyecto y cómo afectarán al diseño del tanque.

## 2.2 Diseño basado en códigos y normas

Como se trató anteriormente, el diseño de tanques a presión está regulado por códigos y normas que permiten asegurar una calidad y seguridad establecida, por lo que todo diseño deberá desarrollarse dentro del margen permitido la norma aplicable, esto no es excepción en el diseño conceptual, por lo que se deberá tomar en cuenta.

El diseñar basándose en códigos conlleva mayormente ventajas como lo es el tener la certeza de proceder de forma segura en el diseño, ahorrar tiempo y procesamiento mental en buscar soluciones a problemas técnicos que se repiten continuamente en el diseño, lo cual lleva a reducción de costos de diseño, y la homologación de calidad y seguridad del PV.

Desafortunadamente también presenta desventajas en el diseño conceptual limitando el desarrollo, tanto en procedimientos como en materiales, a lo acotado por la norma.

En el caso del diseño paramétrico, las ecuaciones de diseño más comunes se basan en estos códigos y normas, y es posible encontrar manuales o documentos que las contengan en una forma compacta y digerida refiriéndose a los parámetros más comunes en el diseño.

## 2.3 Metodología Base George E. Dieter

La metodología que presenta este trabajo, enfocada en el proceso de diseño de tanques, se basa en el proceso de diseño propuesto por George E. Dieter en el libro Engineering Design.

Se eligió como metodología base debido a su simplicidad, diversa aplicabilidad y enfoque general.

Esta metodología propone una división del proceso de diseño en 3 partes principales.

- Diseño conceptual
- Diseño de configuración
- Diseño de detalle

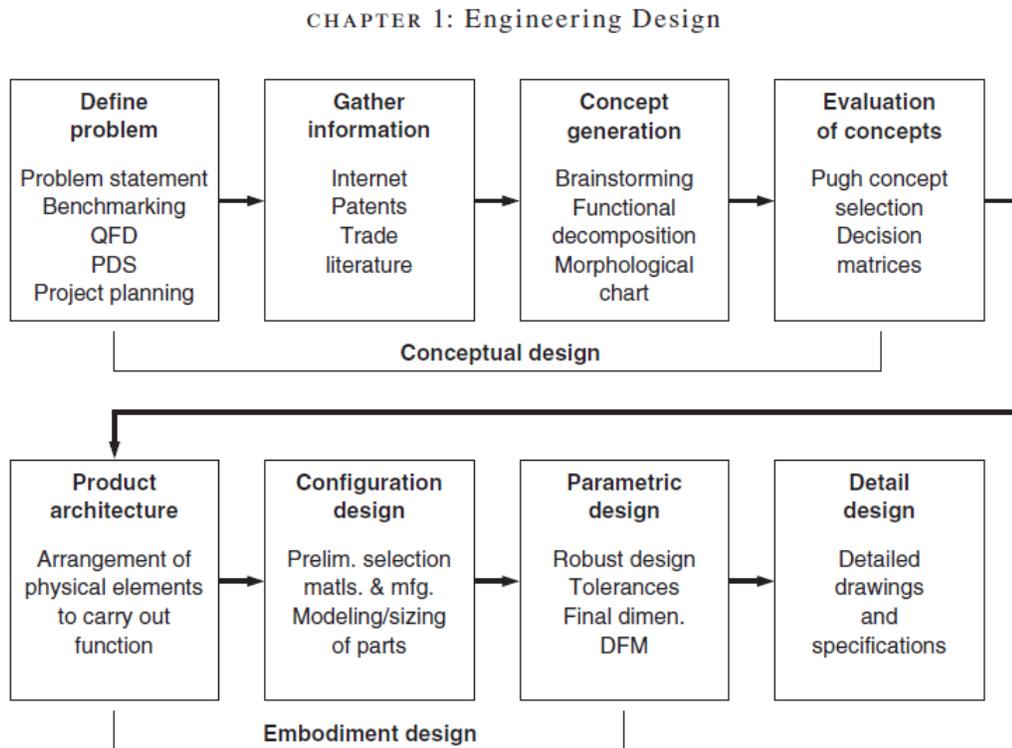


Figura 2.1 Metodología de diseño de George E. Dieter (Extraída del libro PP 19)

Se puede apreciar en la *figura 2.1* los subsegmentos que integran cada parte del proceso de diseño y las herramientas que cada subsegmento propone utilizar, o las tareas que propone se realicen en cada etapa.

Aunque la metodología propuesta por Dieter propone 3 etapas de diseño, los alcances de este trabajo se enfocan únicamente en 2 etapas debido a que el *diseño de detalle* referido a tanques sometidos a presión consiste en especificaciones de detalles, como son los acoplamientos a otros equipos e implementación de valvulas de seguridad y conexiones, y la realización de planos de construcción y estos temas se pueden consultar íntegramente en los códigos y normas vigentes.

## 2.4 Diseño Iterativo

“El diseño es un proceso intelectual y como todas las nuevas creaciones de la mente son el resultado de prueba y error.”<sup>3</sup>

-George E. Dieter

Es bien conocido que el diseño conceptual es un proceso de prueba y error, ver qué sirve y mejorarlo, ver qué no y modificarlo hasta que sea satisfactorio su funcionamiento, y mientras existen métodos que reducen en lo posible este proceso, siempre será parte del diseño y es importante tenerlo en cuenta y tener la paciencia de repetir las cosas y tomar cada intento como una aportación al conocimiento del problema.

El proceso de diseño propuesto en este trabajo se basa en esto, por lo que no está basado en un proceso lineal, sino que propone la estructura base a seguir y se retroalimenta de etapas anteriores. Se considera que, aunque la estructura lineal debe ser considerada una guía en cuanto a que etapas se deben asumir antes que otras, el conocimiento o la información que se obtengan en etapas posteriores puede ser de utilidad en alguna etapa anterior.

---

<sup>3</sup> (Dieter, Engineering design, 2009, pp8.)

## 2.5 Metodología Propuesta

La metodología propuesta para el diseño de contenedores altos sometidos a presión es la siguiente:

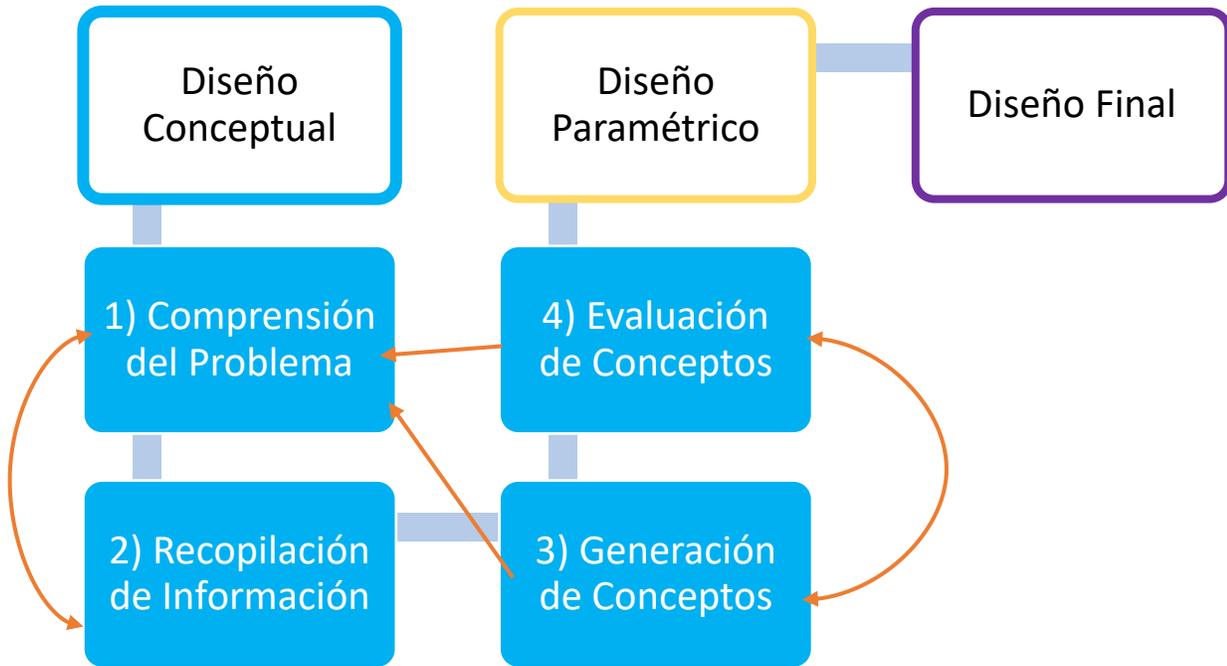


Figura 2.2 Metodología Diseño Conceptual

### 2.5.1 Comprensión del problema

El objetivo básico de la ingeniería y del diseño es resolver problemas, por esto, la primera parte y quizá la más importante del proceso de diseño, independientemente de cualquier producto, es la definición y comprensión del problema.

La comprensión de un problema deriva en la *identificación de necesidades* que se deben satisfacer y en el diseño, las necesidades que se deben satisfacer se traducen en *requerimientos* de diseño.

En el proceso de diseño resolver un problema será el objetivo mientras el *cómo* resolverlo será la información y el *qué* resolver serán los requerimientos.

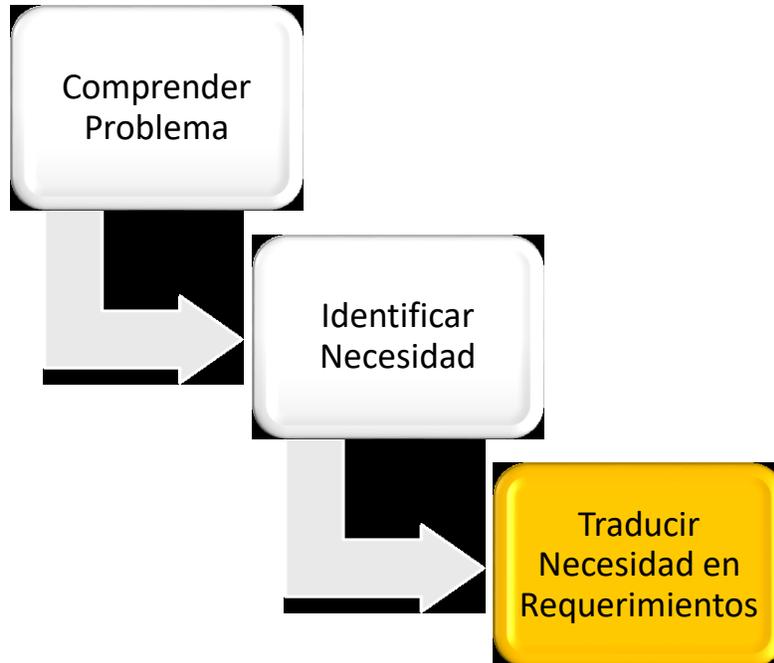


Figura 2.3 Comprensión del problema

## Cliente

La necesidad es establecida por el cliente, definiendo para este trabajo el concepto de “cliente” como “todo aquel que usa o recibe aquello que un individuo u organización probé o produce”<sup>4</sup>.

Adicionalmente, el cliente suele tener la facultad de aprobar o rechazar el diseño previo a la realización material del mismo, por lo que comprender la necesidad real del cliente será de gran importancia para evitar cambios innecesarios futuros en el diseño.

---

<sup>4</sup>(Dieter, Engineering design, 2009, pp.77)

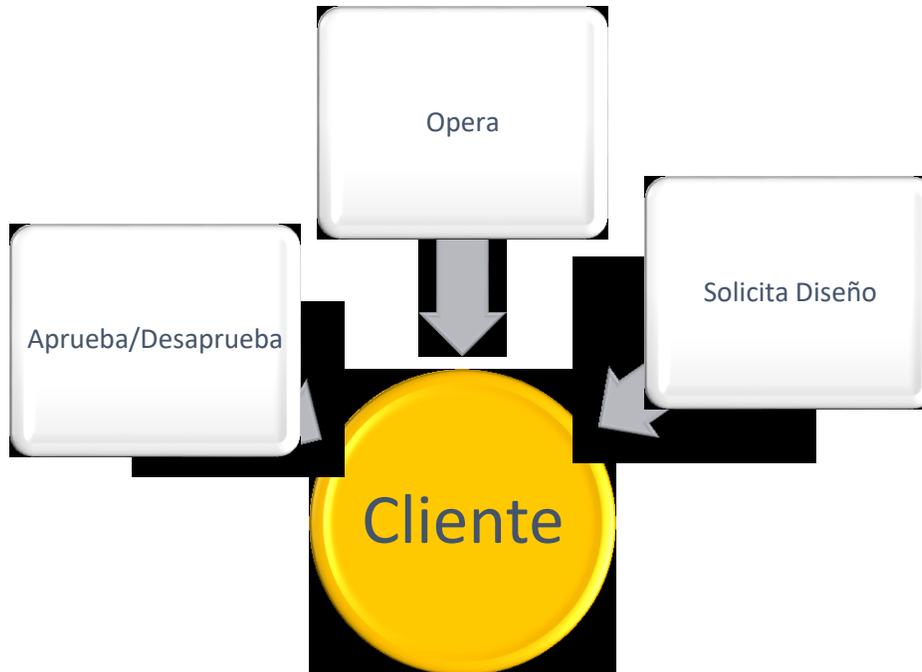


Figura 2.4 Rol del cliente

Basado en la definición antes citada, también se considera como cliente aquel que tendrá uso final del tanque, aquel que lo operará y dependiendo el lugar de operación, quienes tengan interacción con él por lo que un diseño adecuado de un tanque a presión debe tomar en cuenta la interacción diaria de operarios tanto en la operación normal como en el mantenimiento y cualquier situación adicional que se pueda prever como el tránsito de civiles externos a la operación del tanque.

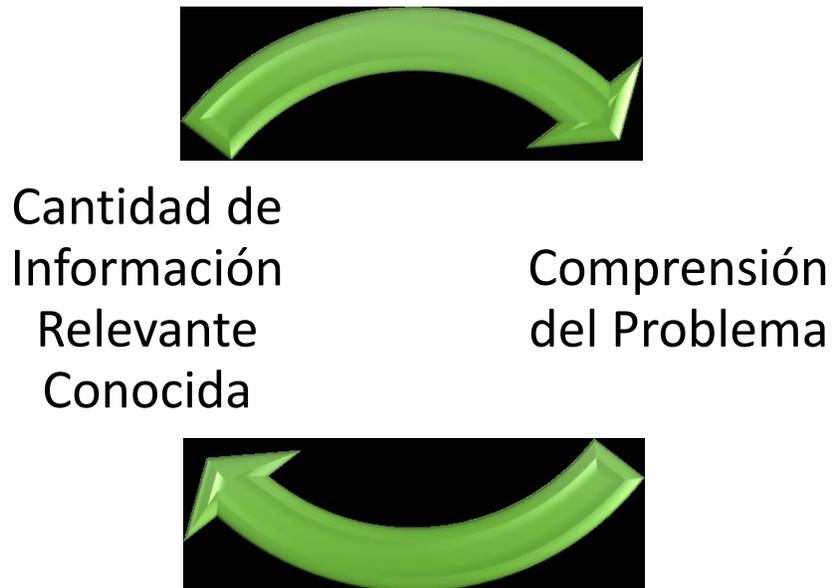
### Diseño convencional/No convencional

El análisis inicial de las necesidades del cliente y posteriormente los requerimientos de diseño servirá para identificar el tipo de diseño que se pretenderá realizar, un diseño convencional de tanques a presión o un diseño de tipo no convencional, ambos definidos en el capítulo 1 del presente trabajo.

La importancia de definir desde la primera etapa del proceso de diseño el tipo radica en la posibilidad de reducir el tiempo dedicado al diseño conceptual, específicamente en la generación de conceptos, e incrementar la atención al diseño paramétrico en el caso de un tipo de diseño convencional reduciendo así tiempo y esfuerzo en el proceso de diseño.

Pudiera parecer en un inicio que se comprende correcta y completamente las necesidades que se deben resolver, pero al tratarse de un paso estrechamente ligado al conocimiento

de la información relativa al problema, y como se verá más adelante, la información necesaria para un diseño satisfactorio es más extensa que los códigos y normas aplicables, y al incrementar esta información conforme se avance en el proceso de diseño, la comprensión del problema igualmente incrementará conforme el proceso de diseño avance.



**Figura 2.5** Relación entre información y comprensión

Adicionalmente, se deberá considerar que no siempre son correctamente interpretados los requerimientos del cliente, pudiéndose originar por problemas en la comunicación, esto generará retrasos en el proceso de diseño, especialmente en etapas posteriores, por lo que es importante interpretar correctamente las necesidades del cliente en una etapa de diseño temprana, ya que su satisfacción es lo que definirá si el diseño es aprobado o no.

Otro punto importante a considerar en esta etapa de diseño es la comunicación con otros sistemas que afecten o se vean afectados directamente por el diseño del tanque, normalmente el recipiente contenedor trabaja en interdependencia con otros sistemas vitales para su funcionamiento y se debe de trabajar con la mejor comunicación posible con los responsables de ellos en cuestión. El no tomar en cuenta este punto puede llevar a contratiempos en etapas posteriores del diseño los cuales serán mucho más perjudiciales que en una etapa temprana.

## 2.5.1.1 Requerimientos

Uno de los puntos más críticos de la definición del problema es la correcta identificación y jerarquización de los requerimientos del cliente.

### Clasificación de requerimientos

Entre los requerimientos especificados es posible que existan diferentes niveles de importancia, en caso de que el PV requiera un diseño no convencional o fuera de norma se recomienda tomar en cuenta lo siguiente.

A continuación, se presenta una herramienta para clasificar los requerimientos, el diagrama de Kano.

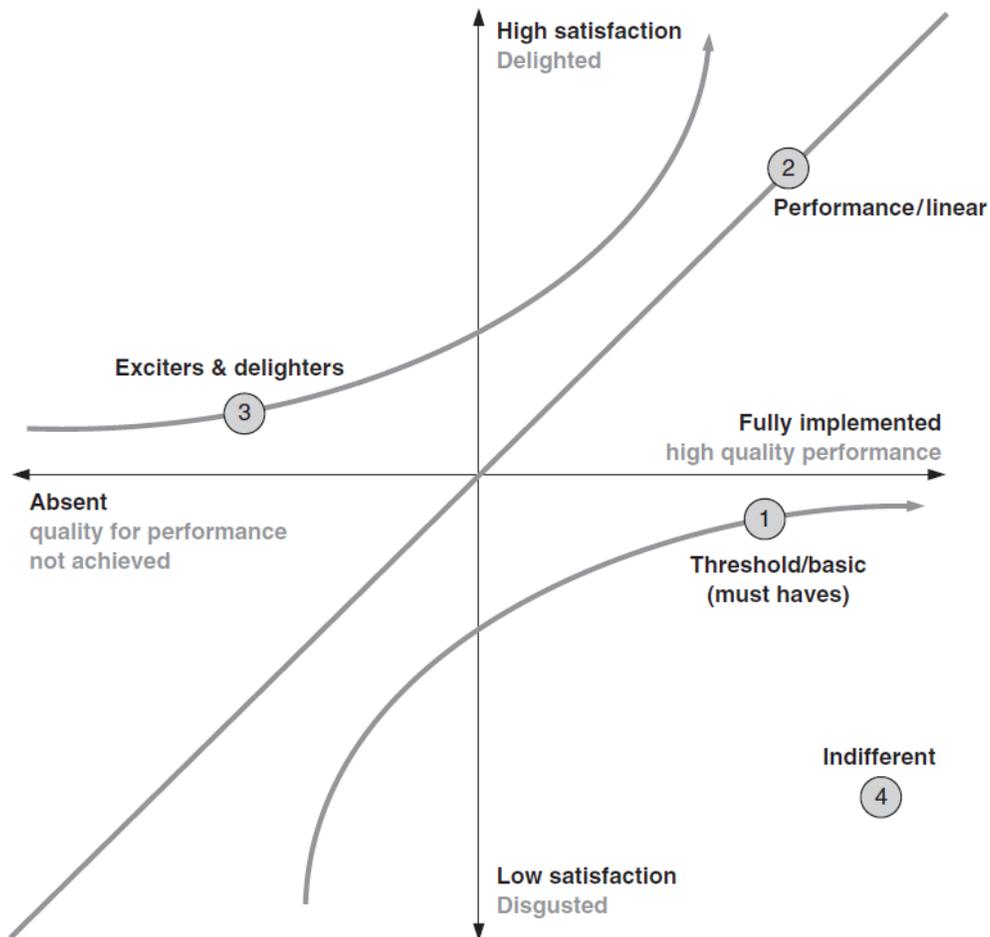
### Diagrama de Kano

Esta herramienta divide los requerimientos en 4 secciones para una mejor forma de visualización y priorización de ellos. De esta forma se puede hacer una primera jerarquización de los requerimientos.

<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Expecters</b></li></ul>	Atributos básicos que se esperan en el producto como estándares. Pueden estar basados en aspectos de seguridad o normatividad como diseño con base en todas las solicitudes esperadas, diseño basado en norma y su cumplimiento.
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Spokens</b></li></ul>	Atributos o funciones que el cliente solicita del producto. Entre ellos se encuentran aspectos del desempeño como presión que resistirá el tanque, materiales específicos, tiempo de vida, número y tipo de conexiones
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Unspokens</b></li></ul>	Atributos que se esperan del producto, pero son tan comunes que no se mencionan por omisión. Ej. Cumplimiento de normas, estandarización de medidas en coples y uniones.
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Exciters</b></li></ul>	Atributos que hacen único al producto y lo distinguen de otros. La ausencia de estos no repercute negativamente en la apreciación debido a que no son conocidos.

Tabla 2.1. Clasificación de Kano de requerimientos.

Figura 2.6 Diagrama de Kano



La clasificación Kano ayuda a visualizar el nivel de satisfacción del cliente esperado con base al cumplimiento de los requerimientos en sus diferentes niveles.

Como muestra la *Tabla 2.1*, existen 4 tipos diferentes los cuales influirán de diferente manera en la sensación de satisfacción y percepción de calidad del producto, la *figura 2.6* muestra el diagrama de Kano que expone esta interacción.

El diagrama de Kano se compone por dos ejes, el eje "x" muestra el nivel de cumplimiento de los requerimientos tomando el centro como el cumplimiento básico de ellos mientras el eje "y" muestra el nivel de satisfacción del cliente y una mayor percepción de calidad tomando como agrado la mitad superior y desagrado la inferior y tres curvas que muestran respuestas a diferentes requerimientos.

La curva número 2 presenta un comportamiento de satisfacción lineal y se compone de *expecters* y *spokens*, satisfacerlos en mayor manera conducirá en cierto punto al encanto del cliente.

La curva número 1 presenta un comportamiento exponencial en el cual la completa satisfacción de requerimientos nunca se verá reflejada en una mejor percepción de calidad mientras que fallar en cumplir alguno de éstos repercutirá de forma dramática en la percepción negativa del producto. Se compone de *expecters* y *unspokens* y son requisitos tan básicos que están presentes en cualquier producto similar y se dan por hecho.

La curva número tres funciona en espejo a la curva 1 en el cuadrante de satisfacción y percepción de gran calidad, se compone de *exciters* o *delighters* y la inclusión de cualquiera de ellos por más básico nivel de cumplimiento generará una percepción positiva. Esto se explica debido a que el cliente no conoce el requerimiento aún, pero le parece algo muy positivo.

Tomando en cuenta la interpretación de Kano, se puede jerarquizar los requerimientos del cliente de la siguiente forma en orden de prioridad:

1. Requerimientos básicos presentes en otros productos de la competencia.
2. Requerimientos tipo *unspokens* observados a través de estudiar el estado del arte.
3. Requerimientos de alta importancia para el cliente.
4. Requerimientos tipo *exciters*

Como última consideración, es importante recalcar que no se debe descuidar los requerimientos básicos al implementar o mejorar requisitos de una categoría inferior en caso de un *Trade-off* en una toma de decisión de performance.

Una vez clasificados los requerimientos, se podrá traducirlos en características cuantificables.

## Requerimientos a características cuantificables

Los requerimientos muchas veces son características cualitativas como ejemplo la garantía de seguridad a una presión determinada, la garantía del cumplimiento del periodo de vida establecido u otras características de esta índole, para poder generar propuestas de diseño tangibles es necesario interpretar y transformar estas características a características cuantitativas.

Estas características estarán en términos comunes de ingeniería y en unidades establecidas, como ejemplo puede transformarse un requerimiento de garantizar la seguridad del tanque a presión interna, la cual es una característica cualitativa, a el espesor de pared que se utilizará, lo cual fácilmente puede interpretarse como una característica cuantificable.

Estas características no están ligadas únicamente a satisfacer un requerimiento dado que una cantidad de ellas intervendrán a satisfacer el mismo fin. Tomando como ejemplo el mencionado en el párrafo anterior, otra característica que influencia la resistencia a la presión es la selección del material específicamente sus capacidades mecánicas como la resistencia a esfuerzos.

Para poder llevar esto a cabo es necesario conocer a detalle la información pertinente (lo que se especifica en el siguiente paso del proceso de diseño), en caso de la mayoría de los tanques a presión, este tipo de características vienen especificadas dentro de los códigos de construcción y se puede ahorrar mucho trabajo basándose en ellos.

En caso de diseños fuera del código o no contemplados completamente en él es importante tener en cuenta este proceso.

Una vez cubierta la primera sección del diseño conceptual se puede proseguir a la segunda o tercera sección, tomando en cuenta que todas están relacionadas entre sí y que no debe considerarse como una metodología lineal.

## 2.5.2. Recopilación de información

La recopilación de información es un proceso básico en el diseño de cualquier producto y esto incluye el diseño de tanques sometidos a presión.

Se ha dispuesto como el segundo paso en el proceso de diseño, pero la recopilación de información se llevará a cabo durante todas las etapas del diseño.



Figura 2.7 Pirámide de jerarquías de información

Entre todas las fuentes de información que pueden ser concernientes al diseño de PV se han agrupado y jerarquizado en 3 secciones o niveles principales, como se puede apreciar en la *figura 2.7*, para facilitar la comprensión del tipo de información que se puede consultar y en general, su impacto en el diseño.

Cada nivel comprende un conjunto de fuentes y tipos de información y están ordenadas en forma jerárquica descendente, el impacto o utilidad de cada sección es la siguiente

#### Nivel 1. Normas y Restricciones

Está compuesto por la información que es indispensable conocer previo al diseño de PV como son las Normas y códigos que apliquen, a su vez que incluye el conocimiento de las formas de manufactura (que en general se especifican en los códigos) de PV y el conocimiento de la capacidad de manufactura con que se cuente. Su jerarquía es la más alta debido a que esta información acota los alcances en el diseño y adicionalmente abarca los aspectos básicos.

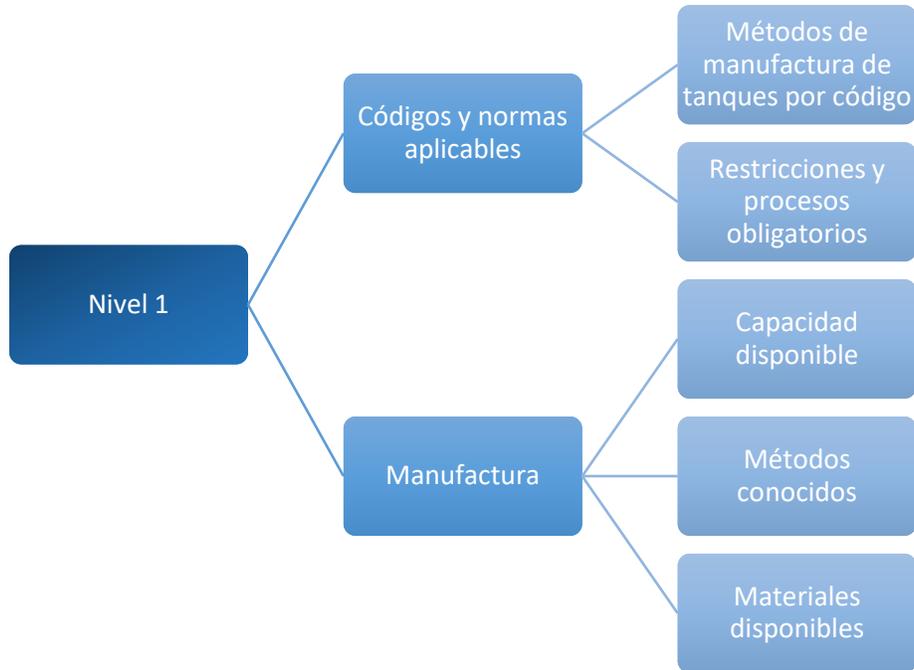


Figura 2.8 a) Desglose nivel 1

### *Códigos y normas aplicables*

Los códigos internacionales aplicables a todo lo referente con tanques a presión, desde el diseño y la construcción hasta la operación, certificación, pruebas y materiales, son los publicados por *ASME* en el *BPVC* (véase capítulo 1).

Generalmente no es necesario el conocimiento íntegro del código, sino las secciones y subsecciones pertinentes a las características y requerimientos del proyecto.

Adicionalmente se debe conocer normas que apliquen al tanque a presión.

### *Manufactura*

La manufactura siempre es un factor crítico en el diseño de cualquier producto ya que delimitará las posibilidades del diseño.

Adicionalmente al conocimiento de los métodos tradicionales de construcción de PV, como son mediante estampado y soldado, se debe de conocer la capacidad con la que se cuenta tanto en procesos y maquinaria como en materiales disponibles.

En caso de que se requiera de una empresa externa para realizar la manufactura, se puede consultar con ésta los métodos y problemas técnicos de manufactura que se desconozcan.

## Nivel 2. Aspectos Tradicionales

Se compone de toda la información que debe de conocerse para tener un contexto de los PV en la industria. El tipo de información de este nivel es importante debido a que facilita la comprensión de puntos importantes como la forma de armado de un tanque, equipo utilizado y en general, la forma tradicional de resolver problemas. Se ubica en el segundo nivel debido a que, aunque es muy importante, no es de carácter obligatorio su conocimiento.

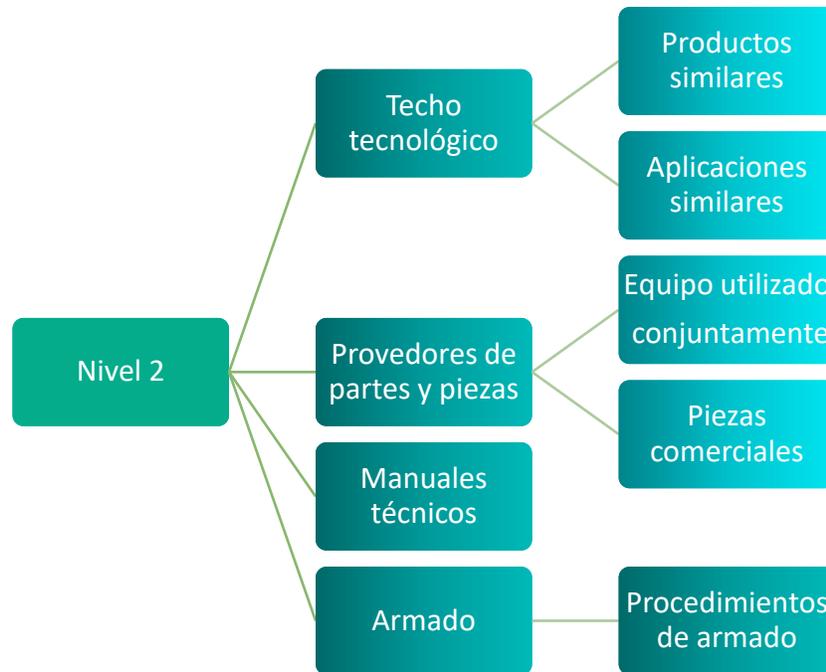


Figura 2.8 b) Desglose nivel 2

### *Techo tecnológico*

Comprende la oferta actual en la industria de los productos o procesos más novedosos e innovaciones tecnológicas relacionados con el tema, pueden encontrarse en exposiciones especializadas o presentaciones de nuevos productos.

Difiere del apartado “Estado del arte” en la consideración de que estos son los productos comercialmente probados mientras que las comprendidas en “Estado del arte” no necesariamente han sido aplicadas comercialmente.

### *Manuales o libros técnicos*

Los manuales suponen una fuente de información rápida con respecto a problemas técnicos comunes. Una de sus ventajas es que son compendios frecuentemente utilizado en la

industria y se basan tanto en normas como en datos de proveedores para solucionar aplicaciones comunes. Su desventaja radica en que proveerán de poca información referente a aplicaciones o métodos alternativos.

### *Armado*

La manera típica de armado de contenedores altos requiere ayudas en las secciones del contenedor las cuales deben ser calculadas con respecto a su centro de gravedad, estas ayudas deberán considerarse en el diseño preliminar del tanque.

### *Proveedores*

Es indispensable para un diseño que considere reducir costos e implementar el mayor uso posible de piezas y tamaños comerciales. Debido a esto es necesario conocer bien las piezas y partes que se requerirán en el contenedor previo a la realización de propuestas de diseño buscando este objetivo.

## Nivel 3. Nuevas Tendencias

La categoría de información más amplia. El conocimiento de este tipo de información genera propuestas de diseño innovadoras. Se compone tanto de publicaciones como de nuevas tendencias en la industria, nuevos materiales utilizados, procesos diferentes de fabricación, equipos nuevos, etc. Su jerarquía es la más baja debido a que el desconocimiento de esta información no impide generar una propuesta válida, pero es la información con más potencial para desarrollar un concepto novedoso.



Figura 2.8 c) Desglose nivel 3

*Publicaciones científicas o industriales*

Estas publicaciones ofrecen un panorama más amplio referente a las nuevas tecnologías que pueden aplicarse, es importante su consulta especialmente en aplicaciones poco convencionales o tradicionales. Contienen a las nuevas tendencias

*Estado del arte*

El conocimiento de este tipo de información genera mayor potencial de una propuesta de diseño innovadora. Entre sus desventajas se encuentra la necesidad de una verificación de viabilidad.

### 2.5.3 Generación de conceptos

La tercera etapa de diseño, conocida como generación de conceptos, pretende generar ideas novedosas buscando solucionar los problemas detectados en la primera etapa por lo que se reitera la importancia de conocer detalladamente el problema que se pretende resolver previo a la etapa de concepción de ideas. Muchas veces los conceptos incorporados a nuevos diseños son aquellos ya utilizados eficazmente en la resolución de problemas diferentes pero que se vislumbra un factor común entre ellos, de aquí la importancia de realizar una amplia búsqueda de información previa.

Para este trabajo, un concepto será una idea o una manera en que se pretende satisfacer un requerimiento del tanque a presión. Como un PV debe satisfacer varios requerimientos diferentes, se espera que existan varios conceptos para satisfacer diferentes requerimientos, de esta forma varios conceptos pueden ser aplicables a un diseño de PV.

Existe una gran cantidad de métodos auxiliares en la generación de conceptos, disponibles en la mayoría de las obras que tratan el diseño, el presente trabajo no pretende tratar ninguno de estos métodos, en vez se enfocará en mencionar aspectos básicos del diseño de tanques a presión que se recomienda tomar en cuenta en esta etapa destacando que la importancia de los mismos dependerá del proyecto en particular que se esté tratando y sus debidas especificaciones.

A continuación, se presentan.

#### Tipo de diseño buscado

Dependiendo los requerimientos particulares identificados en la primera etapa del proceso, la identificación del problema, el diseño seguirá uno de dos posibles caminos, estos son el tradicional totalmente contenido en el código ASME BPVC o el camino del diseño no convencional, el cual deberá resolver uno o varios problemas el o los cuales no estén contenidos en los códigos y por lo tanto no se tenga una guía estricta de la manera de proceder.

Una de las características del diseño tradicional de PV es que puede solucionarse únicamente con información de los niveles 1 y 2 (previamente descritos) y una menor carga de generación conceptual, a diferencia del diseño de PV no convencional, el cual requerirá predominantemente información de los niveles 2 y 3 y un proceso de generación conceptual más fuerte.



**Figura 2.9 Divergencia en diseños**

Para esta etapa ya se deberá tener identificado el tipo de diseño que se buscará.

### Aspectos Geométricos

Se refiere a la selección de la geometría de las secciones que comprenden un tanque alto y la manera en que afectarán, por ejemplo:

#### *Selección de geometría de la tapa*

##### Tapas rígidas

Deberá considerarse la existencia de una gran cantidad de tipos de tapas, regulados por el código ASME BPVC. La selección deberá ser considerada con base en las propiedades de resistencia de presión de la geometría, facilidad y costo de construcción ya que cada tipo se desempeña de diferente forma, en caso de pensar en una geometría diferente es importante realizar una validación mediante cálculos que garanticen su seguridad.

##### Alternativas

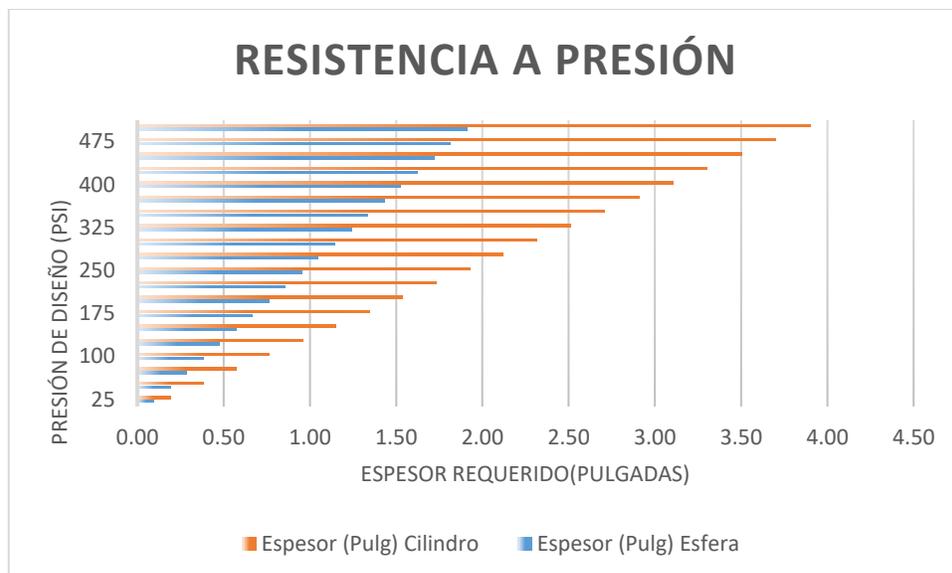
Adicionalmente existen alternativas en el mercado en cuanto a tapas, como pudiesen ser las bolsas de gas, éstas funcionan con dobles membranas impermeables de un material polimérico en las que la exterior protege del ambiente, manteniendo su geometría en todo momento por medio de sopladores internos, y la interior permite una contención de gas flexible a diferentes volúmenes.

Entre sus ventajas se encuentran la posible reducción de peso y en ciertos casos de costos manteniendo funciones indispensables en la tapa como registros de inspección, posibilidad de entrada para agitadores y un costo de mantenimiento adecuado.

### *Selección de geometría del cuerpo del tanque*

Pudiendo escoger entre diferentes geometrías, debe considerarse los diferentes costos de manufactura entre ellos, el desempeño al soportar la presión interna y la capacidad de almacenamiento volumétrico entre otros.

En la *Gráfica 2.1* se puede observar el requerimiento de espesor de pared para una iteración realizada a dos tanques con parámetros idénticos en respecto a diámetro, presión y material, pero con dos geometrías diferentes, una sección circular y una cilíndrica.



**Gráfica 2.1 Comparativa entre el espesor requerido de dos tanques con diferente geometría a una misma presión.**

Como se puede apreciar, la geometría esférica (notada en color azul) requiere casi la mitad del espesor de pared que la geometría cilíndrica para resistir de manera segura la misma presión interna. Esta es una de las razones por las cuales las geometrías se utilizan para soportar presiones mayores, pero tienen el inconveniente que están limitadas en el volumen que podrán contener en relación al diámetro proyectado al suelo disponible, a diferencia de una geometría cilíndrica alta la cual, con ciertas restricciones, puede crecer en volumen verticalmente en caso de contar con una menor área proyectada al suelo.

La geometría también afecta otros parámetros como los esfuerzos a los que se someterá debido a ciertas situaciones que podrán ocurrir dentro de la vida del contenedor, favor de dirigirse a la sección 3.5 para más detalles.

## *Selección de base*

Al igual que la tapa existen formas reguladas ya por ASME, es importante considerar que generalmente se tiene una salida en la parte inferior por lo que se debe ayudar a su correcto funcionamiento (geometrías que promuevan un flujo sin interrupciones).

### Aspectos funcionales

Se refiere a aquellos que influenciarán las características de operación, construcción y seguridad del tanque, incluyen:

**Materiales:** Aunque los metálicos son los más comúnmente usados, es cada vez más común encontrar ejemplos de tanques con materiales alternativos a éstos por lo que es posible considerar otros tipos como poliméricos, cerámicos y combinados.

#### Construcción

Cualquier concepto que pueda reflejarse en una construcción más sencilla será de gran impacto en el costo final.

#### Transporte

En casos donde el transporte sea caro o complicado, conviene pensar en formas de facilitarlos mediante una segmentación modular o la posibilidad de fabricación in-situ.

#### Operación

Debe tenerse muy claro las condiciones en las que operará para poder tomarlas en cuenta en el momento de decidir aspectos del diseño operacionales, generalmente especificadas en un inicio por el cliente, entre algunas posibles se pueden considerar el aislamiento térmico, tipo de protección contra corrosión, capacidad de manipulación de factores internos o algún otro parámetro operativo.

Adicionalmente, al tener presente en el diseño un factor importante en la operación de los PV cuyo contenido es un fluido en estado líquido como lo es el llenado del mismo, y los esfuerzos generados por el choque del líquido (Golpe de ariete), deberá tenerse considerado al momento del diseño del sistema de llenado.

## Nuevas tendencias

Entre las nuevas tendencias en el uso y diseño de PV se pueden mencionar las siguientes

### Modularidad

Actualmente existe una creciente tendencia a el diseño de productos modular, si bien no todos los usos de tanques contenedores pueden considerarse candidatos a características de este tipo, en ciertos casos podría ser una opción innovadora válida.

### Eficiencia en operación

Algunos PV requieren de características específicas para su operación y entre las más comunes es una temperatura promedio, el conseguir un sistema de aislamiento superior a los convencionales puede ser viable respecto a la inversión en este debido a los costos de operación de la calefacción.

### Materiales alternativos

Entre las últimas tendencias en la construcción de contenedores sometidos a presión, los materiales alternativos han estado haciendo una aparición en los contenedores utilizados para fines alternativos, como lo son los biodigestores.

## 2.5.4 Evaluación y Selección de Conceptos

La última etapa del proceso de diseño conceptual, en esta etapa se debe considerar la factibilidad de cada idea conceptualizada con anterioridad, visualizar que conceptos resolverán adecuadamente los problemas establecidos en la primera etapa y a su vez la facilidad o viabilidad de implementarlos.

Para poder seleccionar adecuadamente es posible ayudarse de ciertas herramientas, como ejemplo la casa de la calidad, y considerar si los conceptos cumplirán los requerimientos adecuadamente, adicionalmente se deberá considerar la manera en que se realizará la manufactura y ya se pueden estimar costos de producción.

### *Contratiempos en el diseño*

Es importante que aquellas ideas que prometen generar más contratiempos que beneficios sean identificadas en ésta etapa ya que de lo contrario su corrección en cualquier etapa posterior generará un mayor contratiempo a su identificación previa.

Se deberá considerar la información con la que se cuenta de cada concepto y que se desconoce para garantizar una incorporación satisfactoria en el tanque, como ejemplo, si es un concepto respecto a la implementación de materiales nuevos se debe considerar que, aunque no está restringido su uso por los códigos ASME, éstas no contarán con información que facilitara cálculos posteriormente requeridos, a diferencia de los más ampliamente utilizados en la industria como son los metálicos.

### *Límites de conceptos e interacciones*

Si bien la validación de la viabilidad de implementación de conceptos nuevos en el diseño de PV se realizará en una etapa posterior (expuesta en el siguiente capítulo), se deben considerar las restricciones que se pueden tener en el diseño evitando generar propuestas que se sabe en esta etapa serán inviables.

### Manufactura

Es importante tomar en cuenta la capacidad de manufactura con la que se cuenta, ya que de poco servirá un concepto prometedor si la manufactura retrasara el proceso o simplemente será imposible su construcción. Esto no excluye la posibilidad de innovación en procesos de manufactura, pero debe tomarse en cuenta para evitar retrasos en etapas posteriores evitando conceptos no manufacturables.

### *Casa de la calidad*

Una herramienta muy útil para este proceso es la llamada “casa de la calidad” la cual es auxiliar en la correlación de requerimientos y características ponderables y adicionalmente su resultado es una evaluación de que características influyen de manera positiva y negativa en la satisfacción de estos requerimientos. Se recomienda su uso en caso de realizar un rediseño de algún tanque y si se debe comparar el desempeño con otro en el mercado.

Como ventaja de esta herramienta, se puede visualizar la relación de *trade-off's* en la implementación de ciertas características debido a que, aunque su implementación influencie positivamente la satisfacción de una característica, puede influenciar de forma negativa a otras.

El ejemplo más común de un *trade-off* sería la relación de un material con mejores propiedades mecánicas que otro (incrementando la resistencia), pero con un mayor costo del proyecto o incluso dificultando la capacidad de manufactura.

#### 2.5.4.1 Generación de propuestas

Una vez considerado el valor de un concepto, éste es seleccionado, la suma de todos los conceptos elegidos generará una *propuesta* la cual debe satisfacer enteramente los requerimientos del diseño.

Es posible que en esta etapa se llegue a una encrucijada en la cual se tengan diferentes conceptos que presenten beneficios particulares y en este punto no se cuentan con las herramientas que permitirán distinguir claramente la mejor opción, como pudiera ser la elección entre un material u otro sin disponer de los cálculos pertinentes u otro criterio que permita eliminar una de las opciones, esto lleva a terminar con dos posibles soluciones de enfrentar un mismo problema, esto se refiere como generación de propuestas, dos diseños conceptuales similares entre sí con alguna diferencia como pudiese ser el material, la utilización de algún sistema contra otro, etc.

Las propuestas de diseño no deben diferir en demasiados conceptos entre ellas ya que de lo contrario se obtendrán dos diseños completamente distintos lo que posteriormente supondrá una gran cantidad de trabajo de cálculo que generará retrasos, sino su intención deberá ser la de posibilitar el avance en cálculos de los conceptos base entre ellas y una mejor toma de decisión entre las diferentes soluciones a implementar.

## Conclusiones del capítulo

El diseño de tanques a presión se puede dividir en tradicional y no convencional, el diseño no convencional requiere seguir un proceso de diseño conceptual, mientras que, en el diseño de tanques tradicional es posible omitir o minimizar este proceso.

La metodología propuesta no es lineal debido a que la obtención de información no lo es, debe tomarse como modelo base considerando las retroalimentaciones de cada etapa del proceso de diseño.

Independientemente del tipo de diseño buscado, se propone organizar y jerarquizar los requerimientos para tener más claridad en la etapa siguiente, diseño paramétrico, expuesto en el próximo capítulo.

---

# CAPÍTULO III

## METODOLOGÍA DE DISEÑO: DISEÑO PARAMÉTRICO

---

El resultado de la etapa previa de diseño será uno o varios conceptos (propuestas de diseño) de los cuales se conoce a grosso modo la disposición de los segmentos y se tiene considerado uno o varios materiales para su construcción, se espera cierto comportamiento y así mismo el cumplimiento de normas, pero se desconocen las características o parámetros que asegurarán que el tanque en realidad se comporte como es deseado.

Para poder asegurar que el tanque responderá de forma aceptable a las solicitaciones a las cuales se enfrentará, es necesario desarrollar mediante herramientas de cálculo los conceptos previos para pasar del concepto a un diseño detallado del cual se tenga la certeza de un desempeño correcto. Es por esto que se suele nombrar a esta etapa desarrollo del concepto, haciendo evolucionar una idea a parámetros de construcción bien definidos.

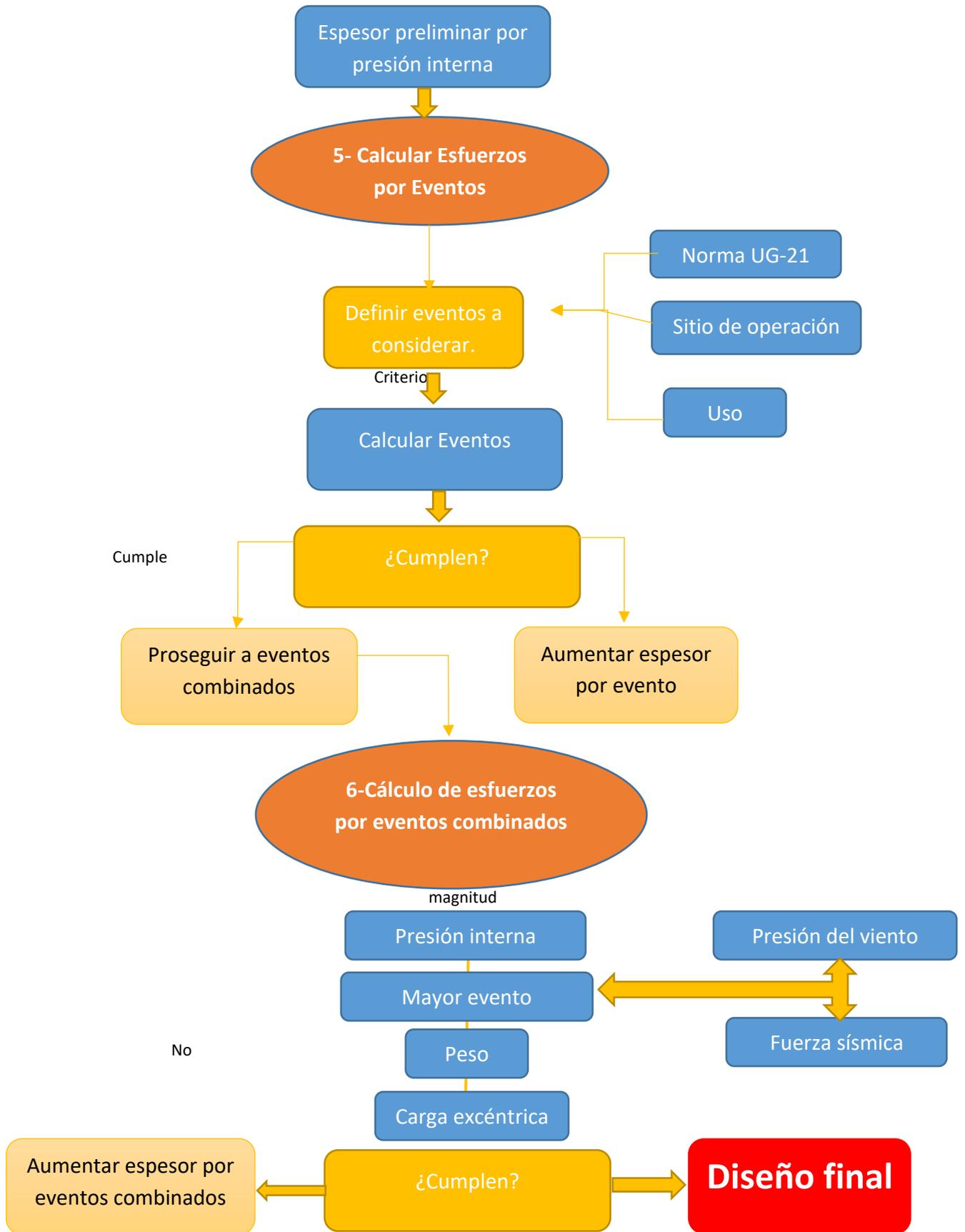
Como nota se hace mención que en la literatura también se hace referencia a esto como diseño paramétrico o de parámetros.

A continuación, en la *figura 3.1*, se expone un diagrama, y su explicación, de la serie de pasos a seguir para el desarrollo de conceptos considerando que, si bien esta serie de pasos deben aplicarse a todos los tanques contenedores altos, en caso de que el proyecto presente solicitaciones especiales no mencionadas en esta obra, se deben igualmente desarrollar en esta etapa de diseño.

Como última consideración, se menciona que esta obra no pretende ser una memoria de cálculo por lo que las ecuaciones generalmente utilizadas en los siguientes pasos, en su mayoría no serán incluidas limitándose únicamente a aquellas consideradas como auxiliares en la comprensión de relaciones de diseño, en vez se pretende que la obra sirva como modelo de consulta en cuestión de los pasos de diseño.

Figura 3.1, Desarrollo de Conceptos





## 3.1 Definición de Geometría

La primera etapa del desarrollo del concepto es la definición de la geometría, en la etapa conceptual se definió la forma del contenedor, su cabeza, base y en general la relación altura diámetro que se utilizará.

En esta etapa se definirá la altura total, el diámetro interno o sus dimensiones transversales en caso de una geometría rectangular y por ende el volumen total interno.

En la mayoría de los casos se diseña para cumplir un volumen especificado por lo que los cálculos deberán ajustarse a cumplir éste.

Al final de esto se debe conocer:

- Volumen total
- Dimensiones totales internas

Esta etapa esta interrelacionada con la definición de base y tapa.

## 3.2 Definición base y tapa

Si bien ya se debe conocer el tipo de tapa y base que se desea utilizar, en esta etapa se debe definir entre dos opciones.

- Construirla
- Seleccionarla prefabricada

En caso de selección, se deberá cuestionar ¿Existe el tamaño comercialmente? En su defecto de deberá retornar a la primera etapa y modificar la geometría para adaptarse a valores comerciales.

Esta etapa esta interrelacionada con la definición de la geometría y la definición del material.

## 3.3 Definición de Material

Si bien, es posible que anteriormente se haya elegido el material a emplear, en esta etapa se deberá definir ciertos ajustes de diseño que se utilizarán posteriormente, conocer la disponibilidad de éste, así como la capacidad de manufactura.

Se divide en dos grupos esta etapa:

- Material metálico con o sin recubrimientos.
- Material polimérico, cerámico o compuesto.

## Material metálico con o sin recubrimiento

Siendo la opción mayormente usada en la construcción de tanques contenedores, es la que cuenta con mayor información disponible en la literatura especializada.

Dentro de este grupo se encuentran todas las aleaciones metálicas, siendo delimitado únicamente por las normas de construcción ASME las cuales exigen una adecuada capacidad a ser soldadas<sup>5</sup> y provén las características necesarias para acreditar el material.

A excepción de aleaciones anticorrosivas, como lo es el acero inoxidable, la mayoría de los materiales metálicos requerirán una capa protectora anticorrosiva, esto se contempla dentro del siguiente proceso.

Considérese el gasto inicial del material y el mantenimiento requerido como un factor de decisión entre materiales anticorrosivos o materiales que no lo sean.

Al elegir este tipo de materiales se debe conocer su resistencia mecánica y resistencia a la corrosión, entre otros factores relevantes al uso en cuestión.

Se puede esperar que la manufactura de estos materiales sea más sencilla que la de sus contrapartes.

Antes de proseguir a la siguiente etapa, se deberá considerar lo siguiente:

### Calidad de la soldadura (eficiencia)

Se sabe que el punto donde se origina la falla siempre será aquel que presente menos resistencia.

Los tanques a presión metálicos generalmente están contruidos por medio de placas soldadas entre sí, esta soldadura puede debilitar la región donde es aplicada debido a las altas temperaturas a la que se expone el material a soldar, especialmente si el material fue trabajado en frío y no se trata después de la soldadura.

De igual forma es posible que el trabajo no sea realizado perfectamente generando espacios intersticiales en el material de soldadura depositado generando concentradores de esfuerzos, dando origen a fallas a una sollicitación menor a la prevista del material.

---

<sup>5</sup> (ASME BPVC VII-2, Párrafo 3.2.1.3., 2013)

Así mismo el tipo de junta soldada o dicho de otra forma la manera en que se suelden las placas influye en la resistencia que tendrá la pared.

Un buen trabajo y una junta resistente, como puede ser la junta a tope con doble cordón, evita lo antes expuesto, pero para poder calcular un espesor de pared que contenga la presión con seguridad, se debe examinar, mediante un proceso de radiografiado a las secciones soldadas, que el trabajo de soldadura fue realizado correctamente comprobando que no se ha debilitado la pared.

Adicionalmente a el criterio de selección, se debe considerar que, en ciertas utilidades del equipo, como pueden ser en la contención de ciertos fluidos peligrosos o presiones excesivas, el código ASME BPVC establece ciertos tipos específicos de soldadura, inspección de la misma, y por consiguiente valores de eficiencia.

Con base en lo anterior, se define el concepto de factor de soldadura o eficiencia de la soldadura el cual varía de 1 a 0.45<sup>6</sup> dependiendo la forma en que se examina la soldadura y el tipo de unión, y se aplica en el diseño de espesores de pared del tanque.

En la *figura 3.2* se muestra la forma de obtener el factor de soldadura.

---

<sup>6</sup> (Megyesy, 1992, pp. 144)

TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS				
TIPOS NORMA UW-12	EFICIENCIA DE LA JUNTA, E Cuando la junta es:	a. b. c.		
		Radiografiada totalmente	Examinada por zonas	No Examinada
1 	Juntas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse ésta después de terminar la soldadura.	1.00	0.85	0.70
2  En juntas circunferenciales únicamente	Junta a tope de un solo cordón con tira de respaldo que queda en su lugar después de soldar	0.90	0.80	0.65
3 	Junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldo	—	—	0.60
4 	Junta a traslape de doble filete completo	—	—	0.55
5 	Junta a traslape de un solo filete completo con soldaduras de tapón	—	—	0.50
6 	Junta a traslape de un solo filete completo sin soldaduras de tapón	—	—	0.45

Figura 3.2 Tipos de Juntas soldadas \*

\*Imagen obtenida de la Página 144 del libro Manual de recipientes a presión, Diseño y Cálculo. Eugene Megyesy.

La selección del tipo de junta está definida por normas dependiendo la sección en que se deba de aplicar del tanque y el tamaño de contenedor, contenido y servicio que prestará.

En caso de no verse restringido por alguna norma, la selección del tipo de junta y su calidad puede efectuarse en base al aspecto económico considerando la relación entre costos de una mejor calidad de soldadura y los de un mayor espesor de pared.

### Corrosividad del fluido y factor por corrosión

Se debe establecer un factor por corrosión, el cual especifica un sobredimensionamiento en el espesor del casco, tomando en cuenta la corrosión y el tiempo de vida útil que se espera, en caso de que no aplique, el factor será de cero lo que indica que no es necesario sobredimensionarlo.

El cálculo de este factor va ligado a la vida útil esperada del contenedor y a la corrosividad del fluido en cuestión y agrega un espesor de seguridad en caso de presentarse corrosión en el material considerando un desgaste periódico a lo largo de la vida útil.

Las consideraciones de sobredimensionamiento se detallan en el apéndice no obligatorio E del código división VII sección 1.<sup>7</sup>

### Material polimérico, cerámico o compuesto

La utilización de estos materiales pudiese ofrecer ventajas frente a los metálicos, pero es importante considerar de igual forma todos los aspectos como disponibilidad, costos y capacidad de manufacturación.

Adicionalmente se deberá verificar previo al siguiente punto las siguientes características del material:

- Definir zonas de mayor debilidad
- Verificar interacción no reactiva con fluido de trabajo
- Periodo de vida útil

### Zonas de mayor debilidad

Se deberá definir si hay zonas, debidas a los métodos de construcción, geometrías o cualquier otro factor, en las que se concentren esfuerzos o debilite el material, de ser así se debe calcular esfuerzos generales en base a la zona de menor resistencia.

---

<sup>7</sup> (ASME BPVC VII-1, E1-E6, 2013, pp.573)

Interacción no reactiva

Deberá de tenerse la certeza de que el material utilizado presentará reacciones adversas con el fluido que contendrá o con el ambiente comprometiendo su correcto funcionamiento. En caso de cierta interacción se deberá considerar si es permisible y controlable mediante tratamientos o mantenimiento, o si comprometerá funciones.

Vida útil

Se deberá definir el periodo de vida útil conocido del material considerando la vida del tanque.

En caso de no cumplir satisfactoriamente cualquier punto se deberá elegir otro material, en su defecto se proseguirá al siguiente punto.

### 3.4 Calculo de Espesores por Presión Interna

Una vez definido el material y tomando en cuenta sus debidas consideraciones, se proseguirá a definir el espesor o los espesores de pared que debe tener nuestro tanque en todas las zonas, desde base hasta tapas, tomando en cuenta los esfuerzos generados por la presión interna en operación normal, de igual forma se obtendrán los esfuerzos máximos permisibles a este espesor.

Esta etapa se divide en 4 procesos:

- Cálculo de presión de operación
- Definición de presión de diseño
- Cálculo de espesores por presión interna
- Cálculo de esfuerzos máximos permisibles por operación normal

Presión de operación

Para poder calcular exitosamente los espesor y esfuerzos máximos, es necesario conocer en primer lugar la presión de operación, que se refiere a la presión máxima normal a la que operará el tanque<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> (Megyesy, 1992, pp. 15)

En el caso de la presión hidrostática, es posible definir las variaciones de presión respecto a la altura debido a la disminución de la columna de fluido, debido a que esto supondrá la posibilidad de una disminución del espesor del casco requerido.

Una vez conocida esta presión se debe definir la presión de diseño, que es la que se utilizará en la ejecución de todos los cálculos pertinentes a presión

#### Presión de diseño

Se refiere a la presión a la cual será diseñado el recipiente, debe ser mayor a la presión de operación en orden de dejar un margen de seguridad a la hora del diseño.

Se satisface lo establecido en el código ASME BPVC al definirla sobredimensionando la presión de operación en un 10% o en su defecto 30 psi, cualquiera sea el valor más alto.

#### Cálculo de espesores por presión interna

Una vez contando con el valor de la presión interna de diseño es posible calcular efectivamente el espesor de pared que la contenga satisfactoriamente.

Independientemente del material elegido, se deberán calcular los espesores con base en la zona de menor resistencia de las paredes, en casos de fibras se debe tener cuidado de considerar su dirección preferencial, en caso de contar con una, y definir la resistencia a las sollicitaciones pertinentes.

En el caso de paredes metálicas, su construcción generalmente se lleva a cabo soldando placas rectangulares hasta alcanzar la geometría adecuada, esto lleva a la aplicación de costuras tanto longitudinalmente como circunferencialmente.

Debe considerarse que los esfuerzos en ambas costuras se presentan de diferentes formas por lo que los espesores requeridos para cada disposición de costura son diferentes.

En el caso de recipientes sometidos a presión aplicada constante e internamente, las costuras longitudinales son sometidas a esfuerzos del doble de la magnitud que en el caso de las costuras circunferenciales por lo que el cálculo de espesor de pared debe hacerse tomando en cuenta las primeras.

Una vez que se conocen los espesores de pared es importante conocer los esfuerzos que se generan en ellas, puntualmente en las costuras

## 3.5 Cálculo de Esfuerzos por Eventos

El espesor de pared preliminar se ha calculado para resistir de forma segura la presión interna a la que operará sin embargo, a lo largo de su vida útil el tanque será expuesto a otras solicitaciones ya sea por eventos naturales o por la propia naturaleza del tanque y componentes adicionales que serán colocados, por lo que posteriormente al cálculo de espesor inicial por presión interna se deberá verificar si es posible afirmar que con dicho espesor el tanque resistirá las solicitaciones aplicadas en éstos eventos específicos.

La necesidad de realizar estos cálculos es garantizar la seguridad del tanque y del personal en general bajo escenarios probables durante su vida útil, y es requisito para cumplir con la norma UG-22 contenida en el código ASME BPVC.<sup>9</sup>

En una primera instancia se deberán calcular los esfuerzos ejercidos en el tanque por los eventos de forma aislada, considerando si dichos eventos son aplicables al tanque en cuestión, más adelante se indicará en qué casos se debe de hacer cálculos con una combinación de eventos y esfuerzos resultantes por ellos.

A continuación, se presenta la lista de los eventos que debe tomar en cuenta el diseño del tanque y posteriormente se tratará la forma de abordarlos.

### Eventos independientes

- Presión del viento
- Peso del recipiente
- Vibración
- Carga sísmica
- Carga excéntrica
- Estabilidad elástica
- Deflexión máxima permitida
- Nieve

### Presión del Viento

En caso de que el sitio de operación del tanque se encuentre en la intemperie, el tanque se verá sometido a ráfagas de viento lo que conllevará a la generación de cargas adicionales a las de una operación normal.

---

<sup>9</sup> (ASME BPVC VII-1, 2013, pp. 15)

El viento actúa generando una presión positiva a lo largo de la zona de contacto la cual genera un momento de volteo en la base de soporte del tanque y en el propio tanque.

El momento de volteo genera esfuerzos de compresión o de tensión, dependiendo la dirección en la que el viento impacte el tanque, siendo de tensión en el barlovento o la zona de impacto y de compresión en el sotavento o zona opuesta a la de impacto.

El comportamiento presentado por el tanque alto se asemeja al de una viga empotrada en voladizo, sometida a una carga uniforme a lo largo de su envergadura y el método de cálculo para esta situación se basa en la norma ANSI A58.1-1982 <sup>10</sup>.

Es posible afirmar que la magnitud de la presión del viento y el momento de volteo generado son directamente proporcionales a la velocidad del viento que impacta, la aerodinámica de la geometría del recipiente, el área de contacto del viento, la disposición de componentes externos que puedan actuar como lastres en caso de existir y la altura total del recipiente.

Es común que en estos proyectos se conozca desde las especificaciones el dato de la presión del viento a la que deberá trabajar el tanque, lo que ahorrará cálculos, en su defecto deberá investigarse en los registros geográficos nacionales la velocidad y proseguir a definir la presión del viento de diseño como se indica a continuación.

#### Presión de diseño del viento

Se define a partir de la presión de estancamiento del viento corregida por dos factores, el primero  $C_e$  relaciona la geometría del tanque y por ende su aerodinámica, el segundo  $C_q$  relaciona la altura del mismo y a su vez relaciona la forma en que éste está expuesto a las ráfagas del aire.

$$P = q_s C_e C_q$$

Ecuación 3.1 Cálculo de presión de diseño del viento

---

<sup>10</sup> (Megyesy, 1993, pp.50)

La intensidad del viento es variable entre regiones y a su vez en alturas de una misma, pero tiende a seguir patrones dentro de una misma zona. Para efectos de cálculo homogeneizados se utiliza la velocidad máxima que se ha registrado en la zona en un periodo dado de tiempo, digamos los últimos 50 años, y siempre a una altura ya definida de *30 pies*.

Dependiendo la velocidad definida, se calcula una presión unitaria de estancamiento del viento de acuerdo a la siguiente forma.

Tabla 3.1 Velocidad del viento/Presión

Velocidad básica del viento, mph	70	80	90	100	110	120	130
Presión $q_s$ , lb/pie <sup>2</sup>	13	17	21	26	31	37	44

Posteriormente se define el factor de aerodinámica o también nombrado factor de forma de la siguiente manera (*Tabla 3.2*).

Tabla 3.2 Factor de forma

$C_q =$	Coeficiente de presión (factor de forma)	
	Torres cuadradas o rectangulares	1.4
	Torres hexagonales u octagonales	1.1
	Torres redondas o elípticas	0.8

Considerando aumentara **0.9** o **1** en el caso de una torre redonda si se tiene una gran cantidad de equipos exteriores que aumenten el arrastre.

Y finalmente se define el factor de altura y exposición como se observa en la *tabla 3.3* considerando una exposición **tipo C** a la más crítica en casos de situarse en una región plana y en su mayor parte abierta extendiéndose mínimo media milla a la redonda del tanque, y una exposición **tipo B** a la cual el terreno presente irregularidades, construcciones o bosques de una altura mínima de *20 pies* extendiéndose igualmente media milla a la redonda y con una concentración del *20%* o superior.

**Tabla 3.3 Coeficiente de exposición**

Altura sobre el piso, pies	Coeficiente Ce	
	Exposición C	Exposición B
0-20	1.2	0.7
20-40	1.3	0.8
40-60	1.5	1.0
60-100	1.6	1.1
100-150	1.8	1.3
150-200	1.9	1.4
200-300	2.1	1.6
300-400	2.2	1.8

En la *tabla 3.4* se muestra la comparación de la presión del viento de diseño resultante en cuatro casos diferentes expuestos a las mismas condiciones de velocidad del viento, altura de la torre y área de contacto, variando el factor geométrico y el factor de la exposición por tipo de zona.

Los casos son:

Caso 1: torre cuadrada con exposición tipo c

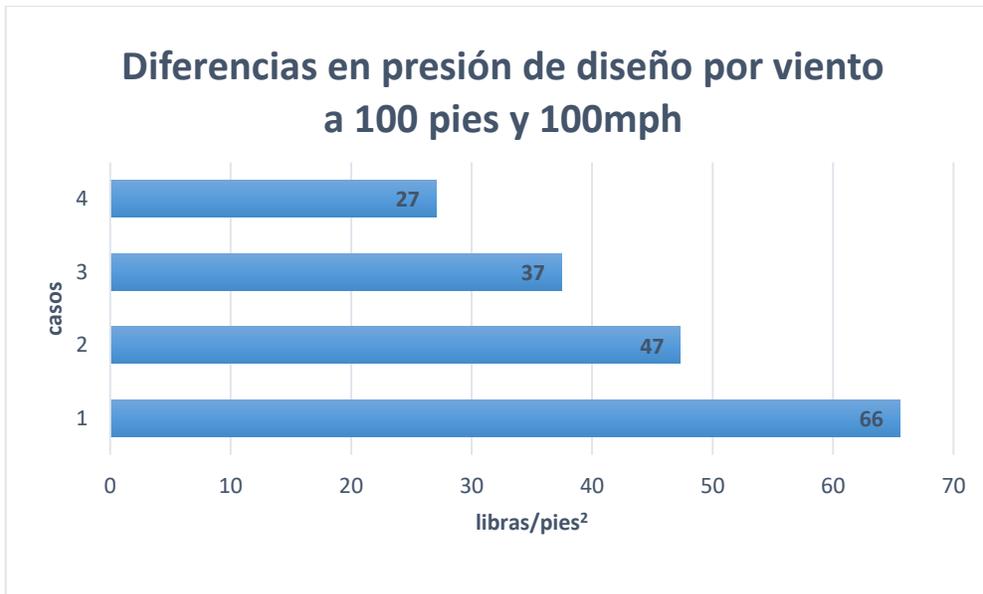
Caso 2: torre cuadrada con exposición tipo b

Caso 3: torre redonda con exposición tipo c

Caso 4: torre redonda con exposición tipo b

**Tabla 3.4 Iteraciones a diferentes exposiciones**

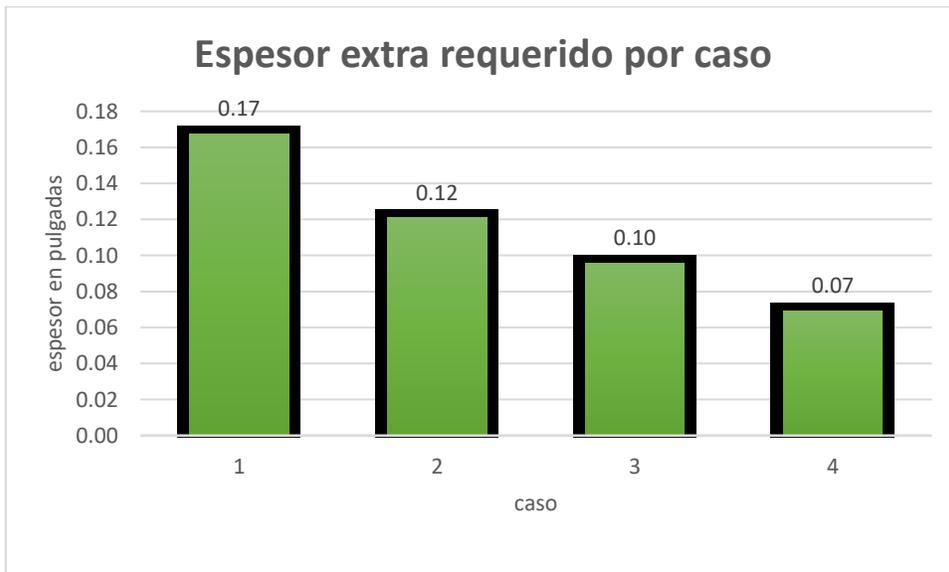
Altura total del tanque	<b>H</b>	100	<b>pies</b>
Diámetro del tanque	<b>D</b>	15	<b>pies</b>
Altura a la base	<b>h<sub>base</sub></b>	8	<b>pies</b>
Brazo de palanca	<b>h<sub>p</sub></b>	50	<b>pies</b>
Velocidad del viento a 30 pies	<b>Vel</b>	100	<b>mph</b>
Presión de estancamiento a 100 mph	<b>qs</b>	26	<b>lb/pies<sup>2</sup></b>
<b>Coeficiente de presión aerodinámico</b>			
Torre cuadrada	<b>C<sub>q</sub></b>	1.4	
Torre hexagonal	<b>C<sub>q</sub></b>	1.1	
Torre redonda	<b>C<sub>q</sub></b>	0.8	
<b>Coeficiente de altura a 100 pies</b>			
Exposición c	<b>C<sub>s</sub></b>	1.8	
Exposición b	<b>C<sub>s</sub></b>	1.3	



**Gráfica 3.1 Diferencias en presión de diseño por viento**

Podemos ver en la gráfica 3.1 y *grafica 3.2* que el aumento de la presión es proporcional al aumento del espesor requerido por lo que vemos que se duplica del caso 4 al caso 1 y se puede concluir por qué las torres altas generalmente son de construcción cilíndrica.

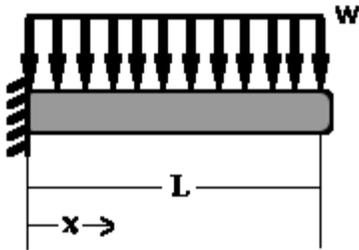
Esfuerzo de cedencia de un acero 1020	<b>S</b>	53600	<b>psi</b>
Eficiencia de soldadura	<b>e</b>	0.85	



**Gráfica 3.2 Comparación de espesores**

## Esfuerzos Cortantes

Una vez contando con la presión del viento de diseño es posible calcular los esfuerzos cortantes debidos a la misma y a su vez, el momento de volteo generado, recordando que el análisis de una torre alta viéndose afectada por la presión del viento es análogo al de una viga empotrada en voladizo soportando una carga uniforme (Figura 3.3).



**Figura 3.3 Viga empotrada en voladizo sometida a carga uniformemente distribuida**

El análisis de los esfuerzos cortantes será similar al de la fuerza aplicada a lo largo de la torre por la presión del viento, tomando en cuenta que el área de contacto será el producto de la altura desde el suelo de la torre por el diámetro de la misma.

En caso de contar con un tanque cuya construcción presente diferentes diámetros, el cálculo de los esfuerzos cortantes se debe efectuar sumando cada sección de diferente diámetro, y por lo tanto área, y posteriormente multiplicándolas por la presión, considerada de igual magnitud a lo largo del tanque.

Adicional al cuerpo del tanque es necesario calcular la presión ejercida en los aditamentos extras del tanque como pudiesen ser escaleras, plataformas o conexiones de gran magnitud dejando fuera a consideración del diseñador los aditamentos de menor tamaño o de poca influencia en el aumento del área.

## Momento de Volteo

El momento de volteo se analiza como el producto de los esfuerzos cortantes con un brazo de palanca.

Al definir la carga como uniforme se toma como brazo de palanca la distancia del empotramiento, en este caso el anclaje de las vigas de soporte al piso, a la mitad de la sección a analizar.

Aunque es posible analizar el tanque como una sola sección, es posible que la diferencia de diámetros en la construcción y la adición de aditamentos de gran tamaño obligue un análisis conjunto de diferentes secciones.

En estos casos el brazo de palanca debe utilizarse de la misma forma en que se ha propuesto, considerando la distancia del empotramiento a la mitad de cada sección.

Independientemente si se analiza el tanque por secciones o como un solo bloque, mediante esta metodología se obtendrá el momento máximo de volteo.

Esta magnitud es la mayor carga que el presente evento puede generar y está localizada en la parte inferior del tanque, más precisamente en las vigas o cualquier estructura que lo soporte por lo que es relevante para su cálculo, pero como fue expuesto anteriormente, en este trabajo no se abordará ese tema.

El momento de volteo que afectará el tanque será el presentado a la altura de la unión con el soporte del tanque y el tanque en sí, generalmente encontrándose en la base del mismo.

$$M_T = M - h_T (V - 0.5 P_w D h_T)$$

**Ecuación 3.2 Cálculo de momento de volteo por presión del viento a una torre alta**

Donde:

$h_T$  = Altura a la unión del tanque con los soportes

$V$  = Cortante

$P_w$  = Presión del viento

Al presentar el comportamiento de una viga empotrada en voladizo, el momento irá disminuyendo conforme la altura aumente por lo que este momento será menor al máximo presentado.

En caso de que se consideren espesores diferidos a lo largo del tanque, es recomendable verificar la divergencia de éste momento en el tanque.

Con el momento de volteo a la línea tangencial de la base es posible calcular los esfuerzos ejercidos en éste y verificar que los espesores propuesto sean los correctos o en su defecto ajustarlos.

Donde:

M=Momento de volteo

T=Espesor

R= Radio interno del contenedor

$$S = \frac{12M}{R^2 \pi t}$$

**Ecuación 3.3 Cálculo de esfuerzos por el momento de volteo de un tanque cilíndrico**

### Peso del recipiente

El segundo caso en generar esfuerzos extra a los supuestos por la presión interna es el del peso del propio recipiente y su contenido.

Generan esfuerzos de compresión excepto cuando se presenta el caso de excentricidad, la cual se trata más adelante, en general los esfuerzos son insignificantes especialmente trabajando con gases.

Hay tres tipos diferentes de pesos a calcular, *instalación, operación y prueba*.

Los esfuerzos generados por el peso de operación y prueba deberán añadirse a otros casos en el cálculo de esfuerzos combinados, el cual se tratará más adelante.

La forma de calcular los esfuerzos en tanques cilíndricos es la siguiente:

$$S = \frac{W}{ct}$$

**Ecuación 3.4 Cálculo de esfuerzos por peso en recipientes cilíndricos**

Donde “c” representa la circunferencia media del casco y “t” representa el espesor de pared.

### Vibración

El tanque expuesto a la presión del viento tiende a vibrar y un periodo de vibración prolongado puede llevar a la fatiga el material por lo que es importante limitar su periodo, de igual forma un sismo generará vibraciones en el tanque.

La forma más común de calcular el periodo de vibración permitido es en base a la deflexión máxima permitida del tanque, la cual se tratará más adelante (ver página 58), la vibración armónica suele obviarse al ser generalmente impedida por los soportes del tanque.

El método para corroborar si el periodo de vibración es permitido es el siguiente:

1. Calcular el periodo de vibración real en base a la ecuación 5.

$$T = 0.0000265 \left( \frac{H}{D} \right)^2 \sqrt{\frac{wD}{t}}$$

Ecuacion 3.5 Cálculo del periodo de vibración real de un tanque cilindrico

donde:

H=Altura total

D=Diámetro medio del tanque

w=Peso del tanque por unidad de altura (Pies)

t=Espesor de pared en la base del tanque

2. Calcular el periodo de vibración máximo permitido en base a la ecuación 6.

$$T_a = 0.80 \sqrt{\frac{WH}{Vg}}$$

Ecuación 3.6 Cálculo del periodo de vibración máximo permitido para una torre alta

Donde:

W=Peso total del recipiente exceptuando soportes

V=Esfuerzos cortantes (ocasionados por el aire o por sismos)

g= Gravedad

3. En caso de sobrepasar el periodo, ajustar relación de altura y diámetro

La vibración afecta principalmente a los soportes del tanque por lo que su cálculo se relaciona a los valores de los soportes.

Deberá considerarse el caso de sismo como de viento para definir el periodo máximo permitido.

## Carga Sísmica

El diseño de un tanque deberá asegurar la resistencia a la carga producida por un movimiento sísmico, a continuación, se presenta la forma de analizar los efectos del sismo en el tanque basada en la norma ANSI 58.1 de 1982.

El efecto del sismo se asemeja al de una viga empotrada en un extremo que presenta una carga uniformemente incremental en dirección del extremo libre, generando esfuerzos cortantes a lo largo del tanque y un momento de volteo en la base.

Con base en lo anterior, es posible relacionar los efectos de un sismo con los presentados por la presión del viento, la diferencia reside en la forma de calcular los esfuerzos cortantes.

### Cálculo de Cortantes Sísmicos de Diseño

La definición de los cortantes sísmicos se ve regida por el periodo de vibración natural del tanque, la zona sísmica en que se encuentre el tanque (dividiéndose en 4 zonas, mientras más propensa sea la zona a sísmos, mayor el coeficiente) y el peso del tanque; el método para obtenerlos es el siguiente:

1. Calcular el periodo de vibración real del tanque (Explicado en la sección anterior)
2. Determinar el coeficiente de vibración  $C$ , el factor de la zona sísmica  $Z$  y el coeficiente de la resonancia estructural de la zona  $S$  de la siguiente forma.

$$C = \frac{1}{15\sqrt{T}} = \frac{0.067}{\sqrt{T}}$$

Ecuación 3.7 Cálculo de constantes  $C$ ,  $Z$  y  $S$ .

$Z$ = Factor sísmico

0.2875 para zona 1; 0.375 para zona 2; 0.750 para zona 3; 1 para zona 4

$S$ = 1.5 si  $T \leq 2.5$  y

=  $1.2 + .24 T - .048(T)^2$  si  $T > 2.5$

3. Verificar que el producto de  $CS$  sea menor a 0.14, de lo contrario verificar dimensiones del tanque.

4. Determinar el cortante de la siguiente forma (Ecuación 8).

$$V = 2ZCSW$$

Ecuación 3.8 Cálculo de cortante para una torre alta

Deberá tomarse en cuenta que la presente ecuación se basa en una norma de construcción civil <sup>11</sup> la cuál considera factores de seguridad tanto por ocupación humana como fuerza horizontal los cuales fueron ya aplicados en la ecuación resultando en un factor dos.

Cálculo de momento de volteo

Con la magnitud del esfuerzo cortante y el periodo de vibración natural se puede obtener la fuerza horizontal que ejerce el movimiento sísmico en la parte superior del tanque.

Tomando en cuenta esta fuerza y los esfuerzos cortantes es posible calcular el momento de volteo total y por zonas con la ecuación de vigas empotradas en voladizo con una carga incremental.

$$M = \left[ F_t H + (V + F_t) \left( \frac{2H}{3} \right) \right]$$

$$M_x = M \left( \frac{X}{H} \right) (Aprox.)$$

Ecuación 3.9 Cálculo de momento de volteo por fuerza sísmica para una torre alta

Donde:

X= Distancia del suelo a la región a analizar

Posteriormente se puede proseguir a calcular los esfuerzos por compresión y tensión que este momento generará en el tanque de la misma forma en que se calculó para la presión del viento.

---

<sup>11</sup> (Megyesy, 1993, pp 59.)

## Carga excéntrica

Como fue tratado anteriormente, el tanque se ve afectado por su propio peso y el del equipo adicional generando esfuerzos de compresión en sus paredes.

Los tanques altos suelen estar conectados exteriormente a equipo adicional como escaleras o conexiones externas, en estos casos la distribución asimétrica de equipo de gran tamaño genera un momento debido a la excentricidad (fuera de una línea vertical imaginaria que pasa por el centro del cuerpo) de la posición del equipo, esto conlleva a la flexión debido al momento y a esfuerzos de tracción en adición a los de compresión por peso concéntrico.

En caso de contar con este tipo de equipo deberán calcularse los esfuerzos resultantes para su posterior análisis en una situación de esfuerzos combinados.

La magnitud del momento generado dependerá de la excentricidad, que es la distancia desde el eje vertical del eje del tanque al punto más alejado del equipo, y del peso del equipo.

La excentricidad puede despreciarse en equipos y conexiones pequeñas, y en caso de contar con más de un equipo colocado excéntricamente, deberán sumarse las resultantes en un momento combinado.

## Estabilidad elástica

El estudio de la estabilidad elástica del tanque consiste en verificar la rigidez de sus paredes, la inestabilidad produce fallas localizadas a un esfuerzo de compresión menor al de cedencia debido al efecto del ovalamiento en paredes sin rigidez suficiente.

La rigidez dependerá de la relación entre el espesor de pared y el diámetro del tanque.

En caso de no contar con una rigidez que asegure la estabilidad elástica será necesario reforzar el tanque con elementos rigidizantes como son los llamados anillos atezadores, que básicamente consisten en refuerzos en forma de anillos colocados concéntricamente tanto longitudinalmente como circunferencialmente.

El incremento en la rigidez dependerá del área transversal del anillo y de la separación entre cada uno de ellos.

Deberá considerarse en estos casos a los soportes como unidades rigidizantes.

## Deflexión

Un contenedor a presión dispuesto en forma de torre alta y sometido a la presión del viento presenta un momento de volteo, como se trató anteriormente.

Adicionalmente al cálculo de esfuerzos generados por dicho momento, será necesario asegurar que el tanque cumpla con un criterio establecido respecto al comportamiento elástico de la deflexión en torres.

Éste menciona que la deflexión en una torre no deberá sobrepasar la relación de 6 pulgadas, medidas como el desplazamiento horizontal del eje vertical de la torre en el punto más alto de la misma, por cada 100 pies de altura de la misma.

La forma de calcular la deflexión en la torre está dada por el producto de la presión del viento, el área de contacto en el tanque y el producto cubico de la altura de tanque dividido entre el producto del módulo de elasticidad por el momento de inercia del tanque.

Se observa que la variable más influyente en la deflexión es la altura del tanque.

## 3.6 Cálculo de Esfuerzos Combinados

Para concluir el diseño de un tanque contenedor alto sometido a presión interna se deberán de integrar los esfuerzos resultantes a las cargas anteriormente mencionadas de forma que se pueda garantizar el correcto desempeño del tanque a todos los eventos esperados dentro de la vida útil del tanque.

Para éste tipo de tanques, es necesario calcular en conjunto los esfuerzos generados por la presión interna, el peso del tanque y su contenido, la excentricidad de sus accesorios, en caso de presentarse, la presión del viento y los esfuerzos generados por sismos, de acuerdo a la *tabla 3.5*.

Condición:	Movimiento sísmico / Presión del viento	Peso del recipiente	Presión interna	Carga excéntrica *
Genera	Momento de volteo	Carga estática	Carga estática	Momento de volteo
Tipo de esfuerzo	(+) y (-)	(-)	(+)	(+) y (-)

donde:

sólo debe considerarse el de mayor magnitud

tipo de esfuerzo dependerá del lado del tanque

\* de presentarse el caso

(+) Tensión

(-) Compresión

Tabla 3.5 Condición de esfuerzos para eventos combinados

Los esfuerzos que rijan los cálculos de espesor del tanque dependerán de los requerimientos particulares del proyecto en cuestión.

Como se observa en la *tabla 3.5*, los esfuerzos generados por movimientos sísmicos y la presión del viento no deberán sumarse y para efectos de cálculo bastará utilizar el de mayor magnitud debido a que no se considera que ambos eventos ocurran al mismo tiempo.

Así mismo, el cálculo de esfuerzos combinados deberá efectuarse en diversas zonas del tanque (Ver *tabla 3.6*), debido a que los esfuerzos se concentran principalmente en ciertas zonas como la inferior o la junta con el soporte o faldón, dando pie a la posibilidad de espesores diferidos.

La diferenciación de espesores es importante debido a que impactará en gran medida al costo final del material y de construcción del tanque.

Debido a la naturaleza de las cargas a las que se expone el tanque, los momentos generarán mayores esfuerzos en la sección inferior que en la superior, y la presión interna generalmente será uniforme a lo largo del tanque (exceptuando los casos de presión hidrostática), aunando a la diferenciación de esfuerzos por zonas, también se puede afirmar que los esfuerzos serán diferentes dependiendo la condición en la que se encuentre el tanque, armado, bajo prueba o en operación, por lo que se deberán calcular bajo cada condición (Ver *tabla 3.6*).

Tabla 3.6 Casos de analisis de esfuerzos

Tipo de Carga	Presión interna	Peso	Momento viento/sismo	Momento excéntrico
<b>Sección a analizar</b>				
Inferior (punto más bajo del tanque)	Máxima	Máximo (fluido + tanque)	-	-
Junta de soporte con cabeza inferior	Si	Si	Máximo	Máximo de presentarse
Junta de cabeza inferior con casco	Si	Si	Si	Si de presentarse
Sección/es que presente/n cambio en diámetro	Si	Si	Si	Si de presentarse
<b>Condición</b>				
Armado	-	Tanque y soportes sin fluidos	Si	Si de presentarse
Prueba	Presión de prueba (hidrostática)	Tanque + agua de prueba	Si	Si de presentarse
Operación	Presión de diseño	Tanque + fluido de operación	Si	Si de presentarse

## Conclusiones por capítulo

Esta sección refirió los parámetros que usualmente se deben calcular en el diseño de tanques a presión, si bien la presión y estabilidad por peso propio deben calcularse obligatoriamente y las cargas adicionales considerarse, el método, la presión de diseño y la relevancia de las cargas adicionales quedan a consideración del diseñador. En este capítulo se mostró la forma más común de calcular las cargas y espesores requeridos.

---

# CAPÍTULO IV

## CASO DE ESTUDIO

---

Como se ha mencionado anteriormente, el presente trabajo se basó en un proyecto realizado por parte de un equipo del Departamento de Diseño, parte del Centro de Ingeniería Avanzada “CIA” de la Facultad de Ingeniería UNAM.

El presente capítulo refiere la resolución del diseño del tanque contenedor de dicho proyecto desde el punto de vista del diseñador encargado de ese sistema, como miembro del equipo de diseño de dicho proyecto.

### 4.1 Especificaciones del Proyecto

#### *Introducción*

El presente subcapítulo tiene como propósito referir las especificaciones y requerimientos constructivos del tanque, así como describir aspectos generales del proyecto que afectan directamente los criterios de diseño.

Proyecto

#### *Propósito*

El propósito del diseño y construcción del tanque contenedor es ser utilizado como un reactor para biodigestión utilizando triturado de nopal, el cual es parte de un conjunto de sistemas cuyo objetivo es generar energía eléctrica a partir de un recurso limpio, renovable y endémico de una comunidad de la Ciudad de México.

La justificación de recurrir a esta alternativa es que al encontrarse dicha comunidad en una zona de difícil acceso por cuestiones geográficas y sociales, el suministro de energía eléctrica de manera convencional es más caro del promedio en la ciudad, aunado a esto recientemente se han impulsado proyectos de energías alternativas debido a factores como el cambio climático, agotamiento de hidrocarburos y encarecimiento de combustibles, por lo que la generación de energía eléctrica a partir de fuentes alternativas parece una opción atractiva.

## *Empresa*

El proyecto de generación de energía está a cargo de una empresa privada de origen mexicano dedicada a la ingeniería ambiental. El proyecto fue encargado por parte de una delegación de la Ciudad de México, encargada de proveer los fondos para su desarrollo e implementación. La ingeniería y el diseño del proyecto fue encargada a el Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica (CDMIT) de la Universidad Nacional Autónoma de México, ubicado en el Centro de Ingeniería Avanzada (CIA).

## *Sistemas*

El proyecto integral está conformado por tres sistemas principales subdivididos en varios sistemas secundarios, tomando como inicio del ciclo el ingreso de nopal para su trituración y como fin la generación de energía eléctrica producida por un motor de gas.

El proceso que se espera llevar a cabo es el siguiente:

Se pretende el ingreso de hasta 5 toneladas diarias de una mezcla de nopales tanto enteros como restos de nopales pelados, espinas y bagazo, posteriormente trituración del mismo hasta contar con una mezcla homogénea y líquida la cual será impulsada a la parte alta del contenedor a través de una bomba, ya dentro de éste se acumulará y se mantendrá por cierto periodo de tiempo tomando en cuenta que se debe mantener una recirculación y temperatura constante, esto será llevado a cabo por un serpentín interno y un sistema de paletas que mantengan un flujo constante.

Durante éste periodo se dispondrá de instrumentación en el tanque para conocer la temperatura y presión, entre otras variables de la biomasa ya que se pretende que el tanque contenedor sirva también como un laboratorio para conocer las condiciones óptimas de operación y reacciones a diferentes catalizadores en futuras operaciones.

Posteriormente se utilizará el biogás generado para hacer funcionar una turbina de gas que proveerá de energía eléctrica al mercado de nopal donde será instalado el tanque y a la comunidad cercana a éste.

El primer sistema es la trituración, el cual incluye los siguientes subsistemas:

- Alimentación de nopal entero y restos
- Trituración de nopal
- Unidad de poder (Bomba)
- Bombeo al tanque contendor

El segundo sistema conforma al tanque contenedor y es el de mayor relevancia para el presente trabajo. Se divide en:

- Tanque contenedor
- Soporte estructural del tanque
- Intercambiador de calor
- Recirculación
- Accesorios
- Corrosión

Siendo de primordial relevancia los subsistemas de tanque, corrosión y accesorios al afectar directamente los criterios de diseño.

El tercer sistema es la conversión de biogás a energía, este sistema no fue parte del trabajo encargado al CDMIT por lo que no se tratará más en lo referente a éste.

### *Sitio*

Es importante hacer una descripción del sitio en donde se llevará a cabo la instalación, transportación y operación del tanque contenedor ya que es un factor que influye de forma directa el diseño del tanque contenedor.

El sitio final de operación es un centro de acopio de nopal. La instalación se realizará dentro del terreno en un espacio relativamente amplio y descubierto que permitirá la instalación del equipo y operación, sin encontrarse alejado de la zona de disposición de residuos de nopal.

El centro de acopio tiene gran afluencia de personas en todos los horarios, por el día ingresan los mercaderes a descargar sus productos, generalmente en vehículos medianos tipo pick-up y camiones pequeños. Hay vendedores de menudeo y mayoreo a lo largo de la jornada y la zona conurbada al mercado es habitacional. Es importante recalcar la cercanía ya que se debe tomar en cuenta al ajustar el factor de seguridad al tratarse de un recipiente a presión lo cual, en caso de un malfuncionamiento, puede presentar una amenaza a la integridad de las personas cercanas al sitio.

### Ingreso al lugar

La ubicación se encuentra en una delegación extensa de la Ciudad conocida por ser una de las más rurales y el ingreso al centro de acopio sólo puede realizarse por zonas de vialidades secundarias, calles estrechas en las que las personas de la localidad acostumbran dejar sus

automóviles estacionados, cableado de luz y teléfono y en general malos caminos por lo que se dificulta el transporte en vehículos sobredimensionados. Esto debe tomarse en cuenta con el diseño del tanque contenedor para evitar sobrepasar ciertas dimensiones.

### *Especificaciones del tanque*

#### Especificaciones del tanque

- Volumen total del tanque – 100[m<sup>3</sup>] – tolerancia de  $\pm 0.5$ [m<sup>3</sup>]
- Volumen de líquidos – 70[m<sup>3</sup>]
- Volumen de control de gases – 30[m<sup>3</sup>]
- Altura máxima del tanque – 7[m]
- Diámetro máximo en el tanque 6[m]

#### Especificaciones de operación

- Temperatura de operación – 55°C  $\pm$  2°C
- Fluido a contener- triturado de nopal
- Presión de operación del biogás – 1.3 [ATM]

### *Limitaciones y Requerimientos*

- El tanque debe de ser ensamblable y des ensamblable en caso de que en un futuro se quisiera retirar.
- Las secciones del tanque deben de poder ser transportadas al sitio en vehículos de carga medianos.
- El sitio es de difícil acceso, con vías de 2.5[m] de ancho y 2.7[m] de altura.
- Debe tener entrada hombre superior para posteriores pruebas.
- Ensamble en sitio
- Líneas de acceso y descarga

## 4.2 Planteamiento del problema

El presente subcapítulo tiene como finalidad demostrar cómo fueron analizadas las especificaciones y consideraciones y la forma en que se prosiguió a jerarquizar los requerimientos iniciales.

Inicialmente se clasificaron los requerimientos del cliente en la jerarquía Kano como se puede ver en la *tabla 4.1*

Tabla 4.1 Clasificación de Kano

<b>1. Expecters</b>	Mantener dimensiones dentro del límite establecido. Garantizar contención segura de los fluidos especificados.
<b>2. Unspokens</b>	Garantizar cumplimiento de NOM 020. Garantizar cumplimiento ASME BPVC.
<b>3. Spokens</b>	Capacidad de ser ensamblado en sitio. Capacidad de ser desensamblado y posteriormente re ensamblado. Contar con capacidad de ser transportado en vías de difícil acceso. Contar con entrada hombre superior. Cumplir especificaciones previamente mencionadas. Resistir con seguridad un fluido altamente corrosivo. Contar con entradas y salidas en sitios especificados. Disminuir la magnitud del golpe de ariete.
<b>4. Exciters</b>	Contar con una medida de verificación de correcto nivel de líquido/gas. Economía en costo de manufactura. Posibilidad de utilización de materiales compuestos.

De esta forma fue posible visualizar el grado de importancia de los requerimientos del proyecto con el fin de no comprometer un requerimiento de una jerarquía superior en la búsqueda del cumplimiento de un requerimiento de nivel inferior.

Como consideración adicional en reuniones presenciales con el cliente nos fue informado oralmente que les gustaría que el tanque fuera manufacturado en un material compuesto (haciendo alusión primordialmente a fibras industriales como la fibra de vidrio).

Posteriormente se prosiguió a un análisis de las características de las necesidades y requerimientos con el fin de identificar el tipo de diseño que se debía implementar (*Tabla 4.2*).

En base al análisis se llegó a la conclusión de la necesidad de la realización de un diseño no convencional con el fin de satisfacer uno o varios de los requerimientos clasificados como Spokens (los cuales forzosamente deben de cumplirse por su nivel de jerarquía).

**Tabla 4.2** Requerimientos no convencionales

Grado de Necesidad	Requerimientos
Alta	Capacidad de ser desensamblado y posteriormente re ensamblado.
Alta	Contar con capacidad de ser transportado en vías de difícil acceso (Medidas especificadas por medición posterior en sitio).
Baja (Sugerencia)	Posibilidad de utilización de materiales compuestos.

Se prosiguió a la agrupación de requerimientos basado en sus características con el fin de tener una mejor organización y visualización (*Tabla 4.3*).

Tabla 4.3 a) Agrupación de requerimientos "Performance"

<b>Performance</b>	Contención de presión segura a parámetros establecidos
	Resistir fluido corrosivo
	Desensamblable y Reensamblable
	Facilidad en transporte
	Ensamblable en sitio
	Disminución de golpe de ariete

Tabla 4.3 b) Agrupación de requerimientos "Limitantes"

<b>Limitantes</b>	Volumen interno total
	Diámetro y altura máximos
	Dimensiones máximas de secciones transportables

Tabla 4.3 c) Agrupación de requerimientos "Adicionales"

<b>Adicionales</b>	Entradas y salidas especificadas
	Entrada Hombre
	Uso de material compuesto
	Verificación de nivel

Posteriormente se prosiguió a la recopilación de información, aunque debe notarse que este proceso continuó durante todo el diseño.

Inicialmente las fuentes consultadas fueron las siguientes (*Tabla 4.4*):

**Tabla 4.4 Fuentes inicialmente consultadas**

Fuentes	Observaciones
ASME BPVC sección VIII-2 “Reglas alternativas”	En un principio se planteó basarse en la división 2 considerando las reglas alter- nas como suficientes
ASME BPVC sección VIII-1	Posteriormente se identificó muchas re- glas referentes a la primera división del código
Manual de recipientes a presión “Diseño y construcción” Eugene Megyesy	Se basó los cálculos de diseño del tan- que en este manual.
Consulta en precios con proveedores de láminas metálicas.	
Consulta de recubrimientos con un especia- lista en materiales	
Artículos científicos relacionados a la cons- trucción y operación de Biodigestores	

Adicionalmente se realizó una visita al sitio de operación destinado al tanque con el objetivo de conocer de forma presencial las características de la locación y la forma de ingreso al mismo.

Las conclusiones a las que se llegaron tras la visita fueron las siguientes:

- La zona de operación del tanque a presión es una zona con alta concentración de personas debido a las actividades mercantiles que se llevan a cabo.
- El flujo del viento abierto se prevé por dos direcciones considerando según el código BPVC.
- El acceso al sitio es efectivamente complicado y se consideran los valores previamente obtenidos de dimensiones máximas en vías de acceso como adecuadas.
- Debido a la zona densamente habitada se considera aumentar el factor de seguridad.

### 4.3 Generación de conceptos

El presente subcapítulo expone las ideas generadas enfocadas en la satisfacción de los requerimientos.

Inicialmente se concertó una reunión con el equipo de diseño del proyecto general, en la cual se realizó una lluvia de ideas de la manera en que se podría satisfacer los requerimientos.

#### *Conceptos*

La *tabla 4.5* agrupa los conceptos que inicialmente se consideraron podrían satisfacer los requerimientos.

Se puede observar que los requerimientos clasificados como *Limitantes* y *Adicionales* no requirieron ser transformados en requerimientos adicionales debido a su naturaleza por lo que se estableció que únicamente serían satisfechos o no.

Tabla 4.5 a) Generación de conceptos "Performance"

<b>Performance</b>	Contención de presión segura a parámetros establecidos	Diseño de espesor con factor de seguridad aumentado	Diseño de espesor tomando en cuenta código ASME BPVC
	Resistir fluido corrosivo	Selección de recubrimiento resistente a corrosión	Selección de material resistente a corrosión
	Desensamblable y Reensamblable	Secciones verticales bridadas	
	Facilidad en el transporte	Geometría que permita anidación tipo "Matrushka"	Aumentar número de secciones disminuyendo dimensiones
	Ensamblable en sitio	Soldado en sitio	Secciones Bridadas
	Disminución de golpe de ariete	Entrada de líquido en posición alta con difusores	Entrada de líquido en posición baja

Tabla 4.5 b) Generación de conceptos "Limitantes"

<b>Limitantes</b>	Volumen interno total	Cumple/No cumple
	Diámetro y altura máximos	
	Dimensiones máximas de secciones transportables	

Tabla 4.5 c) Generación de conceptos "Adicionales"

<b>Adicionales</b>	Entradas y salidas especificadas	Cumple/No cumple
	Entrada Hombre	
	Uso de material compuesto	
	Verificación de nivel	

Entre los conceptos propuestos inicialmente, los más críticos se consideraron los relacionados a los requerimientos no convencionales de alto grado de importancia.

Debido a la necesidad expresada por parte del cliente de incluir en el tanque contenedor la capacidad de ser des-ensamblado y posteriormente reensamblado en otra locación se propuso que el PV se compusiera de diversas secciones horizontales las cuales tuvieran la capacidad de unirse entre sí por medio de bridas, de ahora en adelante se referirá a este arreglo como *secciones bridadas*.

Se consideró el arreglo de bridas debido a que se conoce su efectividad y confiabilidad en aplicaciones en las cuales sean sometidas a presión interna y contención de gases.

Adicionalmente el arreglo de *secciones bridadas* combinado con una selección de geometría cónica en el cuerpo del tanque permitiría un empaquetamiento para transporte anidado el cual reduce el volumen total de partes para transportar reduciendo costos y tiempo por transporte.

## Sketches

Inicialmente se realizaron sketches a mano y en CAD's para ayudar a la presentación y visualización de los conceptos, a continuación, se presentan los más representativos.

La *figura 4.1* presenta un sketch de la propuesta conceptual de secciones bridadas y anidación tipo "Matrushka" mientras que la *figura 4.2* presenta un sketch de la forma de transportación asociada a este concepto, nótese que la "facilidad del transporte" dependerá de las dimensiones máximas del segmento más grande.

En la *figura 4.3* se aprecia más detalladamente mediante un CAD, la forma conceptual propuesta para la anidación y como se propuso se introdujera cada sección dentro de la otra, de esta manera se esperaba reducir los vehículos requeridos en el transporte del tanque.

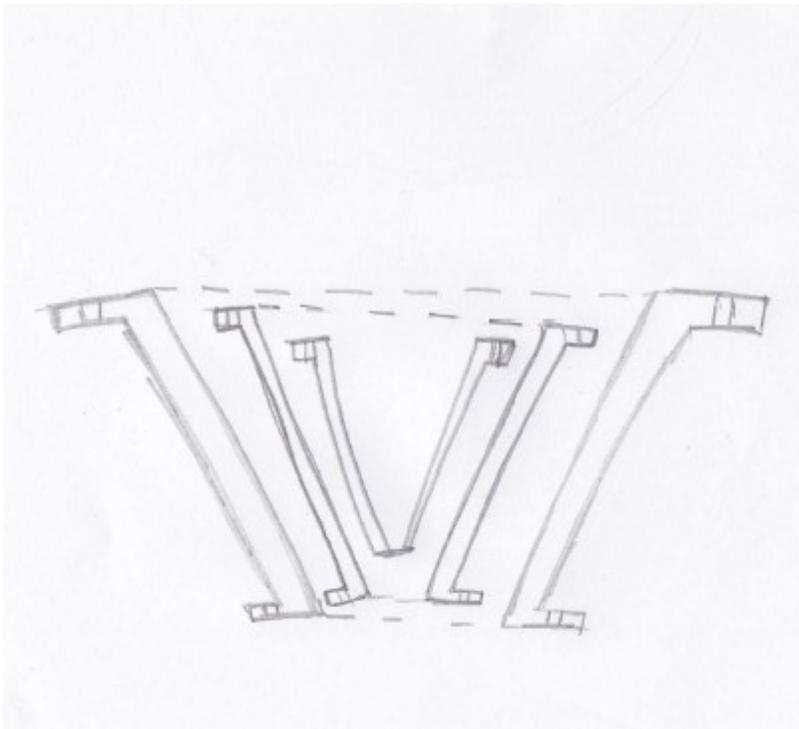


Figura 4.1 Sketch "anidación de secciones bridadas tipo matrushka"

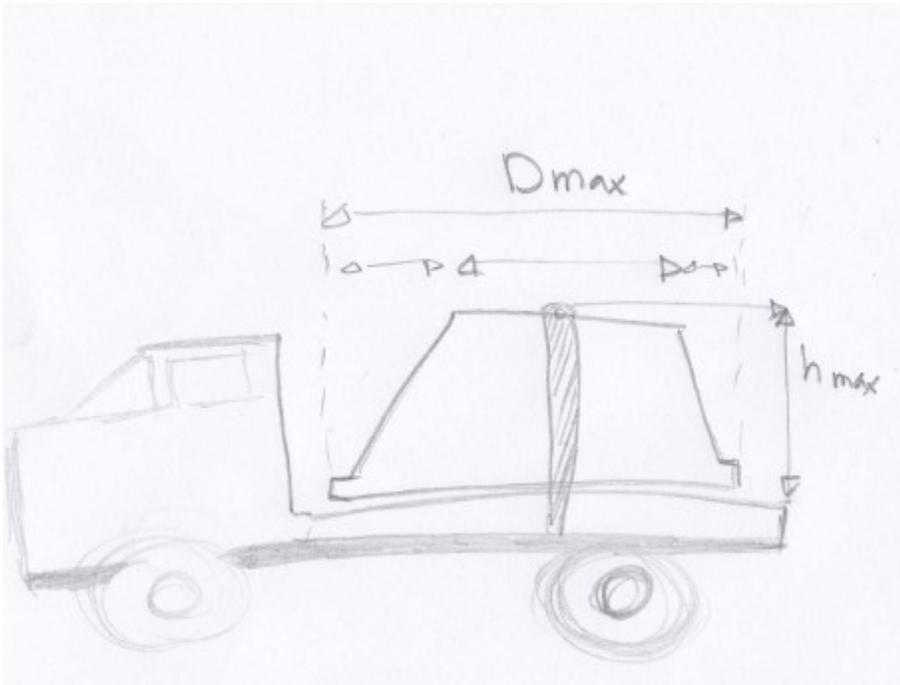


Figura 4.2 Sketch "forma de transporte"

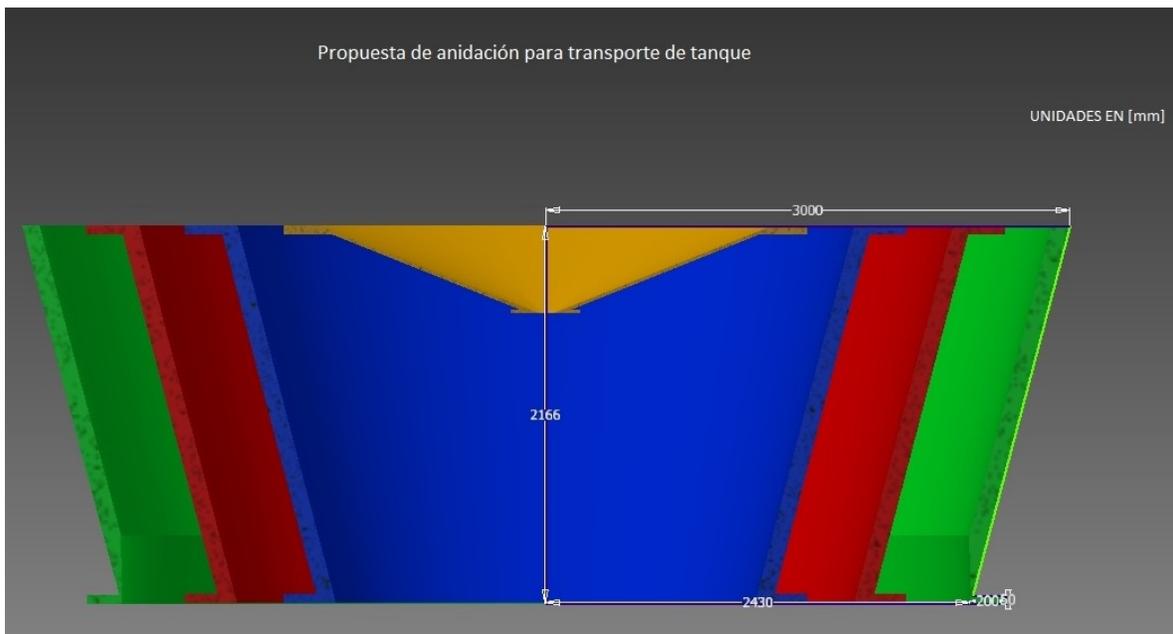


Figura 4.3 CAD "Propuesta de anidación para el transporte"

La figura 4.4 muestra la adición de varios conceptos como son los siguientes:

- Sustitución de tapa por “bolsa de gas”
- Ingreso de fluido por difusores colocados en la sección superior
- Adición de 2 mirillas para verificar nivel de líquido de forma visual
- Serpentin interno (No es parte de este trabajo)

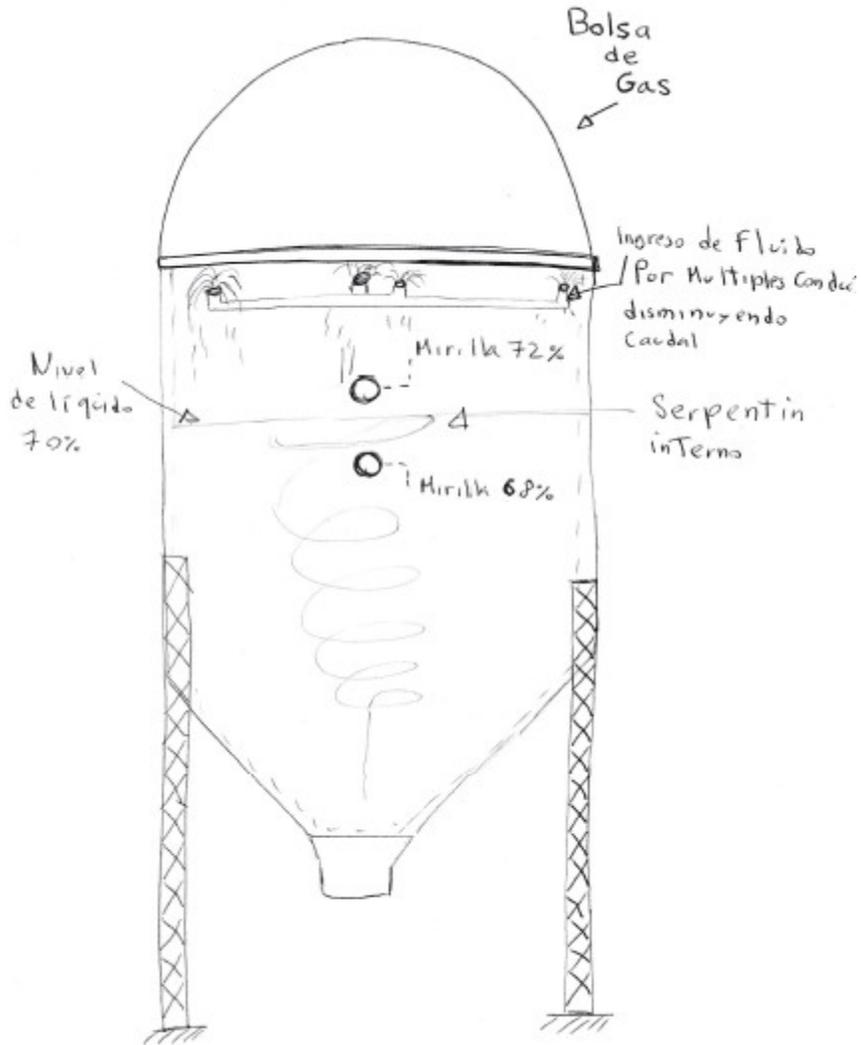


Figura 4.4 Sketch “conceptos propuestos del tanque a presión”



Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")												
					Cumplimiento de BPVC	selección aleación de acero al carbon	selección aleación de acero inoxidable	selección de material fibra de vidrio	utilización de bolsa de gas en tapa	Incrementar factor de seguridad	Implementación de secciones bridadas	Empaquetamiento de módulos "matrushka"	Implementación de mirilla	Entrada de líquido en posición baja	Entrada en posición alta y por difusores	Número de secciones	Selección de geometría del tanque
1	9	14.7	5.0	Contención segura de presión	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○
2	9	11.8	4.0	Resistir fluido altamente corrosivo	○	○	○	○	▲	○							
3	9	11.8	4.0	Cumplimiento de Normas	○	○	○		▲	▲				▲	▲		▲
4	9	11.8	4.0	Ensamblable en sitio	▲	○	○		○		○	▲		▲		○	○
5	9	11.8	4.0	Desensamblable en sitio					○		○	▲		▲		○	▲
6	9	5.9	2.0	Tranquilidad social									○				
7	9	8.8	3.0	Disminución de golpe de ariete	▲					▲				○	○		
8	9	2.9	1.0	Utilización de material compuesto	○			○	▲	▲							
9	9	11.8	4.0	facilidad de transporte					○	▲	○	○				○	▲
10	9	8.8	3.0	Economía	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Figura 4.6 Casa de la calidad "requerimientos contra características"

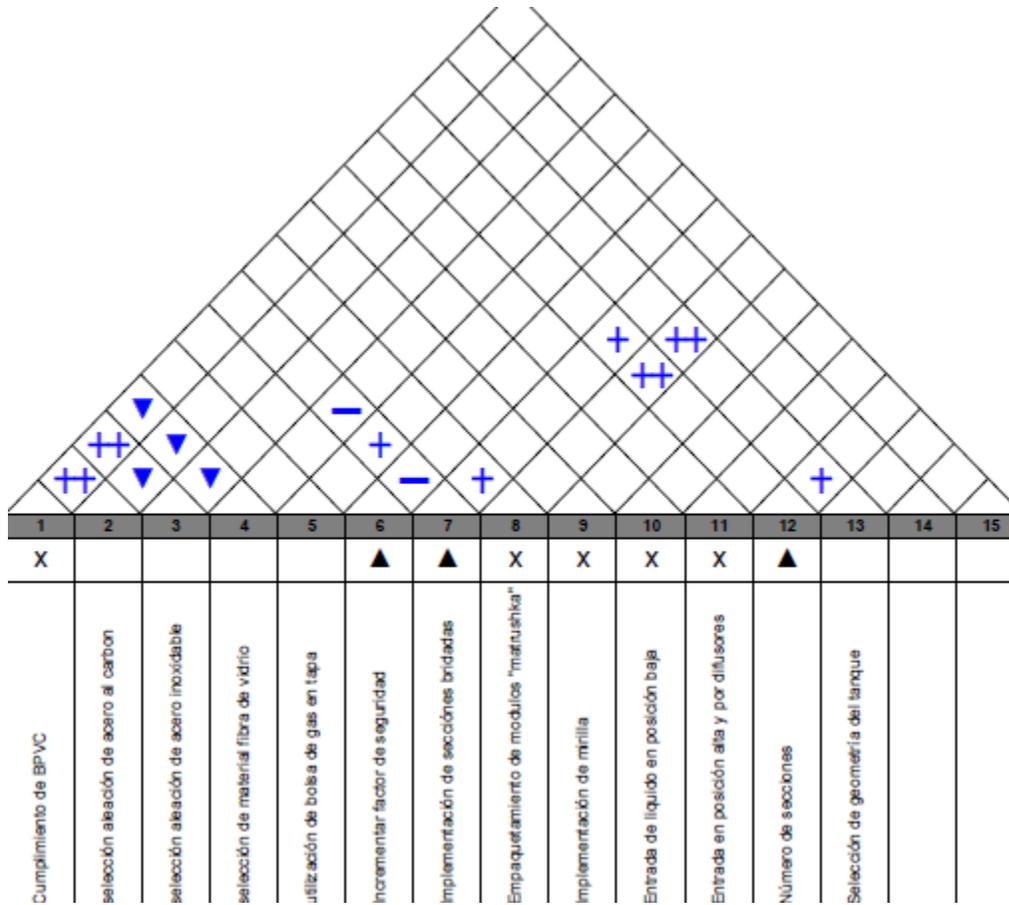


Figura 4.7 Casa de la calidad "afinidad entre características"

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")
1	9	14.7	5.0	Contención segura de presión	
2	9	11.8	4.0	Resistir fluido altamente corrosivo	
3	9	11.8	4.0	Cumplimiento de Normas	
4	9	11.8	4.0	Ensamblable en sitio	
5	9	11.8	4.0	Desensamblable en sitio	
6	9	5.9	2.0	Tranquilidad social	
7	9	8.8	3.0	Disminución de golpe de ariete	
8	9	2.9	1.0	Utilización de material compuesto	
9	9	11.8	4.0	facilidad de transporte	
10	9	8.8	3.0	Economía	

**Figura 4.8 Casa de la calidad “requerimientos del cliente”**

La casa de la calidad compara, como se muestra en la *figura 4.6*, los requerimientos del cliente con los conceptos o características técnicas, y su relación en la satisfacción de los mismos, ponderando la importancia percibida de cada requerimiento, *figura 4.8*, la dificultad de implementación de cada concepto y finalmente devolviendo una calificación de importancia a cada concepto. Adicionalmente relaciona la afinidad o “compatibilidad” entre la implementación de un concepto con otro, *figura 4.7*.

Entre los beneficios de la utilización de esta herramienta se encuentra el poder conocer la prioridad de cada concepto visualizar la compatibilidad en su implementación evitando realizar un intercambio o “*trade of*” de una característica con mayor puntuación por otra de menor.

Como se observa en la *figura 4.5*, los conceptos resultantes en una calificación mayor, en respectivo orden, fueron los siguientes:

1. Utilización de secciones bridadas
2. Apego a códigos y normas
3. Selección de material: Acero inoxidable \*
4. Incremento de factor de seguridad
5. Selección de número de secciones

\*Deberá considerarse que cada tipo de material fue ingresado como un concepto diferente por lo que la elección de material deberá tener mayor importancia

Con base en los resultados obtenidos en la casa de la calidad se concluyó lo siguiente:

- La implementación de secciones bridadas se justifica al satisfacer los requerimientos no convencionales de mayor importancia.
- El empaquetamiento tipo “Matrushka” no resulta ser un factor de gran importancia.
- La selección del material del cuerpo del tanque sería un factor de gran importancia al repercutir en varios requerimientos como seguridad, resistencia a corrosión y precio; adicionalmente, como se verá más adelante en el trabajo, en el cumplimiento de códigos. En este punto se desconocía una condición que posicionara a un material sobre los otros. Se esperaba la recomendación de un recubrimiento por parte de un especialista externo que, posterior a pruebas en laboratorio, soportase adecuadamente el fluido corrosivo de trabajo.
- El incremento del factor de seguridad resultó una alternativa lógica a la contención segura tomando en cuenta las condiciones y lo poco convencional del proyecto.
- El número de secciones en que se dividiría el tanque repercutiría en la seguridad, precio, facilidad de transporte, de armado y desarmado por lo que encontrar el valor óptimo sería de vital importancia.
- La resolución del problema técnico del golpe de ariete por parte del flujo de entrada por medio de una entrada en posición baja del flujo en contraparte de una entrada alta por difusores supondría una solución de menor complejidad y más económica en gastos iniciales.
- La implementación de la mirilla de nivel del líquido se justifica al suponer una baja dificultad.
- Para este punto falta información que justifique la implementación de una bolsa de gas en sustitución de una tapa rígida.

## 4.5 Propuestas iniciales

Tomando en cuenta la información obtenida hasta este punto del proceso de diseño se realizó la primera entrega de propuestas de diseño.

Se realizó una propuesta de diseño base de la cual derivaron 4 posibles modificaciones o propuestas derivadas, la propuesta base presentó las siguientes características:

- Contenedor dividido en 4 secciones pensando en una facilidad de transporte, ver *figura 4.9*
- Volumen interior del contenedor de 100 m<sup>3</sup>
- Las 3 secciones inferiores presentan una geometría cónica
- Angulo exterior del cono reducido para optimizar relación volumen/altura
- Sección superior presenta una geometría cilíndrica a excepción de la tapa
- Las 3 secciones inferiores diseñadas para ser transportadas una dentro de otra sucesivamente, ver *figura 4.10* y *figura 4.11*
- Las dimensiones de la sección cónica de mayor tamaño son 2.5 metros de altura y 4.8 metros de diámetro máximo
- Se propone utilizar los barrenos de las bridas de forma auxiliar en la inmovilización en el transporte
- Base cónica para promover un flujo constante en la remoción de lodos
- Posibilidad de manufactura de tapa en un material distinto al cuerpo (material compuesto) o sustitución de tapa por bolsa de gas

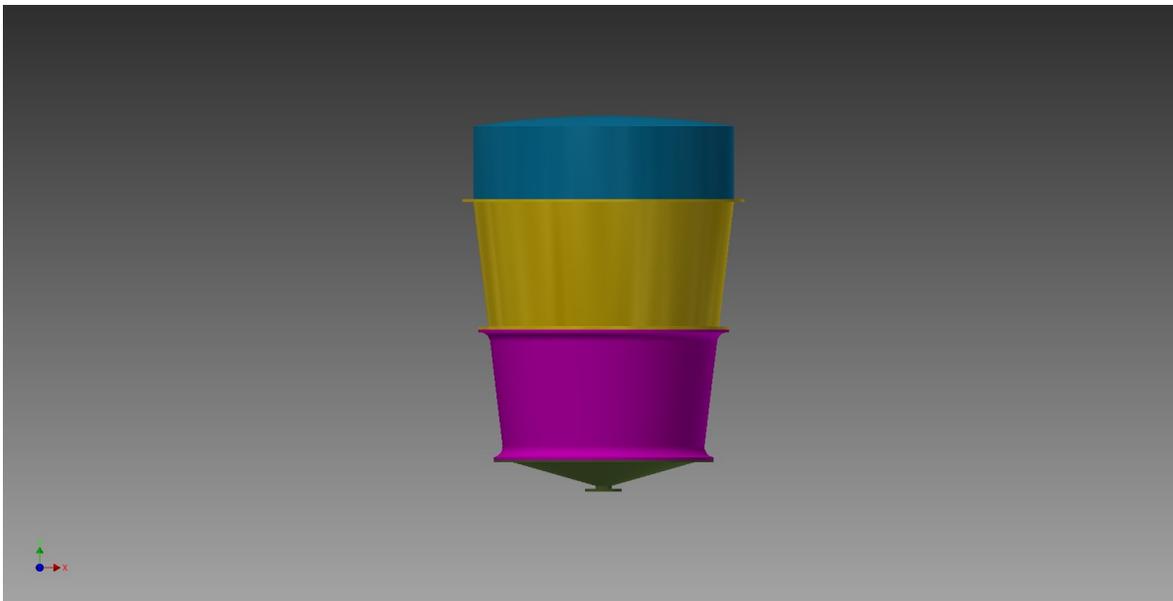


Figura 4.9 primera propuesta "secciones"

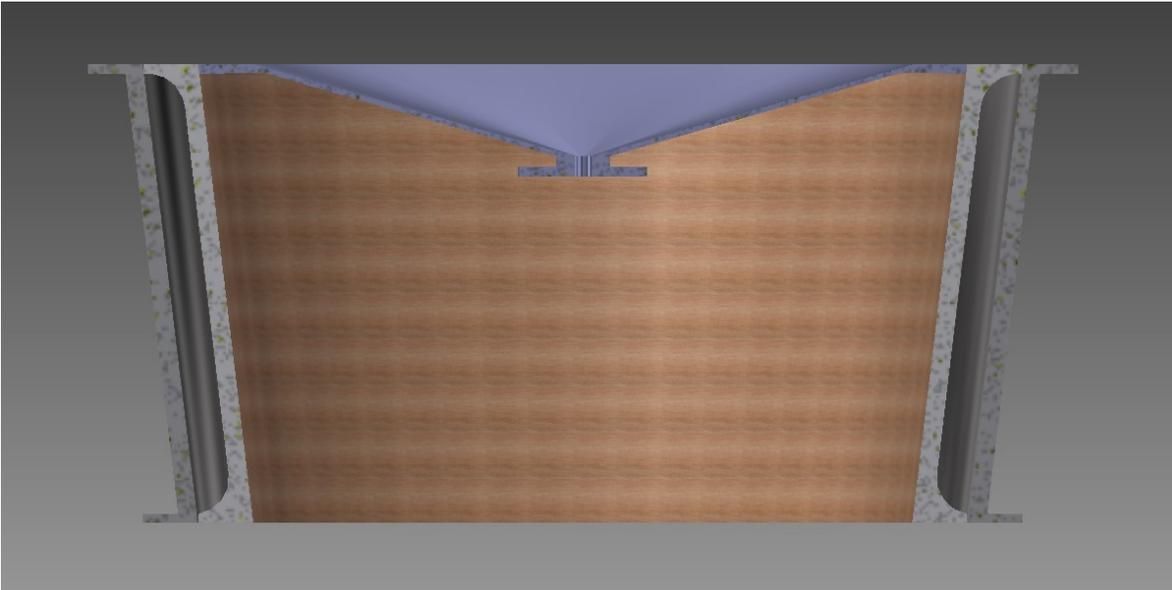


Figura 4.10 Primera propuesta "corte transversal empaquetamiento para transporte "

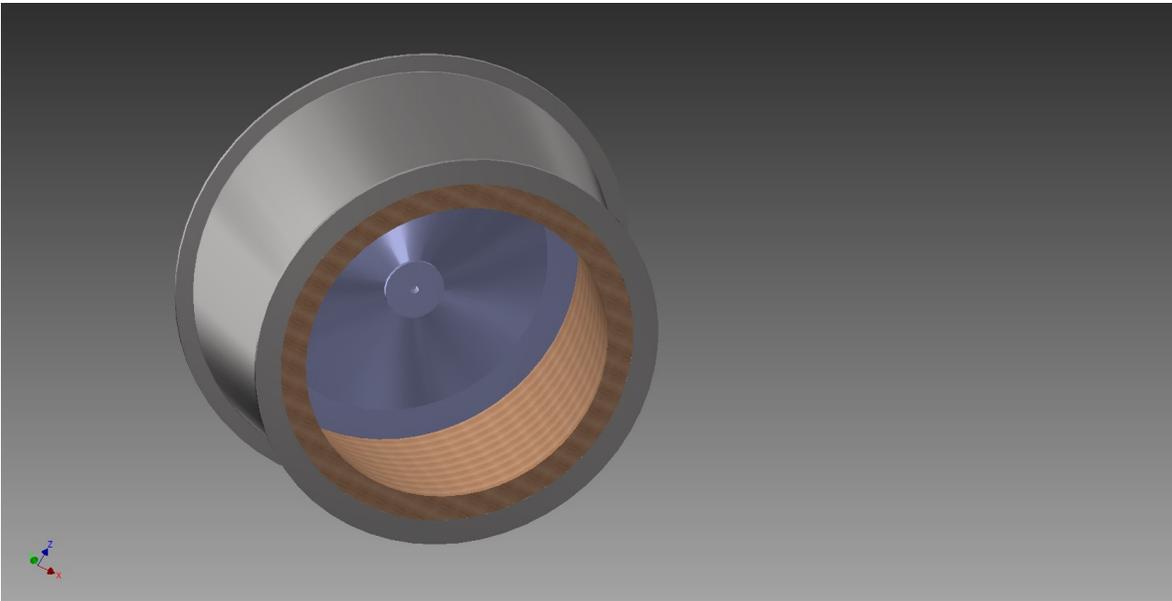
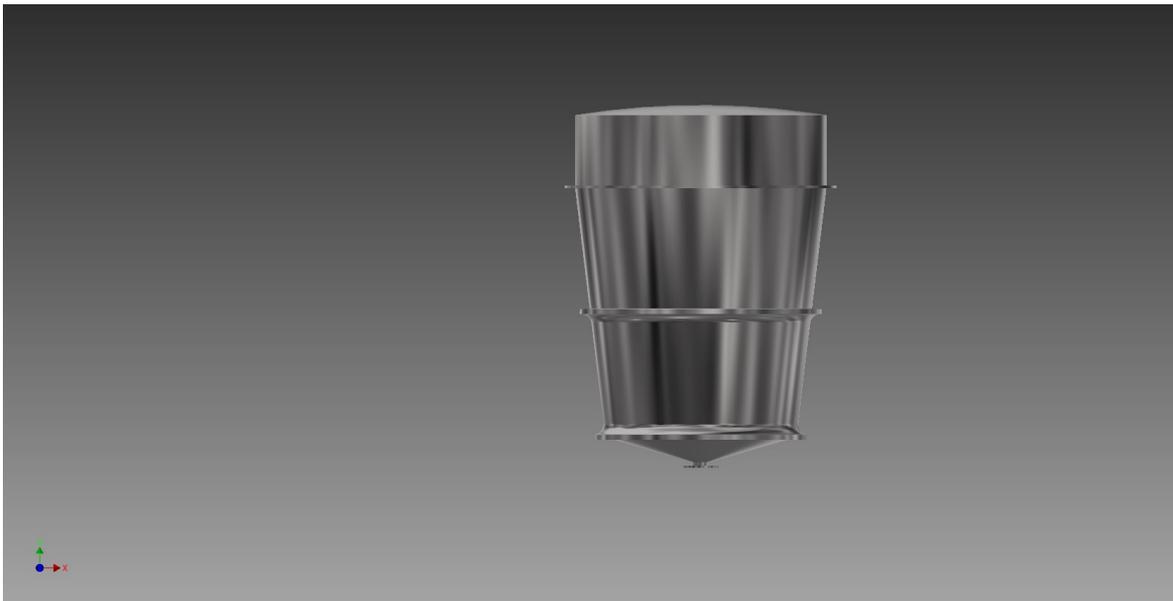


Figura 4.11 Primera propuesta "empaquetamiento para transporte"

### *Propuestas derivadas*

Se propusieron las siguientes combinaciones de materiales para la manufactura del contenedor:

- Íntegramente compuesto por una aleación de acero al carbono recubierto internamente por recubrimiento especial anticorrosivo y externamente por recubrimiento común
- Íntegramente compuesto por una aleación de acero inoxidable sin recubrimientos ver *figura 4.12*
- Secciones inferiores de material metálico, sección superior y tapa fabricadas en fibra de vidrio
- Secciones inferiores en material metálico y sustitución de tapa por bolsa de gas ver *figura 4.13*



**Figura 4.12 Primer propuesta íntegramente en acero inoxidable**

Adicionalmente, se requirió el espesor estimado de las paredes del cuerpo, base y tapa del contenedor para cada material por lo que se definió una presión de diseño para conocer de forma aproximada la diferencia de espesores mínimos requeridos por cada material.

Una vez presentada, esta propuesta fue sometida a análisis tanto por parte del equipo de diseño como por el cliente, el cual, posteriormente emitió su opinión, recomendaciones, y solicitudes de modificación.

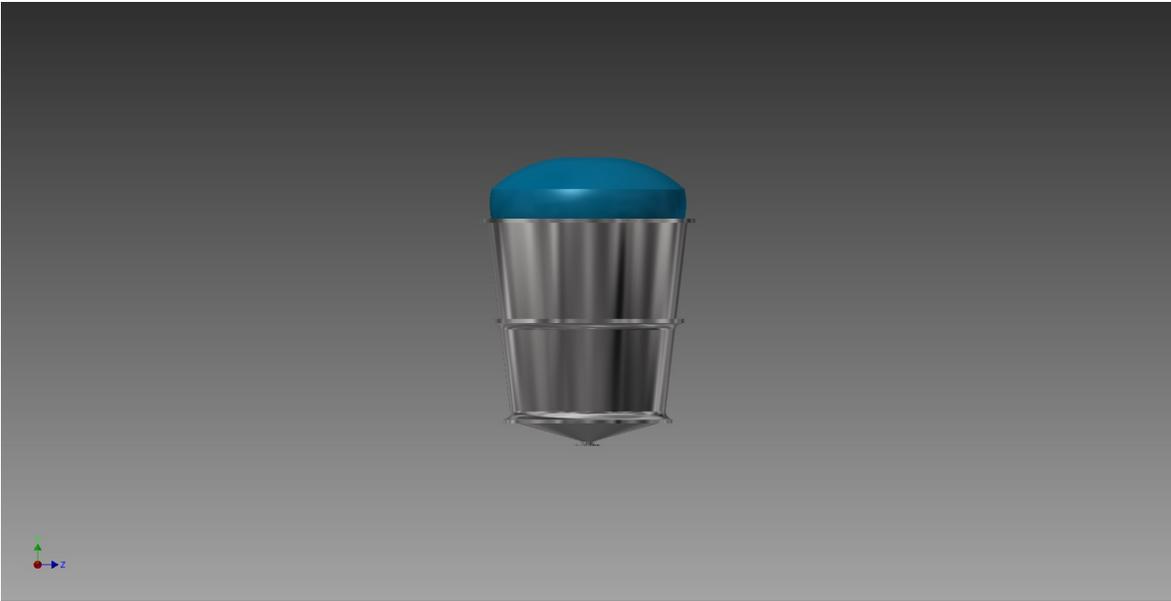


Figura 4.13 Primer propuesta integrando bolsa de gas

#### Factores de modificación de diseño

Posteriormente a la presentación de la propuesta preliminar surgieron una serie de motivos para realizar modificaciones en el diseño, entre los cuales se encontraron el poco agrado por parte del cliente a ciertas características del contenedor, el conocimiento de restricciones contenidas en el código “ASME BPVC Sección VIII División 1 y 2” y la falta de un recubrimiento que garantizara una correcta resistencia a la corrosión en contacto con el triturado de nopal.

Las principales modificaciones fueron las siguientes:

Eliminación de necesidad de empaquetamiento especial para transporte y geometría cónica

El cliente presentó poca aceptación por el concepto de reducción de espacio en el transporte y manifestó la posibilidad de emplear mayor número de vehículos en el transporte.

Adicionalmente se consideró complicado lograr las tolerancias especificadas por el diseño en la manufactura.

Imposibilidad de uso de materiales compuestos

Posterior a una revisión detallada del código de construcción de contenedores a presión, se encontró que la sección X, referente a la construcción de recipientes a presión fabricados en polímeros y reforzados por fibras, prohíbe su utilización en la contención de gases inflamables por lo que la utilización de materiales compuestos quedó descartada<sup>12</sup>

Pobre aceptación de bolsa de gas

Inicialmente el concepto de la sustitución de una tapa rígida por una bolsa de gas fue bien acogido por parte del equipo de diseño, pero se descartó su utilización a partir de este punto debido a el desagrado del concepto por parte del cliente y la falta de información en ese periodo que justificase su implementación y estableciese un presupuesto aproximado.

Definición de acero inoxidable como material de construcción

Al no contarse con una fuente teórica respetable que cuantificara la capacidad de corrosión del triturado de nopal, se realizaron una serie de pruebas experimentales acerca de los efectos corrosivos del mismo en diferentes materiales metálicos, lo cual entregó resultados menos positivos de los esperados.

Adicionalmente al no contarse para ese punto con una recomendación justificada de un recubrimiento que garantizara soportar la acción corrosiva del fluido por parte del especialista encargado, se decidió proseguir el diseño tomando en cuenta una aleación de acero inoxidable como el material principal en el diseño, aunque la posibilidad de construcción en acero al carbono se dejó abierta.

---

<sup>12</sup> (ASME BPVC X Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessels, 2013.)

## 2° propuesta



**Figura 4.14 Segunda propuesta**

Tras la retroalimentación de las primeras propuestas se llegó a un nuevo diseño que cumpliera todos los requerimientos y limitantes, ver *figura 4.14*.

Entre las características se encuentran las siguientes:

- Geometría del cuerpo cilíndrica
- Geometría de la base hemisférica
- División en 4 secciones bridadas
- Volumen interior del contenedor de 100 m<sup>3</sup>
- Material propuesto de acero inoxidable con posibilidad de acero al carbono
- Eliminación de concentradores de esfuerzos en cambios bruscos de ángulos de paredes

## Justificación de diseño

La eliminación del empaquetamiento especial para transporte consecuentemente eliminó la necesidad de una geometría de cuerpo cónica por lo que cambió por una cilíndrica al ser la que mejor se adapta a las restricciones de espacio del sitio, especialmente en cuestión de radio máximo, considerando el volumen de contención requerido y presentando un coeficiente aerodinámico adecuado necesario en la disminución de la presión por efecto del viento.

Se optó por una geometría de la base del tanque hemisférica, ver *figura 4.15* al presentar características favorables en la extracción de residuos evitando atascamientos, una mayor relación de volumen interno por radio y altura y principalmente una mejor distribución de esfuerzos por presión interna<sup>13</sup> derivando en mayor seguridad en la contención de presión interna.



**Figura 4.15** Base hemisférica

Al momento de la propuesta se trabajaba en la selección de la geometría de la tapa debido a que se pretendía cubrir requerimientos adicionales como funcionalidad y un fácil acceso sin comprometer la seguridad del tanque por lo que se analizaron varias opciones. Adicionalmente se continuó con el concepto de secciones bridadas y la división del tanque en 4 secciones ver *figura 4.16*

---

<sup>13</sup> (León Estrada, 2001, pp. 18)



**Figura 4.16 División de secciones del contenedor (Sin Tapa)**

### Cálculos preliminares

Conjuntamente con la propuesta conceptual se inició el desarrollo de concepto o el diseño paramétrico de la propuesta, obteniendo las primeras aproximaciones en presión de diseño, espesores de pared requerido para soportar satisfactoriamente la presión interna y consideraciones aplicables al tanque para el diseño.

Para la obtención de los parámetros preliminares, es necesario seguir un orden debido a la dependencia de un parámetro con otro, siendo los de mayor importancia para el establecimiento de un presupuesto, el o los espesores de pared y las dimensiones geométricas.

Debido a que en cada propuesta se definió la geometría de cada tanque, ese aspecto ya se encontraba cubierto para este punto, por lo que se prosiguió a el cálculo de la presión de operación, la presión de diseño y el espesor de pared.

Como se observa en la *figura 4.17* la presión de operación máxima<sup>14</sup>, referente a la presión en el punto más bajo del contenedor, fue de 186 KPa o 1.84 Atmósferas, y la presión de diseño<sup>15</sup> obtenida fue de 204 KPa o 30 Atmósferas.

---

<sup>14</sup> Conforme a la norma UG-21, ASME BPVC

<sup>15</sup> Ver capítulo 3, presión de diseño, pág. 51

Los espesores de pared se obtuvieron en una primera aproximación para soportar únicamente los esfuerzos generados por la presión interna en el tanque, adicionalmente se definió provisionalmente el espesor por corrosión en una octava parte de pulgada.

Se puede apreciar en la *figura 4.18* que el espesor máximo en el tanque fue de 0.35 pulgadas quedando el valor comercial más próximo como tres octavos (3/8) de pulgada.

Adicionalmente se puede observar en la *figura 4.19* que el espesor de pared mínimo requerido en la base hemisférica es de 0.237 pulgadas quedando el valor comercial más cercano en un cuarto (1/4) de pulgada.

Se observa una diferencia entre espesores de la sección cilíndrica y la esférica, esto se debe a que los esfuerzos ejercidos en las costuras en una pared esférica se presentan uniformemente, a diferencia de una pared cilíndrica.<sup>16</sup>

Sección 1		Presión máxima en tanque (por secciones)					
Densidad de fluido (Nopal licuado)	$\rho$	1200	kg/m <sup>3</sup>	*Valor suministrado por SUEMA			
Gravedad	g	9.81					
Columna de altura(para 70 m <sup>3</sup> )	$h_{70}$	4.63	m				
Formula presión hidrostática		<b><math>P = \rho gh</math></b>					
Presión de fluido	P	54517.4	Pascales				
Densidad del gas	$\rho$	1.2					
Columna de altura	h	2.02	m				
		<b><math>P = \rho gh</math></b>					
Presión del gas	P	23.8	Pascales				
Presión total hidrostática	P <sub>toth</sub>	54541	Pascales	0.54	atm		
Presión Atmosférica	=	101325	Pascales				
Presión del gas (Operación)	=	1.3	atm				
Factor de seguridad	=	<b>1</b>					
formula=		<b><math>P_{tot} = P_{toth} + P_{bar}</math></b>					
Presión total (Factor seguridad 1)	P <sub>tot</sub>	186264	Pascales	1.84	atm	27.0	psi
Presión total(Factor seguridad indicado)	P <sub>tot</sub>	186264	Pascales	1.84	atm	27.0	psi
Presión de diseño	P <sub>d</sub>	204890	Pascales	2.02	atm	29.7	psi

Figura 4.17, Cálculos preliminares 1, Presión máxima

<sup>16</sup> (Megyesy, 1992, pp. 14)

Datos:		Seccion 1 acero inoxidable		Formula espesor cilíndrico		$t = \frac{PD}{SE - 0.6P}$	
Presión de diseño	P	29.7	lb/pulg <sup>2</sup>	Espeor	t=	0.23	Pulgadas
Esfuerzo del material	S	15700	lb/pulg <sup>2</sup>	Margen por corrosion	c.a=	0.125	Pulgadas
Eficiencia de la junta	E	0.8		Espeor final	t+c.a=	0.35	Pulgadas
Diametro interior	D	190	pulg				
Factor de seguridad		1					

\*1 Valor obtenido de megysesy pagina 159 para acero inoxidable 304I a 200 grados farenheit

Figura 4. 18 Cálculos preliminares 2, Espesor de pared cilíndrica

Calculo de espesor de cabeza esférica por presión interna			
Datos		Unidades	
Diametro	D	190	Pulgadas
Presion de diseño	P	29.7	Psi
Resistencia del material (Acero inoxidable 304L)	S	15700	Psi
Eficiencia de la junta	E	0.8	-

\*1

Formula		$t = \frac{D}{2Exp^{\frac{0.5P}{SE}} - 1}$		*Fuente: ASME sec VIII-2 Pag 284	
espeor (sin margen por corrosion)	t=	0.112	Pulgadas		
espeor (con margen de corrosion)M.A=.125Pulg	t=	0.237	Pulgadas		

Formula		$T = \frac{PR}{2ES + 8P}$		*Fuente: Megysesy Pag 18 y 22	
espeor (sin margen por corrosion)	t=	0.112	Pulgadas		
espeor (con margen de corrosion)M.A=.125Pulg	t=	0.237	Pulgadas		

Figura 4.19 Cálculos preliminares, espesor de pared cabeza hemisférica

La importancia de presentar la segunda propuesta con los parámetros preliminares radica en que permitió obtener un aproximado del costo requerido por la manufacturar del tanque.

### *Contratiempos en el diseño*

La presente sección tiene como función enunciar los diferentes contratiempos que surgieron entre la entrega de propuestas y el desarrollo del diseño final, se puede encontrar un análisis más específico posteriormente en el subcapítulo 4.7, pero se considera pertinente presentarlos en esta sección debido a su influencia en el diseño final.

Debido a ciertos sucesos se produjeron retrasos en proceso de diseño, entre ellas la que mayor impacto tuvo en los tiempos de entrega fue la mala comunicación con el cliente debido a que se desconocían muchas consideraciones hechas por el cliente, las cuales exigieron un rediseño el cual en etapas ya avanzadas repercutió en una pérdida mayor de tiempo.

Otro factor que generó retraso fue la inexperiencia en el tema, lo cual obligó a dedicar una gran cantidad de tiempo a la obtención de información o documentación en el tema, o en su defecto a conocer en tiempo la razón de ciertos procedimientos de cálculo.

Adicionalmente a los factores internos, en el tiempo que se desarrolló el proyecto, ocurrió en el país una tragedia en la cual se perdieron varias vidas incluyendo la de menores, y la cual involucraba una falla en un tanque a presión generando su explosión. Derivado de este incidente se consideró incrementar el factor de seguridad en el tanque.

Finalmente, otro factor que retrasó el proyecto fue una mala comunicación interna por parte del equipo de diseño lo que ocasionó confusiones y retrasos.

## 4.6 Diseño final

Posterior a la entrega, revisión y discusión de la 2° propuesta, por parte, tanto del equipo de diseño como del cliente, se prosiguió a su rediseño lo que llevaría a la 3° y última propuesta.

### *Modificaciones en el diseño*

La modificación en la importancia del tamaño y forma de transporte del contenedor, pasó de muy alta a baja, por lo que se rediseñó el tanque de 4 a 3 secciones bridadas, como se observa en la *figura 4.20*. Esto reduciría costos de manufactura y aumentaría la seguridad al reducir el número de secciones bridadas.

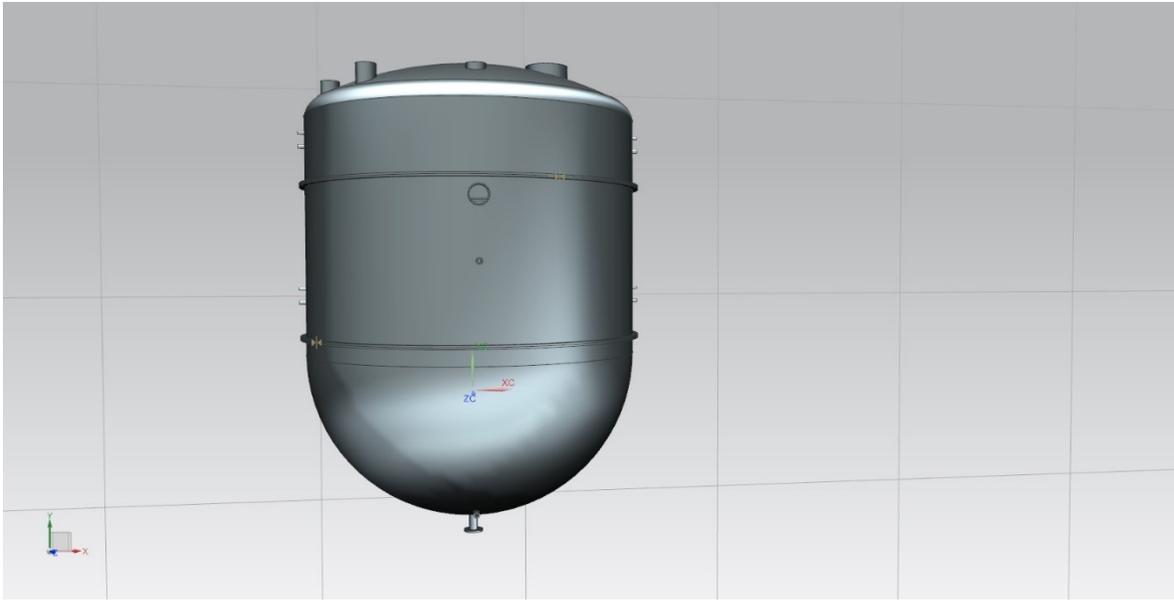
Adicionalmente se decidió implementar una tapa de geometría toriesférica, debido al buen desempeño que presenta esta geometría en la contención de presión interna y al bajo costo de manufactura que ésta supone<sup>17</sup>.

La geometría final del contenedor fue una tapa hemisférica en la sección inferior en la que se contendría la mayor presión, un cuerpo cilíndrico el cual maximiza el volumen y presenta características favorables a los esfuerzos solicitados, y finalmente una tapa superior toriesférica al esperar la menor cantidad de presión y ser más económica que otras opciones.

Finalmente fue decidido por el equipo de diseño aumentar el factor de seguridad del tanque a un valor de 3; la forma en que se llegó a esa resolución se desconoce por el autor, por lo que no será parte de éste trabajo.

---

<sup>17</sup> (León Estrada, 2001, pp. 16)



**Figura 4.20 3° Propuesta**

Finalmente se prosiguió al cálculo de parámetros, tomando en cuenta las últimas modificaciones, a continuación, se muestran estos.

## *Cálculos finales*

En orden de realizar un diseño satisfactorio, el cual contenga de forma segura la presión interna ejercida por los fluidos especificados y a los fluidos en sí, y cumpla los requerimientos especificados, será necesario calcular una serie de parámetros, mencionados en el capítulo anterior.<sup>18</sup>

Deberá recordarse al lector que para este trabajo y particularmente este proyecto descrito como caso de estudio, fue utilizado principalmente como referencia para el cálculo de dichos parámetros el código ASME BPVC Sección VIII división 1 y 2, y el Manual de recipientes a presión Diseño y Cálculo escrito por Eugene Megyesy.

Para el desarrollo del conjunto de cálculos, el autor programó una serie de hojas de cálculo con los parámetros del proyecto para facilitar la modificación de parámetros y poder visualizar de manera más eficiente los efectos en los componentes del tanque expuestos a diversas solicitaciones, y adicionalmente poder generar una serie de diversas iteraciones presentadas como propuestas de una manera rápida y sencilla.

A continuación, se presentan las diversas secciones del programa mencionado, agrupadas en 4 grupos principales para su mejor entendimiento:

- Dimensiones
- Presión de diseño
- Espesores por presión interna
- Esfuerzos por eventos

---

<sup>18</sup> Ver capítulo 3, pág. 43

## Cálculo de dimensiones

Lo primero que debió establecerse fueron las dimensiones del cuerpo del tanque.

Entre las restricciones dimensionales solicitadas se acotó el volumen interno requerido, por lo que los cálculos debieron de entregar una altura y diámetro del tanque en base al volumen interno buscado.

La forma en la que se obtuvo las dimensiones finales fue a través de una serie de iteraciones hasta los alcanzar valores de volumen deseados y adicionalmente buscando una altura menor a los 7 metros.

La *figura 4.21* muestra la secuencia de cálculos de volumen por sección y el total del volumen del contenedor, adicionalmente la *figura 4.22* muestra de forma más definida la altura por sección del contenedor y la altura con respecto a un volumen definido, con el fin de obtener los puntos de colocación de la mirilla de nivel.

Volúmen por sección					
Altura Total	6.65 m				
Diametro interno máximo(Pulgadas)	190 Pulgadas				
<b>Región 1, 2</b>					
Tapa esférica		Sección Cilíndrica			
Altura h	2.41 m	95 Pulgadas	Altura h	2.46 m	97.0 Pulgadas
Radio a	2.41 m	95 Pulgadas	Radio cilindro R	2.41 m	95 Pulgadas
			Diametro cilindro D	4.8 m	190 Pulgadas
Volúmen Tapa Vt	29.4 m <sup>3</sup>		Volúmen Cilindro Vc	45.1 m <sup>3</sup>	
$Vt = \frac{4\pi r^3}{6}$			$Vc = \pi r^2 h$		
Altura a 70m3	4.63 m				
Volúmen Total 1+2	74.5 m <sup>3</sup>				
<b>Región 3</b>					
Tapa toriesférica			Sección Cilíndrica		
Altura h(valores dados a 200" de D)	0.79 m	31 Pulgadas	Altura h(valores dados a 200"	0.99 m	39.0 Pulgadas
Radio a	2.41 m	95 Pulgadas	Radio cilindro R	2.41 m	95 Pulgadas
Volúmen Tapa Vt	7.5 m <sup>3</sup>		Diametro cilindro D	4.83 m	190 Pulgadas
$Vt = \frac{4\pi r^3}{6}$			$Vc = \pi r^2 h$		
			Volúmen Cilindro Vc	18.1 m <sup>3</sup>	
Volúmen Total 3	25.6 m <sup>3</sup>				
Volumen Total 123	100 m <sup>3</sup>				
Altura Total	6.65 m	262 Pulgadas			

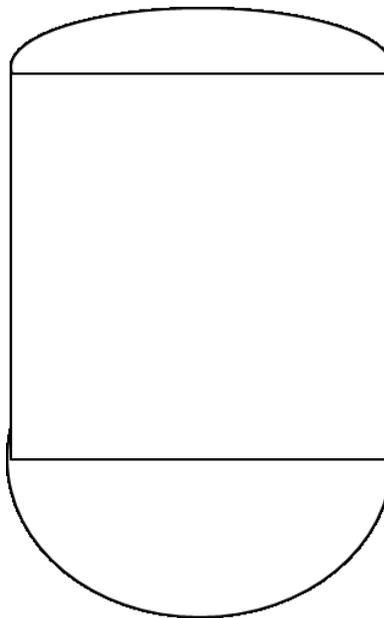
Figura 4.21 Programa de cálculo "Dimensiones"

**Alturas para mirillas**

Altura a 72 m <sup>3</sup>	4.74 m	187 Pulgadas
----------------------------	--------	--------------

Altura a 70 m <sup>3</sup>	4.63 m	182 Pulgadas
----------------------------	--------	--------------

Altura a 68 m <sup>3</sup>	4.52 m	178 Pulgadas
----------------------------	--------	--------------



**Región 3**

Altura	70 Pulgadas	1.78 m
--------	-------------	--------

**Región 2**

Altura	87 Pulgadas	2.21 m
--------	-------------	--------

**Región 1**

Altura	105 Pulgadas	2.67 m
--------	--------------	--------

Figura 4.22 Programa de cálculo "Alturas específicas"

## Cálculo de presión de diseño

Posterior a la definición de la geometría del cuerpo se calculó la presión de trabajo y se definió la presión de diseño.

La presión interna a la que el tanque sería sometido se originaría por 2 factores, la presión del biogás generado y almacenado hasta su extracción, y la presión hidrostática resultante de la columna de nopal triturado.

Al ser una fuente de presión la hidrostática, existiría un gradiente de presión que disminuiría de forma ascendente al disminuir la columna de líquido, generando el punto con mayor presión en el fondo del tanque.

Debido a esto, se calculó la presión interna de operación diferida por cada sección y al punto inferior o de mayor presión por sección.

Adicionalmente, como se mencionó anteriormente, se decidió incrementar el factor de seguridad a 3. La forma en que se llevó a cabo este incremento fue en la multiplicación de la presión generada por el biogás, en la consideración de que esta presión sería la única con posibilidad de aumentar ya que la presión hidrostática depende únicamente del volumen máximo del recipiente y el ingreso de nueva materia de digestión.

Considerando esto, la *figura 4.23* muestra la forma en que se llevaron a cabo estos cálculos.

Sección 1		Presión máxima en tanque (por secciones)			
Densidad de fluido (Nopal licuado)*	$\rho_n$	1200	kg/m <sup>3</sup>	*Valor suministrado por SUEMA	
Gravedad	g	9.81	m/s <sup>2</sup>		
Columna de altura(para 70 m <sup>3</sup> )	$h_{70}$	4.63	m		
<b><math>P = \rho g h</math></b>					
Cálculo presión hidrostática					
Presión de fluido	$P_f$	54517.4	Pascales		
Densidad del gas	$\rho_g$	1.2	kg/m <sup>3</sup>		
Columna de altura	h	2.02	m		
<b><math>P = \rho g h</math></b>					
Presión del gas	$P_g$	23.8	Pascales		
Presión total hidrostática	$P_{toth}$	54,541	Pascales	0.54	atm
Presión Atmosferica	=	101,325	Pascales		
Presión del gas (Operación)	=	1.3	Atm		
Factor de seguridad	=	3			
<b><math>P_{tot} = P_{toth} + P_{bar}</math></b>					
Presión total (Factor seguridad 1)	$P_{tot}$	186,264	Pascales	1.84	atm
<b><math>P_{d*} = P_{toth} + 3P_{bar}</math></b>					
Presión de diseño(Factor seguridad indicado)	$P_{d*}$	449,709	Pascales	4.44	atm
Presión de diseño	$P_d$	204,890	Pascales	2.02	atm
				65.2	Psi
				29.7	Psi

Sección 2					
Columna de altura fluido	h	1.96	m		
<b><math>P = \rho g h</math></b>					
Presión de fluido	$P_f$	122	Pascales		
Presión total(Factor seguridad indicado)	$P_{d*}$	418313	Pascales	4.13	atm
				60.7	Psi

Sección 3					
columna de altura fluido	h	1.90	m		
<b><math>P = \rho g h</math></b>					
Presión de fluido	$P_f$	120	Pascales		
Presión total(Factor seguridad indicado)	$P_{d*}$	395167	Pascales	3.90	atm
				57.3	Psi

Figura 4.23 Programa de cálculo "Cálculo de presiones"

## Cálculo de espesores por presión interna

Una vez que la presión de diseño y las dimensiones fueron conocidas, se prosiguió a el cálculo de los espesores de pared, tanto de las secciones cilíndricas como de las tapas, requeridos bajo las sollicitaciones ejercidas únicamente por la presión interna.

Adicionalmente al espesor debido a esfuerzos resultantes por presión, fue necesario definir en esta etapa un margen por corrosión.

Debido a que el fluido a contener fue reportado como extremadamente corrosivo, por parte del cliente y dicha afirmación fue verificada en pruebas experimentales previas, se manejó la definición del margen de corrosión bajo el criterio del apéndice no obligatorio E, buenas prácticas sugeridas respecto al margen por corrosión del BPVC:

Desde el punto de vista de la corrosión, los contenedores se podrán clasificar de una de las siguientes formas (...) (b) Contenedores en los cuales la tasa de corrosión, mientras que se conoce es relativamente alta, es tanto variable o indeterminada en magnitud;

Cuando los efectos de la corrosión sean indeterminados previo al diseño del contenedor, aunque se conoce son inherentes a cierto grado en el servicio para el cual el contenedor se usará, o cuando la corrosión es incidental, localizada y/o variable en tasa y extensión, el diseñador deberá ejercer su mejor juicio estableciendo un exceso máximo razonable en el espesor del casco. Esta mínima tolerancia puede (...) incrementarse de acuerdo al criterio del diseñador.<sup>19</sup>

Bajo este criterio, se decidió conjuntamente por el equipo de diseño que el margen sería de 1/8 de pulgada.

Finalmente, se calculó el espesor de pared requerido para soportar satisfactoriamente la presión interna, tanto del cuerpo como de las tapas del tanque, como se muestra en las figuras 4.24, 4.25 a) y b) respectivamente.

Para las paredes del cuerpo, se emplearon las fórmulas para la costura circunferencial al ser la más débil.<sup>20</sup>

---

<sup>19</sup> (ASME BPVC VIII-1; E-1, E-3, 2013, pp.573)

<sup>20</sup> (Megyesy, 1993, pp.17,18)

**Cálculo de espesores del cuerpo**

Seccion 1				Formula espesor cilindrico					
Datos:				Acero inoxidable					
Presión de diseño	Pd	65.2	lb/pulg <sup>2</sup>	<b><math>t = \frac{PD}{SE - 0.6P}</math></b>	Espeor	t=	0.49	Pulg	
<b>Esfuerzo máximo permisible</b>	S	<b>15,700</b>	lb/pulg <sup>2</sup>		*1	Margen por corrosion	c.a=	0.125	Pulg
Eficiencia de la junta	E	0.8			<b>Espeor final</b>	t+c.a=	<b>0.62</b>	Pulg	
Diametro interior	D	190	Pulg						
<b>Factor de seguridad</b>		<b>3</b>							

\*1 Valor obtenido de megyesy pagina 159 para acero inoxidable 304I a 200 grados fahrenheit

Seccion 2				Formula espesor cilindrico					
Datos:				Acero inoxidable					
Presión de diseño	Pd	60.7	lb/pulg <sup>2</sup>	<b><math>t = \frac{PD}{SE - 0.6P}</math></b>	Espeor	t=	0.46	Pulg	
Esfuerzo del material	S	15,700	lb/pulg <sup>2</sup>		*1	Margen por corrosion	c.a=	0.125	Pulg
Eficiencia de la junta	E	0.8			<b>Espeor final</b>	t+c.a=	<b>0.59</b>	Pulg	
Diametro interior	D	190	Pulg						
<b>Factor de seguridad</b>		<b>3</b>							

Seccion 3				Formula espesor cilindrico					
Datos:				Acero inoxidable					
Presión de diseño	Pd	57.3	lb/pulg <sup>2</sup>	<b><math>t = \frac{PD}{SE - 0.6P}</math></b>	Espeor	t=	0.43	Pulg	
Esfuerzo del material	S	15,700	lb/pulg <sup>2</sup>		*1	Margen por corrosion	c.a=	0.125	Pulg
Eficiencia de la junta	E	0.8			<b>Espeor final</b>	t+c.a=	<b>0.56</b>	Pulg	
Diametro interior	D	190	Pulg						
<b>Factor de seguridad</b>		<b>3</b>							

Figura 4.24 Programa de cálculo "Espesores del cuerpo"

Espesores de las cabezas

Calculo de espesor de cabeza esférica por presión interna			
Datos		Unidades	
Diametro	D	190	Pulg
Presion de diseño	Pd	65.2	Psi
Esfuerzo máximo permisible	S	15,700	Psi
Eficiencia de la junta	E	0.8	-
		$t = \frac{D}{2Exp \frac{0.5P}{SE} - 1}$	
		*Fuente: ASME sec VIII-2 Pag 284	
Espesor (sin margen por corrosion)	t=	0.247	Pulg
Espesor (con margen de corrosion)M.A=.125Pulg	t=	0.372	Pulg
		$t = \frac{PR}{2ES + .8P}$	
		*Fuente: Megyesy Pag 18 y 22	
Espesor (sin margen por corrosion)	t=	0.246	Pulg
Espesor (con margen de corrosion)M.A=.125Pulg	t=	0.371	Pulg

Figura 4.25 a) Programa de cálculo “Espesores de cabeza esférica”

Calculo de espesor de cabeza toriesférica por presión interna			
Datos			
Radio de abombado	L	190	Pulg
Presion de diseño	Pd	57.3	Psi
Esfuerzo máximo permitido(Acero inoxidable 304L)	S	15,700	Psi
Eficiencia de la junta	E	1	-
		$t = \frac{0.855PL}{SE + 0.8P}$	
		*Fuente: Megyesy pag 24 (cuandoL/r igual a 16 2/3)	
Espesor	t=	0.59	Pulg

Figura 4.25 b) Programa de cálculo “Espesor de cabeza toriesférica”

Se puede apreciar en la *figura 4.24* como varía el espesor del cuerpo en función de la altura, y adicionalmente, como existe una variación significativa entre la base y el cuerpo en general.

Esto abre la posibilidad de una construcción con diversos espesores, aunque se acordó que en el proyecto presentado se homogenizarían los espesores.

## Cálculo de esfuerzos generados por eventos diversos

Finalmente, ya contando con la geometría total del tanque, el espesor de pared y la presión de diseño fue posible proseguir a calcular si el tanque, con los parámetros anteriormente establecidos, cumpliría con varias sollicitaciones adicionales a la presión interna, a las que posiblemente se viera expuesto a lo largo de su vida útil.

Como menciona el código en el párrafo UG-22, hay una serie de cargas<sup>21</sup> a las que, por seguridad, debe diseñarse el tanque para soportarlas. Si bien, deben considerarse todas, se deja al criterio del diseñador cuales serán aplicadas y cuales podrán ser excluidas con base a la particularidad de cada proyecto.<sup>22</sup>

El primer evento calculado fue la generación de esfuerzos por el propio peso del recipiente, este esfuerzo se presenta, a diferencia del generado por presión interna, a compresión, se puede observar en la *figura 4.26* como el esfuerzo resultante por éste fue mínimo.

El segundo evento calculado fue la presión del viento y el momento de volteo resultante por ella, se puede observar en la *figura 4.27* como era conocida la presión del viento del lugar, obtenida por un compañero de datos Nacionales Oficiales, y una vez aplicados los criterios de diseño, ésta se vio reducida en más del 30% debido a la geometría cilíndrica del contenedor y al sitio de exposición, el cual se identificó con rompevientos geográficos en más de una dirección.

El momento generado por esta presión fue considerable en la base o cimientos, pero se vio deducido en gran magnitud en la zona de mayor esfuerzo del tanque, la cual fue la tapa inferior ya que esa sección sería el punto de unión con el faldón, aunque independientemente de éste, los esfuerzos generados fueron valores muy bajos debido a las dimensiones del contenedor, más específicamente su relación de diámetro contra altura.

---

<sup>21</sup> Ver, capítulo 3, pág. 52

<sup>22</sup> (ASME BPVC VIII-1 UG-22, 2013, pp.15)

**Cálculo de esfuerzos generados por el propio peso del recipiente**

<b>Volumen</b>				
Radio exterior	$r_e$	95.62	pulg	
Radio interior	$r_i$	95	pulg	
Altura tanque	H	262	pulg	
<b><math>V_c = \pi h (r_{ext} - r_{int})</math></b>				
Volumen cilindro	$V_t$	97,277	pulg <sup>3</sup>	Aproximación
Volumen liquido	$V_l$	70	m <sup>3</sup>	
	$V_l$	4271680	pulg <sup>3</sup>	
Densidad acero inoxidable	$\rho_{inox}$	0.289	lb/pulg <sup>3</sup>	
Densidad nopal	$\rho_{nop}$	0.043	lb/pulg <sup>3</sup>	
<b>Masa</b>				
<b><math>W = \rho_{inox} V_t</math></b>				
Masa tanque	W	28113.1932	lb	
<b><math>W_l = \rho_{nop} V_l</math></b>				
Masa liquido	$W_l$	183682.24	lb	
	$W_l$	83316.8626	kg	
	$W_l$	83.3168626	TON	
Masa total	$W_t$	211,795	lb	
		96,068.79	kg	
		96.07	TON	
Masa por pie de altura	$W_{esp}$	9,208	lb/Pie	
Esfuerzo por el peso				
Espesor de pared	t	0.62	pulg	
Perímetro medio	c	597	pulg	
<b><math>S = \frac{W_t}{c t}</math></b>				
Esfuerzo de compresion debido al peso	S	572	Psi	

Figura 4.26 Programa de cálculo "Esfuerzo por peso propio"

Cálculo de esfuerzos generados por presión del viento				Notas
Presión del viento	$q_s$	10.88	Psi	Obtenido de valores reportados por instituciones nacionales
Factor de forma	$C_e$	0.8	-	Al referirse a una geometría cilíndrica
Factor de exposición	$C_q$	0.8	-	Al ser una locación con irregularidades en el terreno
<b><math>P_W = q_s C_e C_q</math></b>				
<b>Presión del viento de diseño</b>	$P_W$	6.9632	Psi	
Altura total del recipiente	$H_t$	7.5	m	Incluyendo soportes
	$H_t$	295	pulg	
Ancho del recipiente	$D$	191	pulg	Externo
<b><math>V = P_W D H_t</math></b>				
<b>Esfuerzo cortante</b>	$V$	393,200	Lb fuerza	
Brazo de palanca	$h_m$	3.75	m	Se considera la mitad de la altura total
<b><math>M = P_W D H_t h_m</math></b>				
<b>Momento Maximo (en la base)</b>	$M$	4,837,591	Lb*pies	Presentado en los cimientos
Distancia del suelo a el faldón	$h_T$	128.475	pulg	
<b><math>M_T = M - h_T(V - 0.5P_W D h_T)</math></b>				
<b>Momento máximo (en el tanque)</b>	$M_T$	1,543,718	Lb*pies	presentado en el faldón
Radio	$R$	95	pulg	
Esfuerzo del material	$S$	15,700	Psi	
Eficiencia de la soldadura	$E$	0.8	-	
<b><math>t_{pv} = \frac{12M}{R^2 \pi S E}</math></b>				
<b>Espesor requerido por presión del viento</b>	$t_{pv}$	0.052	pulg	
Espesor del tanque	$t$	0.62	pulg	
<b><math>S = \frac{12M}{R^2 \pi t}</math></b>				
<b>Esfuerzo por presión del viento en costura</b>	$S$	1054	Psi	

Figura 4.27 Programa de cálculo "Esfuerzo por presión del viento"

El tercer y cuarto evento evaluado fue la carga sísmica y las vibraciones y como se mencionó en el capítulo 3, ambos eventos se deben evaluar conjuntamente<sup>23</sup>.

Se puede observar en la *figura 4.28* como el periodo real de vibración del tanque fue mucho menor que el periodo máximo permitido en el mismo, por lo que de esta forma se da por cubierto este evento.

Finalmente se obtuvo la magnitud del momento de volteo tanto en la base o cimientos de los pilotes como en el cuerpo del tanque. Al ser una magnitud menor que la generada por los efectos de la presión del viento en el tanque y como se ha mencionado anteriormente, los efectos del momento por sismo no se tomarán en cuenta.

---

<sup>23</sup> Ver capítulo 3, carga sísmica, pág. 61

## Carga Sísmica y Vibraciones

### Cálculo del periodo de vibración del tanque

Diametro exterior	D	14.7	pies
Altura total	H	28	pies
Gravedad	g	32.2	pies/seg <sup>2</sup>
Masa total	W <sub>t</sub>	211,795	lb
Masa por pie de altura	W <sub>esp</sub>	9,208	lb/pie
Espesor del faldon	t	0.62	pulg
$T = 0.000026 \left( \frac{H}{D} \right)^2 \sqrt{\frac{W_{esp} D}{t}}$			
<b>Periodo de Vibración</b>	T=	0.156	seg

### Cálculo de la fuerza cortante

Factor de zona sísmica	Z	0.375	-	Zona: Milpa Alta Clasificación:2 factor:0.375
Coefficiente de importancia de ocupación	I	1	-	siempre 1 para recipientes
Factor de fuerza horizontal	K	2	-	siempre 2 para recipientes
Coefficiente de resonancia estructural	S	1.5	-	1.5 si T <=2.5
$C = \frac{0.067}{\sqrt{T}}$				
Coefficiente numerico	C	0.170	-	
$V = ZIKCSW$				
<b>Cortante</b>	V	40,467	lb	
$T_a = 0.8 \sqrt{\frac{W_T H}{Vg}}$				
<b>Periodo máximo de vibración permitido</b>	T <sub>a</sub> =	1.707	seg	El periodo de vibración real es menor que el máximo permitido por lo que <b>cumple</b>

Figura 4.28 Programa de cálculo "Carga sísmica y vibraciones"

Cálculo del momento de volteo por fuerza sísmica

$F_t = 0.07TV$				
Fuerza sísmica horizontal	$F_t$	0 lb	0 para T menor a 0.7	
$M = \left[ F_t H + (V - F_t) \left( \frac{2H}{3} \right) \right]$				
<b>Momento de volteo sísmico</b>	M	755,393	Libras*pies	En la base de los pilotes
Distancia del punto superior del tanque al faldón	X	167		
$M_x = M \left( \frac{X}{H} \right)$				
<b>Momento de volteo sísmico</b>	$M_x$	481,491	Libras*pies	En el faldón del tanque

Figura 4.29 Programa de cálculo "Momento de volteo sísmico"

El quinto evento calculado, y el de mayor importancia, fue la presencia de esfuerzos por la combinación de eventos.

Se puede observar en la *figura 4.30* como con el programa de cálculo únicamente se realizó la sumatoria de los esfuerzos anteriormente obtenidos, tomando en cuenta si se presentaban a compresión o a tensión, adicionalmente es interesante observar como los esfuerzos dominantes se presentan a barlovento, del lado donde impacta en viento, y se presentan a tensión, mientras que a sotavento la combinación de esfuerzos es casi nula al eliminarse entre sí por compresión y tensión.

Debe recordarse que en el análisis de esfuerzos combinados solo se aplica uno de los dos eventos que producen un momento de volteo, presión de viento o fuerza sísmica, debido a que no se espera que ocurran conjuntamente, y el evento a ser presentado será siempre el que presente mayores esfuerzos resultantes.

Adicionalmente, es necesario aclarar que en este caso se consideró la presión de diseño original, y no con el factor de seguridad incrementado en la obtención los esfuerzos generados.

Finalmente, y tomando en cuenta lo anterior, se observa como no se rebasa y, en realidad, quedan muy por debajo los esfuerzos presentados en el peor caso posible, comparándolos con los esfuerzos máximos permisibles una vez que se aplica el coeficiente de seguridad por soldadura.

## Esfuerzos Combinados

### Momento en la costura inferior del tanque generado por:

Presión del viento	M	1,543,718	Lb*pies
Fuerza sísmica	M	481,491	Lb*pies
Momento de mayor magnitud:	Viento		

### Parámetros

Esfuerzo máximo en el material	S	15,700	Psi
Eficiencia de soldadura	E	0.8	-
Espesor de pared	t	0.62	pulg

### Esfuerzos por:

Presión interna	S	1,921	Psi	* por presión de diseño
Presión del viento	S	1,054	Psi	
Peso del recipiente	S	572	Psi	

### Barlovento

### Sotavento

Presión interna	+	1,921	Psi	+	1,921	Psi
Presión del viento	+	1,054	Psi	-	1,054	Psi
Peso del recipiente	-	572	Psi	-	572	Psi

<b>Esfuerzos combinados</b>	+	2,402	Psi	+	294	Psi
-----------------------------	---	-------	-----	---	-----	-----

Esfuerzos presentados por eventos combinados	2,402	Psi	Tensión
<b>Maximos esfuerzos permisibles considerando eficiencia de soldadura</b>	12,560	Psi	<b>Cumple con seguridad</b>

Figura 4.30 Programa de cálculo "Esfuerzos combinados"

El cálculo de la deflexión esperada en el tanque fue el sexto evento considerado, se aprecia en la *figura 4.31* como la deflexión esperada es de 0.25 pulgadas y el máximo permitido es de 1.3 pulgadas, por lo que el contenedor se encuentra dentro de los parámetros aceptados como seguros.

<b>Deflexion</b>			
Presión del viento	P	10.88	Psi
Ancho máximo de la torre	D	190	Pulg
moduio de elasticidad	E	28,000,000	Psi
		<b><math>I = \pi r^3 t</math></b>	
Momento de inercia	I	1,683,456	Pulg4
Altura total del recipiente	H	21.8	Pies
$Deflexion\ Máxima = \frac{PDH * (12H)^3}{8EI}$			
<b>Deflexion máxima obtenida:</b>		0.0258	Pulg
$Deflexión\ Máxima\ permitida = \frac{H * 6}{100}$			
<b>Deflexion máxima permitida:</b>		1.3	Pulg
<b>SI CUMPLE</b>			
*Debe ser menor a 6 Pulgadas por cada 100 Pies			

Figura 4.31 Programa de cálculo "Deflexión"

Finalmente, la estabilidad elástica, o rigidez del cuerpo, fue el último evento considerado.

La *figura 4.32* muestra como el esfuerzo por compresión permitido en el tanque sin presentar ovalamiento en el cuerpo fue de 9800 Psi, por lo que cumple satisfactoriamente con el criterio de seguridad propuesto y no se ve rebasado bajo ningún evento u operación normal.

Adicionalmente, se muestra una iteración con atiesadores circunferenciales de 1 pulgada de área transversal, los cuales no se requieren debido a las consideraciones antes mencionadas.

### Estabilidad elástica (Rigidez)

Datos			
Radio Cilindro	R	95	pulg
Espesor de la pared	t	0.625	pulg
Punto de cedencia	Smat	30,000	Psi
$S = 1500000 \left( \frac{t}{r} \right) \leq \frac{1}{3} S_{mat}$			
<b>SIN ATIESADOR</b>			
<b>Esfuerzo por compresión permitido</b>	S	9868.4	Psi
	1/3 Smat =	10000	Psi
<b>SI CUMPLE</b>			
<b>CON ATIESADOR CIRCUNFERENCIAL</b>			
S=	10192.1	Psi	
1/3 Smat =	10000.0	Psi	
<b>Dimensiones de atiesador</b>			
Ax			1
dx			24
Ay			1
dy			24
	tx		0.67
	ty		0.67

Figura 4.32 Programa de cálculo "Estabilidad elástica"

Con esto finalizaron los cálculos por eventos diversos, y analizando los resultados obtenidos fue determinado que el tanque se desempeñaría de forma segura, por lo que se prosiguió a la realización del modelo digital con la adición de detalles para la posterior generación de los planos de referencia y constructivos.

## Detalles

Entre los detalles adicionados al diseño final se contaron con una serie de entradas a lo largo del cuerpo, especificadas para introducir equipos de censado como son termómetros y manómetros, entre otros.

Adicionalmente se especificaron las dimensiones y características de entradas en la parte superior de la tapa toriesférica que serían utilizadas para la adición de sustancias utilizadas como aditivos para la digestión de la biomasa, una vez el digestor operara con normalidad.

Finalmente se especificó la posición y dimensiones de la entrada hombre, la tapa y el método de apertura sería adicionado posteriormente, las *figuras 4.33 a) y b)* ilustran, a groso modo, la adición de estos detalles.



Figura 4.33 a) Adición de detalles “Vista frontal”



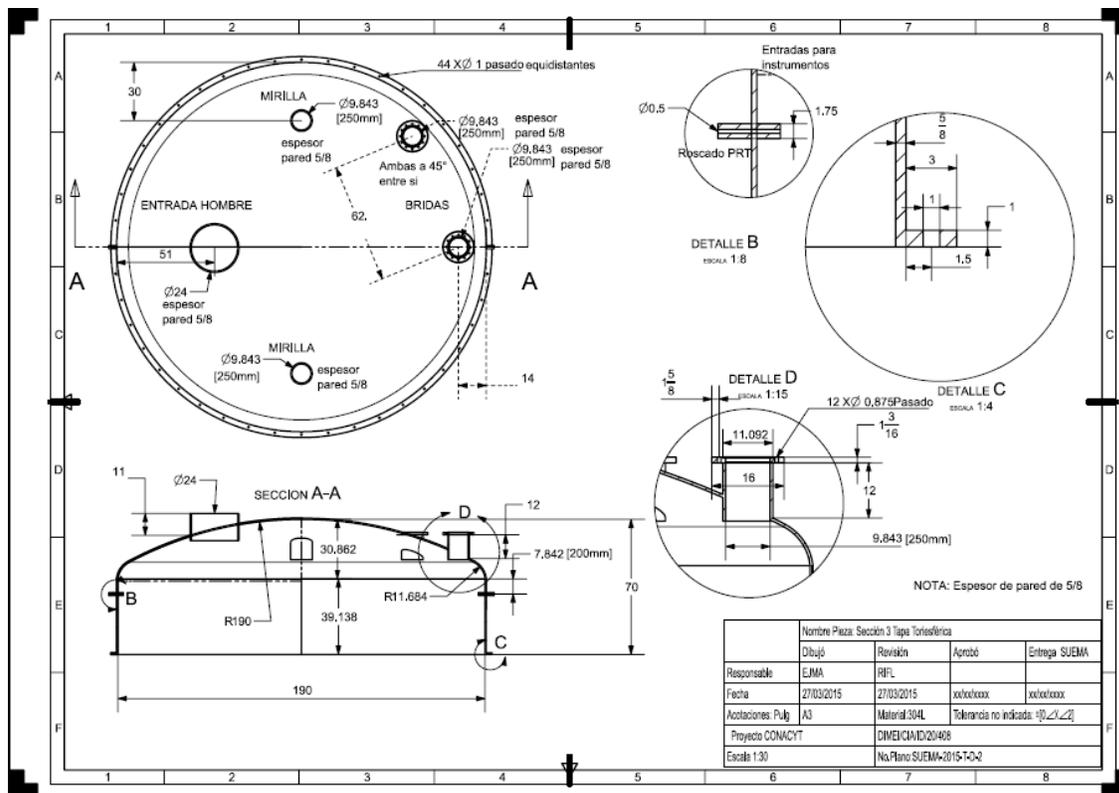
Figura 4.33 b) Adición de detalles “Vista lateral”

## Diseño final

Finalmente, tras la culminación de los cálculos, la propuesta final fue entregada en 3 planos constructivos (uno por cada sección correspondiente), y un plano de referencia.

La sección 3 hace referencia a la tapa toriesférica superior, y una sección cilíndrica del cuerpo. La *figura 4.34* muestra la adición de bridas en las entradas superiores, especificadas por el cliente.

La sección 2 (*figura 4.35*) comprende el cuerpo cilíndrico del tanque, y finalmente la sección 1 (*figura 4.36*) refiere la base hemisférica del tanque.



**Figura 4.34** Plano constructivo sección 3

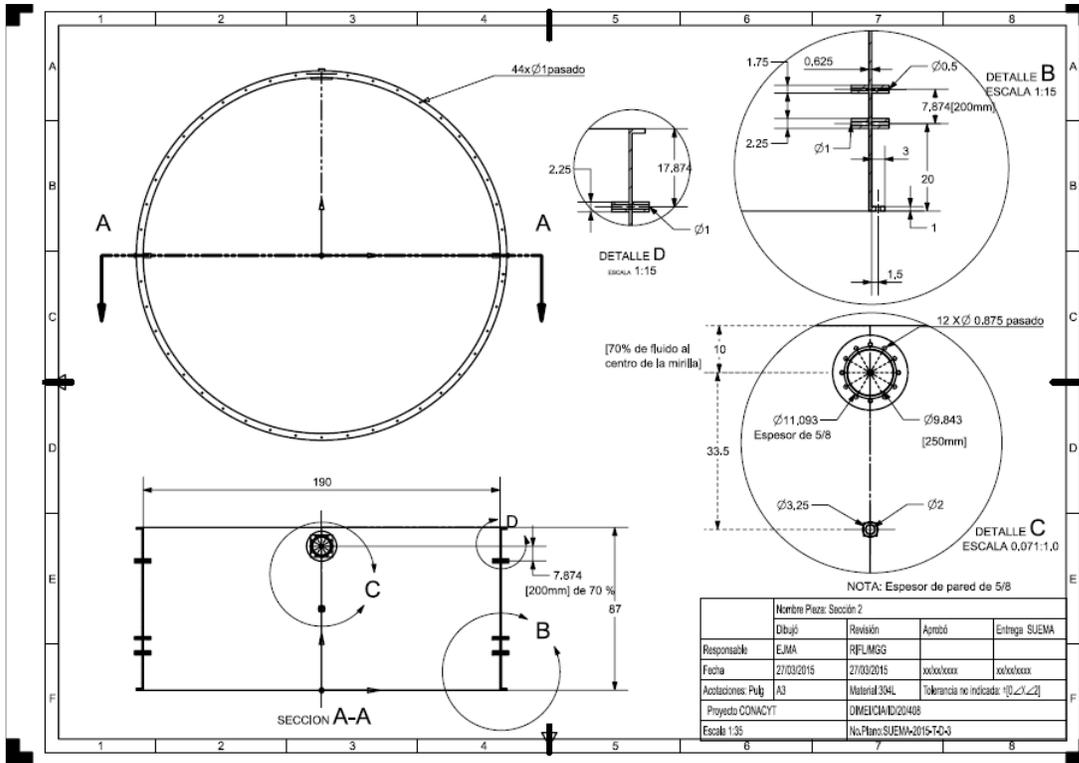


Figura 4.35 Plano constructivo sección 2

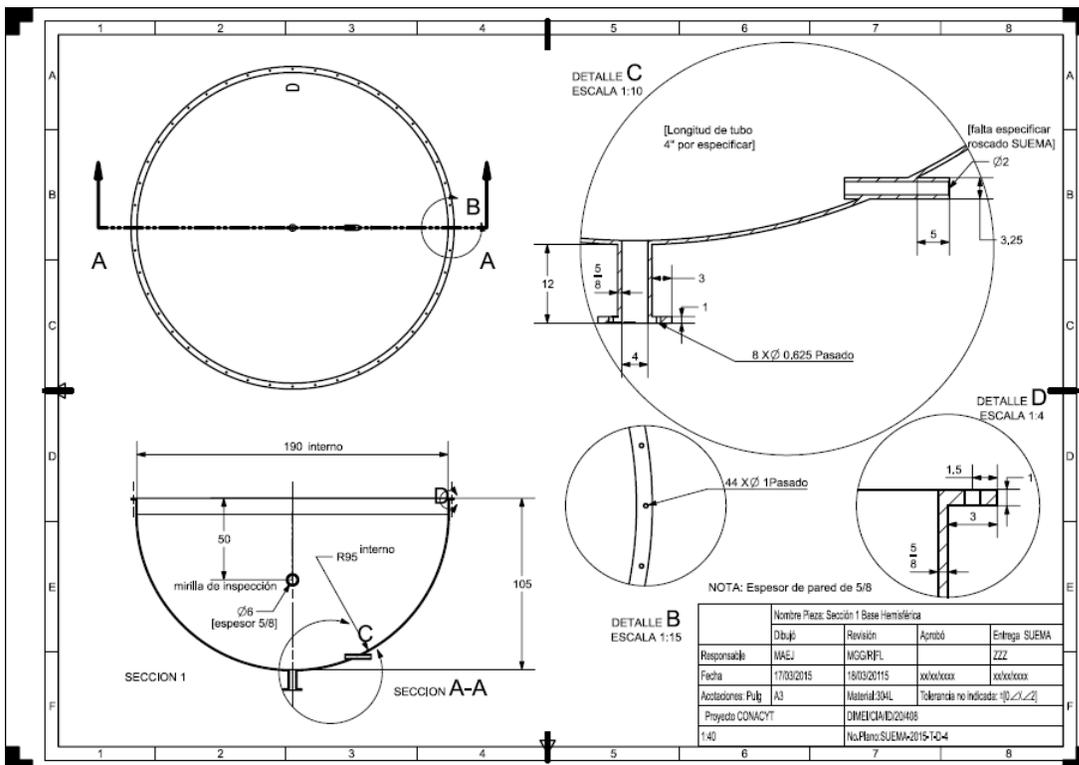


Figura 4.36 Plano constructivo sección 1



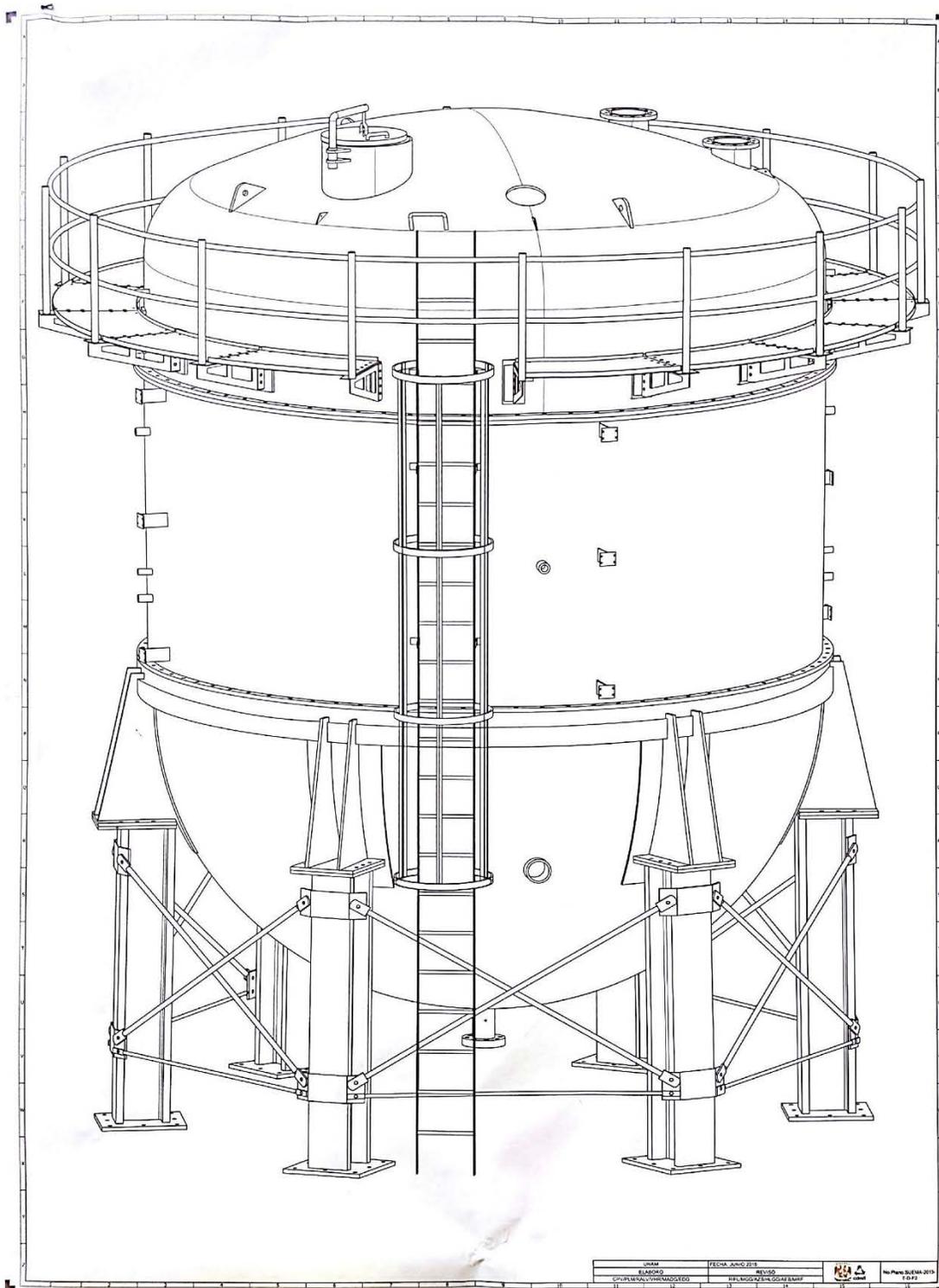


Figura 4.38 Diseño final

# Conclusiones

1

Tras estos 4 capítulos, se considera cumplido el objetivo propuesto del trabajo, ya sea como guía de iniciación en el diseño de tanques sometidos a presión, o como referencia en casos atípicos de diseño de tanques, tanto por parte de la metodología propuesta como por el caso de estudio aquí mostrado, señalando ciertos contratiempos, consideraciones y sus respectivas consecuencias, a continuación, enlistadas, respecto al diseño final.

2

En cuanto a la metodología de diseño de tanques a presión propuesta, no deberá considerarse como lineal, sino como una guía base con múltiples etapas de retroalimentación, especialmente en lo referente a diseños no convencionales y por parte de diseñadores sin experiencia previa en contenedores a presión.

3

En los casos de diseño de tanque sometidos a presión convencionales, se podrá omitir o minimizar gran parte de la sección 1 “diseño conceptual”, de la metodología aquí propuesta, y servirse únicamente de la sección 2 “diseño paramétrico”.

4

Con respecto al caso de estudio presentado, analizando los datos obtenidos, principalmente el cálculo efectuado durante el diseño paramétrico, se observa como el margen entre los esfuerzos esperados, inclusive en las situaciones más críticas, y los esfuerzos máximos permisibles, es muy alto.

Aunque incrementa la seguridad ante imprevistos sufridos por el tanque, esta condición es innecesaria al considerar que el método de diseño paramétrico basado en el código ASME BPVC ya incluye una serie de condiciones de seguridad que se puede considerar incrementan el factor de la misma en la operación del tanque, estas consideraciones son:

- Se maneja un esfuerzo máximo permisible en el diseño, diferente a un esfuerzo de cedencia, que en el caso del material utilizado en este caso de estudio (Acero inoxidable 304I), sus valores son de 15,700 Psi contra 33,000 Psi respectivamente, con una diferencia de 17, 300 Psi entre ambos estándares. Si bien, esta consideración no considera la falla por inestabilidad elástica, sí ofrece un factor de seguridad importante frente a los esfuerzos esperados en la operación normal.

- Se emplea una presión de diseño, la cual, generalmente sobredimensiona en un 10% la presión esperada de operación incrementando la seguridad del tanque.
- Se incluye una tolerancia extra en el espesor por corrosión, la cual prevé ser mayor que la pérdida de material.
- Se define un valor de eficiencia en la soldadura el cual prevé deficiencias leves en ésta y lo corrige aumentando espesores de pared.
- Se prevé el diseño y construcción en base a cargas adicionales a la presión interna del recipiente basadas en la experiencia en diseño, construcción y operación a lo largo de un periodo de tiempo muy amplio.

Tras una iteración hecha en el programa de cálculo anteriormente presentado, se llegó a la conclusión que, bajo condiciones de operación reales, el tanque podría presentarse en medidas de espesor de pared más contenidas, mientras conserva la seguridad de desempeñarse óptimamente, esta comparación puede observarse en la tabla A

	Original	Rediseño
Presion de diseño	65.2 Psi	29.7 Psi
Margen por corosión	0.125 (1/8)	0.0625 (1/16)
Eficiencia de soldadura	0.8	0.8
Espesor requerido (Cuerpo)	0.62 Pulg	0.29 Pulg
Espesor requerido (Cabeza)	0.6 Pulg	0.28 Pulg
Espesor requerido (Base)	0.37 Pulg	0.175 Pulg
Maximos esfuerzos presentados	2,402 Psi	2,990 Psi
Naturaleza de los esfuerzos	Tension (Barlovento)	Compresión (Sotavento)
Evento	Esfuerzos combinados	Esfuerzos combinados
Cumple la estabilidad elástica?	Si	Si
Placa a usar	5/8 Pulg	1/3 Pulg

Tabla A

5

Con respecto al caso de estudio presentado, analizando la geometría presente en el contenedor y su desempeño bajo una serie de solicitaciones, se concluye que la geometría robusta del contenedor y sus proporciones de altura y diámetro semejante, principalmente seleccionadas para un máximo aprovechamiento del volumen interno, presentaron una baja cantidad de esfuerzos a dichas solicitaciones, en comparación con geometrías cuya relación de altura respecto a su diámetro es mayor.

6

Con respecto al caso de estudio presentado, el programa de cálculo utilizado como herramienta auxiliar en el diseño paramétrico, el cual fue programado por el autor, ha sido probado con éxito en el ámbito profesional, posterior al desarrollo del caso de estudio, y se ha utilizado en la revisión y comprobación de memorias de cálculo de diversos proyectos, comprobando ser una herramienta válida y fidedigna.

# Trabajo a futuro

La metodología propuesta y la experiencia en la realización de éste trabajo se pueden emplear en la futura realización y supervisión de tanques sometidos a presión, acortando tiempos de diseño y optimizando los mismos.

Realizar el análisis por elemento finito en la base del tanque, debido a que es un tanque elevado, el peso se concentra en la unión de las columnas de la base y la propia base del tanque. Esto podría influir en la elección del espesor de la misma base del tanque o sus refuerzos.

Adicionalmente, con un trabajo posterior, es posible expandir, complementar e inclusive obtener derechos sobre un software producido basado en el software desarrollado para este trabajo, considerando que ya ha demostrado su utilidad en proyectos profesionales no relacionados con el trabajo.

# Bibliografía

Megyesy E. F. (1993) *Manual de recipientes a presión, Diseño y Cálculo* (2° Edición) Limusa: Grupo Noriega Editores

Dieter G. E. y Schmidt L. C. (2009) *Engineering Design* (4° Edición) Mc Graw Hill: Higher Education

León Estrada J. M. (2001) *Diseño y Cálculo de Recipientes Sujetos a Presión* (Edición 2001) Inglesa

The American Society of Mechanical Engineers (2013) *Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Section VIII – Pressure Vessels Division- 1*

The American Society of Mechanical Engineers (2013) *Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Section VIII – Pressure Vessels Division- 2*

The American Society of Mechanical Engineers (2013) *Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Section X – Fiber-Reinforced Pressure Vessels*