

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



Tesis

**Diseño de un Tanque de Almacenamiento de Combustible
Basado en Norma API 650 para Alimentar Grupos Electrógenos
de 1875 KVA en una Mina Polimetálica**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por:

Kevin Arnold Delgado Oblitas

 [0009-0001-7042-0639](https://orcid.org/0009-0001-7042-0639)

Asesor:

Dr. Aurelio Marcelo Padilla Ríos

 [0009-0007-6270-6171](https://orcid.org/0009-0007-6270-6171)

LIMA – PERÚ

2024

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento va dirigido a todos los docentes de la facultad de ingeniería mecánica por la formación de ingenieros y facilitadores por continuar con nuestra investigación, a mi asesor el Dr. Aurelio Padilla por el apoyo y orientación para culminar el desarrollo de la tesis.

DEDICATORIA

A mi madre por su apoyo durante toda mi etapa universitaria siendo pilar en mi formación, y a mi pareja que es la persona que más me inspira, por ser mi motor en los momentos difíciles y por creer siempre en mis sueños. Esta tesis es el reflejo de tu constante apoyo.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

Índice de Tablas	vi
Índice de Figuras	vii
Resumen	ix
Abstract	x
CAPÍTULO I: Generalidades	1
1.1. Antecedentes investigativos	1
1.2. Descripción de la Realidad Problemática.....	3
1.3. Formulación de la Problemática.....	4
1.3.1. Problema Principal	4
1.3.2. Problemas Específicos.....	4
1.4. Justificación e Importancia.....	4
1.5. Objetivos Generales y Específicos	5
1.5.1. Objetivo General	5
1.5.2. Objetivo Especifico	5
1.6. Hipótesis.....	6
1.6.1. Hipótesis General	6
1.6.2. Hipótesis específicas.....	6
1.7. Operacionalización de Variables.....	6
1.8. Metodología de la Investigación.....	7
1.8.1. Unidad de Análisis	7
1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación	7
1.9. Exclusiones	7
CAPÍTULO II: Marco Teórico y Marco Conceptual.....	8
2.1. Bases y Criterios	8
2.1.1. Combustibles	8
2.1.2. Diesel.....	8
2.1.2.1. Diesel B5	8
2.1.3. Tanques de Almacenamiento.....	10
2.1.4. Corrosión	14
2.1.4.1. Corrosión uniforme	14
2.1.4.2. Corrosión por picaduras	15
2.1.4.3. Corrosión Intergranular	15
2.1.4.4. Corrosión galvánica.....	15
2.1.5. Norma API 650	16
2.1.5.1. Alcances.....	16
2.1.6. Normas ASME	19
2.1.7. Sistemas Contra Incendio	20
2.1.7.1. Inflamabilidad de los combustibles	21
2.1.7.2. Métodos de Extinción	22
2.2. Marco Conceptual	27
2.2.1. Tanque de Almacenamiento	27
2.2.2. Grupo Electrógeno	27
2.2.3. Presión.....	27
2.2.4. Carga Muerta	27
2.2.5. Esfuerzo.....	28
2.2.6. Momento.....	28
2.2.7. Carga Viva	28

CAPÍTULO III: Desarrollo del Trabajo de Investigación	29
3.1. Generalidades del Proyecto.....	29
3.2. Parámetros del Proyecto	30
3.2.1. Condiciones de Sitio	30
3.2.2. Condiciones de Operación	30
3.3. Parámetros de Diseño	32
3.4. Normas Internacionales Aplicadas.....	34
3.5. Cálculo hidráulico	35
3.6. Diseño de Tanque	38
3.6.1. Selección del Material	40
3.6.2. Fondo de Tanque.....	44
3.6.3. Envolverte de Tanque	45
3.6.4. Anillos Rigidizadores Intermedios	47
3.6.5. Diseño de Techo.....	53
3.6.6. Diseño y selección de conexiones	58
3.6.6.1. Conexiones principales.....	59
3.6.6.2. Diseño de venteo.....	65
3.6.7. Verificación de Efecto de Viento.....	69
3.6.8. Verificación del Efecto Sísmico	73
3.6.9. Diseño de Pernos de Anclaje	88
3.6.10. Diseño de Silletas de Anclaje	93
3.7. Sistemas de Protección	98
3.7.1. Diseño de Cubeto	99
3.7.2. Diseño de sistema contra incendio.....	100
3.7.2.1. Diseño sistema de rociadores.....	101
3.7.2.2. Diseño de hidrante – monitor.....	104
3.7.2.3. Diseño de cámara de espuma y tanque bladder.....	105
CAPÍTULO IV: Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión Resultados .	114
4.1. Análisis de resultados.....	114
4.2. Contrastación de Hipótesis	119
4.2.1. Contrastación de Hipótesis General.....	119
4.2.2. Contrastación de Hipótesis Especificas.....	120
4.3. Discusión de Resultados	122
Conclusiones	124
Recomendaciones	125
Referencias	126
Anexos.....	129
Anexo A: Esfuerzos Admisibles de Materiales de Planchas de Acero – API 650	129
Anexo B: Dimensiones de Boquillas para Virolas – API 650	130
Anexo C: Módulos de Sección de Anillos Rigidizadores – API 650	131
Anexo D: Cargas de Levantamiento para Cálculo de Anclajes – API 650	132
Anexo E: Hoja de Cálculo – Tanque de Almacenamiento de Techo Cónico	133
Anexo F: Diagramas PFD y Planos de Planta.....	149

Índice de Tablas

Tabla 1	Operacionalización de Variables.....	6
Tabla 2	Parámetros de control Diesel B-5	9
Tabla 3	Condiciones de sitio.....	30
Tabla 4	Parámetros de operación.....	31
Tabla 5	Características físicas del sistema.....	36
Tabla 6	Resultados de Caudal y Velocidad	37
Tabla 7	Diámetro y Altura del Tanque	39
Tabla 8	Niveles del Tanque	40
Tabla 9	Esfuerzos de Materiales	42
Tabla 10	Parámetros de diseño para el cálculo del techo.....	54
Tabla 11	Conexiones de pared de Tanque.....	59
Tabla 12	Resumen de dimensiones de Manhole	64
Tabla 13	Parámetros de operación para cálculo de Venteo.....	66
Tabla 14	Factor Y	67
Tabla 15	Factor C.....	68
Tabla 16	Factor de Importancia I	74
Tabla 17	Factor Fa función de Clases de Sitio	75
Tabla 18	Factor Fv función de Clases de Sitio.....	75
Tabla 19	Factores de Zona.....	76
Tabla 20	Factor Impulsivo y Convectivo	77
Tabla 21	Criterios de Ratio de Anclaje	86
Tabla 22	Mínimo Borde Libre	88
Tabla 23	Casos de Cargas Sísmicas y Viento	89
Tabla 24	Resumen de dimensiones de Silleta	97
Tabla 25	Tasa de Aplicación de Espuma para Hidrante Monitor	106
Tabla 26	Numero de Descargas según Diámetro de Tanque	107
Tabla 27	Densidad de Tasas de Aplicación.....	108
Tabla 28	Resultados de Rociadores para Tanque de Almacenamiento.....	111
Tabla 29	Modelo de Boquilla Eductora	113
Tabla 30	Valores de Presión y Caudal	113
Tabla 31	Resumen de Dimensiones y Espesores de Tanque de Almacenamiento	123

Índice de Figuras

Figura 1 Tanque de Almacenamiento de Acero	11
Figura 2 Tanque de Almacenamiento de Fibra de Vidrio.....	11
Figura 3 Tanque de techo Cónico	13
Figura 4 Corrosión en Tanques de Almacenamiento.....	14
Figura 5 Corrosión Galvánica de pernos en planchas.....	16
Figura 6 Tipos de Rociadores para Alternativas de Extinción de Incendio	25
Figura 7 Área de Ubicación de Tanque y Grupos Electrógenos	29
Figura 8 Grupo Electrógeno	31
Figura 9 Ubicación de Tanque de Almacenamiento y Grupos Electrógenos.	32
Figura 10 Niveles de Tanque	33
Figura 11 Ruteado de tuberías desde Tanque hacia Grupos Electrógenos.....	35
Figura 12 Layout de Sistema de Transporte de Combustible	37
Figura 13 Diagrama para Selección del Material	41
Figura 14 Diagrama de T vs %Concentración para encontrar los Mils	43
Figura 15 Tabla de módulos de sección de anillos rigidizadores.....	49
Figura 16 Detalle de soldadura en la parte superior de unión viga rigidizadora - Techo. 50	
Figura 17 Tabla del perfil de coronamiento para diferentes diámetros de tanque.....	50
Figura 18 Uniones comunes de techo - pared - anillo	57
Figura 19 Distancias Mínimas de Conexiones de Pared	60
Figura 20 Distancias mínimas de conexión de Pared de Tanque	61
Figura 21 Dimensiones de Manhole	62
Figura 22 Dimensiones de Manhole	63
Figura 23 Consideraciones de carga presentes en un tanque por acción del Viento.....	69
Figura 24 Zona Convectiva e Impulsiva del líquido al interior de un Tanque	73
Figura 25 Diagrama de Silletas	98
Figura 26 Cubeto de Tanque	100
Figura 27 Radio de cobertura de Rociador.....	102
Figura 28 Hidrante Monitor de 4"	105
Figura 29 Diagrama de Aplicación para selección de Cámara Espuma	109
Figura 30 Diagrama del Sistema Contra Incendio	110
Figura 31 Diagrama de Cámara de Espuma y Monitor Hidrante	112
Figura 32 Criterio de Von Misses	114
Figura 33 Cuerpo y Estructura de Tanque de Almacenamiento 3D.....	115
Figura 34 Cuerpo de Tanque de Almacenamiento	116

Figura 35 Mallado del Tanque Almacenamiento	117
Figura 36 Resultados de Análisis Estático en Tanque.....	118
Figura 37 Deformaciones Máximas en Pared de Tanque de Almacenamiento.....	119
Figura 38 Tanque de Almacenamiento bajo Metodología BIM	123

Resumen

El presente trabajo tiene como primer objetivo calcular y diseñar un tanque de almacenamiento de combustible (Diesel B5) de una capacidad de 63.61 m³ y para ello se recurren a las normas API 650, donde se encuentran los requisitos mínimos que debe cumplir el diseño; estos cálculos serán presentados de forma detallada como una memoria de cálculo en los anexos de nuestro trabajo, además de las normas ASME VIII para el diseño de pernos de anclaje y ASME B31.4 para el diseño de las tuberías para el transporte del combustible desde el tanque hacia los grupos electrógenos. El diseño del tanque será comprobado no solo por normas, sino que se realizará el modelado mediante el software Ametank, y el análisis por elementos finitos mediante INVENTOR. Los equipos de protección también juegan un rol importante cuando se trata de almacenamiento de combustible, por lo que de acuerdo con la norma NFPA 11, se va a seleccionar el o los accesorios con mejor desempeño para proteger al equipo e instalaciones de cualquier siniestro. El tipo de trabajo de investigación es del tipo aplicativo con un enfoque cualitativo, se busca aplicar normas a un sistema específico para resolver la problemática y necesidad. Los resultados obtenidos permiten un mejor entendimiento acerca del diseño de tanques y una correcta aplicación de las normas, además del dimensionamiento de líneas de transporte de combustible y los sistemas de protección.

Palabras clave: Tanque, Diesel B5, API, ASME, NFPA.

Abstract

The present job has as first objective to calculate and design a fuel storage tank (Diesel B5) with a capacity of 63.61 m³, adhering to API 650 standards. Where we find the minimum requirements that our design must meet, these calculations presented in details as a calculation report in the annexes of our work, in addition to ASME VIII standards for design of anchor bolts and ASME B31.4 for the design of pipes that transport fuel from the tank to the generator sets. The tank design will not only be checked against standards but will also be modeled using Ametank software and analyzed with finite element analysis using INVENTOR. Protective equipment also plays an important role when it comes to fuel storage, so in accordance with the NFPA 11 standard, we will select the performing accessories or accessories to protect equipment and facilities from any accident. The type of research work is of the application type with a qualitative approach, we seek rules to apply to specific system solve the problem and need. The results obtained allow a better understanding of tank design and the correct application of standards, as well as the sizing of fuel transport lines and protection system.

Keywords: Tank, Diesel B5, API, ASME, NFPA.

CAPÍTULO I: Generalidades

1.1. Antecedentes investigativos

Concha F., et al. (2018)¹, analizo las consideraciones que se tomara al momento de seleccionar el tamaño de un tanque y algunos de los tipos principales de tanques que se diseñan y construyen; así mismo se refiere al desarrollo del diseño del tanque, en donde se analizó cada detalle siguiendo las pautas paso a paso dadas por la norma API 650, así como el cálculo de cargas sísmicas y los cálculos de la estructura de acero interna del tanque permitiendo comparar los esfuerzos permisibles y el diseño por resistencia.

Yafac J., et al. (2019)², tuvo como objetivos el diseño de un tanque basado en norma API 650, desarrollando el fondo, pared, techo de domo y seleccionar de materiales, además del desarrollo de un método de protección catódica para prevenir la corrosión al interior del tanque. Proporciono también el metrado de la cantidad de acero y la evaluación económica lo cual decide si el proyecto es viable o no, permitiendo obtener una buena operatividad en el diseño.

Andrianich J., et al. (2019)³, diseño tanque de almacenamiento de 100,000 galones aplicando las normas peruanas vigente y la norma internacional API 650, así como el diseño del sistema de protección contra incendios que tendrá equipos principales como un sistema de bombas autónomas, del tipo motobomba. La metodología aplicada busca definir el material adecuado basándose en la compatibilidad y almacenamiento del producto, a su vez de los parámetros de funcionamiento del sistema contra incendio esperando así contar con un diseño optimo y confiable.

¹ Concha, F. (2018). Diseño, Fabricación y Montaje de Tanque de Almacenamiento de Diesel de 200, 000 Galones de capacidad, Basado en Norma Api 650, para la Unidad Minera Toquepala, Departamento de Tacna. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Chiclayo.

² Yafac, J. (2019). Diseño de tanques de almacenamiento de nafta con protección catódica para la refinería de Iquitos. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Chiclayo.

³ Andrianich, J. (2019). Diseño de Sistema Contra Incendio para 03 Tanques de Almacenamiento de Diesel B5 de 330,000 Galones de capacidad Total. Universidad Católica de Santa María.

Muñoz J., et al. (2021)⁴, el objetivo principal del proyecto es la implementación de un terminal portuario dedicado al almacenamiento de derivados petrolíferos, el área total de diseño deberá tener la capacidad de almacenar 100,000 m³, para conseguir esa cantidad de volumen se procedió a dividir la cantidad en 10 tanques de almacenamiento, los cuales tendrán una capacidad de 10,000 m³ cada uno, el diseño está basado en norma API 650 en la ciudad de Cádiz, además de contemplar las medidas de protección contra incendio según la norma internacional NFPA.

Jaramillo F., et al. (2021)⁵, tiene como objetivo el desarrollo de un modelo simple y eficiente que toma en consideración los efectos producidos en la base del tanque, la flexibilidad del suelo y la interacción fundación – estructura. El desarrollo se basa en análisis dinámico 3D, aplicando movimientos sinusoidales para el comportamiento del tanque en las direcciones propuestas. Los resultados obtenidos permiten una mejor comprensión del comportamiento de tanques anclados y muestran que la interacción suelo – fundación -estructura reduce la respuesta sísmica, lo que motiva posibles modificaciones en los códigos actuales de diseño sísmico.

Aguilar & Rubio., et al. (2022)⁶, Tiene como objetivo diseñar una ruta óptima para transportar el combustible Diesel desde un tanque principal de 11,800 galones hacia tanques dos tanques secundarios de 1850 y 380 galones respectivamente, mediante estudios y dimensionamiento del sistema también se planea conocer los tipos de accesorios que se requieren, sean bombas y los accesorios de succión e impulsión. En su sistema también plantea el uso fundamental de la utilización de una válvula solenoide mediante un control lógico programable LOGO y la instalación de un PLC. Por último se presenta un análisis económico del proyecto.

⁴ Muñoz, J. (2021). Diseño de Tanques de Almacenamiento de Combustibles e Implantación de la Terminal según Instrucción Técnica Complementaria MI-P02 y Protección Contra Incendios. Sevilla.

⁵ Jaramillo, F. (2021). Efecto de los Pernos de Anclaje y Flexibilidad del suelo sobre la respuesta Sísmica de Tanques de Almacenamiento de Líquidos. Universidad Católica de Chile, Chile.

⁶ Aguilar & Rubio. (2022). Diseño y Simulación del Sistema Automático de distribución del Tanque Diesel tipo II desde el Tanque Principal hasta los Tanques Secundarios y de Almacenamiento Diario de 1850 y 380 Galones Respectivamente. Universidad Politécnica Salesiana, España.

Mejía C., et al. (2022)⁷, diseño un tanque horizontal de almacenamiento de combustible Diesel empleando ecuaciones generales de mecánica de materiales y la norma ASME sección VIII, logrando dimensionar los espesores y verificando estos con la norma UL-142, además de la realización de un análisis estático a una determinada presión interior, permitiendo así obtener los planos de construcción y la autonomía deseada para el funcionamiento.

1.2. Descripción de la Realidad Problemática

Una mina polimetálica con capacidad de producción de 5500 t/día, tiene como prioridad poner a prueba un área de proyecto subterráneo mediante el método de minería de parada (lhos), por lo que para ello necesitan reinstalar y ubicar nuevos campamentos con sus estructuras para todas las actividades necesarias de la mina.

Todo el nuevo campamento iba a ser dotada de una fuente general que provenía de la planta principal, por lo que se esperaba que en el campamento haya una subestación preparada para recibir dicha carga y distribuirla, pero dicha carga se desvió para otros proyectos por lo que el campamento necesitaba producir su propia energía, de esta manera surge la problemática de la investigación, ¿Cómo solucionar la carencia de energía?, las consecuencias que generan el no tener energía en la zona es que los equipos de trabajo, así como personal de la mina no puede cumplir con sus labores, ya que los trabajos solo se dan durante la mañana, y como hay inexistencia de campamentos el personal debe ser trasladado por lo que hay mucho tiempo muerto que se pierde debido al no contar con energía.

La solución que se debe presentar debe tener en consideración que se necesita de una fuente primaria de energía y que sea capaz de cubrir las necesidades mínimas del campamento y espacios de trabajo que se requieran, algunas de las soluciones pueden

⁷ Mejía, C. (2022). Diseño de Tanque Horizontal de Acero al Carbono para Almacenamiento de Combustible Diesel de 6120 Gal. Universidad Tecnológica del Perú. Lima.

ser utilizar las energías renovables, como emplear un aerogenerador, paneles solares, etc. o bien utilizar fuentes externas como petróleo o energía nuclear.

Cada una de estas propuestas de solución se consideran según la carga de energía que se requiere para el sitio, además de costos de instalación, mantenimiento y de cuan eficientes pueden llegar a ser en el lugar, por lo que de estas propuestas la más factible y viable es elegir fuentes externas para la generación de energía y sería utilizar grupos electrógenos. Por lo que la tesis se centrara en el almacenaje y alimentación de dichos grupos para el correcto funcionamiento.

1.3. Formulación de la Problemática

1.3.1. Problema Principal

- ¿Cuál es la manera más factible y segura para la alimentación de los grupos electrógenos dentro del campamento para la satisfacción de la necesidad de energía logrando un servicio continuo en la mina polimetálica?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las bases de diseño y en qué medida influye la normativa al momento de comparar los resultados y analizar el diseño?
- ¿Cómo se va a dimensionar el sistema de alimentación y que exigencias debe de cumplir dicho sistema?
- ¿Cuáles son las medidas de contención para dicho tanque en caso ocurra un siniestro o haya una fuga del fluido dentro del tanque?

1.4. Justificación e Importancia

El proyecto es una tesis aplicativa, tiene como valor y justificación que se presenta una solución a una necesidad debido a la falta de energía, además de presentar una guía

de cuáles son los pasos para poder dimensionar no solo el tanque si no también el sistema de tuberías y la red del sistema de protección contra incendio.

El diseño no solo es aplicable a almacenamiento de Diesel si no que se puede extender a aplicaciones de almacenamiento de otros fluidos líquidos. La metodología aplicada tiene una alta exigencia ya que se aplica normas internacionales.

El uso de software como el Ametank y el AFT Fathom presentan ventajas tecnológicas frente a elaborar cálculos de manera manual, ya que permite la reducción de horas hombre, y de optimizar la cantidad de material utilizado y minimizar los costos. En el aspecto social, el tanque presenta sistemas de contención frente a cargas por sismos o incendios, logrando salvaguardar vidas y proteger los equipos del campamento.

1.5. Objetivos Generales y Específicos

1.5.1. Objetivo General

- Diseñar un tanque de almacenamiento de 63.61 m³ de capacidad para alimentar a 2 grupos electrógenos de 1875 KVA en una mina polimetálica.

1.5.2. Objetivo Especifico

- Diseño de un tanque cumpliendo con los requisitos exigidos por la norma API 650 para almacenar fluidos de manera segura mediante hojas de cálculo en Excel y el análisis del comportamiento del tanque por elementos finitos en el software INVENTOR y el modelado en Ametank de acuerdo con la norma.
- Definir el sistema de tuberías de alimentación mediante el software AFT Fathom 10 para garantizar el correcto funcionamiento, y verificar el resultado de acuerdo con la norma ASME B31.4.
- Analizar cuál es el sistema de protección contra incendio óptimo para proteger el tanque y alrededores en caso ocurra un siniestro o una fuga del combustible, de acuerdo con la norma NFPA.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

- El diseño de un tanque de almacenamiento de 63.61 m³ de capacidad permite alimentar a 2 grupos electrógenos de 1875 KVA en una mina polimetálica.

1.6.2. Hipótesis específicas

- El diseño de un tanque de almacenamiento que cumple con los requisitos exigidos por la norma api 650 y que permita almacenar fluidos de manera segura. El diseño será mediante hojas de cálculo en Excel, además del análisis del comportamiento del tanque por elementos finitos en el software Inventor y modelo con Ametank.
- La definición del sistema de tuberías de alimentación mediante el software AFT Fathom 10 garantiza el correcto funcionamiento verificando el resultado, de acuerdo con lo establecido en la norma ASME B31.4.
- El análisis del sistema de protección contra incendios más óptimo protege el tanque y alrededores en caso de un incendio de acuerdo con NFPA 11.

1.7. Operacionalización de Variables

Tabla 1

Operacionalización de Variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Operacionalización		Escala de Medición
			Dimensiones	Indicadores	
VI: Consumo de Combustible del Grupo Electrónico	Es la cantidad de combustible que el grupo electrónico utiliza para operar y generar energía eléctrica.	Funcionamiento del grupo electrónico medido en términos de horas de uso y consumo de combustible.	Frecuencia de operación	Tiempo de uso	Horas
			Litros consumidos por operación	Consumo	Litros/hora
VD: Diseño de la Capacidad del Tanque de almacenamiento	Equipo que cumple la función de poder almacenar y distribuir el fluido durante un tiempo de operación.	Se diseña en función del consumo y el tiempo de operación deseado.	Tiempo de almacenamiento	Tiempo de uso	Horas
			Capacidad total del tanque	Nivel de combustible	Metros

1.8. Metodología de la Investigación

1.8.1. Unidad de Análisis

La unidad de análisis es el tanque de almacenamiento que es el responsable de almacenar y distribuir el combustible Diesel B5 a los grupos electrógenos.

1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación

El tipo de investigación es del tipo aplicativo, debido a que se busca aplicar normas de diseño a una aplicación específica.

El enfoque de la investigación es del tipo cualitativa, porque la elección de un tanque de almacenamiento para alimentar grupos electrógenos fue una sugerencia verbal y aprobada por el cliente.

1.9. Exclusiones

- Se excluyen las consideraciones para procesos de soldadura.
- Los planos presentados en los anexos no son válidos para procesos de construcción.
- La investigación se limita y es válida solo para el área especificada.
- Se excluyen otros conceptos o teorías que requieran más profundidad en el análisis debido a la naturaleza específica del estudio.
- Se excluyen aspectos éticos y nombres de la investigación por razones de privacidad y confidencialidad.

CAPÍTULO II: Marco Teórico y Marco Conceptual

2.1. Bases y Criterios

2.1.1. Combustibles

Combustibles es cualquier material capaz de liberar energía cuando se cambia o transforma su estructura química. Entre los combustibles fluidos, se encuentran los líquidos como el gasóleo, el querosene o la gasolina (nafta) y los gaseosos, como el gas natural o GLP.

La principal característica de un combustible es su poder calorífico, que es el calor desprendido por la combustión completa de masa de kilogramo. Este calor o capacidad calorífica se mide en joule o caloría. Estos combustibles como la gasolina, gasóleos y gas son muy utilizados en la combustión interna de vehículos. (Quimica, 2024)

2.1.2. Diesel

También conocido como gasóleo o gasoil, se obtiene a partir de la destilación y purificación del petróleo. Por lo general, contienen aditivos que mejoran sus cualidades y prestaciones con la finalidad de hacerlos más eficientes, menos contaminantes, más estables químicamente, así como alargar la vida útil del motor. (Repsol, 2024)

Nos encontramos con distintos tipos de Diesel y se pueden dividir es gasóleo tipo A, tipo B y tipo C, la diferencia radica en el refinamiento y la cantidad de aditivos, haciendo que el tipo A sea empleado en vehículos, el tipo B empleado en maquinarias y grupos electrógenos y el tipo C empleado en calderas o equipos de producción, siendo este último más contaminantes.

2.1.2.1. Diesel B5

El diésel B5 – S50 es un combustible constituido por una mezcla en volumen de 95% de diésel n°2 o tipo B y 5% de biodiesel B100, con contenido de azufre máximo de 50

ppm. Este es el combustible empleado para nuestro estudio, por lo que en el siguiente cuadro se muestra un resumen de todos los datos necesarios para tomar como base para nuestro diseño del tanque.

El diésel por sí solo no corroe ni descompone el acero de manera rápida ni genera reacciones significativas que afecten negativamente al acero en un periodo corto de tiempo, sin embargo, bajo ciertas condiciones como contacto con agua, impurezas propias del diésel o temperaturas elevadas si puede producir y acelerar la corrosión. Para prevenir la corrosión en el almacenamiento de diésel se puede utilizar revestimientos en interior del tanque.

Tabla 2

Parámetros de control Diesel B-5

Descripción	Unidad	Valor
Punto de inflamación	°C	60
Punto de ebullición	°C	160- 360
Temperatura de auto inflamación	°C	257
Inflamabilidad	-	Líquidos y vapores inflamables
Presión de vapor	atm	0.004
Gravedad específica a 15.6 °C	-	0.81-0.85
Límites de explosividad	%	1.3 - 6
Solubilidad	-	- En agua insignificante (inmiscible) - En disolventes de petróleo
Viscosidad cinemática a 40°C	cSt	1.9 - 4.1

Nota: Fuente Petroperú (2006), Ficha de datos de seguridad.

De acuerdo con la ficha de seguridad como medidas de lucha contra incendios los medios de extinción son agua pulverizada, polvo químico, espuma, CO₂; nunca utilizar chorro de agua directo. (Repsol, 2006).

2.1.3. Tanques de Almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son recipientes normalmente utilizados para almacenar sólidos, líquidos o gases en condiciones controladas, como presión y temperatura. Su uso más frecuente es el sector petroquímico, debido a su gran variedad para almacenar petróleo crudo y sus derivados, butano, propano, gas licuado de petróleo, etc. Aunque es muy común encontrarlos en otras industrias como tanques de almacenamiento de agua y otros.

Los tanques pueden ser verticales u horizontales, tener cuerpo cilíndrico o esférico, tener un fondo plano, ser cónicos, tener una esfera, tener techo o ser abierto a la atmosfera. Debido al tipo de fluido y según las condiciones que necesitamos para nuestro trabajo vamos a centrarnos en un tanque de almacenamiento vertical de cuerpo cilíndrico del tipo atmosférico, es decir sin presión interna, más que la presión que ejerce el propio fluido almacenado. Dentro de estos tanques nos encontramos tanques tipo domo, tanques techo fijo, tanques techo cónico, tanque techo flotante, tanques empernados, etc.

Los materiales para los tanques varían según la aplicación que se necesite, los tanques de acero son muy empleados para el almacenamiento de crudo, productos petroleros, químicos y otros líquidos, los tanques de fibra de vidrio son ligeros y resistentes a la corrosión, son muy útiles si se requiere almacenar productos químicos y combustibles. Los tanques de polietileno son empleados para almacenar productos químicos y agua, son resistentes a la corrosión y son una opción económica para almacenamientos a pequeña escala.

Figura 1

Tanque de Almacenamiento de Acero



Nota: Fuente CAMEX (2023).

Figura 2

Tanque de Almacenamiento de Fibra de Vidrio



Nota: Fuente LEPSA (2023).

Por otro lado, también hay distintas aplicaciones dependiendo del fluido como los tanques criogénicos, que almacenan gases licuados a temperaturas bajas, como el oxígeno líquido, nitrógeno líquido y argón. Estos y otros tanques también se adecuan y se eligen por el material pudiendo almacenar alimentos, agua y productos químicos a granel.

Según sus aplicaciones y las propiedades físicas del fluido a almacenar podemos dividir a los tanques en dos grupos, los tanques de techo fijo (soportados y auto soportados) y los tanques de techo flotante; empleados en líquidos volátiles y contaminantes.

TANQUES SOPORTADOS

Son los tanques asociados a techo fijos, es decir necesitan de un elemento estructural para ser soportados en la superficie de su área, para su diseño se necesitan de largueros y perfiles que irán asociados y soldados en zonas específicas. Generalmente son empleados para tanques de gran diámetro.

TANQUES AUTOSOPORTADOS

Son tanques que se puede soportar así mismos en su periferia, no necesitan de ningún soporte adicional más que un apoyo en la base de estos, generalmente son para diámetros pequeños, estos tanques a su vez se pueden diseñar según la forma que se necesita para la aplicación, pudiendo ser del tipo techo cónico, domo y sombrilla.

Los tanques de techo cónico son útiles y muy empleados por su capacidad de drenaje ya que su forma cónica permite que sólidos y líquidos no se acumulen, además de su reducción de acumulación de materiales y mayor resistencia estructural, esto permite al tanque ser instalado en condiciones climáticas severas como vientos fuertes o nieve acumulada. Por último, es su fácil limpieza y mantenimiento además de que estos tanques de techo cónico son comunes en la industria química y petroquímica.

Figura 3

Tanque de techo Cónico



Nota: Fuente La Industria (2017).

Los tanques de techo domo son utilizados por su resistencia estructural ya que son fuertes y resistentes, distribuyen las cargas uniformemente sobre las paredes del tanque, lo que los hace adecuados para soportar cargas de viento y nieve, estos tanques son empleados por su mayor capacidad de almacenamiento en comparación a los tanques de techo cónico y planos, además de tener bajo mantenimiento y reducción de riesgos ambientales.

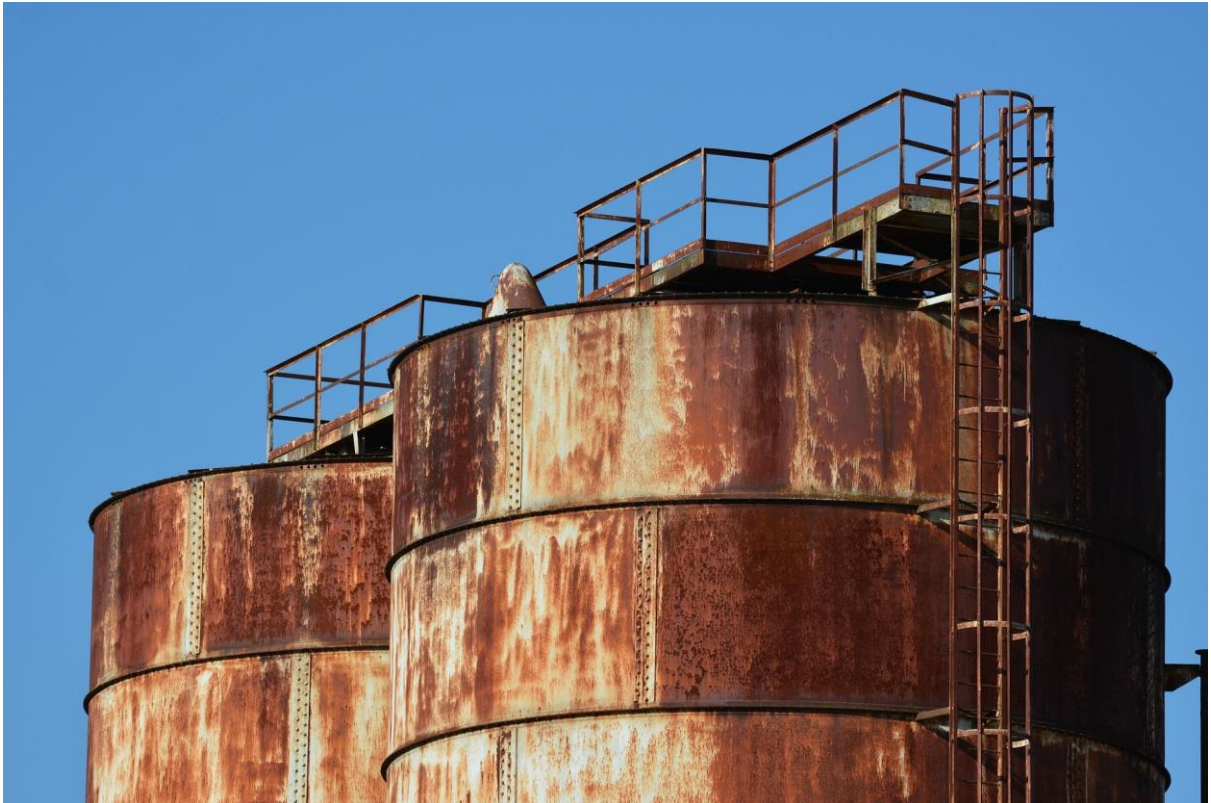
Los tanques de techo flotante son un tipo de tanque de almacenamiento utilizados para contener líquidos, como productos petroleros, químicos o líquidos a granel, lo que distingue a estos tanques es que el techo sube o baja a medida que el fluido avanza, las características y ventajas de estos tanques son que tiene un control de emisiones, ya que no deja espacio entre el líquido y techo para que se formen vapores, estos tanques son mucho más seguros debido a su alta confiabilidad lo que mejora la seguridad contra incendios. Las aplicaciones de estos tanques son comunes en la industria petrolera y petroquímica, donde se utilizan para el almacenamiento de petróleo crudo, productos refinados y otros líquidos a granel.

2.1.4. Corrosión

La corrosión del acero es un proceso químico y electroquímico que puede ocurrir en una variedad de formas. La corrosión a diferencia de la oxidación es un término que hace referencia al deterioro del material mientras que la oxidación es solo una reacción química en presencia del oxígeno que produce sobre el material una capa de óxido o herrumbre, por lo que la oxidación no es un proceso dañino para el material a diferencia de la corrosión. A continuación, se presentan los tipos de corrosión más comunes que afectan al acero:

Figura 4

Corrosión en Tanques de Almacenamiento



Nota: Fuente Arveng Training (2023), Corrosión en tanques de acero.

2.1.4.1. Corrosión uniforme

También conocida como corrosión generalizada, este tipo de corrosión ocurre de manera uniforme en toda la superficie. Se caracteriza por la pérdida gradual y constante

del material a lo largo del tiempo. La exposición a la humedad y la atmosfera es una de las principales causas de tipos de corrosión.

2.1.4.2. Corrosión por picaduras

La corrosión se produce en forma de pequeñas depresiones o picaduras en la superficie, suele ser causada por la presencia de áreas con concentraciones locales de agentes corrosivos, como los cloruros o ácidos.

2.1.4.3. Corrosión Intergranular

En este tipo de corrosión, la corrosión ocurre a lo largo de los límites de grano del acero, debilitando la estructura del material. Esto a menudo es causado por la sensibilización del acero debido a la exposición al calor durante la soldadura y otros procesos de fabricación.

2.1.4.4. Corrosión galvánica

La corrosión galvánica ocurre cuando dos metales diferentes están en contacto eléctrico y en un entorno corrosivo. Un metal actúa como ánodo (se corroe) y el otro como cátodo (permanece protegido). Este tipo de corrosión también se presenta debido a la diferencia de potencial eléctrico, ya que cada metal tiene un potencial electroquímico único, y al tener dos elementos juntos con un alto valor de diferencia de potencial esto favorece la corrosión de uno de los metales, otros factores que aumentan la corrosión galvánica son la presencia de un electrolito, la conductividad eléctrica y el área relativa de los metales.

Figura 5

Corrosión Galvánica de pernos en planchas



Nota: Fuente agua.es (2023).

2.1.5. Norma API 650

También conocida como la norma API STD 650, es una norma desarrollada por el instituto americano de petróleo (API, por sus siglas en inglés) que establece los requisitos para el diseño, construcción, inspección, y ensayos de tanques de almacenamiento de acero soldados para productos a temperatura ambiente, con capacidades de almacenamiento superiores a 300 galones.

Si bien es cierto que el alcance del código no se limita al almacenamiento de petróleo y sus derivados, es aplicable para almacenamiento de productos químicos, agua, etc. (Tirenti, 2024)

2.1.5.1. Alcances

El estándar API 650 solo cubre aquellos tanques en los cuales se almacenan fluidos líquidos y están contruidos de acero con el fondo uniformemente soportado por una cama de arena, grava, hormigón, etc.; están diseñados para soportar una presión de operación atmosférica menor a 18 kPa o presiones internas que no excedan el peso del techo por unidad de área cuadrada y una temperatura de operación mayor a 93°C, además de que el estándar API 650 permite calcular tanques de forma cilíndrica o vertical,

excluyendo los depósitos horizontales apoyados en soportes y los tanques para servicios de refrigeración. (Garcia, 2017)

La normativa API 650 tiene una estructuración muy clara que nos permite distinguir de un rápido vistazo del proceso de diseño de un tanque metálico siguiendo una secuencia lógica de los apartados y secciones, a continuación, se listan las secciones:

Sección I: esta sección describe el objeto general de la norma junto con sus aplicaciones, formulas y responsabilidades de uso.

Sección II: Recoge las referencias utilizadas para elaborar la normativa, resulta de interés ya que recoge toda la normativa dimensional de materiales, procedimientos de soldadura, componentes, estructura metálica, etc.

Sección III: Detalla todos los términos utilizados en la norma y cada una de sus definiciones. Es importante analizarlo en detalle antes de utilizar la norma para su total comprensión.

Sección IV: Una de las secciones más detalles en cuanto a los materiales utilizados y sus propiedades necesarias para el cálculo de cada uno de los elementos. Incluye los requisitos mínimos de chapas, barras, perfiles, tubos, bridas, pernos, consumibles de soldadura, etc.

Sección V: La más importante ya que recoge todos los requisitos de diseño que debe contemplar un tanque metálico, establece las exigencias en cuanto a uniones soldadas, consideraciones de diseño, chapas de fondo, chapas anulares, envolvente, anillos intermedios y superiores, techos, efectos de nieve, efectos de sismo y anclaje de tanques.

Sección VI: Indica las pautas necesarias para poder fabricar y construir el tanque de acuerdo con la norma, de modo que en todo momento se encuentre dentro de los estándares admisibles y se evite cualquier tipo de error.

Sección VII: Contempla las distintas exigencias durante el izado de los tanques como son detalles de soldadura, ensayos, inspección y reparaciones, tolerancias dimensionales.

Sección VIII: Recoge todos los métodos de inspección admitidos y su procedimiento para realizarlos correctamente. Muy útil si se tiene que inspeccionar un tanque se ha sido diseñado.

Sección IX: Recoge todos los procedimientos de soldadura y cualificación de soldadores, además de definiciones, procedimientos y organismos autorizados para la correcta cualificación del soldador que ejecute el montaje de tanque según API 650.

Sección X: La última sección de la norma donde se encuentra la manera de como elaborar correctamente una chapa de identificación que recoja todas las propiedades bajo las cuales se ha diseñado.

Además de cada una de estas secciones la norma API 650 cuenta con 27 anexos que recogen todo tipo de situaciones que se pueden encontrar y que son de gran utilidad cuando se diseñe un tanque con consideraciones específicas, a continuación, se va a hacer una breve mención de algunos de estos anexos:

Anexo A: Bases de diseño opcional para tanques pequeños.

Anexo D: Consultas técnicas.

Anexo E: Diseño sísmico de tanques de almacenamiento.

Anexo F: Diseño de tanques con bajas presiones internas.

Anexo L: Hoja de datos de acuerdo con API 650.

Anexo M: Requerimiento de tanques operando a temperatura elevada.

Anexo N: Uso de nuevos materiales.

Anexo T: Requisitos para ensayos no destructivos (NDE).

Anexo V: Diseño de tanques bajo presión externa.

Otras normas aplicables también son el API 2000 (Venteos atmosféricos para tanques de almacenamiento) y API 620 (Para tanques con presiones superiores a 18 kPa).

2.1.6. Normas ASME

La sociedad Americana Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME, por sus siglas en ingles). Se trata de una organización profesional fundada en 1880 dedicada a promover y desarrollar el campo de la ingeniería mecánica en los estados unidos y a nivel internacional.

ASME establece estándares y códigos para una variedad de industrias, incluyendo ingeniería mecánica, aeroespacial, nuclear, química y muchas otras, estos estándares son utilizados por ingenieros y profesionales para garantizar la seguridad, confiabilidad y calidad de los productos y sistemas mecánicos.

Dentro de los códigos más importantes de diseño nos encontramos con los códigos ASME B31, y su campo de aplicación son los siguientes:

ASME B31.1: Sistema de Tuberías de Potencia (Vapor, Centrales)

ASME B31.3: Sistema de Tuberías de Proceso (Procesos, Refinerías, Petroquímicas)

ASME B31.4: Sistema de Tuberías de Líquidos y Suspensiones (Hidrocarburos)

ASME B31.5: Sistema de Tuberías de Refrigeración

ASME B31.8: Sistema de Tuberías para el Transporte de Gas

ASME B31.9: Sistema de Tuberías de Servicios de Edificios

ASME B31.12: Sistema de Tuberías para Transporte de Hidrogeno

Con fines de estudio de la presente tesis se va a desarrollar la norma ASME B31.4 ya que es la que rige el transporte de líquidos, incluyendo hidrocarburos a través de oleoductos, esta norma es aplicable a oleoductos utilizados para el transporte de líquidos y suspensiones, incluyendo petróleo crudo, productos refinados del petróleo, productos químicos y otros.

2.1.7. Sistemas Contra Incendio

Son un conjunto de equipos y dispositivos diseñados para la prevención y control de incendios. El diseño es regido de acuerdo con las normas NFPA, la cual es la encargada de dar los lineamientos, bases y una serie de consideraciones para la adecuada instalación y diseño de los equipos de protección. Para el correcto diseño y clasificación de los tipos de incendio se procede a dar una descripción de una división de estos de acuerdo con la NFPA 10.

Entre los principales tipos de incendio se tiene:

Incendio Clase A: Este tipo de incendio involucra materiales combustibles ordinarios como madera, papel, tela, cartón y ciertos plásticos. El agente extintor típicamente utilizado es agua o agentes químicos que crean una barrera superficial sobre el material en llamas, evitando que el oxígeno llegue al fuego.

Incendio Clase B: Los incendios de clase B implican líquidos inflamables o gases. Esto incluye productos petrolíferos, gasolina, aceites, pinturas y gases inflamables como el propano. Los agentes extintores efectivos para este tipo de incendios incluyen espumas especiales, polvos químicos secos y dióxido de carbono (CO₂). Estos agentes extintores sofocan el fuego al eliminar el oxígeno o inhibir la reacción química del fuego.

Incendio Clase C: Los incendios de clase C ocurren en equipos eléctricos energizados como electrodomésticos, herramientas y dispositivos eléctricos. Debido al peligro de electrocución, se debe utilizar un agente extintor no conductor de electricidad,

como dióxido de carbono o ciertos polvos químicos secos para extinguir este tipo de incendios.

Incendio Clase D: Los incendios de clase D involucran metales combustibles como magnesio, titanio, sodio y potasio. Estos incendios pueden ser extremadamente peligrosos y requieren agentes extintores específicos, como polvo de grafito o polvo de metal seco.

Incendio Clase K: Este tipo de incendio se refiere a incendios que involucran gases y aceites de cocina, comúnmente encontrados en entornos de restaurantes y cocinas industriales. Los extintores de clase K contienen agentes químicos especiales que reaccionan con los aceites y grasas para formar una espuma jabonosa que sofoca el fuego y previene su reencendido.

2.1.7.1. Inflamabilidad de los combustibles

De acuerdo con la norma NFPA 30, que es código de líquidos inflamables y combustibles, clasifica los líquidos inflamables y combustibles en diferentes clases según sus propiedades y riesgos específicos, las clases principales según la NFPA 30 son:

Clase I Líquidos Inflamables

Clase IA: Líquidos inflamables con punto de inflamación inferior a 73 °F (22.8 °C) y un punto de ebullición inferior a 100 °F (37.8 °C).

Clase IB: Líquidos inflamables con punto de inflamación inferior a 73 °F (22.8 °C) y un punto de ebullición igual o superior a 100 °F (37.8 °C).

Clase IC: Líquidos inflamables con punto de inflamación igual o superior a 73 °F (22.8 °C) y un punto de ebullición igual o superior a 100 °F (37.8 °C).

Clase II Líquidos Combustibles

Clase IIA: Líquidos inflamables con punto de inflamación inferior a 100 °F (37.8 °C) y un punto de ebullición igual o superior a 100 °F (37.8 °C).

Clase IIB: Líquidos inflamables con punto de inflamación igual o superior a 100 °F (37.8 °C) y un punto de ebullición igual o superior a 100 °F (37.8 °C).

Clase IIC: Líquidos inflamables con punto de inflamación igual o superior a 100 °F (37.8 °C) y un punto de ebullición igual o superior a 150 °F (65.6 °C).

Clase IIIA y IIIB Líquidos combustibles

Clase IIIA: Líquidos inflamables con punto de inflamación igual o superior a 140 °F (60 °C) y un punto de ebullición igual o superior a 200 °F (93.3 °C).

Clase IIIB: Líquidos inflamables con punto de inflamación igual o superior a 200 °F (93.3 °C).

2.1.7.2. Métodos de Extinción

Existen varios métodos de protección contra incendios que se utilizan para prevenir, controlar y extinguir incendios en diferentes situaciones. Algunos de los métodos de protección contra incendio incluyen:

Extintores de incendio

Los extintores son dispositivos que contienen agentes extintores específicos para apagar diferentes tipos de incendio. Se clasifican según el tipo de fuego que pueden apagar (Clase A, B, C, D o K) y son esenciales para la primera respuesta en caso de un incendio pequeño.

Los extintores más comunes son de polvo químico seco ABC o BC; contiene un polvo químico seco que es efectivo en incendios de clase A, B y C, extintores de espuma AFFF; utiliza un agente espumante que sofoca el fuego y también se enfría; es adecuado para líquidos inflamables de clase B y extintores de dióxido de carbono (CO₂); contiene CO₂ comprimido que sofoca el fuego privando al fuego de oxígeno y es utilizado en clase B y C.

Sistema de Rociadores

Los sistemas de rociadores automáticos son sistemas de protección contra incendios ampliamente utilizados que consisten en una red de tuberías y rociadores conectados a una fuente de agua. Los sistemas de rociadores se eligen el tipo de aplicación y el tipo de boquilla que va a requerir el sistema.

A continuación, se explica cada sistema:

Sistema de Tubería Húmeda (Wet Pipe System)

Los sistemas de tubería húmeda son los más comunes y simples. En estos sistemas las tuberías están llenas de agua en todo momento y los rociadores están conectados directamente a la red de tubería. Cuando un rociador se activa debido al calor del incendio, el agua fluye inmediatamente desde el rociador para extinguir el fuego.

Las aplicaciones para este sistema son adecuadas para áreas donde el riesgo de congelación es mínimo, como oficinas, hoteles y edificios residenciales.

Sistema de Tubería Seca (Dry Pipe System)

En los sistemas de tubería seca, las tuberías están llenas de aire comprimido o gas nitrógeno en lugar de agua. Cuando un rociador se activa, la presión del aire disminuye y se abre una válvula para permitir que el agua fluya hacia las tuberías y finalmente a los rociadores.

Las aplicaciones para este sistema son en áreas donde las tuberías podrían congelarse, como garajes no climatizados y almacenes no calentados.

Sistema de Rociadores de Acción Previa

Son un tipo específico de sistema de rociadores diseñados para ofrecer una respuesta rápida y automática en situaciones de incendio. Estos sistemas son especialmente útiles en áreas donde la velocidad de respuesta es crucial para controlar el

fuego antes de que se propague. Estos sistemas llevan un panel de control que monitorea el área de aplicación y otros instrumentos como detectores de humo y/o calor

Las aplicaciones para este sistema son almacenes de documentos, museos, galerías de arte, bibliotecas, centros de datos, áreas de almacenamiento de bienes y valor y almacenamiento de alimentos.

Sistema de Diluvio (Deluge System)

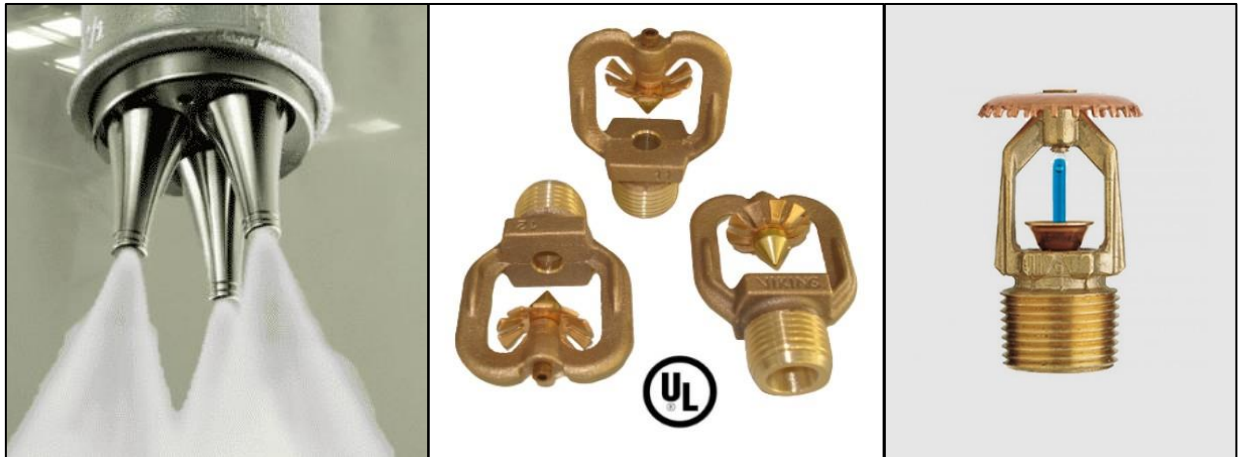
En los sistemas de diluvio, todos los rociadores en el área protegida se activan simultáneamente cuando se detecta un incendio. A diferencia de otros sistemas, los rociadores de un sistema de diluvio no están cerrados individualmente y no tienen bulbo de vidrio.

Las aplicaciones de los sistemas de diluvio se utilizan en áreas de alto riesgo donde es necesario aplicar grandes cantidades de agua rápidamente, como en instalaciones de almacenamiento de líquidos inflamables.

Otro factor importante es que la forma de los rociadores y la manera en la que el agua sale, entre estos tipos de rociadores encontramos el rociador normal con bulbo utilizado en sistemas contra incendio, los rociadores de agua pulverizada; que no disponen de ningún dispositivo que libere el orificio de la boca pulverizada (totalmente abierto), además de ser empleado en instalaciones de productos químicos, almacenes de productos inflamables y centros de transformación, por ultimo los rociadores de agua nebulizada; que emplean agua mediante la división de gotas de muy pequeño tamaños y a presión de baja, media y alta (500 psi).

Figura 6

Tipos de Rociadores para Alternativas de Extinción de Incendio



Fuente: Zensitec (2023). Rociadores abiertos, automáticos y nebulización.

Sistema de Alarma Contra Incendios

Estos sistemas detectan el humo, el calor o las llamas y emiten una alarma para alertar a las personas en el edificio. Algunos sistemas también notifican automáticamente a los servicios de emergencia.

Hidrantes Contra Incendios

Los hidrantes son conexiones de agua ubicados en exteriores de edificios o en áreas comunes. Los bomberos pueden conectarse a estos hidrantes para obtener un suministro de agua en caso de incendio. Los valores de caudal de presión se pueden encontrar en la NFPA 1 y la NFPA 724, en donde debe ser provistos de una presión residual mínima de 20 psi.

Sistema de Supresión de Gases

Estos sistemas liberan gases específicos, como dióxido de carbono CO₂ o agentes limpios, para extinguir el fuego sofocando el oxígeno o inhibiendo la reacción química.

Espumas Antincendios

Se utilizan para apagar incendios de líquidos inflamables derramados, ya que crean una capa flotante que evita la liberación de vapores y sofoca el fuego. Estos sistemas utilizan una solución de espuma para sofocar el fuego y eliminar el suministro de oxígeno dividiéndose en sistemas de espuma para líquidos inflamables y espuma para incendios de hidrocarburos.

Dentro de estos existen la espuma de alcohol resistente (AR-AFFF); es resistente al alcohol y el agua, es adecuado para apagar incendios que involucran líquidos inflamables y alcoholes polares como metanol y etanol. La espuma sintética (AFFF) forma una capa acuosa que flota sobre el líquido inflamable y lo sofoca al mismo tiempo que enfría la superficie del combustible, ambas espumas tienen aplicación en sistemas de almacenamiento de líquidos inflamables.

La espuma de proteína producida a partir de proteínas naturales es efectiva en incendios de hidrocarburos, es más densa que otras espumas y se adhiere a las superficies, su aplicación es en refinerías, estaciones de servicio e instalaciones de petróleo y gas. Otras espumas también aplicadas y existentes son la espuma de alcohol resistente de alta viscosidad (AR-AFFF HV), espuma de alcohol polar resistente (AR-P) y espuma de alta expansión.

Mangueras contra incendio

Las mangueras contra incendio son dispositivos conectados a una fuente de agua que permiten a los bomberos dirigir un flujo de agua hacia el fuego. Las casetas de mangueras son diseñadas de acuerdo con la norma NFPA 14, en la cual se agrupan y dividen en clases según el tamaño, caudal y presión.

2.2. Marco Conceptual

Los principales términos conceptualizados de la investigación son:

2.2.1. Tanque de Almacenamiento

Es un recipiente mayormente de forma cilíndrica que están diseñados para el almacenamiento y conservación de productos líquidos o sólidos. Pueden ser fabricados de distintos materiales de acuerdo con el uso o al líquido a almacenar. La configuración y diseño del tanque es gobernado por el tipo de techo que tendrá el tanque, estos pueden ser techo fijo o techo flotante. (SagaFluid, 2024).

2.2.2. Grupo Electrónico

Se refiere a un equipo que tiene como función convertir la llamada capacidad calorífica en energía mecánica para luego convertirla en energía eléctrica. Estos equipos pueden ser utilizados de equipos principales y/o equipos auxiliares. Sus componentes son alternador, motor, carrocería, cuadro de conmutación, panel de control y bancada.

2.2.3. Presión

Se entiende por presión a un cuerpo que está sometido a una fuerza por unidad de área, dicha presión puede ser de manera interna o externa. Interna se presenta cuando se tiene sistemas que almacenan o transportan fluidos, sea el caso de tuberías o tanques a presión y la externa representa las presiones de agentes externos, como la presión atmosférica u otros.

2.2.4. Carga Muerta

Referido al peso de un objeto el cual genera una carga en uno o varios puntos de apoyo de la estructura, también conocida como carga estática, generalmente esta carga se representa de manera vertical y la poseen todos los cuerpos con un volumen definido.

2.2.5. Esfuerzo

Referido a la fuerza por unidad de área a la cual es sometida un cuerpo, esto se puede entender como cuanta fuerza puede permitir un objeto de cierto tipo de material sin sufrir alguna deformación irreversible o alguna rotura. Cada material estudiado presenta una curva de esfuerzo vs deformación, donde se toma como referencias zonas de trabajo.

2.2.6. Momento

Referido a todo cuerpo que cuando es sometido a una fuerza respecto a un punto este sufre un movimiento de rotación en un plano. En el diseño de tanques es muy empleado para calcular el momento de volcadura y dimensionar los anclajes a causa de sismos o viento.

2.2.7. Carga Viva

Referido a carga temporal o variable que es aplicado a una estructura y que puede cambiar de posición o intensidad con el tiempo. Para el desarrollo de esta investigación en adelante las cargas vivas serán tomadas como cargas debido a personas y/o equipos.

CAPÍTULO III: Desarrollo del Trabajo de Investigación

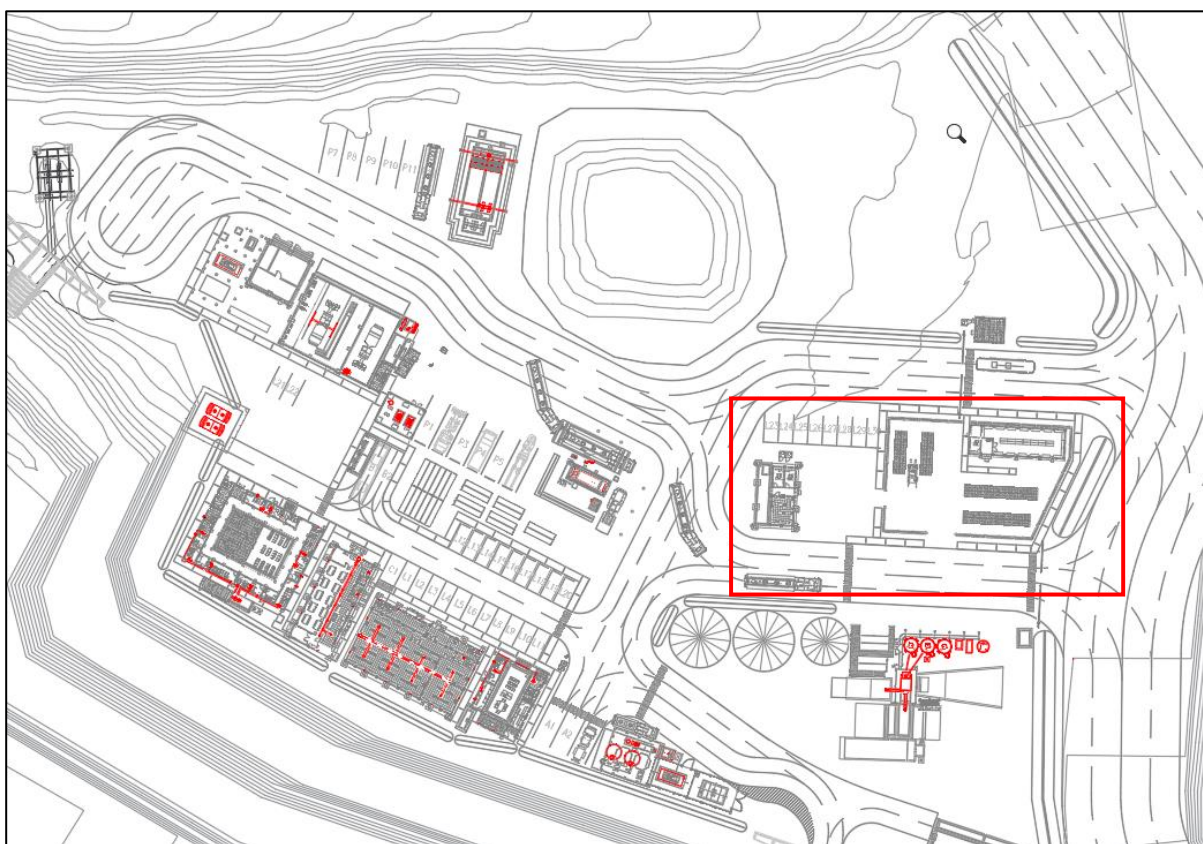
3.1. Generalidades del Proyecto

De acuerdo con la problemática descrita anteriormente, el cliente solicito que la mejor alternativa costo/beneficio es la de utilizar grupos electrógenos, por ende, para alimentar y almacenar el combustible que utilizan estos equipos se debe de recurrir al diseño de un tanque de almacenamiento. En la siguiente imagen se observa las ubicaciones de todas las áreas que tendrá esta nueva planta y el recuadro rojo muestra el área donde se llevará a cabo la ubicación de los equipos electrógenos y el tanque para su posterior diseño.

Las consideraciones y requisitos son mostrados en los parámetros de diseño.

Figura 7

Área de Ubicación de Tanque y Grupos Electrógenos



3.2. Parámetros del Proyecto

3.2.1. Condiciones de Sitio

A continuación, se presenta una tabla resumen con las condiciones del lugar para considerar en el desarrollo del proyecto:

Tabla 3

Condiciones de sitio

Descripción	Valor	Unidad
Ubicación	Cajamarca	-
Altitud	3752	m
Temperatura máxima	22.4	°C
Temperatura mínima	0.4	°C
Carga de nieve	20	kg/m ²
Diseño carga de nieve	100	kg/m ²
Velocidad de viento	120	km/h
Precipitación	1598	mm
Zona sísmica	3	-
Pseudo aceleración	0.2g	-

3.2.2. Condiciones de Operación

Como punto de inicio para el desarrollo del proyecto, se necesitan los datos de consumo de los grupos electrógenos, para ello el cliente proporcione una hoja de datos del equipo a utilizar que es un Diesel Generator Modelo 3512B de bajo consumo de combustible, esto permite el máximo rendimiento del equipo y gran control de emisiones, de la ficha técnica se extraen los valores de consumo a plena carga para el dimensionamiento del tanque, esto se puede observar en la tabla 4.

Figura 8

Grupo Electrónico



Nota: Fuente Data Sheet Diesel Generator Sets CAT 3512B.

Otros datos auxiliares que son necesarios para el dimensionamiento del volumen útil es el número de días de operación, las horas de operación, y la cantidad de grupos electrógenos en operación y en stand by, para ello se presenta tabla 4 con un resumen de los datos.

Tabla 4

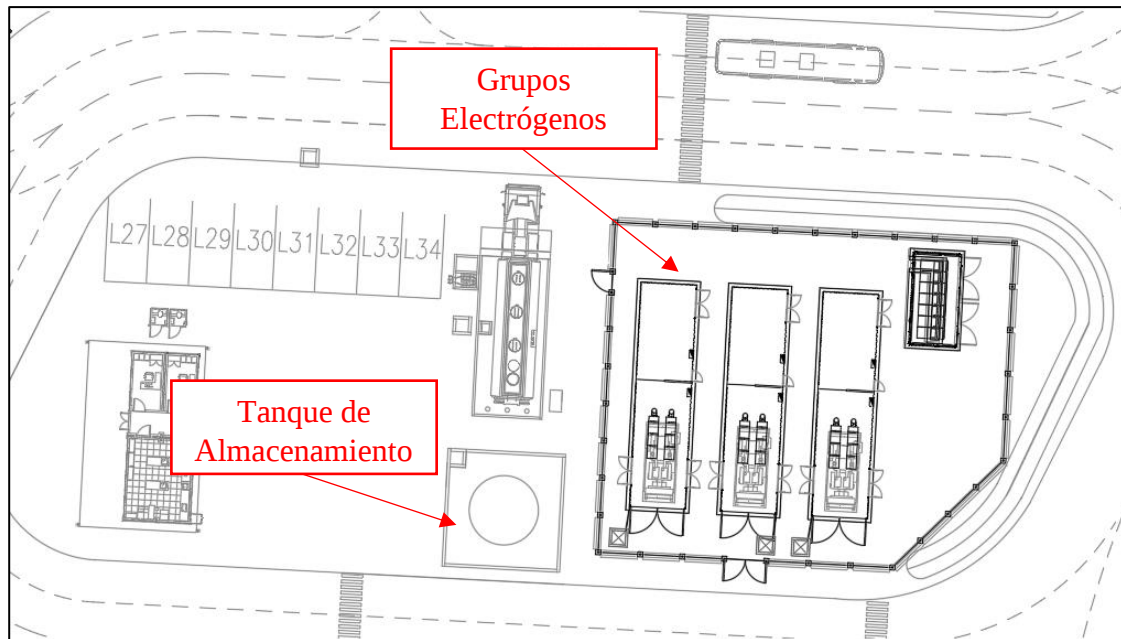
Parámetros de operación

Descripción	Valor	Unidad
Consumo	401.6	L/h
# Grupo electrógenos	2	-
# Días	3	-
Horas de operación	24	h
Volumen total útil	57.83	m3
Volumen útil de diseño	63.61	m3

El volumen total hace referencia al volumen que resulta de la cantidad de consumo total en los días de operación y el volumen útil de diseño es el volumen útil por 10% adicional por seguridad. En la siguiente imagen se muestra la ubicación final del tanque y los grupos electrógenos, donde 2 equipos electrógenos están en funcionamiento y el otro en stand – by.

Figura 9

Ubicación de Tanque de Almacenamiento y Grupos Electr6genos.



3.3. Parámetros de Diseño

Los parámetros de diseño hacen referencia a las dimensiones, capacidad, costo, seguridad, durabilidad, est6tica, sostenibilidad y facilidad de mantenimiento, adem1s de definir las bases para aplicar la norma que diseño. Para el desarrollo de esta tesis se emplea la norma API 650 13va Edici3n.

De acuerdo con la secci3n V de API, en el punto 5.3 de las consideraciones especiales, se visualiza una imagen con los requisitos de nivel que debe de tener todo tanque de almacenamiento, tales como, nivel m1nimo de llenado, nivel normal de llenado, nivel de diseño del l1quido y altura total del tanque, Ver Figura 10.

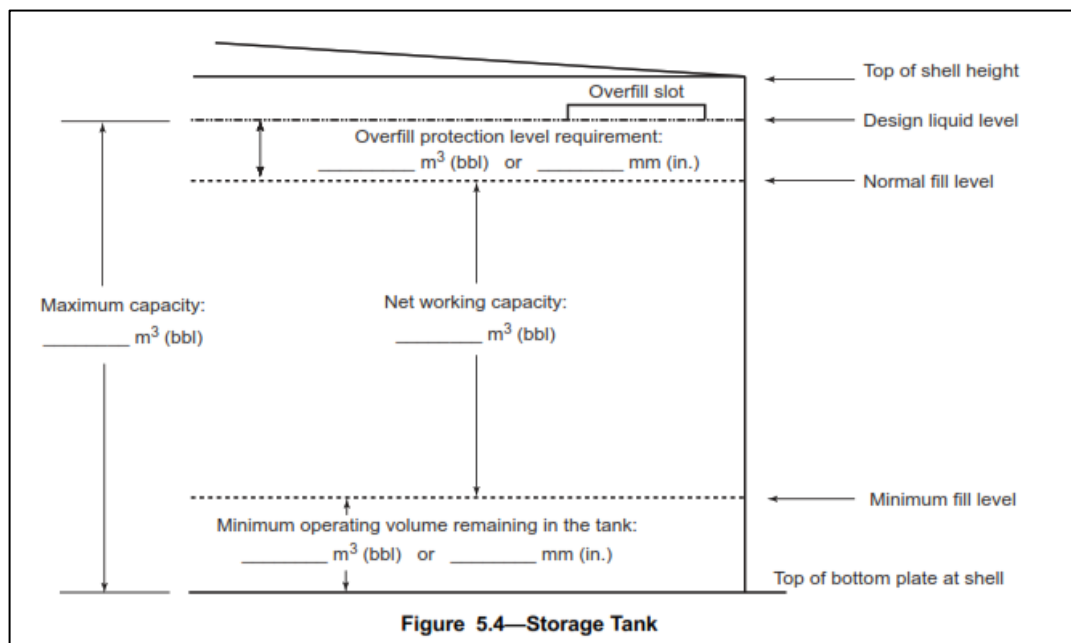
El m1nimo nivel de llenado se obtiene despu3s de realizar un an1lisis hidr1ulico desde la ubicaci3n de descarga del tanque hacia el o los puntos finales que ser1n las entradas hacia los grupos electr6genos, este nivel es imprescindible ya que, si el sistema requiere de bombas para impulsar el fluido hacia su destino, estos niveles nunca deben ser menores ya que as1 se previene la cavitaci3n de las bombas.

El valor o nivel mínimos que necesita tener un tanque el cual está siendo succionado por una fuente externa, que en la mayoría de los casos suele ser una bomba centrífuga horizontal, se aplica el concepto de sumergencia para evitar que la bomba genere vórtices y comience a succionar aire.

Cada uno de estos niveles serán definidos más adelante en este capítulo.

Figura 10

Niveles de Tanque



Nota: Fuente API 650 (2020), 5.3 Special Considerations.

Definiendo los conceptos para un mayor entendimiento, el mínimo nivel de llenado se refiere al volumen muerto que queda en el tanque debido a que la tubería de descarga en todo momento está a una distancia del fondo, a menos que se especifique lo contrario.

El nivel normal de llenado es la altura máxima de operación que tendrá el tanque además, la manera de encontrar esta altura es sumando la altura del volumen muerto y la altura útil del volumen de operación, así mismo sucede con el nivel de diseño, que es una consideración de seguridad para evitar que el tanque se llene y sea sometido a esfuerzos no contemplados, ocasionando deformaciones en el fondo del tanque.

3.4. Normas Internacionales Aplicadas

La utilización de las normas de diseño internacionales mencionadas a continuación, garantizan la seguridad, calidad y confiabilidad del proyecto, ya que son las mínimas requeridas a considerar en todo diseño de este sector.

- API 650: Welded Tank for Oil Storage
- ASME Section VIII: Pressure Vessel – Division I
- ASME B31.4: Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries
- ASME B16.5: Pipe Flanges and Flanged Fittings
- NFPA 11: Standard for Low – Medium and High Expansion Foam
- NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems
- NFPA 14: Standard for the Installation of Standpipe and Hose System
- NFPA 16: Installation of Foam-Water Sprinkler and Spray Systems
- NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code
- ASTM: American Society for Testing and Materials
- UL: Underwriters Laboratories INC
- FM: Factory Mutual
- AWS: American Welding Society
- AWS D01.1: Structural Welding (Steel)
- NACE: National Association of Corrosion Engineers
- OSHA: Occupational Safety and Health Administration

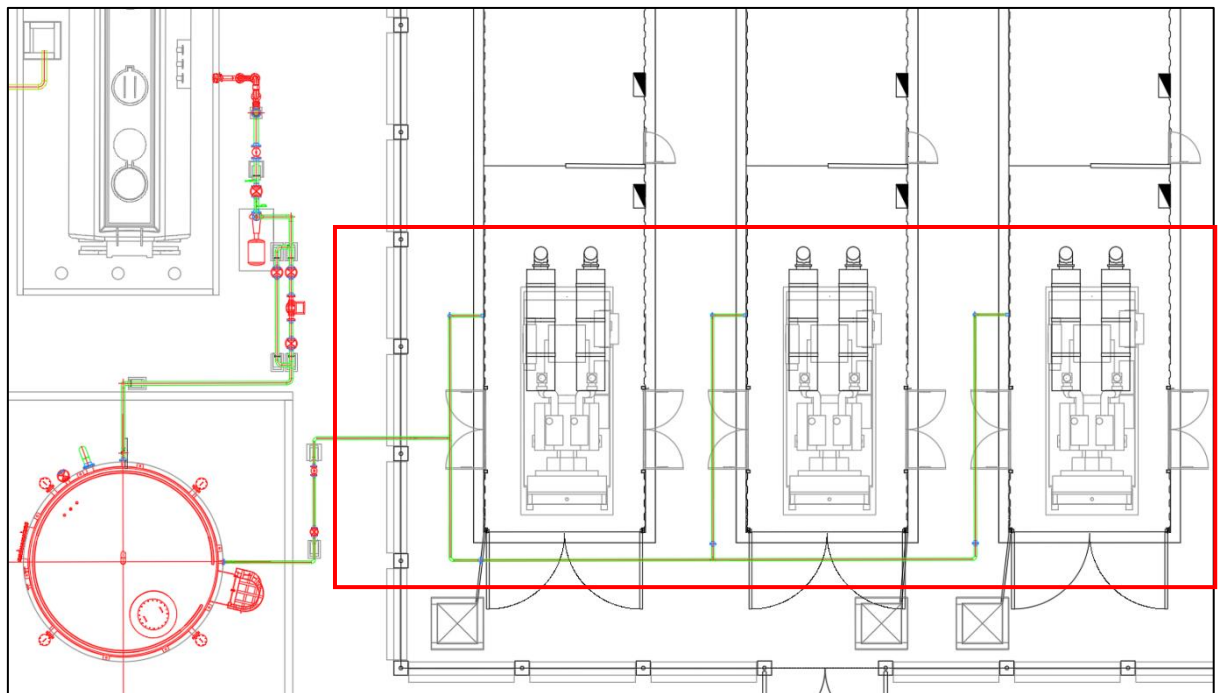
3.5. Cálculo hidráulico

Definidas las ubicaciones finales de los equipos se debe de realizar un cálculo hidráulico para verificar si es necesario un agente externo, como una bomba, para la impulsión del combustible a cada de grupo electrógeno, o solo un análisis por gravedad y diferencia de presión.

Primero se realiza el análisis por gravedad, ya que si este análisis es satisfactorio no se necesitaría de una bomba, además de que el punto de destino será un pequeño cubeto que almacena el combustible para después ser succionado por la bomba de combustible del grupo electrógeno. Lo primero es trazar el recorrido que tendrá la tubería para ir desde el tanque hacia los equipos. En la figura 11 se observa la ruta de la tubería que es calculada:

Figura 11

Ruteado de tuberías desde Tanque hacia Grupos Electrógenos



Con ayuda del software AFT Fathom 10, se realiza el análisis gravitatorio para poder comprobar no solo si se cumple el sistema, si no también estimar el diámetro de la tubería que será la encargada de distribuir el combustible a cada punto. Para ello en tabla 5 se visualiza las elevaciones y longitudes más lejanas para estimar el cálculo.

Tabla 5

Características físicas del sistema

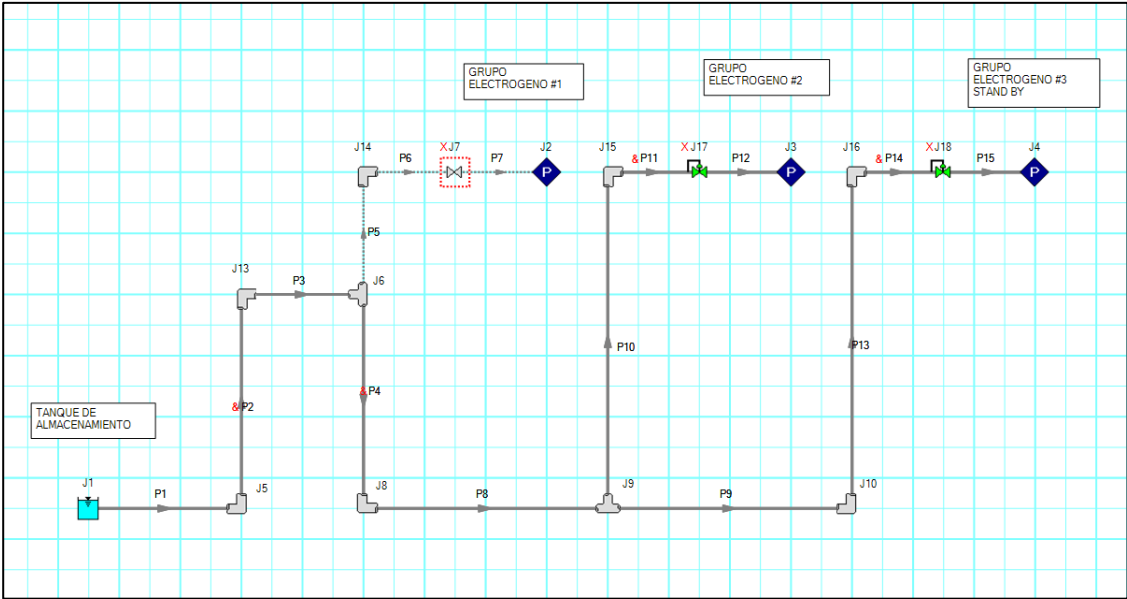
Descripción	Valor	Unidad
ELEVACIONES		
Tanque (Descarga)	3751.5	m
Grupo electrógeno #1 (Ingreso)	3751.3	m
Grupo electrógeno #2 (Ingreso)	3751.3	m
Grupo electrógeno #3 (Ingreso)	3751.3	m
LONGITUDES		
Tanque - GE1	13.3	m
Tanque - GE2	25.5	m
Tanque - GE3	32	m

Estos datos se introducen al software y se realiza el análisis, el sistema base solo necesita las cotas del tanque y el cubeto de combustible. La diferencia de niveles entre estos dos puntos solo es de 0.2m, esto se debe a que se analiza con el mínimo nivel del tanque, entonces el análisis solo se enfoca en que por las tuberías fluya el caudal mínimo de 401 L/h a una determinada velocidad.

La figura 12 muestra el diagrama con los nodos ya definidos realizando una similitud con la figura 11 para que sea más entendible.

Figura 12

Layout de Sistema de Transporte de Combustible



En la anterior imagen se observa los nodos y tuberías que tendrá el sistema. La primera iteración del sistema es probar con un diámetro de 2", esto por el cálculo del diámetro económico para luego ir probando con diámetros superiores o inferiores para obtener el resultado deseado. En la tabla 6, se visualiza los resultados con una tubería de 2" y 1 1/2".

Tabla 6

Resultados de Caudal y Velocidad

TUBERÍA 2"				TUBERÍA 1.5"			
Ítem	Descripción	Caudal (L/h)	Velocidad (m/s)	Ítem	Descripción	Caudal (L/h)	Velocidad (m/s)
1	Pipe	2081.2	0.267	1	Pipe	1063	0.2248
2	Pipe	2081.2	0.267	2	Pipe	1063	0.2248
3	Pipe	2081.2	0.267	3	Pipe	1063	0.2248
4	Pipe	2081.2	0.267	4	Pipe	1063	0.2248
5	Pipe	0	0	5	Pipe	0	0
6	Pipe	0	0	6	Pipe	0	0
7	Pipe	0	0	7	Pipe	0	0
8	Pipe	2081.2	0.267	8	Pipe	1063	0.2248
9	Pipe	995.6	0.1277	9	Pipe	455.2	0.09627
10	Pipe	1085.5	0.1393	10	Pipe	607.8	0.12854
11	Pipe	1085.5	0.1393	11	Pipe	607.8	0.12854

TUBERÍA 2"				TUBERÍA 1.5"			
Ítem	Descripción	Caudal (L/h)	Velocidad (m/s)	Ítem	Descripción	Caudal (L/h)	Velocidad (m/s)
12	Pipe	1085.5	0.1393	12	Pipe	607.8	0.12854
13	Pipe	995.6	0.1277	13	Pipe	455.2	0.09627
14	Pipe	995.6	0.1277	14	Pipe	455.2	0.09627
15	Pipe	995.6	0.1277	15	Pipe	455.2	0.09627

De la tabla anterior se observa que para una tubería de 2" hay mucho más flujo del necesario que para una tubería de 1 ½", se podría optar por elegir la de menor diámetro, pero como el caudal de 401 L/h es lo que succiona y emplea el grupo electrógeno, el cubeto de combustible se debe llenar mucho más rápido, según este criterio se elige una tubería de 2".

Una vez determinado el diámetro de la tubería para el sistema se debe calcular el espesor de la tubería, pero al ser un sistema sin presión, solo el que genera la columna de combustible del tanque, se elegí una tubería comercial de acero A53 SCH40 para todo el sistema que es compatible con las propiedades físicas y químicas del fluido a transportar.

3.6. Diseño de Tanque

Para iniciar con el diseño del tanque, se necesita elegir el diámetro y altura del tanque, para ello según el apéndice A de la norma API 650 tabla A.1, se establece valores de diámetro y altura de acuerdo con el volumen necesario, el volumen mínimo que se necesita es de 63.61 m³, la tabla nos da unos valores iniciales de diámetro de 4.5 m y una altura de 5.4 m para un volumen de 86 m³, estos valores no son finales, ya que se pueden modificar según el espacio o condiciones necesarias para el diseño.

Para fijar las dimensiones del tanque se define el diámetro interior el cual será de 4.6 m y la altura se define a partir del volumen necesario, la cual emplea una ecuación del apéndice A para despejar el valor de la altura.

Tabla 7

Diámetro y Altura del Tanque

Descripción	Valor	Unidad
Volumen útil	63.61	m ²
Diámetro	4.6	m
Altura útil	3.8	m

De la anterior tabla, la altura útil hace referencia al volumen útil, es decir, la altura del tanque debe ser mayor a 3.8m ya que esta altura no considera el volumen mínimo muerto ni considera la altura de diseño ni el borde libre necesario, para obtener el volumen muerto de la sección V, en la tabla 5.6a (Dimensions for Shell Nozzles) se extrae cual es la altura mínima desde el fondo del tanque hasta en centro de la boquilla de salida, para el diseño como se calculó que el diámetro de la tubería de descarga es de 2", entonces la distancia mínima que debe tener es de 175 mm, ahora esta distancia del fondo al centro, a esta distancia se le debe sumar el diámetro interior de la tubería, por ende la altura mínima es de 175 mm + 30.15 mm, dando un total de 205.15 mm, con este dato se define que la mínima altura de llenado del tanque será de 250 mm.

Como ya se definió el mínimo nivel de llenado (MFL), ahora se debe encontrar el nivel normal de llenado que es solo la suma de la altura útil más el mínimo nivel de llenado, obteniendo:

$$NFL = MFL + \text{Altura util} = 250 + 3800 = 4050 \text{ mm}$$

Para tener niveles redondos, se opta por tener un nivel de llenado a la altura de 4100 mm, ahora lo último que falta es encontrar el nivel de diseño del líquido (DLL), por lo general este nivel está ubicado 100 mm por encima del DLL, esto como referencia de que el nivel normal de llenado no será superior al nivel de diseño manteniendo y evitando presiones no consideradas en el diseño.

$$DLL = NFL + 100 \text{ mm} = 4100 + 100 = 4200 \text{ mm}$$

El ultimo valor que se debe definir es el borde libre, este valor es necesario cuando el tanque es sin techo y es sometido a cargas sísmicas, como valor a priori y considerando que la zona sísmica del proyecto es de nivel 3, se considera un valor de 800 mm, este cálculo será comprobado de acuerdo con el apéndice E de la norma API, en el punto E.7.2 (Freeboard), el cual será detallado más adelante para determinar si esta altura es correcta o está muy por encima del necesario, a continuación se presenta la tabla resumen con los niveles.

Tabla 8

Niveles del Tanque

Descripción	Valor	Unidad
Nivel mínimo de llenado (MFL)	250	mm
Nivel bajo - bajo	350	mm
Nivel normal (NFL)	4100	mm
Nivel alto - alto	100	mm
Nivel alto	100	mm
Nivel de rebose	4300	mm
Nivel de diseño de líquido (DLL)	4200	mm
Borde libre	800	mm
Altura total de tanque (TSH)	5000	mm

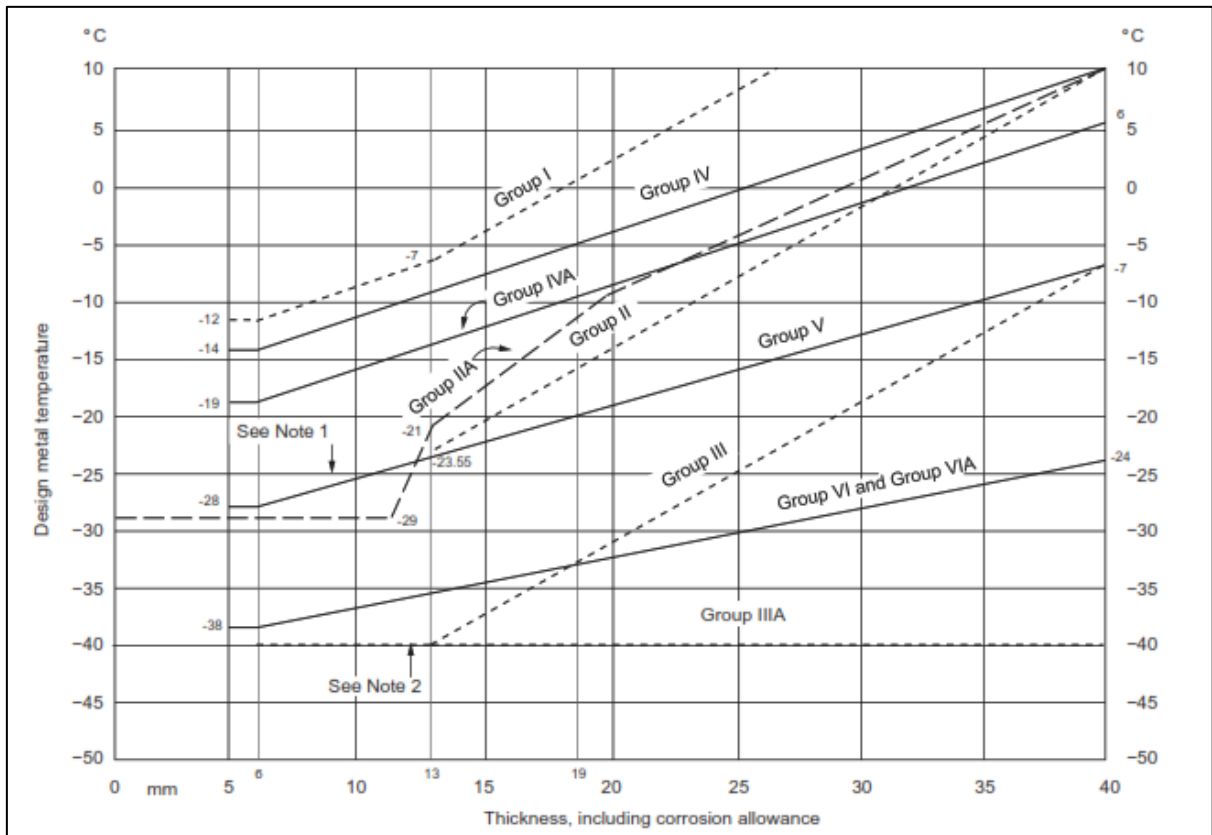
3.6.1. Selección del Material

Luego de tener definido los niveles, las dimensiones y la capacidad se debe de empezar con la selección del material, para ello API 650 en la sección IV, en el punto 4.2.2 (ASTM Specifications) da una descripción de los materiales más utilizados en el diseño de tanques de almacenamiento, la correcta selección del material depende de la temperatura, esfuerzo de material y corrosión.

Para la elección del material en el punto 4.2.10 (Toughness Requirements), se observa un esquema y este se puede visualizar en la figura 13, este diagrama sirve para poder determinar el material según los valores del espesor y la temperatura mínima de diseño.

Figura 13

Diagrama para Selección del Material



Nota: Fuente API 650 (2020), Figure 4.1b Minimum Permissible Design.

De acuerdo con la figura anterior y nuestras condiciones de sitio y operación, se establece que la temperatura es de 0.4°C y la máxima de 22.5°C y si se traza una línea horizontal se observa que la elección dependerá del espesor de las planchas, incluido la tolerancia de corrosión, como se está diseñando un tanque de volumen pequeño, los espesores serán menores a 20 mm, por lo tanto, la intersección se encuentra dentro de los materiales del grupo I.

Ya encontrado el grupo y con ayuda de la tabla 4.4a (Material Groups), se encuentran los materiales que se pueden seleccionar, entre estos materiales se encuentran el acero A36, A131, A283M, A285M, grado 235 y grado 250. La elección de uno de estos materiales depende de la disponibilidad de las planchas, el esfuerzo de fluencia y la corrosión admisible.

Tabla 9

Esfuerzos de Materiales

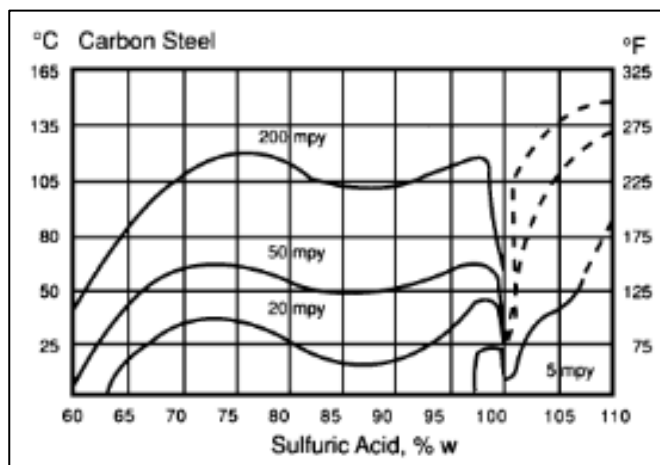
Especificación	Fy (MPa)	Ft (MPa)	Sd (MPa)	St (MPa)
ASTM A283M	205	380	137	154
ASTM A285	205	380	137	154
ASTM A131	235	400	157	171
A36	250	400	160	171

De la tabla anterior el acero A36 (Acero estructural) es el que mejores propiedades mecánicas presenta en comparación con el acero A283M grado C, a pesar de que este último es el más utilizado en la fabricación de tanques de almacenamiento, el acero A36 también es muy empleado y más comercial. El acero A131, conocido como acero naval, es más utilizado en la industria naval para la construcción de barcos, por lo tanto, de todos estos materiales se elige el acero A36.

Otro factor importante a la hora de seleccionar el material es saber la resistencia a la corrosión que presenta el material frente al fluido a almacenar, de acuerdo con NACE CORROSION ENGINEER'S REFERENCE BOOK Third Edition, se presentan gráficos de T vs fluido, en la cual la intersección de estos representado con valor en mpy (Mils por año) nos dice el espesor que se pierde por año. El fluido más corrosivo y el que presenta más problemas es el de ácido sulfúrico, por ello todas las comparaciones, si es que no se encuentra el fluido para la aplicación que se necesita se realizan según ese gráfico.

Figura 14

Diagrama de T vs %Concentración para encontrar los Mils



Nota: Fuente Nace Corrosion Engineers Reference Books (2002), p. 197.

Por otro lado, hay artículos o papers sobre los efectos de la corrosión del Diesel, biodiesel o crudos pesados sobre acero ferríticos, fundición gris, etc. En el artículo “Estudio de los efectos corrosivos del Diesel y Biodiesel sobre una fundición de hierro gris”, se sumergió planchas de hierro gris en Diesel y biodiesel para observar el efecto en el tiempo, dando como resultado que el Diesel al tener un mayor contacto prologando con la fundición gris la corrosión disminuye, arrojando valores que oscilan entre 0.003 – 0.005 mpy. (Amaya, Piamba, & Olaya, 2013).

En el artículo “Determinación de la Corrosividad de Crudos Pesados a Alta Temperatura sobre un Acero Ferrítico bajo Condiciones de Agitación”, se realizaron ensayos tomando probetas de acero 5Cr ½ Mo, que tiene como equivalencia al acero de baja aleación A335, muy empleado en servicios de alta temperatura, para ser expuestos a crudos pesados y diferentes temperaturas para observar los efectos de corrosión, dando como resultados que a 200° C , la corrosión toma valores de 3.40 mpy y a temperaturas de 300 °C, la corrosión toma valores de 5.57 mpy. (Gonzales, Peña, & Cerda, 2007).

Como resultado se estas investigaciones se realizó un promedio y según las condiciones de operación se toma un valor de 2.5 mpy de efectos de corrosión.

$$1 \text{ mpy} = 0.0254 \frac{\text{mm de corrosión}}{\text{año}}$$

De acuerdo con las condiciones y tiempo de vida útil de 20 años, se tiene que las condiciones de sobre espesor a considerar para el diseño será de 1.27mm, por lo tanto, se tomará un valor de 1.5 mm para efectos de corrosión admisible (CA).

3.6.2. Fondo de Tanque

De acuerdo con la norma API, el punto 5.4 (Bottom Plates), se dan primero una serie de pautas y consideraciones para el diseño:

- Todas las planchas de fondo deberán tener como mínimo un espesor sin corroer de 6 mm y tener un ancho mínimo de plancha no menor a los 1800 mm.
- El diámetro del fondo será como mínimo 50 mm más grande que el diámetro exterior de la envolvente.
- Si el tanque lo requiere, este debe contar con una pendiente desde el centro del tanque hacia afuera de 1:120.
- La placa anular es requerida para tanques con diámetros superiores a 30m, de acuerdo con el anexo M.4 (Tank Bottoms). Puede ser instalada en tanques menores si es que lo requiere o si el material de fabricación de los tanques pertenece a los grupos IV, IVA, V o VI.
- La placa anular debe tener como mínimo una distancia de 600 mm, medida desde el diámetro interno de la envolvente hacia el centro del tanque.

Según las consideraciones mencionadas anteriormente el espesor de fondo mínimo del tanque será de 6 mm, esto sin considerar los efectos de corrosión, entonces el espesor de diseño del fondo será:

$$t_{\text{diseño fondo}} = t_{\text{fondo mínimo}} + CA = 6.5 + 1.5 = 7.5 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se termina eligiendo un espesor comercial con un valor de 8 mm.

3.6.3. Envolvente de Tanque

De acuerdo con la norma API, punto 5.6 (Shell Design), esta da una serie de consideraciones para el correcto diseño, las cuales son:

- API presenta una tabla en la que detalle espesores mínimos de diseño según el diámetro, en la cual establece que para diámetros menores que 15m, pero mayores que 3.2m el espesor mínimo de la virola más baja no debe ser menor que 6mm.
- Si no se especifica lo contrario, el ancho de las planchas de la virola o envolvente deberá tener un tamaño de 1800 mm.
- La envolvente del tanque deberá ser lo más estable posible, y esto de acuerdo con el diseño de viento, si el tanque lo requiere este llevará anillos intermedios.
- Para tanques menores de 61m de diámetro, se utilizará el método del pie.

Ya definidas las consideraciones se procede al cálculo por el método del pie, para ello a continuación se presentan las ecuaciones que gobiernan el cálculo del espesor:

$$t_d = \frac{4.9D(H - 0.3)G}{S_d} + CA$$

$$t_t = \frac{4.9D(H - 0.3)}{S_t}$$

Donde:

td: Espesor de diseño de virola (mm)

tt: Espesor de prueba hidrostática (mm)

D: Diámetro nominal del tanque (m)

H: Nivel de diseño del líquido, medida del fondo hasta el techo (m)

G: Gravedad específica

CA: Tolerancia de corrosión (mm)

Sd: Condición de diseño de esfuerzo admisible (MPa)

St: Condición de diseño de esfuerzo para prueba hidrostática (MPa)

Antes de continuar con el diseño se debe calcular la cantidad de virolas de la envolvente, para ello como ya se elegio planchas de acero A36, se debe buscar el ancho y largo comercial de estas planchas, las dimensiones comerciales son de 1500 x 6000 mm, 2400 x 6000 mm y 3000 x 6000 mm, con planchas de 2400 de ancho nos falta un tramo de 200 mm, por lo que lo más adecuado sería seleccionar planchas de 3000 mm de ancho y solo realizar un corte para tener la altura total que es de 5m.

Cálculo de 1ra Virola:

$$t_d = \frac{4.9 * 4.6 * (4.2 - 0.3) * 0.85}{160} + 1.5 = 2.0627 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 4.6 * (4.2 - 0.3)}{171} = 0.6195 \text{ mm}$$

Cálculo de 2da Virola:

$$t_d = \frac{4.9 * 4.6 * (2 - 0.3) * 0.85}{160} + 1.5 = 0.5265 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 4.6(2 - 0.3)}{171} = 0.22408 \text{ mm}$$

De los cálculos obtenidos se observa que los valores son menores a los espesores mínimos requerido por la norma, entonces los valores de espesor mínimo de la primera y segunda virola toman el valor de **6mm** y **5 mm** respectivamente según las consideraciones de diseño.

Otra consideración es que la soldadura vertical no debe ser alineada una con otra, siempre deben estar separadas como mínimo $5t$, donde t es el espesor de la primera virola.

3.6.4. Anillos Rigidizadores Intermedios

De acuerdo con el punto 5.9 (Wind Girders), la norma establece una serie de consideraciones para el diseño de los anillos rigidizadores los cuales son:

- Todos los tanques de techo abierto deben contar con una viga de viento en la parte superior para mantener la redondez y estabilidad.
- Todos los tanques deben ser reforzados por vigas de viento cuando lo requiera, y el diseño es por el punto 5.9.6.
- El diseño también es aplicable y válido para tanques de techo flotante.
- Según la sección 5.1.5.9, la sección de los ángulos, anillos tensores y anillos de compresión deben ser unidos por soldadura completa de penetración y fusión.
- Los anillos rigidizadores pueden ser hechos de secciones estructurales, planchas, secciones construidas por soldadura. Estas secciones pueden ser circulares o poligonales.
- El tamaño mínimo de los ángulos será de $2\frac{1}{2} \times 2\frac{1}{2} \times \frac{1}{4}$ in y para las planchas será de un espesor de $\frac{1}{4}$ " o 6 mm.
- Todos los anillos rigidizadores soldados pueden ir cruzados a las soldaduras verticales del tanque, pero deben estar como mínimo a 150 mm de las soldaduras horizontales del tanque, justo en la unión de virolas.
- Soportes para los anillos rigidizadores deben ser proporcionados cuando las dimensiones del ancho o largo es 16 veces más grande que el espesor, estos soportes deben ser distanciados 24 veces el ancho de cualquier lado.

- El anillo rigidizador debe ser localizado en o cerca de la parte superior del tanque, preferiblemente en la parte fuera del tanque.

El módulo de la mínima sección requerida de la viga de viento superior debe ser determinada por la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{6H_2D^2}{0.5F_y} \left(\frac{P_{wd}}{1.72} \right)$$

Donde:

Z: Modulo mínimo de sección requerida (cm³)

D: Diámetro nominal del tanque (m)

H2: Altura total del tanque, incluyendo borde libre (m)

Fy: Limite elástico de material de virola y anillo rigidizador o 210 MPa, el que sea menor.

Pwd: Presión de diseño de viento = Pwv + 0.24 (kPa)

Pwv: Presión de diseño de viento (kPa)

V: Velocidad de diseño del viento (km/h)

Para iniciar el cálculo, primero se calcula la presión de diseño del viento, que viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{wv} = 1.48 * \left(\frac{V}{190} \right)^2 = 1.48 * \left(\frac{120}{190} \right)^2 = 0.5904 \text{ kPa}$$

$$P_{wd} = P_{wv} + 0.24 = 0.5904 + 0.24 = 0.8304 \text{ kPa}$$

Como material de anillo rigidizador se emplean vigas estructurales de acero A36, la cual tiene un límite de fluencia de 250 MPa. Para cálculos de la ecuación se debe usar la menor entre el esfuerzo del material o 210 MPa.

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$Z = \frac{6H_2D^2}{0.5F_y} \left(\frac{P_{wd}}{1.72} \right) = \frac{6 * 5 * 4.6^2 * 0.8304}{0.5 * 210 * 1.72} = 2.92 \text{ cm}^3$$

Con esta área mínima, la norma API presenta la tabla 5.19a en la que se presenta los valores de módulos de sección ya calculados para cada tamaño de perfil el cual se debe de seleccionar según el espesor de la última virola y con un módulo mayor al mínimo calculado.

Figura 15

Tabla de módulos de sección de anillos rigidizadores

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6
Member Size	As-Built Shell Thickness				
	5	6	8	10	11
Top Angle: Figure 5.24, Detail a					
65 × 65 × 6	6.58	6.77	—	—	—
65 × 65 × 8	8.46	8.63	—	—	—
75 × 75 × 10	13.82	13.97	—	—	—
Curb Angle: Figure 5.24, Detail b					
65 × 65 × 6	27.03	28.16	—	—	—
65 × 65 × 8	33.05	34.67	—	—	—
75 × 75 × 6	35.98	37.49	—	—	—
75 × 75 × 10	47.24	53.84	—	—	—
100 × 100 × 7	63.80	74.68	—	—	—
100 × 100 × 10	71.09	87.69	—	—	—

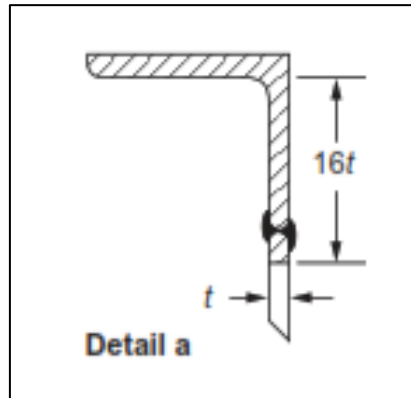
Nota: Fuente API 650 (2020), Table 5.19a – Section Moduli of Stiffening- Rings section.

De la figura anterior se visualiza que, para el espesor de 6 mm se necesita un perfil de 65 x 65 x 6 mm, y el módulo de 6.77 cm³ es mayor al mínimo de 2.92 cm³.

De la figura 5.24 de la norma API 650, Se puede ver el detalle del perfil seleccionado que corresponde al detalle a, donde se aprecia como se debe soldar y la forma de colocar el perfil en la parte superior del tanque.

Figura 16

Detalle de soldadura en la parte superior de unión viga rigidizadora - Techo



Nota: Fuente API 650 (2020), Typical Stiffening – Ring Sections, p. 127.

La norma API también menciona que, si el tamaño de los perfiles es superior en $16t$, donde t es el espesor nominal de la última virola, entonces estos llevarán cartelas.

$$16t = 16 * 6 = 96 \text{ mm} > 65 \text{ mm}, \text{ Al ser mayor no necesita cartelas}$$

Como ya se determinó el perfil de la viga por diseño de viento se debe de determinar el perfil de coronamiento, este perfil también tiene un tamaño mínimo el cual se encuentra en el punto 5.1.5.9, para ello se muestra la figura 17, donde observa el tamaño mínimo:

Figura 17

Tabla del perfil de coronamiento para diferentes diámetros de tanque

Tank Diameter (D)	Minimum Top Angle Size ^a (mm)	Minimum Top Angle Size ^a (in.)
$D \leq 11 \text{ m}, (D \leq 35 \text{ ft})$	$50 \times 50 \times 5$	$2 \times 2 \times 3/16$
$11 \text{ m} < D \leq 18 \text{ m}, (35 \text{ ft} < D \leq 60 \text{ ft})$	$50 \times 50 \times 6$	$2 \times 2 \times 1/4$
$D > 18 \text{ m}, (D > 60 \text{ ft})$	$75 \times 75 \times 10$	$3 \times 3 \times 3/8$

^a Approximate equivalent sizes may be used to accommodate local availability of materials.

Nota: Fuente API 650 (2020), Roof and Top Angle Joints, p. 52.

Como el tanque tiene un diámetro de 4.6m, el mínimo tamaño del perfil será de 50 x 50 x 5 mm, ahora este perfil de coronamiento y el perfil de viga rigidizadora, son dos conceptos distintos pero que a su vez cumplen la función de rigidizar la parte superior del

tanque, no siempre se debe contar con los dos tipos de anillos en la parte superior del tanque, es decir, si el perfil de coronamiento tiene el área suficiente para actuar como anillo rigidizador ya no será necesario dos anillos distintos.

Para el caso de este tanque, se opta por mantener solamente el anillo rigidizador ya que es el que tiene mayor área. La ubicación del anillo rigidizador según API en el punto 5.9.5.1, es que este debe ser situado en o cerca de la parte superior de la envolvente, si por motivos de diseño esta se ubica a 0.6m o más, en la parte superior del tanque se debe colocar un perfil mínimo de 65x65x6 mm para espesores de virolas de 5mm y un perfil de 75x75x6 para espesores de virolas de 6mm o más u otra sección equivalente.

Vigas de Viento Intermedias

El criterio de las vigas intermedias es utilizado para comprobar si el tanque necesita de una o más vigas en el resto de la envolvente del cuerpo, esto con el objetivo de proteger el tanque de cargas de viento. Para esto se utiliza la siguiente formula:

$$H_1 = 9.47t \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 \left(\frac{1.72}{P_{wd}}\right)}$$

Donde:

H1: Altura máxima del tanque sin rigidizar (m)

t: Espesor nominal de virola de menor espesor (mm)

D: Diámetro nominal del tanque (m)

Pwd: Presión de diseño de viento (kPa)

La condición para determinar si necesita o no de anillo es intermedios es que, si la altura sin rigidizar (H1) es mayor que la altura del tanque (H), no necesita viga intermedia, para ello reemplazamos los datos en la formula y obtenemos:

$$H_1 = 9.47 * 5 * \sqrt{\left(\frac{5}{4.6}\right)^3} \left(\frac{1.72}{0.8304}\right) = 111.148 \text{ m}; H_1 > H$$

Por lo tanto, se concluye que el tanque no necesita de una viga intermedia, y solo con la viga en la parte superior de la virola es suficiente para soportar las cargas de viento. Otra comprobación para determinar si el tanque necesita de anillos intermedios o no es por el método de la altura transformada, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$W_{tr} = W \sqrt{\left(\frac{t_{uniforme}}{t_{actual}}\right)^5}$$

Donde:

W_{tr} : Ancho de cada transformada de la virola (mm)

W : Ancho actual de cada virola (mm)

$t_{uniforme}$: Espesor nominal de la virola más delgada (mm)

t_{actual} : Espesor nominal de la virola actual (mm)

La condición es que, si la altura de la transformada es más grande que la máxima altura H_1 , una viga intermedia es requerida, para ello se reemplaza los datos en la ecuación anterior:

Cálculo de la transformada de la 1ra Virola:

$$W_{tr} = 3000 * \sqrt{\left(\frac{5}{6}\right)^5} = 1920 \text{ mm} = 1.92 \text{ m}$$

Cálculo de la transformada de la 2da Virola:

$$W_{tr} = 2000 * \sqrt{\left(\frac{5}{5}\right)^5} = 2000 \text{ mm} = 2 \text{ m}$$

La altura de la transformada se obtiene sumando cada transformada de las virolas, obteniendo:

$$\sum W_{tr} = W_{tr1} + W_{tr2} + \dots = 1.92 + 2 = 3.92 \text{ m}; H_{transformada} < H1$$

Por lo tanto, de lo anterior se concluye que el tanque no necesita de una viga intermedia, esta es otra manera de comprobar si no es necesario la viga intermedia. Si en caso el caso que si se necesitara una viga intermedia esta se debe localizar en la mitad de la altura de la transformada, medida desde la parte superior del tanque y el perfil se debe de seleccionar utilizando la sección mínima Z que se calculó con anterioridad al inicio.

3.6.5. Diseño de Techo

De acuerdo con el punto 5.10 (Roofs) de la norma API, se presenta una serie de consideraciones dependiendo del tipo de techo elegido para el diseño del tanque, la elección del techo gobierna todo el diseño del tanque por ello es importa determinar el tipo de techo a escoger, para el diseño se va a emplear un techo tipo cónico, por ello a continuación se presenta las consideraciones de diseño para este tipo de techo.

- El ángulo de inclinación de techo debe ser mayor a 9.5° pero menor a 37°.
- Para la unión envolvente – techo, en la parte superior debe de estar el perfil de coronamiento o el anillo rigidizador, el que cumpla con los criterios de diseño.
- El espesor nominal sin corroer debe ser mayor que 5 mm, pero menor que 13 mm.

Definidas estas consideraciones se procede al diseño, para ello lo primero es calcular el espesor de las chapas del techo, usando la siguiente formula del punto 5.10.5.1:

$$t_{mín} = 2 * \frac{1000D}{\text{sen}\theta} * \sqrt{\frac{B}{1000E}} + CA \text{ ó } t_{mín} = \frac{2 * 1000 * D}{\text{sen}\theta} * \sqrt{\frac{U}{1.33 * 1000E}} + CA$$

Donde:

D: Es el diámetro nominal del tanque (m)

E: Modulo de elasticidad a la máxima temperatura (MPa) – Ver tabla M.2a

B: Combinación de cargas más grande con la carga de nieve balanceada Sb (kPa)

U: Combinación de cargas más grande con la carga de nieve sin balancear Su (kPa)

Θ: El ángulo del cono respecto a la horizontal (grados)

CA: Corrosión admisible (mm)

Lo primero es definir cuáles son los valores de esas cargas, para ello en el punto 5.2.2 (Load combinations) se aprecia cuáles son las combinaciones de carga, en ella se observa la carga por gravedad las cuales son:

$$B1 = D_L + (L_r \text{ or } S_u \text{ or } S_b) + F_{pe} * P_e$$

$$B2 = D_L + P_e + 0.4(L_r \text{ or } S_u \text{ or } S_b)$$

De estas dos se escoge la mayor y se reemplaza en la formula mencionada anteriormente, las definiciones y los valores son:

DL: Carga muerta de peso de tanque o componentes (kPa)

Lr: Carga viva = 1 kPa; pero no menor a 0.72 kPa.

Fpe: Factor de combinación de carga = 0.4

Pe: Presión externa (kPa)

Sb: Carga de nieve (kPa)

A medida de resumen de muestra la siguiente tabla:

Tabla 10

Parámetros de diseño para el cálculo del techo

Descripción	Valor	Unidad
Lr	1	kPa
Fpe	0.4	kPa
Pe	0	kPa
Sb	100	Kg/m2

Descripción	Valor	Unidad
E	199000	Mpa
θ	20	°

Nota: Fuente Elaboración Propia (2023).

Para poder iniciar, primero se debe calcular la carga muerta, para ello se supondrá un espesor de la chapa del techo inicial con un valor de 10 mm, esto con el objetivo de encontrar un espesor con la formula, si este espesor es menor entonces el espesor de la chapa será el calculado y si es mayor entonces se debe de volver a realizar los cálculos.

Para encontrar la carga muerta, que es el peso del techo o componentes debemos de encontrar el volumen y multiplicarlo por la densidad del acero y la gravedad, para ello:

$$A_{techo} = \frac{\pi D^2}{4 * \cos \theta} = \frac{\pi * 4.6^2}{4 * \cos (20^\circ)} = 17.686 \text{ m}^2$$

El volumen del tanque resulta de multiplicar el área por el espesor, entonces:

$$V = A * t = 17.686 * 0.01 = 0.177 \text{ m}^3$$

Como la chapa de acero es de acero A36, la densidad de este acero es de 7850 kg/m³

$$W_{techo} = 0.177 * 7850 * 9.81 = 13619.413 \text{ N}$$

Ahora la carga muerta resulta de dividir el peso del techo entre el área respectiva, obteniendo:

$$D_L = \frac{W_{techo}}{A} = \frac{13619.413 \text{ N}}{17.686 \text{ m}^2} = 0.77 \text{ kPa}$$

Ahora con el valor de la carga muerta encontrada, se debe calcular la combinación de cargas más grande, para ello se utiliza las ecuaciones del punto 5.2.2 mencionados anteriormente, obteniendo:

$$B_1 = 0.77 + 0.4 * (1) + 0 = 1.170 \text{ kPa}$$

$$B_2 = 0.77 + 0.4 * (0) + 1 = 1.770 \text{ kPa}$$

De estos dos valores se elige la mayor y se reemplaza en la ecuación inicial para determinar el espesor de la chapa, obteniendo:

$$t_{\min} = 2 * \frac{1000D}{\sin\theta} * \sqrt{\frac{B}{1000E}} + CA = \frac{2 * 1000 * 4.6}{\sin(20^\circ)} * \sqrt{\frac{1.1770}{1000 * 199000}} + 1.5 = 4.0369 \text{ mm}$$

Debido a que este espesor es menor que 5mm entonces, se debe escoger un espesor de 5mm sumándole la corrosión admisible, por lo tanto, el espesor mínimo será de 6.5 mm, eligiendo un espesor comercial se selecciona:

$$t_{\text{comercial}} = 8 \text{ mm}$$

Por último, se puede encontrar el valor de la altura del techo, que viene a tener el valor de:

$$h = \frac{D \tan(\theta)}{2} = \frac{4.6 * \tan(20^\circ)}{2} = 0.837 \text{ m}$$

Como comprobación final API establece usando la imagen F.2 (Ver figura 18), el área de aporte de la unión techo – virola sea mayor que la siguiente ecuación:

$$A_{\text{requerida}} = \frac{pD^2}{8F_a \tan\theta}$$

Donde:

p: Combinación de cargas más grandes (kPa)

D: Diámetro nominal de tanque (m)

θ : Angulo del cono a la horizontal (grados)

F_a: Esfuerzo admisible = 0.6F_y, donde F_y es esfuerzo de fluencia del material (MPa)

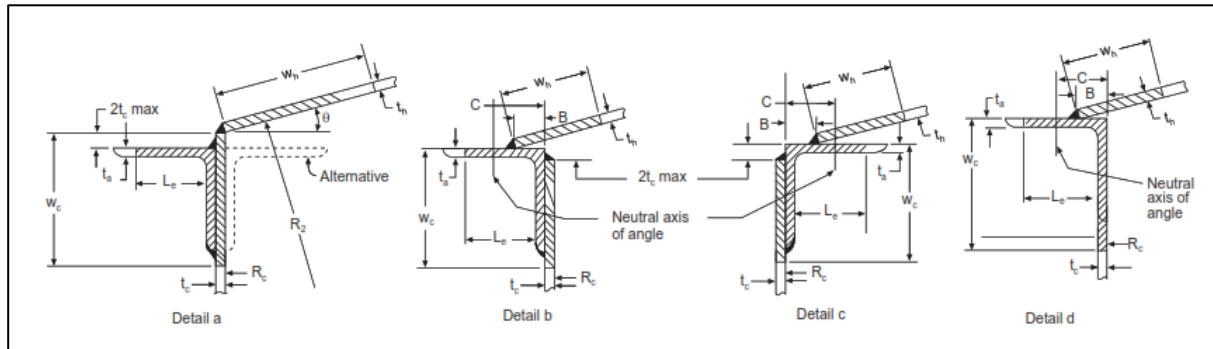
F_y: Esfuerzo de fluencia del material de unión (MPa)

Donde el valor de la combinación más grande p , tiene que volver a ser calculado con el nuevo espesor, obteniendo un valor de 1.616 kPa, reemplazando en la ecuación se obtiene:

$$A_{requerida} = \frac{pD^2}{8F_a \tan \theta} = \frac{1.616 \text{ kPa} * 4.6^2}{8 * 250 * 0.6 * 1000 * \tan(20^\circ)} = 78.294 \text{ mm}^2$$

Figura 18

Uniones comunes de techo - pared - anillo



Nota: Fuente API 650 (2020), Permissible Details of Compression Rings, p. 299.

De la figura anterior extraído de API, se observa las conexiones típicas de pared techo, con ello podremos determinar cuál es el área de aporte de cada elemento de unión, los cuales son el área del anillo, el techo y la envolvente; la suma de todas estas áreas debe ser mayor que el área mínima requerida calculada anteriormente.

El área de aporte del anillo de compresión, que viene a ser la viga de rigidización es 65x65x6mm, el cual tiene un área de aporte de:

$$A = L_e * t = \frac{250t}{\sqrt{F_y}} = \frac{250 * 6}{\sqrt{250}} = 94.87 * 6 = 569.25 \text{ mm}^2$$

El área de aporte de la virola viene determinada por:

$$A = W_c * t = 0.6\sqrt{R_c} * t * t = 0.6 * \sqrt{4600} * 6 * 6 = 598.1 \text{ mm}^2$$

El área de aporte del techo viene determinada por:

$$A = W_h * t = 0.3\sqrt{R_2} * t * h * t = 0.3 * \sqrt{\frac{4600}{\sin(20^\circ)}} * 8 * 8 = 789.57 \text{ mm}^2$$

Entonces el área de aporte total de todos estos miembros es:

$$A_{aporte} = 569.25 + 598.1 + 789.57 = 1956.92 \text{ mm}^2 > 78.294 \text{ mm}^2$$

3.6.6. Diseño y selección de conexiones

De acuerdo con el punto 5.7 (Shell Openings), se dan una serie de consideraciones generales para la selección de las conexiones, de las cuales se detallan a continuación:

- Todas las conexiones de las violas serán diseñadas de acuerdo con el estándar API.
- Todos los platos de refuerzo, superficie de manholes serán cortados de manera uniforme y con las esquinas y/o bordes debidamente redondeados a excepción de esquinas o lados donde serán soldados.
- El espesor y dimensiones de las placas insertadas en la viola serán de acuerdo con el punto 5.7.2.
- Dentro de los tipos de conexiones al tanque se tiene las RTR, LTR y SIN, donde las RTR corresponde a aperturas reforzadas del tipo regular que mantienen una distancia del fondo, no se extienden; las LTR son del tipo low-type, estos son refuerzos que se extienden hasta el fondo y por ultimo las SN que no cuentan con ningún tipo de refuerzo ni placa de inserción.
- Conexiones de NPS 3 o superiores deben ser reforzados de acuerdo con la figura 5.7, 5.8 y las tablas 5.6a – 5.8b del estándar.
- El espesor de la placa de refuerzo o inserción será como mínimo igual o menor que el espesor de la viola.
- El tamaño del manhole debe de ser lo suficientemente grande para que, entre una persona, el tanque debe de tener 1 o 2 manhole en el cuerpo o en el techo.

- Cada manhole debe contar con un pequeño orificio de 6mm para detectar fugas en la soldadura y liberar los gases por soldadura.
- El Flush Type, utilizado principalmente como boquillas de limpieza y usadas como de proceso se deben diseñar de acuerdo con los puntos 5.7.7.2 – 5.7.7.12 del estándar.
- Los manhole de techo serán diseñadas de acuerdo con la tabla 5-13 y la figura 5-16.
- Los venteos de techo deben ser adecuados para prevenir excesos de presiones internas o externas y serán diseñadas de acuerdo con el estándar API 2000.

Después de todas estas consideraciones se procede a la selección de las conexiones, todo tanque debe estar provisto de boquillas, y esto dependiendo del fluido a almacenar, de las facilidades la configuración de la planta y el número de boquillas. Todo tanque deberá contar como mínimo de conexiones de entrada, salida, drenaje, venteo, entrada de hombre y conexiones para indicador y/o control de nivel.

3.6.6.1. Conexiones principales

Se considera conexiones principales, aquellas presentes en los tanques que son la entrada, salida, drenaje y entrada de hombre. API no establece consideraciones de posición, es decir, las conexiones pueden ir a cualquier ángulo según sea requerido, para ello a manera de resumen se presenta una tabla con los tamaños de conexión.

Tabla 11

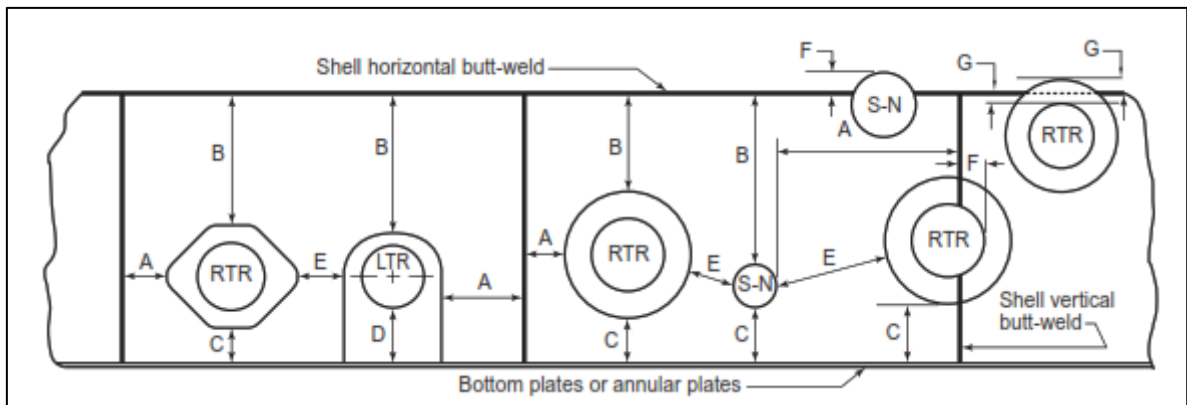
Conexiones de pared de Tanque

Descripción	Tamaño (in)
Conexión de Descarga	2
Conexión de Ingreso	3
Conexión de Manhole	30
Conexión nivel bajo	1
Conexión nivel alto	1

Ya con los tamaños definidos, API si tiene consideraciones del tipo de conexión, si llevan o no refuerzos, distancia de fondo a centro de conexión, distancia entre las propias conexiones y por último la distancia de estas a la soldadura vertical de cada virola, para ello con ayuda de la figura 5.6 de la norma, se establecen las distancias mínimas que debe de existir entre cada conexión.

Figura 19

Distancias Mínimas de Conexiones de Pared



Nota: Fuente API 650 (2020), Minimum Weld Requirimients for Opening in Shell, p. 72.

API establece que conexiones con tamaño NPS 2 y superiores deben contar con refuerzo, menores a este tamaño no es requerido a menos que se especifique lo contrario, de acuerdo con la tabla 11, se establece que todas las conexiones serán del tipo RTR (reforzados del tipo regular) y deberá cumplir con las mínimas distancias permitidas por la norma.

Con ayuda de la tabla 5.6a – Dimensions for Shell Nozzles (Ver figura 20), se puede determinar las mínimas distancias del exterior de la virola del tanque hasta la cara de la brida, así como el diámetro del hueco de inserción para la tubería y el ancho – largo de la placa de refuerzo, se busca el diámetro de conexión que se necesita y con las columnas 8 y 9c se debe encontrar cual es la distancia mínima permitida.

Figura 20

Distancias mínimas de conexión de Pared de Tanque

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9 ^c
NPS (Size of Nozzle)	Outside Diameter of Pipe <i>OD</i>	Nominal Thickness of Flanged Nozzle Pipe Wall ^a <i>t_n</i>	Diameter of Hole in Reinforcing Plate <i>D_R</i>	Length of Side of Reinforcing Plate ^b or Diameter <i>L = D_o</i>	Width of Reinforcing Plate <i>W</i>	Minimum Distance from Shell- to-Flange Face <i>J</i>	Minimum Distance from Bottom of Tank to Center of Nozzle	
							Regular Type ^d <i>H_N</i>	Low Type <i>C</i>
28	711.2	e	714	1440	1745	300	826	720
26	660.4	e	664	1340	1625	300	776	670
24	609.6	12.7	613	1255	1525	300	734	630
22	558.8	12.7	562	1155	1405	275	684	580
20	508.0	12.7	511	1055	1285	275	634	525
18	457.2	12.7	460	950	1160	250	581	475
16	406.4	12.7	410	850	1035	250	531	425
14	355.6	12.7	359	750	915	250	481	375
12	323.8	12.7	327	685	840	225	449	345
10	273.0	12.7	276	585	720	225	399	290
8	219.1	12.7	222	485	590	200	349	240
6	168.3	10.97	171	400	495	200	306	200
4	114.3	8.56	117	305	385	175	259	150
3	88.9	7.62	92	265	345	175	239	135
2 ^f	60.3	5.54	63	—	—	150	175	h
1 1/2 ^f	48.3	5.08	51	—	—	150	150	h
1 ^f	33.4	6.35	—	—	—	150	150	h
3/4 ^f	26.7	5.54	—	—	—	150	150	h

Nota: Fuente API 650 (2020). Dimensions for Shell Nozzles, p. 80.

De la figura anterior se extrae los datos para las conexiones de 1", 2" y 3", estos datos serán necesarios para la etapa del diseño, y posteriormente para la etapa de fabricación, es por ello por lo que se deben de seleccionar según el estándar. Otro factor importante es la selección de las bridas que llevarán las conexiones, ya que deben cumplir ciertos requisitos según la norma, para ello se utiliza la tabla 5.8a – Dimensions for Shell Nozzles Flanges, donde se dan los requisitos mínimos que deben de tener las bridas, tanto como espesor de brida, número de huecos, diámetro exterior de brida; además de que las bridas deben ser especificadas y ser diseñados de acuerdo con ASME B16.5 para diámetros menores a 20" y superiores según ASME B16.47.

Lo siguiente es encontrar las dimensiones de la entrada de hombre, conocida como Manhole, para ello, la norma API en la tabla 5.3a – Thickness of Shell Manhole Cover Plate and Bolting Flange; presenta los valores de espesores que debe de tener el Manhole que ira soldada en la envolvente del tanque.

Figura 21

Dimensiones de Manhole

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9	Column 10
Max. Design Liquid Level m H	Equivalent Pressure ^a kPa	Minimum Thickness of Cover Plate ^b (t_c), mm				Minimum Thickness of Bolting Flange After Finishing ^b (t_f), mm			
		500 mm Manhole	600 mm Manhole	750 mm Manhole	900 mm Manhole	500 mm Manhole	600 mm Manhole	750 mm Manhole	900 mm Manhole
5	49	8	10	12	13	6	7	9	10
6.5	64	10	11	13	15	7	8	10	12
8.0	78	11	12	14	17	8	9	11	14
9.5	93	12	13	16	18	9	10	13	15
11	108	12	14	17	20	9	11	14	17
13	128	13	15	18	21	10	12	15	18
16	157	15	17	20	23	12	14	17	20
19	186	16	18	22	26	13	15	19	23
23	225	18	20	24	28	15	17	21	25

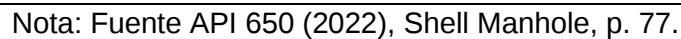
^a Equivalent pressure is based on water loading.
^b For addition of corrosion allowance, see 5.7.5.2.
^c Cover Plate and Flange thickness given can be used on Manholes dimensioned to ID or OD.
^d For table calculations S_d set per 5.7.5.6.
NOTE See Figure 5.7a.

Nota: Fuente API 650 (2020). Thickness of Shell Manhole Cover Plate, p. 73.

De la anterior imagen, en la columna izquierda se observa que para seleccionar los espesores mínimos del manhole, se debe contar con el dato del nivel del líquido, según el diseño el tanque se tiene una altura de 4.2m, entonces nos ubicamos en la primera fila y se selecciona los espesores t_c y t_f ; ahora el tamaño del manhole mínimo es 500 mm y el máximo de 900mm, la elección de este depende del tamaño y de la función que realice, para el diseño se va a considerar solo un tamaño de 600 mm.

Con ayuda de la figura 5.7a – Shell Manhole de la norma (Ver figura 22), que se muestra a continuación se podrá tener más claro que son estos espesores calculados anteriormente.

Dimensiones de Manhole



A manera de resumen de presenta la tabla 12 con los valores del manhole:

Tabla 12

Resumen de dimensiones de Manhole

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Espesor de placa hueca	tf	7	mm
Espesor de brida ciega	tc	10	mm
Espesor de cuello	tn	12.7	mm
Diámetro exterior de manhole	OD	600	mm
Diámetro interior de placa refuerzo	DR	613	mm
Diámetro interior de hueco de virola	DP	616	mm
Espesor placa de refuerzo	T	6	mm
Diámetro exterior brida ciega	Dc	832	mm
Diámetro de ubicación de pernos	Db	768	mm
Cantidad de pernos	-	20	-
Tamaño de pernos	-	20	mm
Espesor de empaquetadura	-	3	mm
Distancia de virola a cara de brida	J	300	mm
Largo de refuerzo de manhole	L	1255	mm
Ancho de refuerzo de manhole	W	1525	mm

De la misma manera que se calculó las conexiones para el cuerpo del tanque, también se van a seleccionar para las conexiones en el techo, el techo debe contar como mínimo con un venteo, una boca de hombre, bocas de aforo y drenaje de emergencia.

- Los manhole de techo deben ser conforme al punto 5.8.4 de la norma API y se seleccionan con la tabla 5.13a, tabla 5.13b y la figura 5.16.
- Los venteos deben ser diseñados para una correcta ventilación para etapas de operación normal y condiciones de emergencia, los venteos deben ser adecuados para prevenir presiones internas y deberán ser requeridos y especificados por la norma API 2000. Las conexiones de techo no deben superar el tamaño de 12" a excepción del manhole.
- Plataformas, escaleras y pasarelas deben ser de acuerdo con la tabla 5.17 y la tabla 5.18 de la norma. Donde no exista estándares locales de seguridad, los requerimientos mínimos que se deben cumplir serán con los de OSHA, específicamente OSHA 29 CFR 1910, subíndice D.

3.6.6.2. Diseño de venteo

Para el correcto diseño del venteo se recurre al estándar API 2000, el estándar se aplica para causas de sobrepresión y vacío, así como la cantidad de venteos requeridos para cada aplicación, para ello la norma establece unas condiciones las cuales son:

- Inhalación normal resultante de una máxima salida de líquido del tanque.
- Inhalación normal resultante de la contracción de vapores dentro del tanque
- Exhalación normal resultante de una entrada máxima de líquido al tanque.
- Exhalación normal resultante de la expansión de un aumento de temperatura.
- Ventilación de emergencia resultante de la exposición al fuego.

Para iniciar con el cálculo, API 2000 establece unas fórmulas que están detalladas en el punto 3.3.2.2 – Required Flow Capacity Due to Filling and Discharge, la cual se detalla a continuación y solo son válidas para líquidos no volátiles:

OUT-BREATHING (Salida)

$$\dot{V}_{op} = \dot{V}_{pf}$$

Donde:

$\dot{V}_{op}$: Flujo de descarga del vapor/gas (m³/h)

$\dot{V}_{pf}$: Máximo flujo de llenado (m³/h)

IN-BREATHING (Salida)

$$\dot{V}_{ip} = \dot{V}_{pe}$$

Donde:

$\dot{V}_{ip}$: Flujo requerido de venteo (m³/h)

$\dot{V}_{pe}$: Máximo flujo de descarga (m³/h)

THERMAL OUT-BREATHING (Exhalación Térmica)

$$\dot{V}_{OT} = YV_{tk}^{0.9}R_i$$

Donde:

Y: Factor por latitud

Vtk: Volumen de tanque (m3)

Ri: Factor de reducción = 1, si no tiene aislamiento

THERMAL IN-BREATHING (Inhalación Térmica)

$$\dot{V}_{OT} = CV_{tk}^{0.7}R_i$$

Donde:

C: Factor que depende de la presión de vapor

Vtk: Volumen de tanque (m3)

Ri: Factor de reducción = 1, si no tiene aislamiento

Tabla 13

Parámetros de operación para cálculo de Venteo

Descripción	Valor	Unidad
Caudal de llenado	54	m3/h
Caudal de Descarga	10	m3/h
Temperatura máxima	20	°C
Latitud	12	°

Con los datos de la tabla 13 se procede a reemplazar en las ecuaciones descritas anteriormente y se obtiene:

OUT-BREATHING (Salida)

$$\dot{V}_{op} = \dot{V}_{pf} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$$

THERMAL OUT-BREATHING (Exhalación Térmica)

$$\dot{V}_{OT} = YV_{tk}^{0.9}R_i$$

Tabla 14

Factor Y

Latitude	Y-factor
Below 42°	0.32
Between 42° and 58°	0.25
Above 58°	0.2

Nota: Fuente API 2000 (2020), Factor Y for various Latitude, p. 18.

Donde: Y=0.32 y $R_i = 1$

El volumen del tanque se obtiene de:

$$V = V_{tk} = \frac{\pi * D^2 * H}{4} = \frac{\pi * 4.6^2 * 5}{4} = 83.09 \text{ m}^3$$

Reemplazando los datos se obtiene:

$$\dot{V}_{OT} = 0.32 * 83.09^{0.9} * 1 = 17.09 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

El valor anterior representar el flujo en condiciones normales es decir a 0°C y una presión de 1 atm, si se requiere convertir a m³/h, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_{op} = \frac{\dot{V}_{ot} * T * P_N}{T_N * P} = \frac{17.1 * (20 + 273) * 1013.25}{(0 + 273) * 636.58} = 30.5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Entonces el volumen total para la exhalación o descarga del tanque es:

$$\dot{V}_{op} = 30.5 + 10 = 40.5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ahora se realiza el mismo procedimiento para el IN- BREATHING (entrada).

IN-BREATHING (Salida)

$$\dot{V}_{ip} = \dot{V}_{pe} = 54 \text{ m}^3/\text{h}$$

THERMAL IN-BREATHING (Exhalación Térmica)

$$\dot{V}_{OT} = C V_{tk}^{0.7} R_i$$

Tabla 15

Factor C

Latitude	C-factor for various conditions			
	Vapor pressure similar to Hexane		Vapor pressure higher than hexane, or unknown	
	Average storage temperature °C			
	< 25	≥ 25	< 25	≥ 25
Below 42°	4	6.5	6.5	6.5
Between 42° and 58°	3	5	5	5
Above 58°	2.5	4	4	4

Nota: Fuente API 2000 (2020), C factor for Various conditions, p.19.

Donde C=4 y Ri=1,

Reemplazando los datos se obtiene:

$$\dot{V}_{OT} = C V_{tk}^{0.7} R_i = 4 * 83.09^{0.7} * 1 = 88.255 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Convirtiendo el valor anterior a m3/h se tiene:

$$\dot{V}_{op} = \frac{\dot{V}_{ot} * T * P_N}{T_N * P} = \frac{88.255 * (20 + 273) * 1013.25}{(0 + 273) * 636.58} = 157.3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Entonces el volumen total para la inhalación o ingreso del tanque es:

$$\dot{V}_{op} = 157.3 + 54 = 211.3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para encontrar el área que debe tener la conexión de venteo, se debe dividir el máximo caudal que necesita el tanque entre la velocidad del aire, de acuerdo con el mapa eólico del Perú, las velocidades en Cajamarca están entre los 5 – 10 m/s.

Entonces para encontrar el área que se necesita se divide:

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{\dot{V}_{op}}{v_{\text{mín}}} = \frac{211.3 \text{ m}^3/\text{h}}{18 \text{ km/h}} = 0.0117 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{V_{\dot{o}p}}{v_{m\acute{a}x}} = \frac{211.3 \text{ m}^3/h}{36 \text{ km/h}} = 0.0058 \text{ m}^2$$

Con estos valores se busca cual es el área de la tubería que se necesita, y se encuentra que una tubería de acero SCH 40 de 4" y 6" cumplen para ese rango de áreas, entonces se concluye que una tubería 6" satisface la ventilación en operación del tanque.

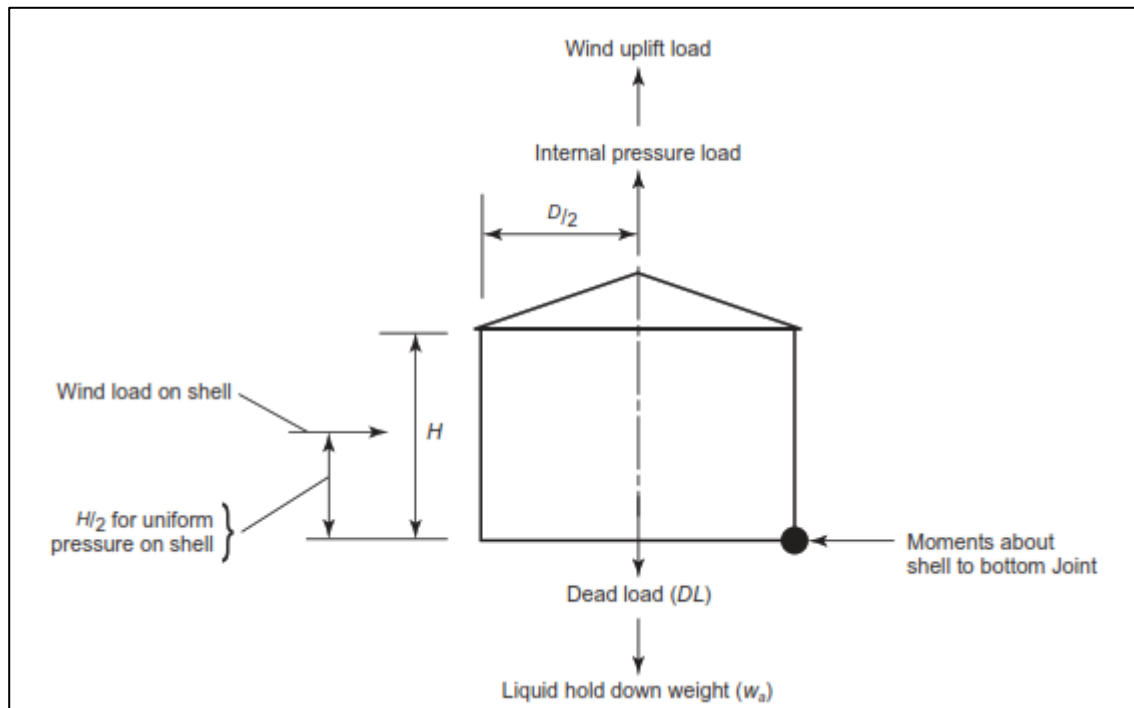
3.6.7. Verificación de Efecto de Viento

Para comprobar la estabilidad de cualquier tanque, esta debe ser calculada de acuerdo con las cargas de viento indicadas en la normativa, para ello se necesita conocer la velocidad del viento y la presión que ejerce sobre el recipiente, con ello se emplean las ecuaciones del punto 5.2.1(k) y conocer si un tanque es mecánicamente estable y si necesita o no de un de un anclaje.

En el capítulo 5.11 de la norma se encuentran las consideraciones para el cálculo, se considera el esquema como se muestra en la figura 25.

Figura 23

Consideraciones de carga presentes en un tanque por acción del Viento



Nota: Fuente API 650 (2020), Wind Loads on Tanks, p. 143.

De la figura anterior, se define los parámetros necesarios para realizar la comprobación.

La presión de diseño por viento en las virolas (P_{WS}) que está definida por:

$$P_{WS} = 0.89 * \left(\frac{V}{190} \right)^2$$

Esta presión se aplica en la superficie vertical proyectada del tanque, obteniendo:

$$A_{proyectada} = D * H$$

La presión de diseño por levantamiento en el techo (P_{WR}) que está definida por:

$$P_{WR} = 1.48 * \left(\frac{V}{190} \right)^2$$

Esta presión se aplica en el área proyectada del techo, obteniendo:

$$A_{proyectada} = D * \frac{\tan(\theta)}{4}$$

Para conocer si un tanque es estable y auto anclado, debe satisfacer las siguientes ecuaciones ocasionadas por el levantamiento produciendo un momento de vuelco, para ello si el tanque cumple todas estas condiciones se puede considerar estable y no necesita ser anclado.

$$0.6M_w + M_{pi} < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR}$$

$$M_w + F_p(M_{pi}) < \frac{M_{DL} + M_F}{2} + M_{DLR}$$

$$M_{ws} + F_p(M_{pi}) < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR}$$

Donde:

M_w : Momento de vuelco en la unión virola-fondo de la presión vertical y horizontal (Nm).

M_{pi} : Momento en la unión virola-fondo debido a la presión interna de diseño (Nm).

Mdl: Momento de vuelco en la unión virola-fondo debido al peso de las virolas y techo (Nm).

Mdlr: Momento unión virola-fondo debido al peso del techo (Nm).

Mf: Momento unión virola-fondo debido al peso del líquido (Nm).

Mws: Momento de vuelco en la unión virola-fondo de la presión horizontal (Nm)

Fp: Factor de combinación de presión =0.4.

Para calcular el valor de momento de vuelco en la unión fondo-virola se utiliza:

$$M_w = P_{WS} * A_{proyec\ virola} * \frac{H}{2} + P_{WR} * A_{proyec\ techo} * \frac{D}{2}$$

$$P_{WS} = 0.89 * \left(\frac{V}{190}\right)^2 = 0.89 * \left(\frac{120}{190}\right)^2 = 0.3550\ kPa$$

$$P_{WR} = 1.48 * \left(\frac{V}{190}\right)^2 = 1.48 * \left(\frac{120}{190}\right)^2 = 0.5904\ kPa$$

$$A_{transversal\ virola} = D * H = 4.6 * 5 = 23\ m^2$$

$$A_{transversal\ techo} = D * \frac{\tan(\theta)}{4} = D * \frac{\tan(20^\circ)}{4} = 0.4186\ m^2$$

$$M_w = 0.3550 * 23 * \frac{5}{2} + 0.5904 * 0.4186 * \frac{4.6}{2} = 20.9816\ KNm$$

El momento debido a la presión interna M_{pi} es igual a cero, ya que el recipiente en todo momento está conectado a la atmosfera.

El momento de vuelco debido a la virola y techo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$M_{DL} = (W_{virola} + W_{techo}) * \frac{D}{2}$$

Donde W_{virola} y W_{techo} , representan los pesos respectivos ya con el espesor final, para ello solo se debe multiplicar la densidad del material por el volumen respectivo.

El material de fondo, tanque y techo serán de acero A36, este presenta una densidad de 7850 kg/m³, entonces con esto se puede calcular los pesos respectivos y son:

$$W_{virola} = \pi D \rho H t g = \pi * 4.6 * 7850 * 5 * 6 * 10^{-3} * 9.81 = 31160.499 \text{ N}$$

$$W_{techo} = A_{techo} t \rho g = 17.686 * 8 * 7850 * 9.81 * 10^{-3} = 10895.5305 \text{ N}$$

$$M_{DL} = (W_{virola} + W_{techo}) * \frac{D}{2} = (31160.499 + 10895.5305) * \frac{4.6}{2} = 96728.867 \text{ Nm}$$

El momento de vuelco debido al peso del techo y cargas adicionales es:

$$M_{DLR} = (W_{techo} * 1.1) * \frac{D}{2}$$

El valor de 1.1 representa un adicional de 10% del peso total para tener una consideración de cargas que son bocas de hombre, conexiones, etc. Entonces el resultado es:

$$M_{DLR} = (W_{techo} * 1.1) * \frac{D}{2} = 10895.5305 * 1.1 * \frac{4.6}{2} = 27565.692 \text{ Nm}$$

Y por el ultimo el momento de vuelco debido al peso del líquido:

$$M_F = W_{fluido} * \frac{D}{2}$$

$$W_{fluido} = \frac{\pi D^2}{4} * H_{liquido} * \rho * g = \frac{\pi * 4.6^2}{4} * 4.2 * 850 * 9.81 = 582026.5127 \text{ N}$$

$$M_F = W_{fluido} * \frac{D}{2} = 582026.5127 * \frac{4.6}{2} = 1338660.979 \text{ Nm}$$

Ahora con estos valores se reemplazan en las siguientes ecuaciones:

$$0.6M_w + M_{pi} < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR} = 0.6 * 20.9816 + 0 < 77499.738 \text{ ¡CUMPLE!}$$

$$M_w + F_p(M_{pi}) < \frac{M_{DL} + M_F}{2} + M_{DLR} = 20.9816 + 0.4 * 0 < 747820.23 \text{ ¡CUMPLE!}$$

$$M_{ws} + F_p(M_{pi}) < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR} = 20.4133 + 0 < 77499.738 \text{ ; CUMPLE!}$$

A partir de todas las verificaciones anteriores, se puede concluir que por acciones de viento el tanque si está perfectamente diseñado y no se necesita ser anclado. Una vez realizado este paso se procede a realizar el análisis sísmico del sistema.

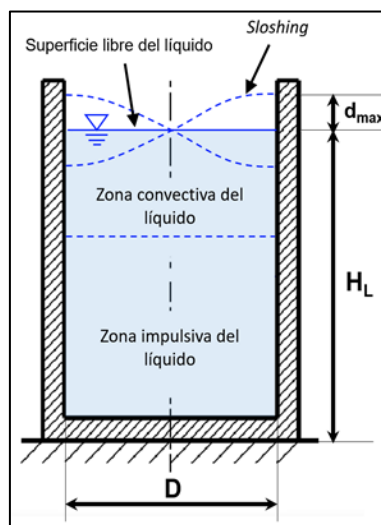
3.6.8. Verificación del Efecto Sísmico

La estabilidad sísmica de líquidos en recipientes cilíndricos verticales debe comprobarse de acuerdo con el anexo E de la norma API. Los efectos que tienen un sismo en un tanque o en fluido contenido por el tanque es que puede ocurrir un desplazamiento horizontal por cortante en la base, generar una inestabilidad y con ello un momento de vuelco y, por último, si el tanque no cuenta con un borde libre, dentro de este se produce un oleaje.

En un sismo, el fluido contenido por el tanque se divide en dos, una componente impulsiva, que es la porción en la parte inferior del tanque y que se mueve junto con el tanque; y la componente convectiva que se ubica en la parte superior, la cual siempre está libre y es capaz de producir oleajes.

Figura 24

Zona Convectiva e Impulsiva del líquido al interior de un Tanque



Nota: Fuente Lobo Rossana (2021), Análisis Sísmico en Tanques de Concreto.

Para un correcto análisis de estos efectos, en el apartado E.3 del anexo E de la norma API, se presentan grupos en base a la seguridad de los tanques, es decir, se agrupan de acuerdo con facilidades, el servicio y la clase de fluido que va almacenar, así como el tipo de contacto o que tan peligroso es si queda expuesto al público.

Estos grupos se dividen según SUG III, SUG II y SUG I, donde el SUG III, tiene un nivel de importancia más grande y el público debe tener cero contacto con el fluido almacenado por lo que el nivel de seguridad debe ser alto, el SUG II es un nivel intermedio en el cual el líquido almacenado no es tan nocivo, pero si se debe tener cuidado y controlado; y el SUG I son para tanques no asignados al II o III.

Tabla 16

Factor de Importancia I

Table E.5—Importance Factor (<i>I</i>) and Seismic Use Group Classification	
Seismic Use Group	<i>I</i>
I	1.0
II	1.25
III	1.5

Nota: Fuente API 650 (2020), E.3 Performance Basis, p. 244.

Para ello, según el diseño y la tabla E.5 de la norma, el tanque se ubica en el grupo SUG II, con un factor de importancia (I) de 1.25.

Otro de los factores importantes a la hora de realizar el análisis sísmico es el espectro de respuesta de aceleraciones del sitio. Para diseños y que se considere sitios dentro de USA, la norma que rige es ASCE 7, y para lugares fuera de USA, se presenta una alternativa para calcular los espectros solo conociendo el espectro de aceleración del suelo S_p :

$$S_S = 2.5S_p$$

$$S_1 = 1.25S_p$$

Donde, S_s representa el espectro de aceleración para periodos de tiempo cortos de 0.2 segundos y S_1 representa el espectro de aceleración para periodos de un segundo. Para los espectros de aceleración máxima los coeficientes de suelo definidos por F_a y F_v , serán modificados de acuerdo con la tabla E.1 y tabla E.2. Además de que cuando las propiedades del suelo no se conocen se asume que se encuentran en una clase de suelo tipo D.

Tabla 17

Factor F_a función de Clases de Sitio

Table E.1—Value of F_a as a Function of Site Class

Site Class	Mapped MCE_R Spectral Response Accelerations at Short Periods				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	a	a	a	a	a

^a Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is required.

Nota: Fuente API 650 (2020), Modifications for Site Soil Conditions, p. 247.

De la tabla anterior se debe extraer el valor del coeficiente de suelos F_a .

Tabla 18

Factor F_v función de Clases de Sitio

Table E.2—Value of F_v as a Function of Site Class

Site Class	Mapped MCE_R Spectral Response Accelerations at 1 Sec Periods				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	a	a	a	a	a

^a Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is required.

Nota: Fuente API 650 (2020), Modifications for Site Soil Conditions, p. 247.

De la tabla anterior se debe extraer el valor de coeficiente de suelo F_v .

Para encontrar cada uno de estos valores, lo primero es encontrar el valor del coeficiente del factor de sismo, para ello en la norma E.030 – Diseño Sismorresistente se puede encontrar el factor de suelo, este factor cambia dependiendo de la ubicación y zona, tomando los valores máximos de:

Tabla 19

Factores de Zona

Tabla N° 1 FACTORES DE ZONA "Z"	
ZONA	Z
4	0,45
3	0,35
2	0,25
1	0,10

Nota: Fuente Sigrid (2015).

De acuerdo con las condiciones del proyecto, se debe ubicar la zona 3 y está presenta el valor que se va considerar a lo largo de todo el diseño, el cual toma un valor de 0.35. Entonces ya definido la aceleración máxima del suelo se reemplazan en las ecuaciones iniciales obteniendo:

$$S_S = 2.5S_p = 2.5 * 0.35 = 0.875$$

$$S_1 = 1.25S_p = 1.25 * 0.35 = 0.4375$$

$$F_a = 1.15 ; F_v = 1.5625$$

Debido a que el tanque contiene un líquido almacenado, ocurre un fenómeno llamado Sloshing (Chapoteo), por lo cual se debe calcular el periodo convectivo que este produce, para ello la norma establece las siguientes ecuaciones:

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68H}{D}\right)}} = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 * 5}{4.6}\right)}} = 0.5782$$

$$T_c = 1.8K_s\sqrt{D} = 1.8 * 0.5782 * \sqrt{4.6} = 2.232 \text{ s}$$

Teniendo ya definidos estos valores, se continúan con los cálculos de los coeficientes de aceleración espectral impulsiva A_i y convectiva A_c , los cuales son:

$$A_i = S_{DS} \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) = 2.5 Q F_a S_0 \left(\frac{I}{R_{wi}} \right)$$

Donde S_{DS} representa el parámetro de aceleración de respuesta espectral y está definida por la siguiente ecuación:

$$S_{DS} = Q F_a S_S = 1 * 1.15 * 0.875 = 1.00625$$

Además, donde el coeficiente R_{wi} representa los factores de respuesta, que se encuentran en la tabla E.4 de la norma, y Q representa el factor de escala y tiene un valor de 1.

Tabla 20

Table E.4—Response Modification Factors for ASD Methods

Anchorage system	R_{wi} (impulsive)	R_{wc} (convective)
Self-anchored	3.5	2
Mechanically-anchored	4	2

Nota: Fuente API 650 (2020), Response Modification Factor, p. 253.

Para la selección de estos valores, se debe conocer cómo actúa el tanque, es decir si el tanque tiene la capacidad de ser auto anclado o necesita ser mecánicamente anclado, debido a los valores de espectro de respuesta y la aceleración del suelo se va a suponer que el tanque necesita ser mecánicamente anclado, por lo tanto, se tiene que los valores de R_{wi} y R_{wc} son:

$$R_{wi} = 4 ; R_{wc} = 2$$

Ya teniendo definido los valores, se reemplaza en la ecuación inicial y se obtiene:

$$A_i = S_{DS} \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) = 1.00625 * \left(\frac{1.25}{4} \right) = 0.3145$$

Y de la misma manera se calcula el coeficiente espectral convectivo, la cual tiene como expresión:

$$A_c = K S_{D1} \left(\frac{1}{T_c} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) ; \text{para valores con } T_c \leq T_L$$

$$A_c = K S_{D1} \left(\frac{T_L}{T_c^2} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) ; \text{para valores con } T_c > T_L$$

Donde T_L representa el periodo de transición para movimiento del suelo mas largos, y para locaciones que estén fuera de USA o donde se difiere de los métodos de ASCE 7, este tomara un valor de 4. Entonces como se cumple que $T_c \leq T_L$:

$$S_{D1} = Q F_v S_1 = 1 * 1.5625 * 0.4375 = 0.684$$

$$A_c = K S_{D1} \left(\frac{1}{T_c} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) = 1.5 * 0.684 * \left(\frac{1}{2.232} \right) * \left(\frac{1.25}{2} \right) = 0.2872 < A_i$$

Ya con los valores de los coeficiente convectivos e impulsivos se debe corroborar las cargas del diseño, para ello en el apartado E.6, se dan las expresiones necesarias para la comprobación.

Cortante Sísmico de Base

Lo primero es encontrar el valor de la fuerza cortante lateral, para ello en el apartado E.6.1 se dan las expresiones:

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2}$$

$$V_i = A_i (W_s + W_r + W_f + W_i)$$

$$V_c = A_c W_c$$

Donde:

W_s : Peso de la envolvente del tanque (N)

W_r : Peso del techo del tanque (N)

Wf: Peso del fondo del tanque (N)

Wp: Peso del fluido almacenado (N)

Wi: Peso impulsivo efectivo del tanque (N)

Wc: Peso convectivo efectivo del tanque (N)

El peso de la envolvente se calcula, multiplicando la superficie de cada envolvente por el espesor, altura de cada anillo, densidad del material y la gravedad, obteniendo:

$$W_s = \pi D t H \rho g = \pi * 4.6 * 0.006 * 5 * 7850 * 9.81 = 31160.499 \text{ N}$$

El peso del techo se calcula multiplicando el área superficial del techo por el espesor, densidad del material y gravedad, obteniendo:

$$A = \frac{\pi D^2}{4 \cos(\theta)} = \frac{\pi * 4.6^2}{4 \cos(20^\circ)} = 17.686 \text{ m}^2$$

$$W_r = A t \rho g = 17.686 * 0.008 * 7850 * 9.81 = 10895.5305 \text{ N}$$

$$W_r = 1.1 * 10895.5308 = 11985.08321 \text{ N, debido a cargas de nieve y accesorios}$$

El peso del fondo del tanque se calcula:

$$D_{fondo} = D_i + 2t + 50\text{mm} = 4600 + 2 * 6 + 50 = 4712 \text{ mm}$$

$$W_f = \frac{\pi D^2 t \rho g}{4} = \pi * 4.712^2 * 0.008 * 7850 * \frac{9.81}{4} = 42971.08 \text{ N}$$

El peso del fluido se calcula:

$$W_p = \frac{\pi D^2 H_{fluido} g G.E \gamma}{4} = \pi * 4.6^2 * 4.2 * 9.81 * 0.85 * \frac{1000}{4} = 582026.5127 \text{ N}$$

Para el cálculo de los pesos efectivos impulsivo y convectivo, en el apartado E.6.1.1 se dan las siguientes expresiones:

$$W_i = \left(1 - 0.218 \frac{D}{H}\right) W_p; \frac{D}{H} < 1.333$$

$$W_c = 0.230 \frac{D}{H} \tanh\left(3.67 \frac{H}{D}\right) W_p$$

Como D/H es 0.92, se puede emplear la ecuación y se obtiene:

$$W_i = \left(1 - 0.218 \frac{D}{H}\right) W_p = \left(1 - 0.218 \frac{4.6}{5}\right) * 582026.5127 = 465295.2753 \text{ N}$$

$$W_c = 0.230 \frac{D}{H} \tanh\left(3.67 \frac{H}{D}\right) W_p = 0.230 \frac{4.6}{5} \tanh\left(3.67 \frac{5}{4.6}\right) * 582026.5127 = 123072.3941 \text{ N}$$

$$V_i = A_i(W_s + W_r + W_f + W_i) =$$

$$= 0.3145 * (31160.499 + 11985.084 + 42971.08 + 465295.2753) = 172758.8664 \text{ N}$$

$$V_c = A_c W_c = 0.2871 * 123072.3941 = 35334.99 \text{ N}$$

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} = \sqrt{173458.7604^2 + 35334.99^2} = 176335.4415 \text{ N}$$

Para realizar la comprobación de que el tanque es capaz de resistir los efectos de corte en la base, en el apartado E.7.6 se presenta la condición que debe cumplir para no anclar el tanque por el efecto de corte, la expresión es:

$$V_s = \mu(W_s + W_r + W_f + W_p)(1 - 0.4A_v)$$

Donde:

μ : Factor de fricción, donde el máximo valor es 0.4

A_v : Aceleración vertical sísmica

$$A_v = 0.47 S_{DS} = 0.47 * 1.00625 = 0.4729$$

$$V_s = \mu(W_s + W_r + W_f + W_p)(1 - 0.4A_v) =$$

$$V_s = 0.4 * (31160.5 + 11985.084 + 40953.798 + 582026.5127)(1 - 0.4 * 0.4729)$$

$$V_s = 216044.6109 \text{ N}$$

$$V < V_s, \text{Entonces no necesita ANCLAJE}$$

Para continuar con el análisis de las fuerzas por sismos, se debe encontrar los centros de acción de las fuerzas laterales para calcular el momento de volcadura, en el apartado E.6.1.2 se encuentran las expresiones y son:

$$X_i = \left(0.5 - \frac{0.094D}{H}\right)H ; \frac{D}{H} < 1.33$$

$$X_c = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67H}{D} \sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right)}\right)H$$

$$X_{is} = \left(0.5 + \frac{0.06D}{H}\right)H ; \frac{D}{H} < 1.33$$

$$X_{cs} = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1.937}{\frac{3.67H}{D} \sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right)}\right)H$$

$$M_{rw} = \sqrt{(A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r))^2 + (A_c(W_c X_c))^2}$$

$$M_s = \sqrt{(A_i(W_i X_{is} + W_s X_s + W_r X_r))^2 + (A_c(W_c X_{cs}))^2}$$

Donde:

Xc: Altura desde el fondo del tanque al centro de acción de la carga lateral convectiva (m)

Xcs: Altura desde el fondo del tanque al centro de acción de la carga lateral convectiva (m)

Xi: Altura desde el fondo del tanque al centro de acción de la carga lateral impulsiva (m)

Xis: Altura desde el fondo del tanque al centro de acción de la carga lateral impulsiva (m)

Xr: Altura desde el fondo del tanque al centro de gravedad del techo (m)

Xs: Altura desde el fondo del tanque al centro de gravedad de las virolas del tanque (m)

Mrw: Momento de vuelco en una porción de anillo que actúa en la base del tanque (Nm)

Ms: Momento de vuelco en la loza (Nm)

Los valores de X_r y X_s se calculan con la expresión:

$$X_r = H + \frac{h}{3}, \text{ donde } h \text{ es la altura del techo; } X_s = \frac{H}{2}$$

Reemplazando en las ecuaciones se obtiene:

$$X_i = \left(0.5 - \frac{0.094 * 4.6}{5} \right) * 5 = 2.0676 \text{ m}$$

$$X_c = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 * 5}{4.6}\right) - 1}{\frac{3.67 * 5}{4.6} \sinh\left(\frac{3.67 * 5}{4.6}\right)} \right) * 4.6 = 3.792 \text{ m}$$

$$X_{is} = \left(0.5 + \frac{0.06 * 4.6}{5} \right) * 5 = 2.776 \text{ m}$$

$$X_{cs} = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 * 5}{4.6}\right) - 1.937}{\frac{3.67 * 5}{4.6} \sinh\left(\frac{3.67 * 5}{4.6}\right)} \right) * 5 = 3.8357 \text{ m}$$

$$X_r = 5 + \frac{0.837}{3} = 5.279 \text{ m}; X_s = \frac{5}{2} = 2.5 \text{ m}$$

Ahora se calculan los valores de momento de vuelco y resulta:

$$M_{rw} = \sqrt{(A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r))^2 + (A_c(W_c X_c))^2} = 371888.7278 \text{ Nm}$$

$$M_s = \sqrt{(A_i(W_i X_{is} + W_s X_s + W_r X_r))^2 + (A_c(W_c X_{cs}))^2} = 470501.7723 \text{ Nm}$$

Ahora estos valores son importantes y sirven para determinar la relación de anclaje J, que es una comprobación para determinar si el tanque lleva anclaje o no, antes de ello se debe calcular los efectos sísmicos verticales y se determinan con ayuda del apartado E.6.1.3 y son:

$$F_v = \pm A_v W_{eff} = A_v (W_s + W_r + W_f + W_p)$$

$$F_v = A_v (W_s + W_r + W_f + W_p) = 0.4729 * (668351.6437) = 316063.492 \text{ N}$$

Donde este valor representa la fuerza vertical que actúa durante un sismo y se debe considerar para analizar si necesita o no anclaje. Otra comprobación es que se necesita

comprobar que las fuerzas dinámicas del líquido no serán más grandes que el esfuerzo de diseño o el esfuerzo de fluencia, para ello en el apartado E.6.1.4 se dan las siguientes expresiones:

$$\text{Para } \frac{D}{H} < 1.33 \text{ y } Y \geq 0.75D$$

Donde Y representa la altura desde la superficie del líquido al punto del análisis, que será el punto donde está el máximo esfuerzo, y que según el método 1 foot ocurre a 0.3 m (1 ft) de la última virola, por lo tanto:

$$Y = H_{\text{liquido}} - 0.3 = 4.2 - 0.3 = 3.9 \text{ m} \geq 3.45 \text{ m}$$

$$N_i = 2.6A_iGD^2$$

$$N_c = \frac{1.85A_cGD^2 \cosh\left(\frac{3.68(H-Y)}{D}\right)}{\cosh\left(\frac{3.68H}{D}\right)}$$

$$\sigma_T = \sigma_h \pm \sigma_s = \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2 + \left(\frac{A_v N_h}{2.5}\right)^2}}{t}$$

$$N_h = 4.9D(H - 0.3)G$$

Donde:

Ni: Fuerza impulsiva de membrana en el anillo (N/m)

Nc: Fuerza convectiva de membrana en el anillo (N/m)

Nh: Fuerza del producto hidrostático en la membrana (N/m)

Donde el esfuerzo del anillo σ_T debe ser menor que el 1.33 del esfuerzo de diseño S_d o ser menor que $0.9S_y$, entonces se reemplaza en la ecuación y se obtiene:

$$N_i = 2.6A_iGD^2 = 2.6 * 0.3145 * 0.85 * 4.6^2 = 14.707 \text{ N/m}$$

$$N_c = \frac{1.85 A_c G D^2 \cosh\left(\frac{3.68(H-Y)}{D}\right)}{\cosh\left(\frac{3.68H}{D}\right)} = \frac{1.85 * 0.2871 * 0.85 * 4.6^2 \cosh\left(\frac{3.68(5-3.9)}{4.6}\right)}{\cosh\left(\frac{3.68 * 5}{4.6}\right)}$$

$$N_c = 0.4942 \text{ N/m}$$

$$N_h = 4.9D(H - 0.3)G = 4.9 * 4.6 * (5 - 0.3) * 0.85 = 90.0473 \text{ N/m}$$

$$\sigma_T = \frac{90.0473 \pm \sqrt{14.707^2 + N_c^2 + \left(\frac{0.4729 * 90.0473}{2.5}\right)^2}}{6} = 18.759 \text{ MPa} ; 11.256 \text{ MPa}$$

$$\sigma_T < (212.8 \text{ MPa} ; 225 \text{ MPa}), \text{ entonces SI CUMPLE}$$

Continuando ahora es momento de calcular el radio de anclaje J, para ello en el apartado E.6.2.1.1, se encuentran las expresiones necesarias para comprobar si el tanque necesito o no ser anclado.

$$w_a = 99t_a \sqrt{F_y H G_e} \leq 201.1 H D G_e$$

Donde:

Wa: Fuerza resistente en una región anular (N/m)

Fy: Esfuerzo de fluencia (MPa)

Ge: Gravedad especifica incluidos efectos de sismo verticales

ta: espesor de la placa de fondo anular (mm)

$$G_e = G(1 - 0.4A_v) = 0.85 * (1 - 0.4 * 0.4729) = 0.6892$$

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2(w_t(1 - 0.4A_v) + w_a - F_p W_{int})}$$

Donde:

Wt: Peso del tanque y techo actuando en la base del tanque (N/m)

Wint: Carga de levantamiento (N/m)

Fp: Ratio normal de operación, mínimo valor de 0.4

Ws: Peso total de virola del tanque más accesorios (N)

wrs: Carga del techo en virola (N/m)

$$w_t = \left(\frac{W_s}{\pi D} + W_{rs} \right)$$

$$w_a = 99t_a \sqrt{F_y H G_e} = 99 * 8 \sqrt{250 * 5 * 0.6892} = 23246.26671 \text{ N/m}$$

$$w_a = 99t_a \sqrt{F_y H G_e} \leq 201.1 H D G_e = 201.1 * 5 * 4.6 * 0.6892 = 3187.763 \text{ N/m}$$

$$w_t = \left(\frac{W_s}{\pi D} + W_{rs} \right) = \left(\frac{33386.249}{\pi * 4.6} + \frac{11985.084}{\pi * 4.6} \right) = 3139.5964 \text{ N/m}$$

El valor de Wint toma el valor de cero ya que no existe presión interna que ocasione esta carga.

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2 (w_t (1 - 0.4 A_v) + w_a - F_p W_{int})}$$
$$= \frac{373521.4681}{4.6^2 * (3139.5964 * (1 - 0.4 * 0.4729) + 3187.763 - 0.4 * 0)} = 3.133$$

El valor de radio de anclaje toma un valor de 3.133, y para que un tanque sea considerado auto anclado debe cumplir algunas condiciones y una de ellas es que el valor del radio de anclaje sea menor que 1.54 y cumpla los criterios de esfuerzos de compresión.

Del apartado E.6.2.1.1.1, se observa la siguiente tabla y se puede elegir algún criterio a considerar si se encuentra dentro o fuera de la tabla E.6.

Tabla 21

Criterios de Ratio de Anclaje

Table E.6—Anchorage Ratio Criteria

Anchorage Ratio J	Criteria
$J \leq 0.785$	No calculated uplift under the design seismic overturning moment. The tank is self-anchored.
$0.785 < J \leq 1.54$	Tank is uplifting, but the tank is stable for the design load providing the shell compression requirements are satisfied. Tank is self-anchored.
$J > 1.54$	Tank is not stable and cannot be self-anchored for the design load. Modify the annular ring if $L < 0.035D$ is not controlling or add mechanical anchorage.

Nota: Fuente API 650 (2020), Anchorage Ratio J, p. 260.

$3.133 > 1.54$, Entonces NO CUMPLE, necesita ANCLAJES.

Esfuerzos longitudinales de compresión máximos

Del apartado E.6.2.2.2 se encuentran las expresiones para los tanques mecánicamente anclados.

$$\sigma_c = \left(w_t(1 + 0.4A_v) + \frac{1.273M_{rw}}{D^2} \right) \frac{1}{1000t_s}$$

Donde t_s representa el espesor de la plancha del fondo sin considerar los efectos de corrosión, quedando así entonces:

$$t_s = t - CA = 8 - 1.5 = 6.5 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \left(w_t(1 + 0.4A_v) + \frac{1.273M_{rw}}{D^2} \right) \frac{1}{1000t_s} \\ &= \left(3139.5964 * (1 + 0.4 * 0.4729) + \frac{1.273 * 373521.4681}{4.6^2} \right) * \frac{1}{1000 * 6} \\ \sigma_c &= 3.9403 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Ahora la comparativa con las tensiones según el apartado E.6.2.2.3 según la expresión:

$$\frac{GHD^2}{t^2} \geq 44, \text{ entonces:}$$

$$\frac{GHD^2}{t^2} = \frac{0.85 * 5 * 4.6^2}{6^2} = 2.49 < 44$$

$$F_c = \frac{83t_s}{(2.5D)} + 7.5\sqrt{GH} = \frac{83 * 6.5}{(2.5 * 4.6)} + 7.5\sqrt{0.85 * 5} = 62.37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_c < F_c ; 3.94 < 62.37, \text{ entonces SI CUMPLE}$$

Análisis de Borde Libre

Tal como se mencionó en capítulos anteriores, este análisis contempla la altura libre que debe de tener todo tanque para minimizar los efectos del Sloshing (Chapoteo) que es causado por los efectos sísmicos debido al liquido libre dentro de este, en el apartado E.7.2 se presentan las expresiones que determinar este cálculo y son:

$$\delta_s = 0.42DA_f$$

Para SUG II y SUG I:

$$A_f = KS_{D1}I\left(\frac{1}{T_c}\right) = 2.5KQF_aS_0I\left(\frac{T_s}{T_c}\right), \text{ cuando } T_c \leq 4$$

$$A_f = KS_{D1}I\left(\frac{4}{T_c^2}\right) = 2.5KQF_aS_0I\left(\frac{4T_s}{T_c^2}\right), \text{ cuando } T_c > 4$$

$$S_{DS} = QF_aS_s = 1 * 1.15 * 0.875 = 1.00625$$

$$S_{D1} = QF_vS_1 = 1 * 1.5625 * 0.4375 = 0.6835$$

$$A_f = KS_{D1}I\left(\frac{1}{T_c}\right) = 1.5 * 0.6835 * 1.25 * \left(\frac{1}{2.232}\right) = 0.574$$

$$\delta_s = 0.42DA_f = 0.42 * 4.6 * 0.574 = 1.109$$

Tabla 22

Mínimo Borde Libre

Table E.7—Minimum Required Freeboard

Value of S_{DS}	SUG I	SUG II	SUG III
$S_{DS} < 0.33g$	(a)	(a)	δ_s (c)
$S_{DS} \geq 0.33g$	(a)	$0.7\delta_s$ (b)	δ_s (c)
a. A freeboard of $0.7\delta_s$ is recommended for economic considerations but not required. b. A freeboard equal to $0.7\delta_s$ is required unless one of the following alternatives are provided. 1. Secondary containment is provided to control the product spill. 2. The roof and tank shell are designed to contain the sloshing liquid. c. Freeboard equal to the calculated wave height, δ_s, is required unless one of the following alternatives are provided. 1. Secondary containment is provided to control the product spill. 2. The roof and tank shell are designed to contain the sloshing liquid.			

Nota: Fuente API 650 (2020), Freeboard, p. 264.

Para un S_{DS} mayor que 0.33g, entonces el mínimo borde libre será:

$$\delta_{min} = 0.7\delta_s = 0.7 * 1.109 = 0.7762 \text{ m}$$

Anteriormente se había dimensionado un valor de 0.8 m por lo ya se puede decir que se está cubriendo lo mínimo que pide el diseño, si se hubiera dimensionado con un valor inferior, se tenía que volver a realizar los cálculos para diseñar con la mínima altura libre.

Ya una vez desarrollado cada una de estas comprobaciones se puede comprobar que solo falla una, por lo tanto, el tanque si necesita ser anclado mecánicamente, para ello en el apartado 5.12 Tank Anchorage, se dan todas las expresiones necesarias para el cálculo.

3.6.9. Diseño de Pernos de Anclaje

Cuando un tanque necesita ser anclado mecánicamente por análisis de viento, sismo o debido a la presión interna, debe seguir los requerimientos siguientes extraídos del apartado 5.12 de la norma los cuales son:

- Los pernos de anclaje deben tener una resistencia tal que soporten cada una de las cargas listadas en la tabla 5.20a y 5.20b.
- La distancia máxima permitida entre los pernos de anclaje no debe superar los 3m de separación, medido de centro a centro.
- La mínima excentricidad debe ser superior al diámetro de la base del fondo, el diámetro del perno y la expansión del material debido a los cambios de temperatura.
- El diseño de las silletas donde se ubicarán los pernos debe ser diseñados de acuerdo con la norma AISC Vol. 2 Part VII – Anchor Bolt Chairs, otra comprobación puede ser recurrir a la norma ASME VIII Division 2 Part 5.

De la tabla 5.20a de la norma, se observan las ecuaciones que rigen las distintas cargas, se debe elegir la combinación de cargas mayor y según esta encontrar cual es valor que soporta cada perno de anclaje.

Tabla 23

Casos de Cargas Sísmicas y Viento

Table 5.20a—Uplift Loads (SI)

Uplift Load Case	Net Uplift Formula, U (N)	Allowable Anchor Bolt or Anchor Strap Stress (MPa)	Allowable Shell Stress at Anchor Attachment (MPa)
Design Pressure	$[P_i \times D^2 \times 785] - W_1$	$^{5/12} \times F_y$	$^{2/3} F_{ty}$
Test Pressure	$[P_t \times D^2 \times 785] - W_3$	$^{5/9} \times F_y$	$^{5/6} F_{ty}$
Wind Load	$P_{WR} \times D^2 \times 785 + [4 \times M_{WS}/D] - W_2$	$0.8 \times F_y$	$^{5/6} F_{ty}$
Seismic Load	$[4 \times M_{rw}/D] - W_2 (1 - 0.4A_F)$	$0.8 \times F_y$	$^{5/6} F_{ty}$
Design Pressure ^a + Wind	$[(F_p P_i + P_{WR}) \times D^2 \times 785] + [4 M_{WS}/D] - W_1$	$^{5/9} \times F_y$	$^{5/6} F_{ty}$
Design Pressure ^a + Seismic	$[F_p P_i \times D^2 \times 785] + [4 M_{rw}/D] - W_1 (1 - 0.4A_F)$	$0.8 \times F_y$	$^{5/6} F_{ty}$
Frangibility Pressure ^b	$[3 \times P_f \times D^2 \times 785] - W_3$	F_y	F_{ty}

Nota: Fuente API 650 (2020), Uplift Loads, p. 146.

De la tabla anterior, se debe calcular solo las cargas a las que está sometido el tanque, para el presente diseño, el tanque solo está sometido a carga de viento, carga de sismo, combinación de presión + viento y combinación de presión + sismo. La carga de presión no se calcula debido a la inexistencia de presión interior y la carga de presión

frangible tampoco debido a que el tanque no presenta techo frangible, entonces las cargas obtenidas son:

Carga de Viento (Load Wind)

$$U_1 = P_{WR} D^2 785 + \left(\frac{4M_{WS}}{D} \right) - W_2$$

Donde:

PWR: Es la carga de levantamiento del techo (kPa)

Mws: =Pws*D*H²/2 (kPa)

W2: Peso de la pared del tanque corroído (N)

D: Diámetro del tanque (m)

$$P_{WR} = 1.48 * \left(\frac{V}{190} \right)^2 = 0.5904 \text{ kPa}$$

$$M_{WS} = P_{WS} D \frac{H^2}{2} = 0.3550 * 4.6 * \frac{5^2}{2} = 20.4133 \text{ Nm}$$

$$W_2 = \pi * (t - CA) * H * \rho * D * g = 25039.6865 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} U_1 &= P_{WR} D^2 785 + \left(\frac{4M_{WS}}{D} \right) - W_2 = 0.5904 * 4.6^2 * 785 + \left(\frac{4 * 20.4133}{4.6} \right) - 25039.6865 \\ &= -15164.7511 \text{ N} \end{aligned}$$

Carga de Sismo (Seismic Load)

$$U_2 = \left(4 \frac{M_{rw}}{D} \right) - W_2 (1 - 0.4A_v)$$

Donde:

Mrw: Momento sismico (Nm)

Av: Coeficiente de aceleración vertical (%g)

$$U_2 = \left(4 \frac{M_{rw}}{D}\right) - W_2(1 - 0.4A_v) = \left(4 * \frac{373521.4681}{4.6}\right) - 25039.6865 * (1 - 0.4 * 0.4729)$$

$$= 309342.6415 \text{ N}$$

Combinación de Presión + Viento (Design Pressure + Wind)

$$U_3 = (F_p P_i + P_{WR}) D^2 785 + \left(\frac{4M_{ws}}{D}\right) - W_1$$

Donde:

Fp: Factor de combinación de presión =0.4

Pi: Presión interna del tanque (kPa)

W1: Peso corroído del techo + pecho corroído de pared del tanque (N)

$$W_1 = W_{techo\ corroido} + W_{pared\ corroida}$$

$$W_{techo\ corroido} = A_{techo}(t - CA)\rho g = 8852.6185 \text{ N}$$

$$W_1 = 8852.6185 + 17314.2923 = 26166.9106 \text{ N}$$

$$U_3 = (F_p P_i + P_{WR}) D^2 785 + \left(\frac{4M_{ws}}{D}\right) - W_1$$

$$= (0.4 * 0 + 0.5904) * 4.6^2 * 785 + \left(\frac{4 * 20.4133}{4.6}\right) - 26166.9106$$

$$= -16342.9243 \text{ N}$$

Combinación de Presión + Sismo (Design Pressure + Seismic)

$$U_4 = (F_p P_i) D^2 785 + \left(\frac{4M_{rw}}{D}\right) - W_1(1 - 0.4A_v)$$

$$U_4 = (0.4 * 0) * 4.6^2 * 785 + \left(\frac{4 * 373521.4681}{4.6}\right) - 33892.305 * (1 - 0.4 * 0.4729)$$

$$= 302164.7171 \text{ N}$$

Entonces la carga máxima que debe soportar el perno es:

$$U_{MAX} = (U_1; U_2; U_3; U_4) = U_2 = 309342.6415 \text{ N}$$

Con este valor ahora se debe calcular cuantos pernos necesita el tanque y también poder encontrar cual es el valor de carga que soporta cada perno, para ello se tiene:

$$T_b = \frac{U}{N}; \text{ donde } N \text{ es la cantidad de pernos}$$

$$N_{\min} = \frac{\pi D}{3} = \frac{\pi * 4.6}{3} = 4.817$$

Se debe elegir por lo menos más de 5 pernos en el tanque, por cuestiones de diseño y distribución se pernos se elige una cantidad de 10 pernos, entonces la carga de cada perno será:

$$T_b = \frac{U}{N} = \frac{304498.4728}{10} = 30934.264 \text{ N}$$

Como la mayoría de los pernos de anclaje se fabrican de acero de baja al carbono, como de acero A36, se usarán las propiedades de este material para calcular el esfuerzo que soporta.

$$S_y = 250 \text{ MPa}, S_t = 400 \text{ MPa}$$

Para poder calcular el esfuerzo que soporta cada perno se debe encontrar el área, para ello se utiliza:

$$A_{\min} = \frac{U}{0.8 * S_y} = \frac{30449.847}{0.8 * 250} = 154.67132 \text{ mm}^2$$

Donde esta área representa el área mínima que debe tener el perno para no sobrepasar el esfuerzo máximo permitido que debe soportar el perno.

Como el área mínima representa el área del núcleo, debemos encontrar el área mínima bruta, entonces se puede definir el área como:

$$A_n = 0.75A_b$$

$$A_{\min \text{ bruta}} = \frac{152.24924}{0.75} = 206.2284 \text{ mm}^2$$

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 202.99}{\pi}} = 16.204 \text{ mm}$$

La norma establece que el diámetro mínimo que debe tener un perno es de 25 mm, entonces se elige:

$$d_{\text{perno}} = 25 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{perno}} = \frac{U}{A} = \frac{4 * 30934.264}{\pi * 0.25^2} = 63.0188 \text{ MPa} < 200 \text{ MPa}$$

Ahora ya definido el diámetro del perno se debe calcular cual es el valor de la excentricidad que debe tener el perno, la excentricidad representa la distancia desde la cara exterior de la pared del tanque hacia el centro del perno y está definida por:

$$e_{\min} = 54 + \frac{d}{2} + 500E_t D \Delta T$$

Donde E_t representa el coeficiente de expansión del material, que para este caso es acero A36.

$$e_{\min} = 54 + \frac{25}{2} + 500 * 0.000012 * 4.6 * 20$$

$$e_{\min} = 67.052 \text{ mm}$$

Después de calcular la cantidad de pernos y el diámetro que tendrá el perno, se debe calcular y diseñar las silletas, que es donde se colocan los pernos para ser anclados a la cimentación del tanque, para ello se recurre a la norma AISI mencionada anteriormente.

3.6.10. Diseño de Silletas de Anclaje

Para el diseño de las silletas, en la norma AISI Part VII Anchor Bolt Chairs se establece las ecuaciones necesarias para poder encontrar los espesores mínimos y necesarios que estos deben tener para poder distribuir la carga de los pernos a las paredes

del tanque, para ello se establecen los parámetros principales que es el espesor de la plancha de la silleta y la altura que debe tener, y se define:

Plancha Superior (Top Plate)

$$c = \left[\frac{P}{Sf} (0.375g - 0.22d) \right]^{1/2}$$

Donde:

c: Espesor de placa superior (in)

f: Distancia desde la cara frontal de la placa hacia la cara exterior del perno (in)

g: Distancia entre placas verticales (in)

d: Diámetro de pernos de anclaje (in)

P: Diseño de carga (1.5Tb o Máxima carga permitida por el perno) “La menor” (Kips)

S: Esfuerzo en un punto (ksi)

$$g_{\min} = d + 1 = 1 + 1 = 2 \text{ in}$$

$$f_{\min} = \frac{d}{2} + \frac{1}{8} = \frac{1}{2} + \frac{1}{8} = 0.625$$

$$P = 1.5 * T_b = 1.5 * 30449.847 = 45674.7705 \text{ N} = 10.2681 \text{ kips}$$

$$S = S_{\max} = 25 \text{ ksi (Condición de diseño)}$$

$$c_{\min} = \left[\frac{10.2681}{25 * 1} (0.375 * 4 - 0.22 * 1) \right]^{1/2} = 0.7251 \text{ in}$$

Entonces el espesor que debe tener la placa es superior a 0.7251, entonces se escoge un valor de 1 pulgada.

$$c = 1 \text{ in} , f = 1 \text{ in} , g = 4 \text{ in}$$

Para encontrar los de ancho de la placa y longitud de la placa superior, la norma AISI estima valores mínimos los cuales son:

$$a_{min} = g + 2j$$

$$b_{min} = e + d + \frac{1}{4}$$

$$j_{min} = \left(\frac{1}{2}; 0.04(h - c) \right) ; \text{el que sea mayor}$$

$$k_{min} = \frac{P}{25j}$$

Donde:

a: Ancho de la placa superior (in)

b: Longitud de la placa superior (in)

h: Altura de silleta (in)

j: Espesor de placas de silleta (in)

k: Ancho de placa vertical (in)

Para resolver estas ecuaciones se tiene la incógnita de saber cuál es el valor que toma la altura de la silleta “h”, para eso la norma AISC presenta la siguiente ecuación:

$$S = \frac{Pe}{t^2} \left[\frac{1.32Z}{\frac{1.43ah^2}{Rt} + (4ah^2)^{0.333}} + \frac{0.031}{\sqrt{Rt}} \right]$$

$$Z = \frac{1}{\frac{0.177am}{\sqrt{Rt}} \left(\frac{m}{t} \right)^2 + 1}$$

Donde:

e: Excentricidad (in)

Z: Factor de reducción

m: Espesor del fondo (in)

R: Radio nominal del tanque (in)

t: Espesor de la pared del tanque (in)

$$m = 8 \text{ mm} = 0.3145 \text{ in}$$

$$t = 6 \text{ mm} = 0.236 \text{ in}$$

$$R = 4.6 \text{ m} = 90.551 \text{ in}; e = 3 \text{ in}$$

Para empezar con los cálculos se asume un valor de ancho de la placa superior con un valor 6 in y se obtiene:

$$Z = \frac{1}{\frac{0.177am}{\sqrt{Rt}} \left(\frac{m}{t}\right)^2 + 1} = \frac{1}{\frac{0.177 * 6 * 0.3145}{\sqrt{90.551 * 0.236}} \left(\frac{0.3145}{0.236}\right)^2 + 1} = 0.8863$$

De la ecuación para encontrar el esfuerzo en la silleta, se debe despejar el valor de h, para ello se debe de iterar y buscar un valor de altura que no supere el valor máximo de esfuerzo permitido que igual a 25 ksi que es el recomendado por la norma (Esto es equivalente al esfuerzo de fluencia de cada material), haciendo esta iteración se obtiene:

$$\text{para } h = 6 \text{ in}; S = \frac{10.2681 * 3}{0.236^2} \left[\frac{1.32 * 0.8863}{\frac{1.43 * 6 * 6^2}{90.551 * 0.236} + (4 * 6 * 6^2)^{0.333}} + \frac{0.031}{\sqrt{90.551 * 0.236}} \right]$$

obteniendo $S' = 30.71 > 25$, FALLA! altura siguiente

$$\text{para } h = 8 \text{ in}; S = \frac{10.2681 * 3}{0.236^2} \left[\frac{1.32 * 0.8863}{\frac{1.43 * 6 * 8^2}{90.551 * 0.236} + (4 * 6 * 8^2)^{0.333}} + \frac{0.031}{\sqrt{90.551 * 0.236}} \right]$$

obteniendo $S' = 21.1 < 25$, OK!

$$\text{para } h = 10 \text{ in; } S = \frac{10.2681 * 3}{0.236^2} \left[\frac{1.32 * 0.8863}{\frac{1.43 * 6 * 10^2}{90.551 * 0.236} + (4 * 6 * 10^2)^{0.333}} + \frac{0.031}{\sqrt{90.551 * 0.236}} \right]$$

obteniendo $S' = 15.802 < 25$, OK!

Con una altura de 8 in ya se consigue disminuir el esfuerzo máximo permitido, pero es un valor muy cercano y sin factor de seguridad, por lo que lo correcto es elegir una altura de 10 in, y con ello ya se puede obtener los demás valores y son:

$$a_{\min} = g + 2j = 5 \text{ in; } a = 6 \text{ in}$$

$$b_{\min} = e + d + \frac{1}{4} = 3 + 1 + 0.25 = 4.25 \text{ in; } b = 6 \text{ in}$$

$$j_{\min} = \left(\frac{1}{2}; 0.04(10 - 1) = 0.36 \right); j = 0.5 \text{ in}$$

$$k_{\min} = \frac{P}{25j} = \frac{10.2681}{25 * 1} = 0.4107 \text{ in; } k = 1 \text{ in}$$

La altura mínima de la silleta no será menor a 6 in y la altura máxima no será mayor a 3 veces el ancho de la placa superior, A manera de resumen se presenta la siguiente tabla:

Tabla 24

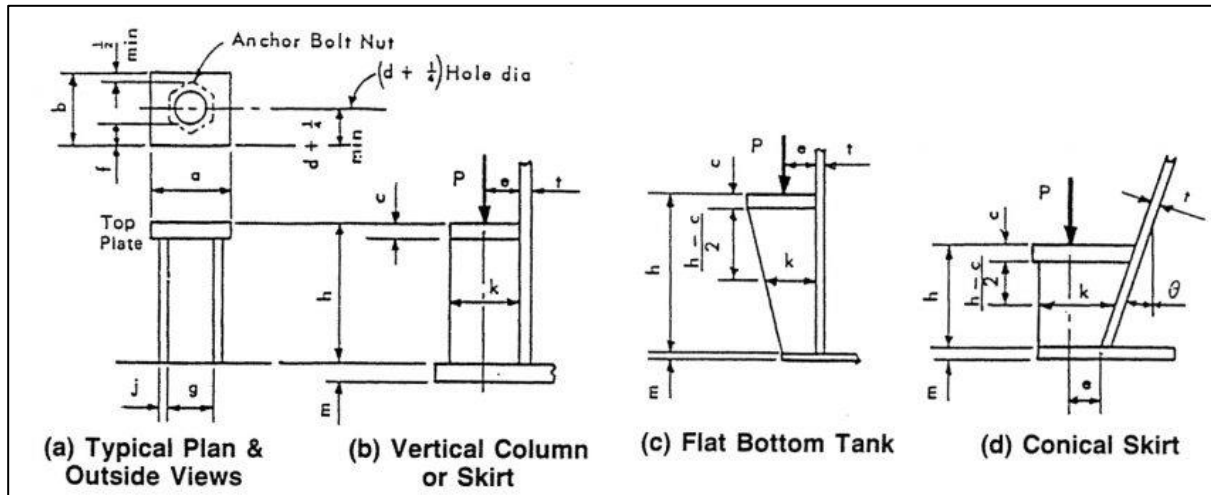
Resumen de dimensiones de Silleta

Descripción	Valor	Unidad
a (Ancho de la placa superior)	150	mm
b (Longitud de la placa superior)	150	mm
c (Espesor de placa superior)	20	mm
d (Diámetro de perno de anclaje)	25	mm
e (Excentricidad del perno)	75	mm
f (Distancia de perno a cara frontal)	50	mm
g (Distancia entre placas verticales)	100	mm
j (Espesor de placas verticales)	14	mm
k (Ancho de placa)	25	mm
h (Altura de silleta)	250	mm
m (Espesor de placa de fondo)	8	mm
t (Espesor de pared de tanque)	6	mm

La siguiente figura muestra las configuraciones típicas que debe tener las silletas, según cada diseño de tanque, donde la más empleada corresponde a la forma típica c.

Figura 25

Diagrama de Silletas



Nota: Fuente Steel Plate Engineering Data (2001), Anchor Bolt Chair Part VII, p. 96.

Después de tener definido todo el diseño completo del tanque, desde el cálculo hidráulico hasta el cálculo de silletas, se debe diseñar el sistema de protección que tiene como objetivo proteger al equipo y las instalaciones cercanas de cualquiera efecto no deseable.

3.7. Sistemas de Protección

Los sistemas de protección para tanques de almacenamiento son fundamentales para salvaguardar tanto el contenido del tanque como el entorno circundante, algunos de los sistemas más comunes de protección utilizados son:

- Sistemas de detección de fugas que incluyen sensores de fugas o monitoreo remoto.
- Recubrimientos y revestimientos mediante pinturas y revestimientos especiales.
- Sistemas de control de presión.
- Sistemas contra incendio.

- Sistemas de protección catódica.

Como medida de seguridad se plantea utilizar un cubeto para poder contener en caso de derrame todo el líquido almacenado dentro del tanque y un sistema de protección contra incendio, para proteger el tanque y los alrededores de la instalación.

3.7.1. Diseño de Cubeto

El cubeto es una bandeja que sirve como contención de un fluido, se puede fabricar de distintos materiales sea acero, concreto, plástico, etc. Para el diseño, este debe tener la capacidad de poder contener un volumen de 73.12 m³, adicional un 10%, por lo que se según el espacio que se cuente se debe variar el largo, ancho o alto.

Dentro del cubeto que contara con unas dimensiones de 8m x 8m x 1.8m con un espesor de pared de 200 mm, se dispone de un área para la base del tanque, que será de Ø 5.2m y 1.2 m de alto, realizando un control de volumen se obtiene:

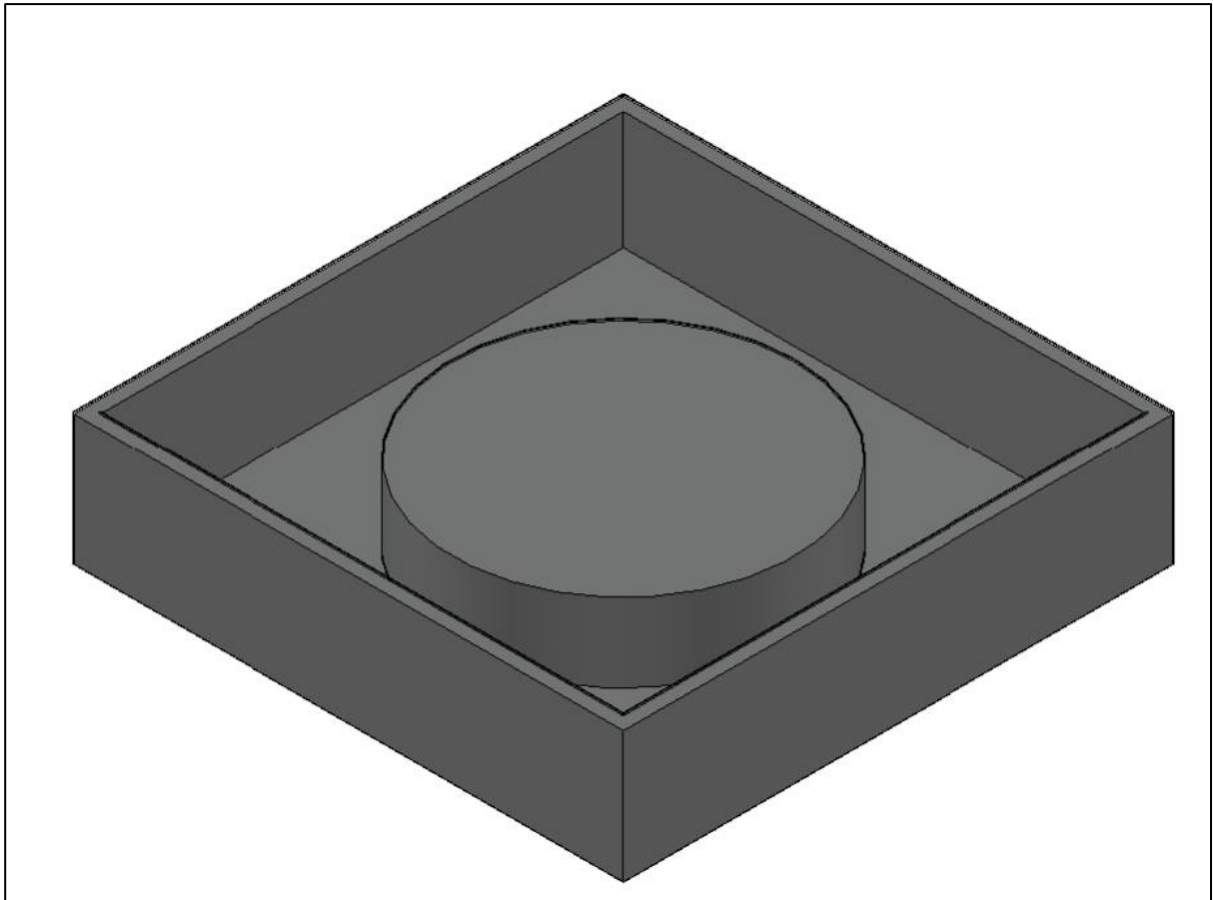
$$V_{CUBETO} = 8 * 8 * 1.8 = 115.2 \text{ m}^3$$

$$V_{BASE} = \frac{\pi}{4} * 4.6^2 * 1.2 = 25.48 \text{ m}^3$$

$$V_{CUBETO} - V_{BASE} > V_{LIQUIDO} ; 89.72 \text{ m}^3 > 80.43 \text{ m}^3 , OK!$$

Figura 26

Cubeto de Tanque



3.7.2. Diseño de sistema contra incendio

Una vez definida y caracterizada según el nivel de riesgo que presenta el tanque y sus alrededores se debe proceder a implementar el tanque con los dispositivos necesarios para mitigar los posibles escenarios de peligro, esta caracterización es definida mediante un documento llamado “Estudio de Análisis de Riesgos” en el cual se evalúan todas las posibilidades y escenarios de un incendio, así como catalogarlos por niveles de riesgo y además de determinar las medidas necesarias de prevención y mitigación.

En el documento mencionado anteriormente se recomienda que el tanque debe ser implementando por dispositivos de extinción y enfriamiento los cuales son un tanque de concentrado de espuma AFFF 3% que exclusivamente deberá ser empleado para mitigar incendios en el tanque, casetas de mangueras, hidrantes y extintores portátiles, de estos

se va diseñar el sistema de extinción para emplear las espuma AFFF 3%, para ello se debe recurrir a normas internacionales, la más conocida la NFPA “National Fire Protection Association” donde se dan a conocer los requerimientos mínimos que debe tener toda instalación para ser protegida, las más relevantes y necesarias para el diseño presente será utilizar la norma NFPA 11, 13, 14 y 30.

El diseño comprenderá en seleccionar, calcular y dimensionar los equipos necesarios para proteger al tanque, el cual consiste en diseñar el sistema de rociadores de acuerdo con la NFPA 13 y 30; el hidrante – monitor de acuerdo con NFPA 14 y la cámara de espuma con tanque Bladder de acuerdo con la NFPA 11.

3.7.2.1. Diseño sistema de rociadores

De acuerdo con la NFPA 13, se debe establecer cuál es el método que se va a emplear, para ello la norma establece el método de densidad, en el cual se debe de contar con el área de aplicación donde se van a instalar los rociadores, el área de aplicación viene a ser la superficie del cuerpo del tanque y está definido por:

$$A_d = \pi DH = \pi * 4.6 * 5 = 72.25 \text{ m}^2$$

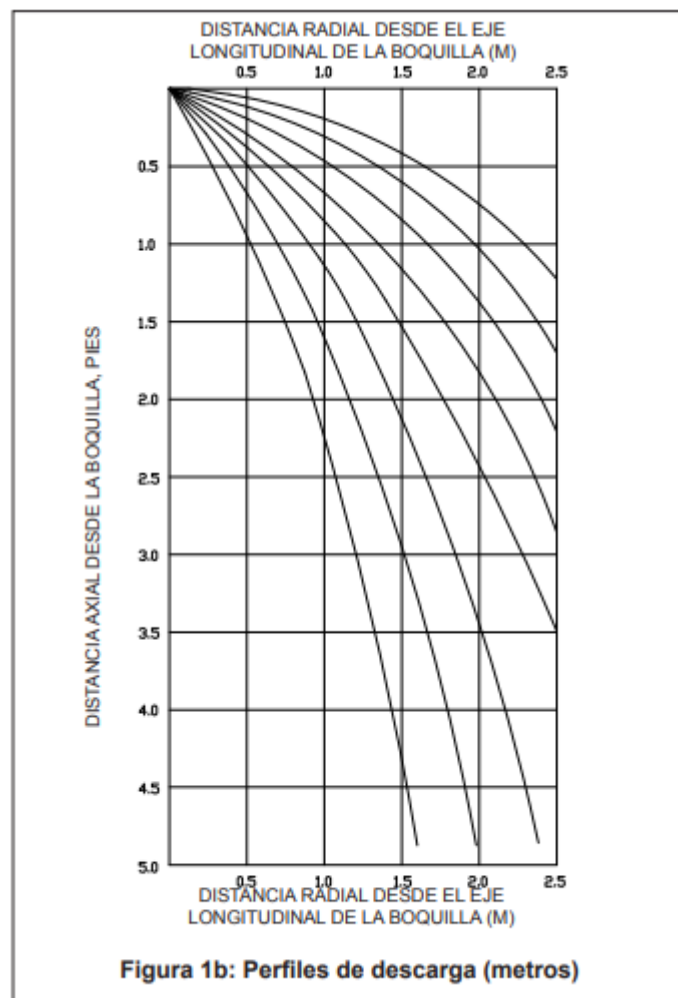
De acuerdo con la NFPA 13, para un sistema de riesgo extra la densidad viene a ser $\geq 0.25 \text{ gpm}/\text{pie}^2$ con área de protección no mayor a 9 m² por rociador y un espaciamiento máximo de 3.7 m, con ello podemos sacar el caudal máximo que necesita el sistema tomando un valor de:

$$Q_{min} = \rho A_d = 0.25 \frac{\text{gpm}}{\text{pie}^2} * 72.25 \text{ m}^2 * \frac{1}{0.3048^2} * \frac{\text{pie}^2}{\text{m}^2} = 194.42 \text{ gpm}$$

Para encontrar la cantidad de boquillas necesarias se debe contemplar cual es la distancia máxima y mínima, ya que la norma NFPA 15, establece que los chorros nunca deben superponerse, dicho de otra manera se debe preseleccionar el tipo de rociador, se emplea boquillas pulverizadoras listadas y aprobadas por UL/FM, estas boquillas son fabricadas para funcionar en tuberías de diluvio ya que son totalmente abiertas, presentan diversos ángulos que favorecen de acuerdo al tipo de aplicación necesaria.

Figura 27

Radio de cobertura de Rociador



Nota: Fuente Viking (2013), Boquillas Pulverizadoras.

De la figura 27, extraída de la ficha técnica de la boquilla pulverizadora se obtiene el radio de cobertura a altura determinada de la superficie a cubrir, la norma no establece una distancia mínima a la superficie de protección dejando la distancia a juicio del

diseñador, se elige una distancia con un valor 0.5 m desde la periferia del tanque hacia afuera, obteniendo una distancia radial de 1.3 m, por lo tanto, la cantidad de rociadores de cobertura para el tanque son:

$$\#_{ROCIADORES} = \frac{\pi D}{2R_{cobertura}} = \frac{\pi * 4.6}{2 * 1.3} = 5.55 \approx 6 \text{ rociadores}$$

La norma NFPA 13, establece que el factor nominal K no será menor a 5.6 a menos que se especifique lo contrario. Donde el factor K representa la relación que tiene la presión y el caudal, es decir manteniendo un valor K constante para cada valor de presión se obtiene un valor de caudal. Se toma el máximo valor de diseño del aspersor y toma el valor de:

$$K\sqrt{P} = Q; \text{tomando } K = 7.2 \frac{gpm}{psi^{\frac{1}{2}}}$$

$$Q_{rociador \text{ mín}} = \frac{Q_d}{\#rociadores} = \frac{194.42}{6} = 32.403 \text{ gpm}$$

Cada rociador debe expulsar como mínimo un caudal de 32.4 gpm a una presión mínima, la norma NFPA establece que la boquilla más alejada no descargará a una presión menor a 7 psi, además este valor debe ser verificado según el tipo de aspersor en su ficha técnica, para el aspersor seleccionado la presión mínima residual será de 10 psi, por lo tanto, el aspersor más alejado deberá tener una presión residual superior al mínimo establecido.

Una vez definidos los requisitos mínimos de los aspersores se requiere definir el diámetro de la tubería principal donde se alojarán estos, la norma NFPA 13 presenta en el capítulo 27, tablas donde dan una noción de tamaños mínimos requeridos para poder instalar una cantidad máxima determinada de aspersores, para el caso de diseño con 6 aspersores es una misma troncal, el tamaño mínimo de la tubería debe ser de 2", admitiendo hasta un máximo de 10.

Las comprobaciones y resultados serán verificados más adelante considerando los demás diseños que faltan.

3.7.2.2. Diseño de hidrante – monitor

Para diseñar y seleccionar el sistema de protección mediante hidrantes, la norma NFPA 14, da a conocer todos los lineamientos y los mínimos valores a considerar para poder presentar el diseño de manera correcta los cuales son:

- La norma divide por clases el sistema entre ellos se tiene la clase I para conexiones a mangueras de 2 1/2", clase II para conexiones de manguera de 1 1/2" y clase III para una combinación de estas.
- La presión máxima para clase I y III no debe superar los 175 psi, y la presión mínima tampoco debe ser inferior a 100 psi.
- La presión máxima para clase II no debe superar los 100 psi y la presión mínima tampoco debe ser inferior a 65 psi.
- Para sistemas de clase I y III, la tasa de flujo mínima para la tubería vertical más remota debe ser 500 gpm a través de 2 salidas más remotas de 2 1/2".
- Para sistemas de clase II, la tasa de flujo mínima para la manguera más remota de conexión de 1 1/2" debe ser 100 gpm.
- El tamaño de tubería mínimo para una conexión de manguera clase I y/o III será con una tubería vertical no menor a 4".
- El tamaño de tubería mínimo para una conexión de manguera clase II será con una tubería vertical no menor a 2 1/2".
- La velocidad máxima que debe recorrer por la tubería será de 6 m/s.
- El tiempo de suministro para cada sistema será como mínimo de 30 minutos.

Ya definidos estos parámetros se puede seleccionar el tipo de monitor que se necesita para ello se debe recurrir a fichas técnicas en la que se presenten estas condiciones, es decir, un monitor hidrante que tenga conexiones para manguera de clase I, II o III, que cuenta con un tamaño de tubería vertical no menor a 4" y que el monitor sea aislado con una válvula de compuerta tipo OS&Y. El tamaño mínimo estándar de los monitos tendrá conexión de 4" en la entrada y a la salida en boquilla presenta una salida con conexión de 2 1/2".

Figura 28

Hidrante Monitor de 4"



Nota: Fuente Zenzitec (2023), Monitor Hidrante.

La elección será utilizar un hidrante monitor de 4" con salidas de 2 1/2".

3.7.2.3. Diseño de cámara de espuma y tanque bladder

Como última medida de protección se tiene la cámara de espuma y el tanque bladder, la norma NFPA 11 es la encargada de brindar los requisitos mínimos necesarios para el funcionamiento de un sistema que presente estos equipos.

La norma contempla el diseño para sistemas de baja expansión y sistemas de media – alta expansión, donde cada uno de estos tiene su área de aplicación, los sistemas de baja expansión se utilizan normalmente en incendios de hidrocarburos como en almacenamientos de tanques, refinerías, etc.; la de alta densidad permiten lograr grandes distancias y alturas, los de mediana expansión muy utilizados en el cuerpo de bomberos para incendios pequeños y la espuma de alta expansión utilizado en fuegos de productos secos.

De la norma NFPA 15, capítulo 5, punto 5.2, los tanques de techo fijo se pueden proteger por monitores y mangueras, salidas fijas de descarga de espuma, pero estos no serán considerados como equipos principales si el diámetro del tanque es superior a 9m. Como el tanque de este proyecto presenta un diámetro de 4.6, si se puede considerar como equipos principales emplear monitores, mangueras y salidas fijas, para ello se necesita conocer la densidad mínima que deben tener estos y es:

Tabla 25

Tasa de Aplicación de Espuma para Hidrante Monitor

Table 5.2.4.2.2 Foam Handline and Monitor Protection for Fixed-Roof Storage Tanks Containing Hydrocarbons			
Hydrocarbon Type	Minimum Application Rate		Minimum Discharge Time (min)
	L/min · m²	gpm/ft²	
Flash point between 37.8°C and 60°C (100°F and 140°F)	6.5	0.16	50
Flash point below 37.8°C (100°F) or liquids heated above their flash points	6.5	0.16	65
Crude petroleum	6.5	0.16	65

Nota: Fuente NFPA 11 (2014).

Como el sistema está protegiendo un combustible que es clase III, con punto de inflamabilidad mayor a 60°C, se tiene que emplear una densidad de 6.5 L/min.m² durante un mínimo de 50 minutos. El área de protección queda determinada y toma el valor de:

$$A_d = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi * 4.6^2}{4} = 16.62 \text{ m}^2$$

$$Q_d = \rho A_d = 6.5 \frac{L}{\text{min} \cdot \text{m}^2} * 16.62 \text{ m}^2 = 108.03 \frac{L}{\text{min}}$$

Por lo tanto, el caudal mínimo para un monitor hidrante será de 108 L/min, ahora lo siguiente es determinar el caudal mínimo de la cámara de espuma, para ello se debe de tener las siguientes consideraciones:

- Las salidas de descarga fija de espuma deben estar instaladas en el tope del casco de manera que el techo no les cause daño.
- Las salidas de descarga fija deben contar con un sello para evitar la entrada de vapores a las salidas y al interior de la tubería principal de espuma

Para seleccionar la cantidad mínima de salidas fijas, la norma presenta la siguiente tabla.

Tabla 26

Numero de Descargas según Diámetro de Tanque

Table 5.2.5.2.1 Number of Fixed Foam Discharge Outlets for Fixed-Roof Tanks Containing Hydrocarbons or Flammable and Combustible Liquids Requiring Alcohol-Resistant Foams		
Tank Diameter (or equivalent area)		Minimum Number of Discharge Outlets
m	ft	
Up to 24	Up to 80	1
Over 24 to 36	Over 80 to 120	2
Over 36 to 42	Over 120 to 140	3
Over 42 to 48	Over 140 to 160	4
Over 48 to 54	Over 160 to 180	5
Over 54 to 60	Over 180 to 200	6

Nota: Fuente NFPA 11 (2014).

De la tabla anterior se puede observar que, de acuerdo al diámetro, se necesita como mínimo una descarga para tanques con diámetro menor a 24m. y esta elección también va a la par del área superficial del tanque. Ahora se debe seleccionar cuando es la densidad para ello se presenta la siguiente imagen.

Tabla 27

Densidad de Tasas de Aplicación

Table 5.2.5.2.2 Minimum Discharge Times and Application Rate for Type I and Type II Fixed Foam Discharge Outlets on Fixed-Roof (Cone) Storage Tanks Containing Hydrocarbons				
Hydrocarbon Type	Minimum Application Rate		Minimum Discharge Time (min)	
	L/min · m²	gpm/ft²	Type I Foam Discharge Outlet	Type II Foam Discharge Outlet
Flash point between 37.8°C and 60°C (100°F and 140°F)	4.1	0.10	20	30
Flash point below 37.8°C (100°F) or liquids heated above their flash points	4.1	0.10	30	55
Crude petroleum	4.1	0.10	30	55

Nota: Fuente NFPA 11 (2014).

De la imagen anterior se encuentra que la densidad de aplicación para una salida fija, que viene a ser la cámara de espuma toma un valor de $4.1 \text{ L/min} \cdot \text{m}^2$ durante un tiempo de 30 minutos.

$$Q_d = \rho A_d = 4.1 \frac{\text{L}}{\text{min} \cdot \text{m}^2} * 16.62 \text{ m}^2 = 68.142 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

El caudal presentado tiene un valor teórico muy inferior a lo que realmente una cámara debe tener, el valor mínimo por fichas técnicas requiere un caudal de 150 L/min para una presión mínima de 40 psi. Debido a ello se opta por triplicar el caudal teórico con el objetivo de poder dimensionar el volumen necesario de espuma requerido, logrando así una óptima proporción de agua + espuma, entonces el caudal de diseño teórico será:

$$Q_d = 68.142 \frac{\text{L}}{\text{min}} * 3 = 204.426 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Ahora con estos valores de caudales se debe encontrar el volumen de espuma necesaria y se calcula de la siguiente manera:

$$V_{monitor} = Q_d t \% espuma = 108.03 * 50 * 0.03 = 162.045 L$$

$$V_{camara} = Q_d t \% espuma = 204.426 * 30 * 0.03 = 183.9834 L$$

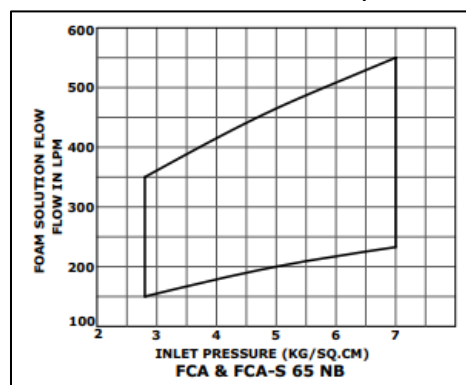
$$V_{espuma} = 162.1 + 184 = 346.1 L$$

El volumen de espuma calculado es el mínimo necesario para poder suplir el tiempo mínimo que estipula la norma. Ahora, con este valor se puede dimensionar el tanque bladder, este tanque es solo un tanque de membrana, donde el interior se encuentra toda la espuma recubierta por esta, el agua entra a presión al interior del tanque haciendo que toda la membrana reduzca su tamaño logrando que por otra salida salga también la espuma a presión, para después de ello ir hacia la boquilla proporcionadora (eductora) para lograr la proporción necesaria que es agua al 97% y espuma AFFF al 3%. De manera comercial el tanque que cumple con las condiciones es un tanque de 100 galones (379 L).

Ya definido el tanque es momento de definir la cámara de espuma mediante fichas técnicas, se mencionó anteriormente que las cámaras de espuma necesitan como mínimo una presión de 40 psi, a continuación, se presenta una tabla extraída de una ficha técnica aprobado por UL.

Figura 29

Diagrama de Aplicación para selección de Cámara Espuma



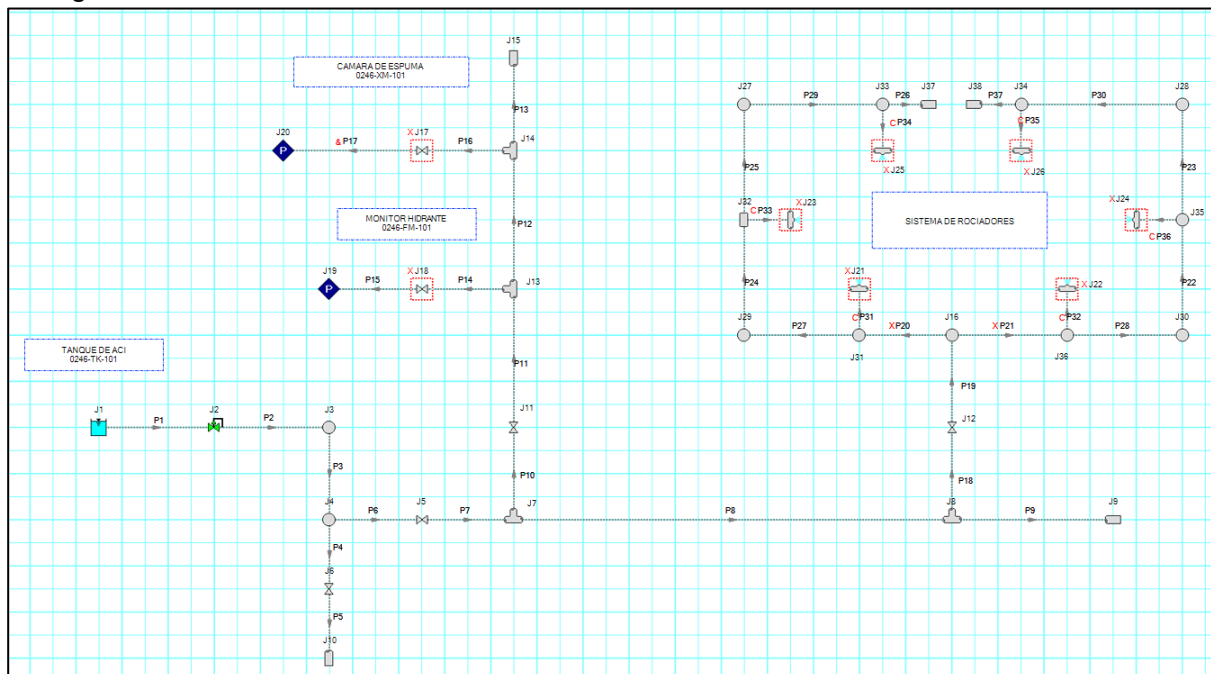
Nota: Fuente HD Fire Protect PVT. LTD (2015).

El rango operativo optimo recomendado por fabricantes es trabajar en el centro, por ello se debe realizar el cálculo hidráulico para obtener una presión de entrada con un valor de 5 kg/cm² equivalente a 70 psi. De la misma manera sucede con el monitor hidrante, se debe conseguir trabajar en una presión de 115 psi, ya que el mínimo es 100 psi y el máximo 175 psi.

El cálculo hidráulico presenta solo contempla el cálculo para los equipos mencionados, dejando de analizar otras áreas contempladas en el proyecto, para entrar en contexto el tanque contra incendio está ubicado a una altura de 189m respecto a las áreas a proteger, y el recorrido planteado es realizar un anillo alrededor de las zonas a proteger y hacer derivaciones para llegar a otras áreas, dicho de esta manera, el cálculo hidráulico solo se centra en analizar los requisitos mínimos que llegan a los equipos involucrados y descritos anteriormente.

Figura 30

Diagrama del Sistema Contra Incendio



De la figura 30 se observa que los equipos a analizar solo serán la cámara de espuma, el monitor hidrante y la línea de enfriamiento gracias a los aspersores. El sistema

está dotado con una presión estática de 150 psi en todo el anillo, con una tubería de HDPE SDR 11.

El primer análisis y comprobación será analizar el sistema de enfriamiento con aspersores, para ello se crea un escenario y solo se analiza el anillo de enfriamiento para observar si las dimensiones de la tubería elegidos y los requerimientos mínimos se cumplen obteniendo:

Tabla 28

Resultados de Rociadores para Tanque de Almacenamiento

Descripción	Q teórico (gpm)	Q sistema (gpm)	P sistema (psi)
Aspersor 21	32.403	51.2	48.2
Aspersor 22	32.403	51.2	48.2
Aspersor 23	32.403	49.89	47.49
Aspersor 24	32.403	49.89	47.49
Aspersor 25	32.403	49.69	47.3
Aspersor 26	32.403	49.69	47.3

De la tabla anterior se observa que el caudal de cada aspersor es correcto, además de que la presión en todos los nodos de aspersión es superior al mínimo tomando un valor de 48.2 psi. Entonces los diámetros de tubería escogidos también son correctos, el diámetro de todo el anillo que se ubicará en la periferia será de acero A53 SCH 40 2”.

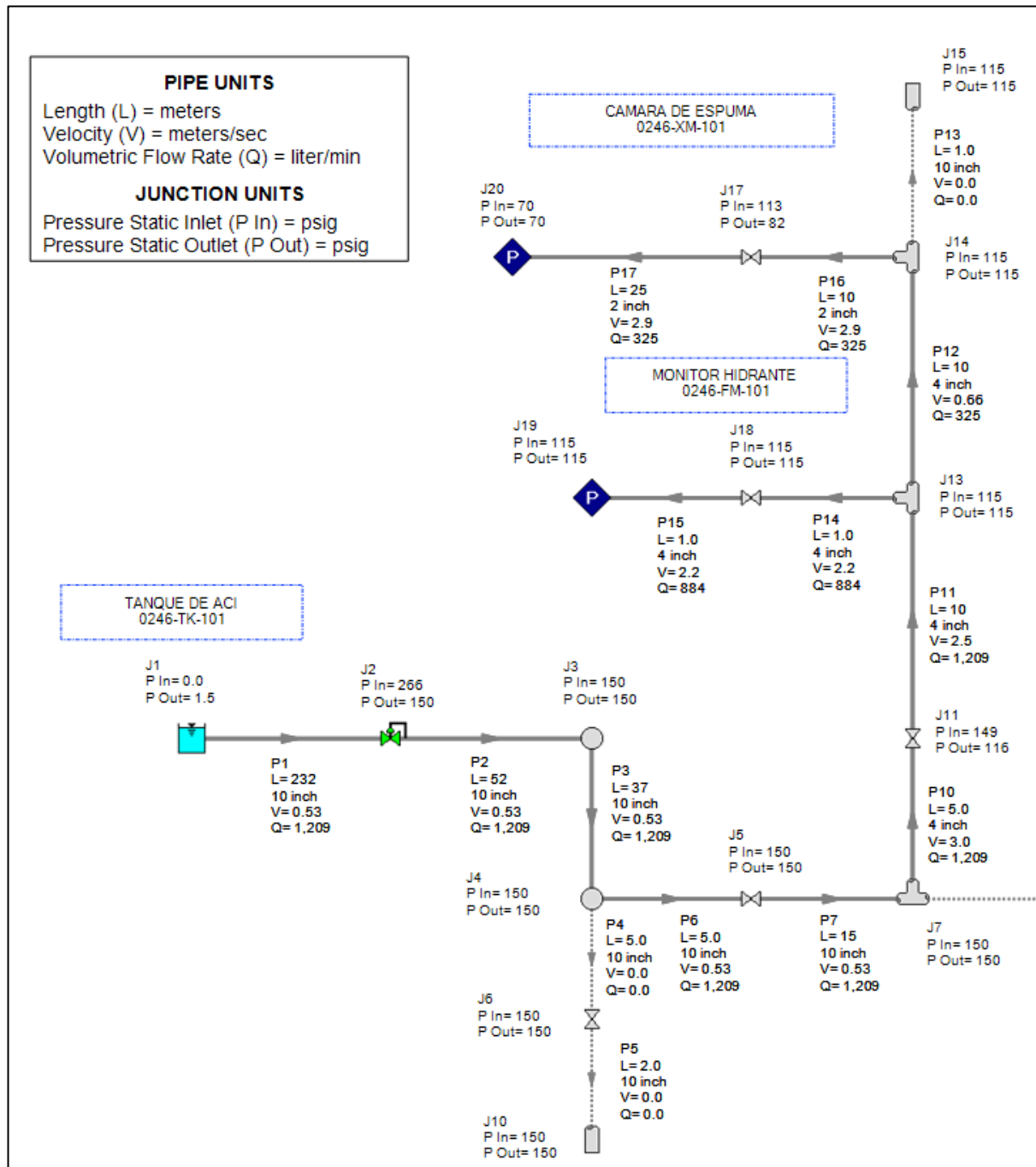
Ahora se debe realizar el análisis hidráulico para el sistema de cámara de espuma e hidrante – monitor, para ello ya se mencionó anteriormente los requisitos de presión que estos deben tener, y ahora se debe verificar si el sistema es capaz de entregar más del caudal mínimo necesario para el correcto funcionamiento.

Este análisis se realiza para poder seleccionar la boquilla eductora de espuma, que es lo último que falta, esta boquilla se selecciona de manera posterior ya que cualquier cambio en el caudal no cumplirá la proporción y en el peor de los casos la boquilla seleccionada será mucho más pequeña que la necesaria para poder cumplir con los requisitos de presión y caudal, en el peor de los casos si no se selecciona de manera

correcta el proporcionador no funciona y podría simplemente dar mucha agua o mucha espuma o un equivalente de ambos.

Figura 31

Diagrama de Cámara de Espuma y Monitor Hidrante



De la figura 31 se observa que el caudal total de todo el sistema toma el valor de 1467 L/min, y el caudal que fluye por el monitor hidrante es 1034 L/min, superior al mínimo

y el caudal que fluye por la cámara de espuma es 433 L/min, ahora con estos datos se debe ir a datos de fabricante para poder seleccionar la boquilla eductora.

Tabla 29

Modelo de Boquilla Eductora

MODELO	PRESIÓN ** DE ENTRADA		TASA DE CAUDAL DE SOLUCIÓN *			
			3% (SERIES A)		6%	
	PSI	BAR	GPM	LPM	GPM	LPM
LP-35	90	6,2	345,5	1308	356,5	1349
	100	6,9	361,0	1366	372,6	1410
	110	7,5	376,0	1423	388,0	1469
	135	9,3	411,2	1556	424,4	1606
	165	11,3	446,4	1689	460,7	1744
	200	13,8	491,5	1860	507,2	1920

Nota: Fuente National Foam (2019), Proporcionadores en Línea.

Como recomendación de fabricante, la presión óptima de trabajo de una boquilla eductora para una correcta proporción de agua y espuma, es logrando una presión de entrada de 125 psi. Las conexiones de este conector son de 4" a la entrada y 3" a la salida.

A manera de resumen se presenta la siguiente tabla con los valores de presión y caudal.

Tabla 30

Valores de Presión y Caudal

Descripción	Q teórico (gpm)	Q sistema (gpm)	P sistema (psi)
Hidrante monitor	108.03	433	115
Cámara de espuma	204.426	1034	70
Boquilla eductora	-		140

CAPÍTULO IV: Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión

Resultados

4.1. Análisis de resultados

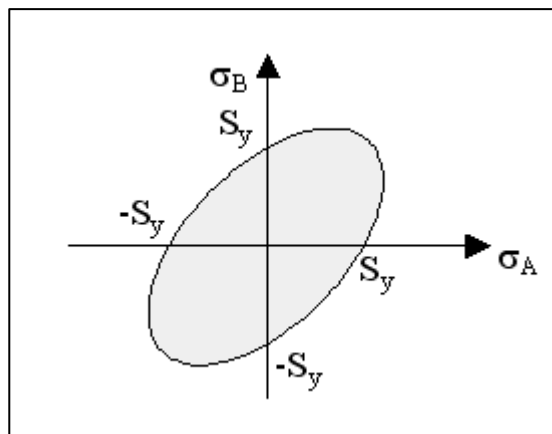
Para el análisis de los resultados se procede a realizar una verificación por elementos finitos con ayuda del software Inventor, esto brinda la posibilidad de realizar un análisis estático y visualizar los esfuerzos mínimos y máximos que actúan en el tanque.

El criterio empleado para el análisis es el criterio de Von Mises, que es un criterio de resistencia estática aplicada a los materiales dúctiles, el cual nos dice que el material no cederá siempre que la energía de distorsión no supere la energía de distorsión de la fluencia, por ello el esfuerzo de Von Mises debe ser menor al esfuerzo de fluencia.

$$\sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)} < S_y$$

Figura 32

Criterio de Von Mises



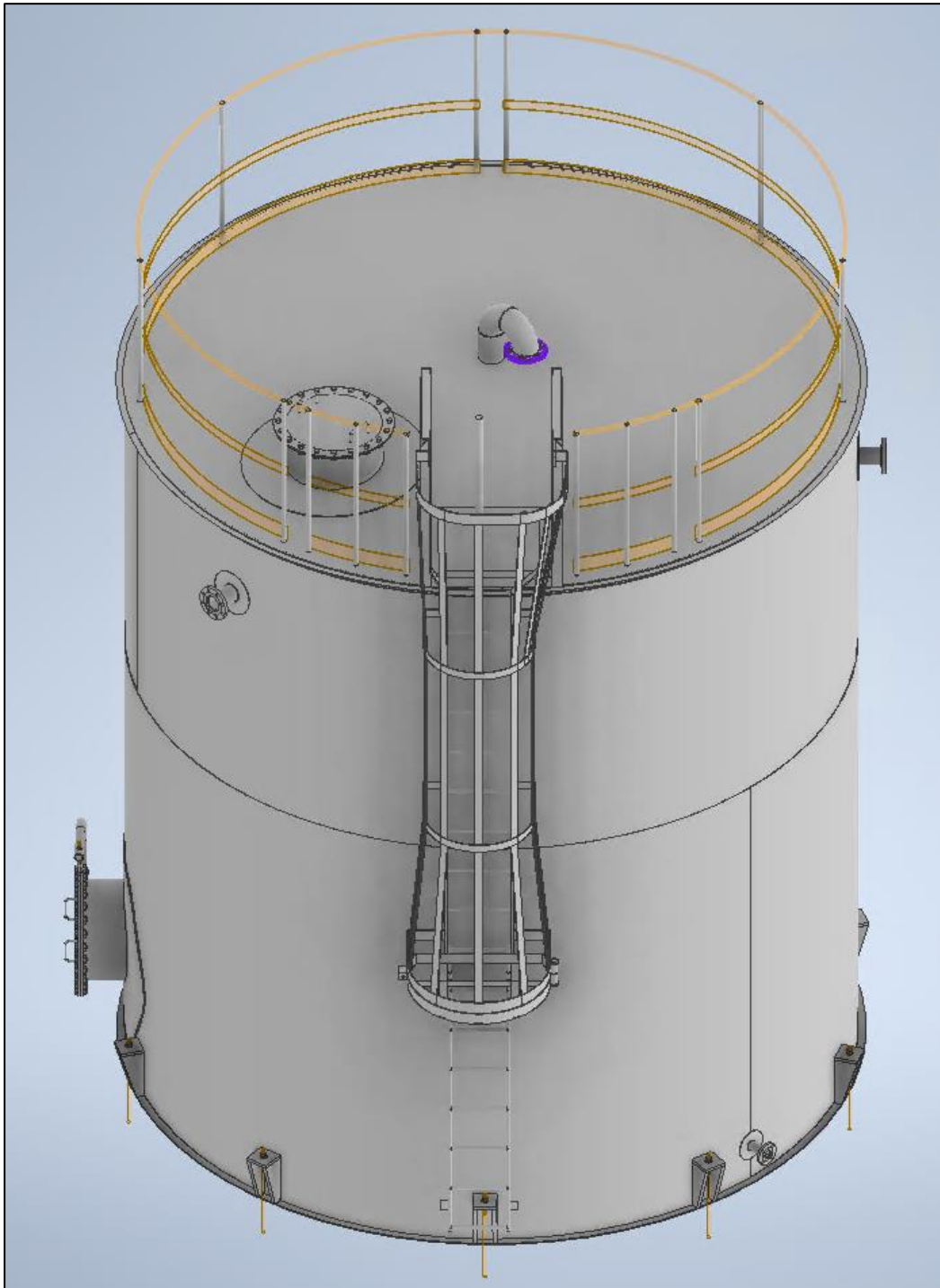
Nota: Marta C. Mora (2022), Criterio de Von Mises.

El análisis se centra en todo momento que los esfuerzos principales se encuentren dentro del círculo, de esa manera se obtiene un diseño seguro. Además de que se debe verificar que se obtenga un factor de seguridad amplio.

A continuación, se presenta el diseño del tanque de manera completa con todos sus accesorios y elementos estructurales, solo para visualización.

Figura 33

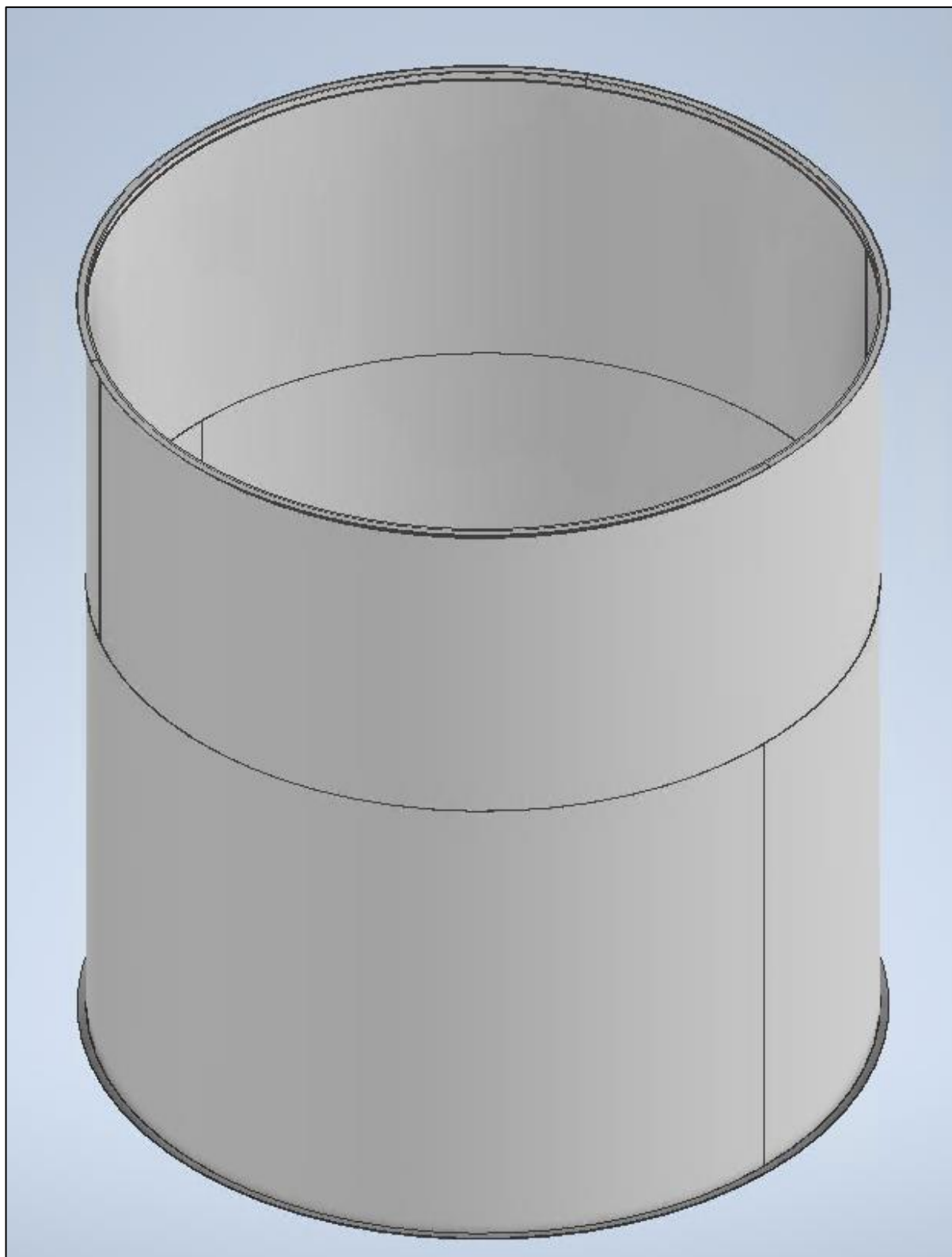
Cuerpo y Estructura de Tanque de Almacenamiento 3D



Para el análisis se opta por retirar todos los accesorios y solo mantener el fondo y el cuerpo del tanque con el objetivo de tener un mejor mallado.

Figura 34

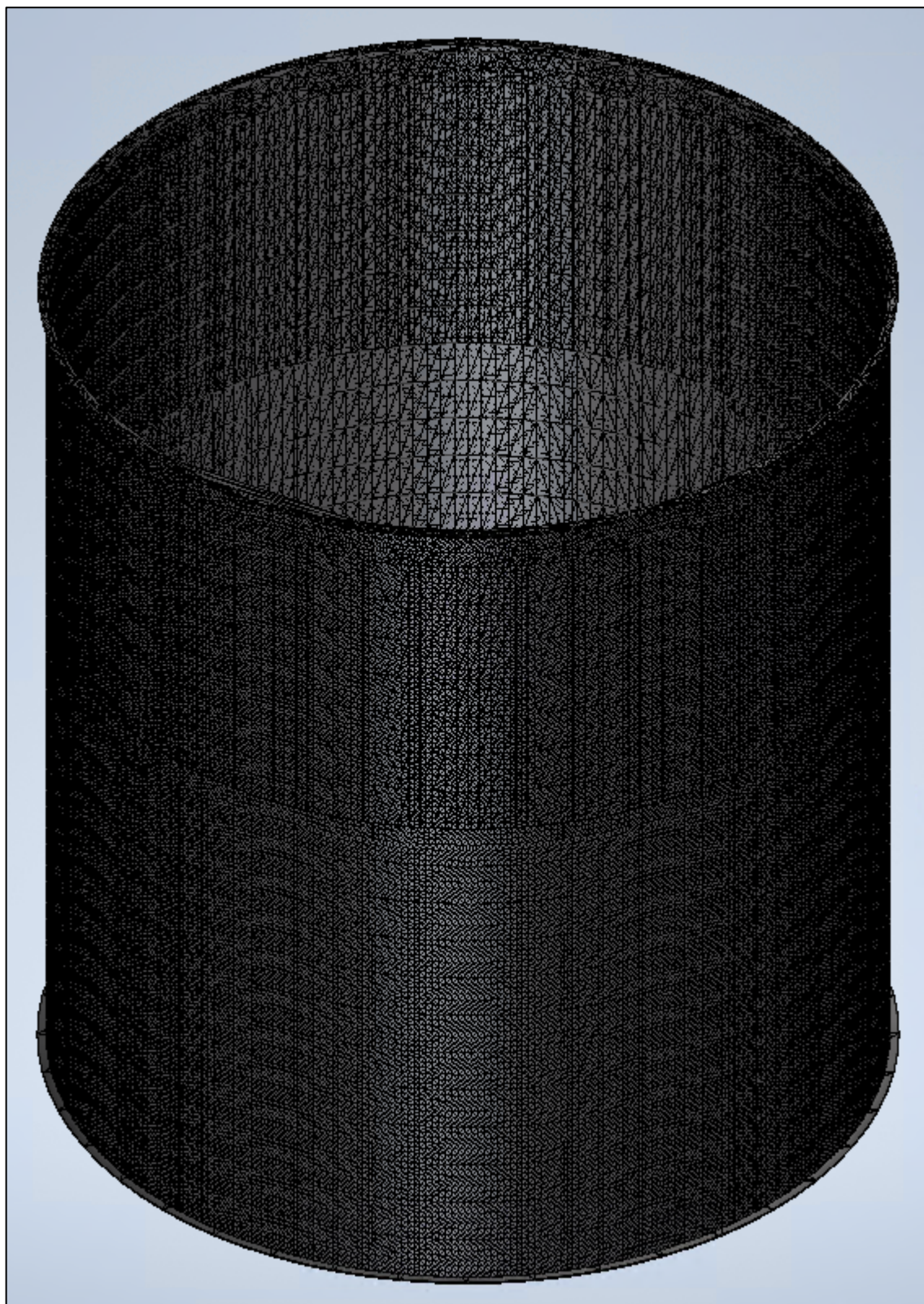
Cuerpo de Tanque de Almacenamiento



Ahora se realiza el mallado para poder obtener los resultados de esfuerzos del sistema.

Figura 35

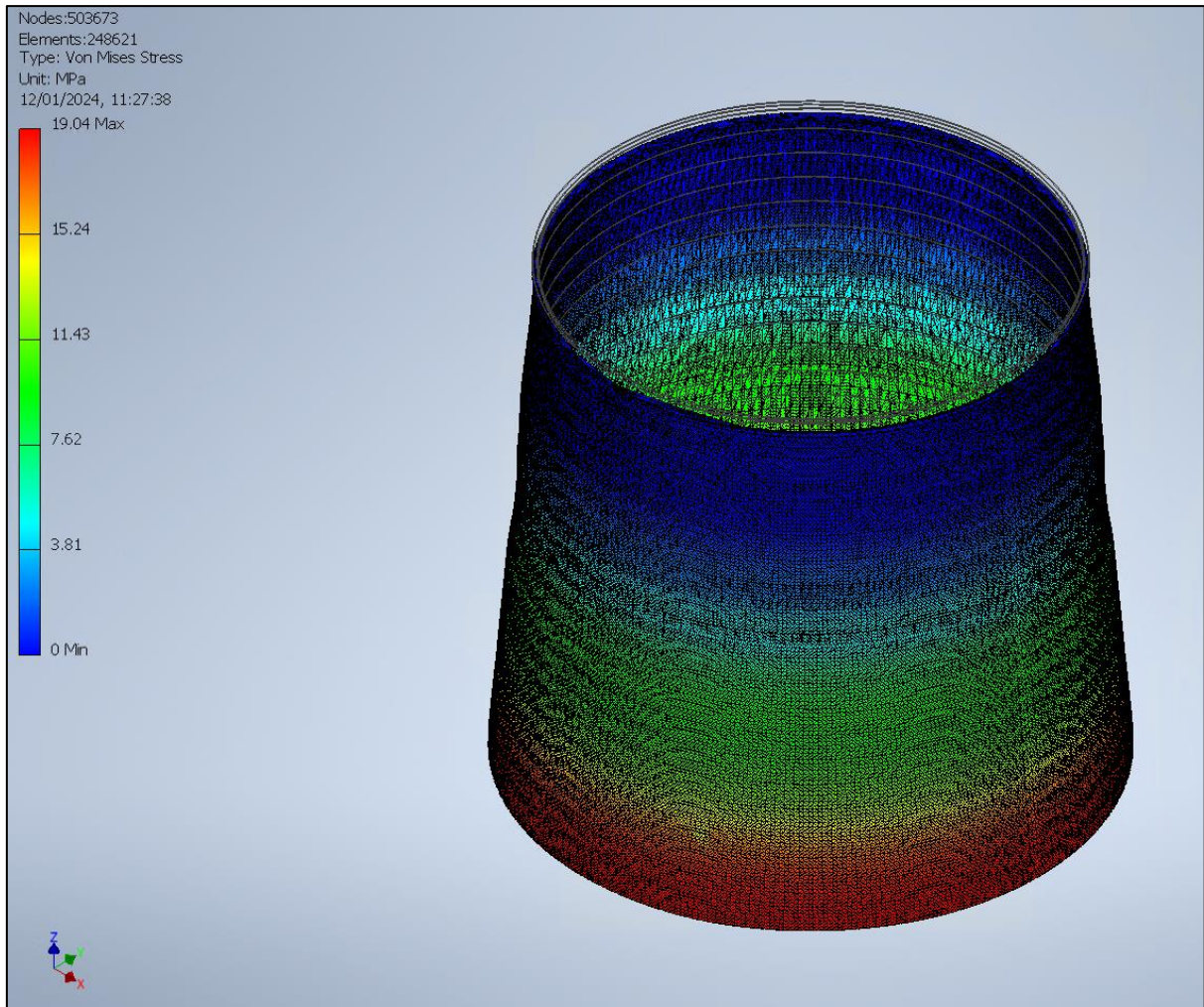
Mallado del Tanque Almacenamiento



Ya completado el mallado del tanque, se procede a analizar para obtener los resultados.

Figura 36

Resultados de Análisis Estático en Tanque

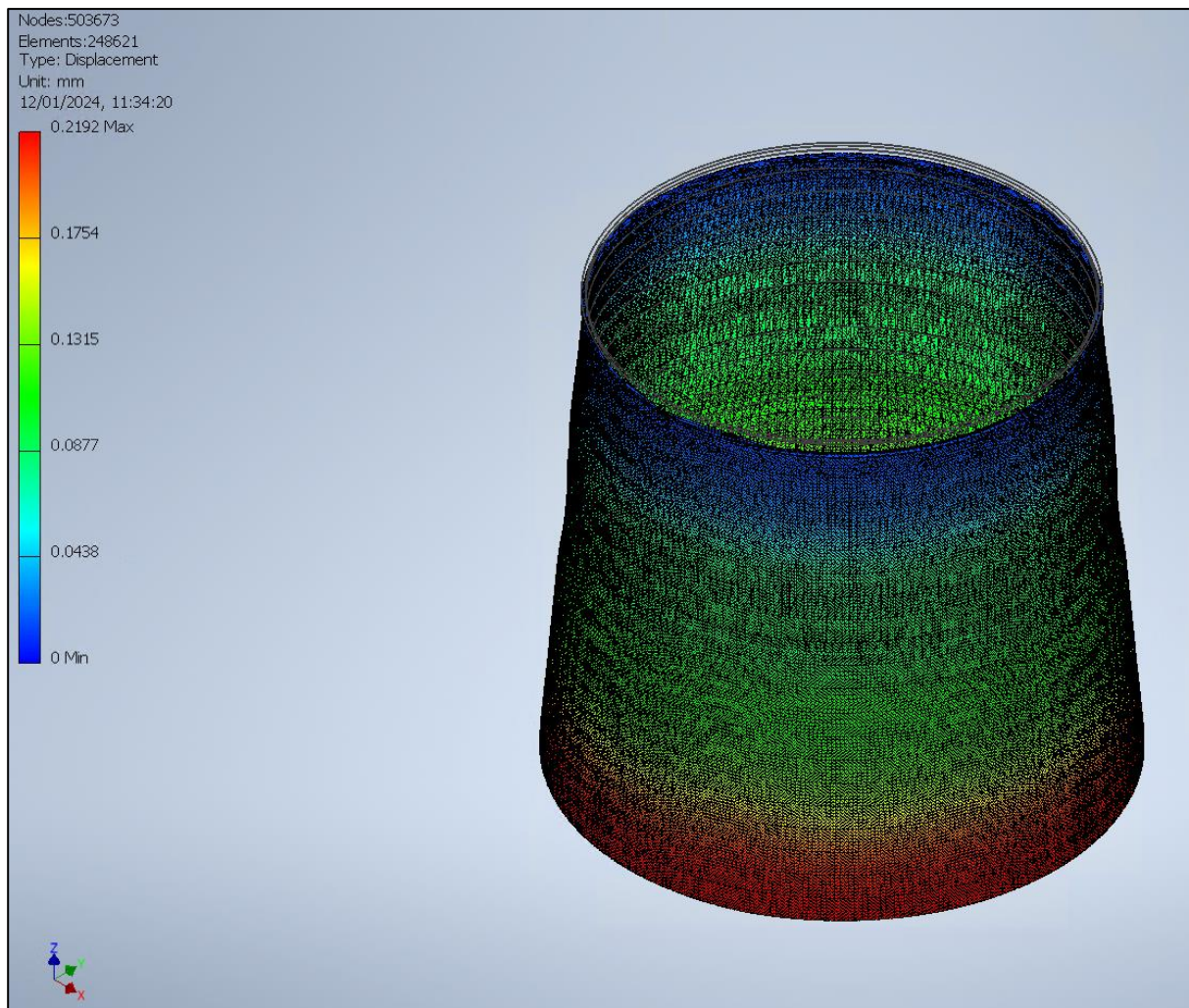


De la anterior imagen se puede visualizar que el esfuerzo de Von Mises toma un valor máximo de 19.04 MPa, la teoría nos dice que para que un elemento no falle por ruptura o deformación, este debe presentar un valor menor al esfuerzo de fluencia que toma un valor de 250 MPa.

Los esfuerzos máximos se van a presentar en todo momento en el fondo del recipiente debido a la presión que se ejerce cuando se encuentra totalmente lleno. De la misma manera se presenta el análisis para los desplazamientos del sistema y se obtiene un desplazamiento máximo en el fondo del tanque con un valor de 0.2192 mm.

Figura 37

Deformaciones Máximas en Pared de Tanque de Almacenamiento



Con este análisis se llega a la conclusión que el sistema no presenta ningún tipo de esfuerzo que le genere algún ruptura o deformación plástica, por lo cual, el tanque esta correctamente diseñado.

4.2. Contrastación de Hipótesis

4.2.1. Contrastación de Hipótesis General

Ho: El diseño de un tanque de almacenamiento de 63.61 m³ de capacidad no permitirá alimentar a 2 grupos electrógenos de 1875 KVA en una mina polimetálica.

Hi: El diseño de un tanque de almacenamiento de 63.61 m³ de capacidad mejorara significativamente la alimentación de 2 grupos electrógenos de 1875 KVA en una mina polimetálica.

Decisión:

Durante la etapa de diseño se determinó la mejor alternativa mediante un análisis hidráulico para mantener en todo momento a los grupos electrógenos recibiendo un flujo constante de combustible.

4.2.2. Contrastación de Hipótesis Específicas

Ho: El diseño de un tanque de almacenamiento no cumplirá con los requisitos exigidos por la norma API 650, ni será verificado por un análisis de elementos finitos con el software Inventor.

Hi: El diseño de un tanque de almacenamiento cumplirá con los requisitos exigidos por la norma API 650, además se analizará el comportamiento del tanque por elementos finitos con el software Inventor.

Decisión:

Para la elaboración de todo diseño que involucra almacenamiento de combustibles se debe recurrir a aplicar normas internacionales en las cuales se encuentra los mínimos lineamientos a cumplir a lo largo del cálculo, dentro de estas se encuentra la norma API 650, que abarca tanques atmosféricos de almacenamiento de combustible con una presión no mayor a 18 kPa. El uso de software como el Inventor es una verificación estática para obtener los esfuerzos, desplazamientos y factores de seguridad, obteniendo así una doble verificación.

Ho: La definición del sistema de tuberías de alimentación mediante el software AFT Fathom 10 no garantiza el correcto funcionamiento verificando el resultado, de acuerdo con lo establecido en la norma ASME B31.4.

Hi: La definición del sistema de tuberías de alimentación mediante el software AFT garantiza el correcto funcionamiento verificando el resultado, de acuerdo con lo establecido en la norma ASME B31.4.

Decisión:

Al aplicar un análisis hidráulico con ayuda del software de cálculo como el AFT Fathom tiene ventajas ya que permite observar el comportamiento del flujo, presión y velocidad en todo el sistema de tuberías de combustible, además de ofrecer ventajas ya que trabaja en conjunto con normas ASTM para la selección de los materiales y reduce a la mitad de tiempo la obtención de resultados pudiendo presentar alternativas para el menor recorrido y costo.

Ho: El análisis del sistema de protección contra incendio más optimo no protegerá el tanque y alrededores en caso de incendios de acuerdo con la norma NFPA 11.

Hi: El análisis del sistema de protección contra incendio más optimo mejorara la protección del tanque y alrededores en caso de incendios de acuerdo con la norma NFPA 11.

Decisión:

Se desarrollo todos los equipos de protección que debe tener un sistema de almacenamiento Diesel de acuerdo con la norma NFPA, si bien no necesariamente requiere de todos para una aplicación distinta a la mostrada en esta investigación, es importante conocer cada uno de los equipos de protección. El desarrollo y diseño de un correcto sistema de extinción mantiene seguro el área de almacenamiento además de que de ocurrir un siniestro la aplicación automática de estos evitara pérdidas materiales que puede ser equivalente a millones de dólares. Además de cumplir con las normas nacionales que busca la protección de la vida humana y la no contaminación del medio ambiente, haciendo proyectos más sostenibles.

4.3. Discusión de Resultados

- En base a los resultados obtenidos en este trabajo de investigación y en revisión con los resultados de los antecedentes citados, se verifica que la metodología y los resultados obtenidos de las ecuaciones de la norma API 650, presentan una alta fiabilidad y no requiere una verificación por elementos finitos, ya que suelen estar siempre cercanos, a menos que el tanque este siendo sometido a efectos o cargas variables donde si se va a requerir una verificación adicional. Por su parte, en esta tesis, Yafac (2019), utilizo la norma API 650 pero aplicada al diseño del tanque con techo domo, y a su vez verifico por elementos finitos los esfuerzos y desplazamientos que ocurren en estos. También, Mejía (2022), utilizo la norma ASME Sección VIII para el diseño de un tanque de almacenamiento horizontal, ya que las ecuaciones de la norma API 650, son solo aplicables a tanques verticales, obteniendo resultados confiables solo considerando lo expuesto en la norma y verificando con la norma UL-142.
- El diseño de elementos de protección como cubetos o equipos de extinción son muy empleados cuando se trata de almacenamiento de combustibles, cada autor o cada aplicación, así como la capacidad o área a proteger puede tener tantos equipos como sea posible o tener solo los mínimos necesarios. La elección de estos siempre dependerá del costo, el acceso, la manipulación y la evaluación de riesgos. En la tesis Muñoz (2021), calculo la cantidad de equipos de protección necesarios de acuerdo con el área de protección basados en la norma española UNE 13565-2, obteniendo resultados de densidad de flujo similares a los empleados en la tesis, ya que todo parte usando como referencia de la norma internacional NFPA.

A medida de resumen se presenta la tabla con las dimensiones de cada una de uno de los diseños, sea fondo, cuerpo, techo y accesorios, además de los pesos de cada uno de estos.

Tabla 31

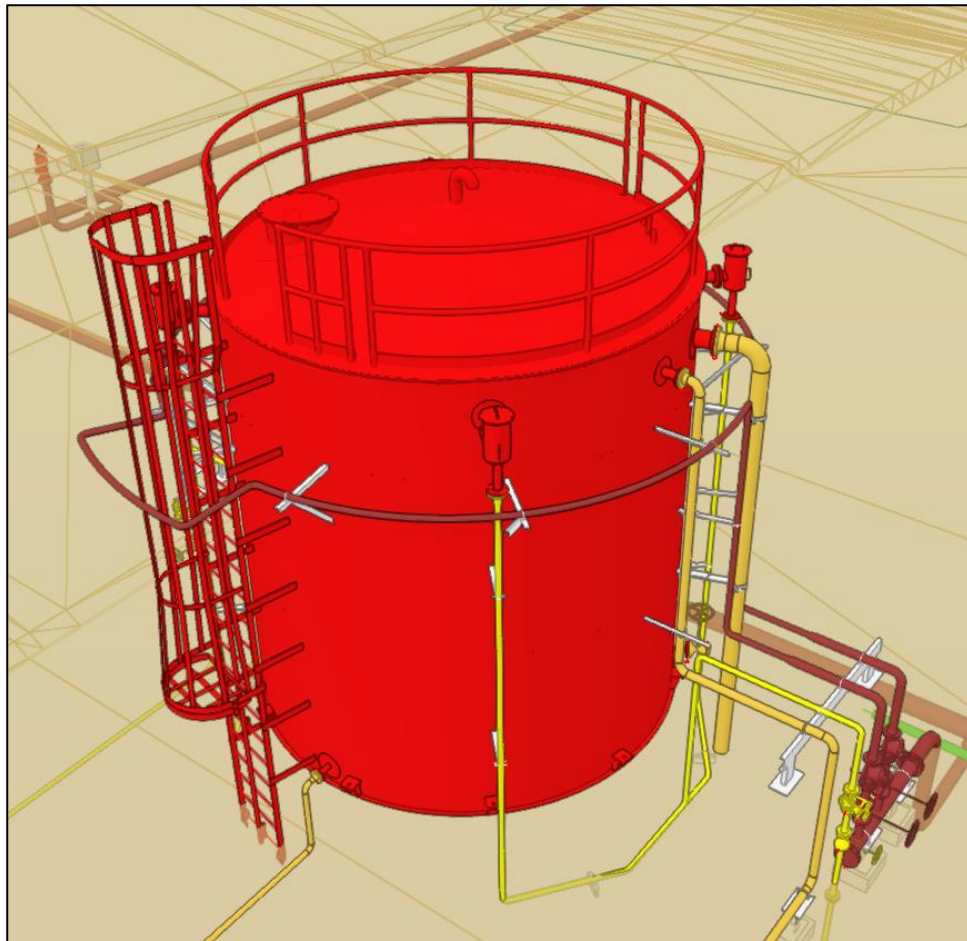
Resumen de Dimensiones y Espesores de Tanque de Almacenamiento

Características	Medida (mm)	Espesor (mm)	Peso (Kg)
Fondo de Tanque	4712	8	4380.33
1ra Virola de Tanque	4600	6	2042
2da Virola de Tanque	4600	5	1134.4
Anillo Rigidizador	65 x 65	6	85.4
Techo de Tanque	4600	8	1389.45
Accesorios	-	-	250
Peso Total	-	-	9281.58

Y de esta manera queda definido totalmente el tanque, especificando la cantidad de material que va a ser necesario para la construcción.

Figura 38

Tanque de Almacenamiento bajo Metodología BIM



Conclusiones

- Se verificó el volumen total, niveles mínimos - máximos y cada espesor de plancha con los lineamientos que da la norma API 650, esto con fin de ceñirse a una norma internacional de alta exigencia. Además de ello se analizó los efectos de sismo y viento, permitiendo ir un poco más lejos y calcular el tamaño de pernos de anclaje y silletas, verificando que el tanque debe ser anclado para mitigar los efectos dinámicos del viento y suelo.
- Se verificó mediante el software Inventor cuales son los valores de deformación y esfuerzos a los que está sometido, obteniendo valores significativamente similares a los encontrados por las ecuaciones de la norma API 650 Edición 13 en el capítulo 4. Como resultado se obtiene que los esfuerzos a los que estaría sometido el tanque en régimen estacionario están dentro de lo permitido y con factores de seguridad superiores a 5.
- Se verificó el cálculo hidráulico en régimen estacionario con ayuda del software AFT Fathom, reduciendo el tiempo y optimizando los recursos para obtener resultados en el menor tiempo posible. Además, siempre que sea posible se recomienda utilizar las normas ASME, esto para poder identificar la calidad de materiales mínimos en el transporte de cierto tipo de fluidos, en esta investigación se utilizó la norma ASME B31.4 ya que es la responsable de dar los lineamientos mínimos para el transporte de fluidos combustibles.
- Se analizó cada uno de los mecanismos de extinción necesarios que toda área de almacenamiento de combustible debe poseer, obteniendo los parámetros necesarios para su selección. Si bien la norma NFPA no exige utilizar todos los mecanismos desarrollados, será responsabilidad del diseñador evaluar por una matriz de riesgos y el líquido a almacenar para una correcta selección y cantidad de estos.

Recomendaciones

- Para un buen diseño y correcta interpretación de la norma API 650, lo principal es conocer cuál es el tipo de fluido que se va a almacenar, así como las condiciones de sitio. Conociendo esto es que se puede realizar un correcto diseño, respetando las pautas y empleando los anexos de la norma.
- Emplear las normas ASME, según el tipo de aplicación que se necesita, brinda al usuario una visión más amplia de los materiales de tuberías, válvulas, dimensiones, es por ello por lo que en todo diseño se debe considerar y elegir la norma aplicable al diseño.
- Considere utilizar las normas NFPA como mínimo, siempre que se necesite realizar diseños de sistema de protección en donde se esté almacenando líquidos inflamables, esto permite saber todas las consideraciones y modificaciones que se pueden realizar en un diseño.
- Siempre que sea posible considerar emplear el uso de software de cálculo y diseño, ya que reducen considerablemente el tiempo, obteniendo resultados en el menor tiempo posible.

Referencias

- Aguilar y Rubio (2022). Diseño y Simulación del Sistema Automático de distribución del Tanque Diesel tipo II desde el tanque principal hasta los tanques secundarios y de almacenamiento diario de 1850 y 380 galones respectivamente. [Tesis de grado Univ. Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21912>
- Amaya, Piamba y Olaya (2013). Estudio de los efectos corrosivos del Diesel y Biodiesel sobre una fundición de hierro gris. [Artículo Revista Latinoamericana]. <https://ve.scielo.org/pdf/rlmm/v34n2/art12.pdf>
- Andrinich (2019). Diseño de Sistema Contra Incendio para Tanques de Almacenamiento de Diesel B5 de 330,000 Galones de capacidad Total. [Tesis de Grado Universidad Católica de Santa María] https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM_70a87e06e76e94b87247bb52a1cc4b38.
- API 650 (2020). Welded Tank for Storage. Thirteenth Edition. New York: American Petroleum Institute.
- ASME B31.4. (1992). Sistema de Transportes de Hidrocarburos Líquidos y Otros Líquidos por ductos de Tubería. Edición española 1992. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- Concha (2018). Diseño, Fabricación y Montaje de Tanque de Almacenamiento de Diesel de 200, 000 Galones de capacidad, Basado en Norma Api 650, para la Unidad Minera Toquepala, Departamento de Tacna. [Tesis de Grado Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo] https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UPRG_96bb24e8d5a1972ca6df2a15a4479582/Description#tabnav.

- Gallardo (2017). Manual para la Elaboración de Plan de Tesis y Tesis Universitaria. Escuela Nacional de Folklore Jose María Arguedas. https://www.escuelafolklore.edu.pe/wp-content/uploads/2018/02/MANUAL_ELABORACION_PLAN_TESIS_UNIVERSITARIA_2017.pdf
- García (2017). Diseño, Cálculo y Construcción de un Depósito Industrial de Chapa de Acero para fluidos. [Trabajo de Grado]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/74580/FERRANDO%20-%20Dise%C3%B1o,%20c%C3%A1lculo%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20dep%C3%B3sito%20industrial%20%20de%20chapa%20de%20acero%20para%20fluidos.pdf?sequence=3>
- Gonzales, Peña y Cerda (2007). Determinación de la Corrosividad de Crudos Pesados a Alta Temperatura sobre un Acero Ferrítico bajo Condiciones de Agitación. [Artículo]. https://www.researchgate.net/publication/277177051_Determinacion_de_la_corrosividad_de_crudos_pesados_a_alta_temperatura_sobre_un_acero_ferritico_bajo_condiciones_de_agitacion
- Introducción a la investigación (2018). Universidad Veracruzana. Disponible en: <https://www.uv.mx/apps/bdh/investigacion/unidad1/investigacion-tipos.html>.
- Jaramillo (2021). Efecto de los Pernos de Anclaje y Flexibilidad del suelo sobre la respuesta Sísmica de Tanques de Almacenamiento de Tanques de Almacenamiento de Líquidos [Tesis de Grado]. <https://repositorio.uc.cl/xmlui/handle/11534/62489>.
- Mejía (2022). Diseño de Tanque Horizontal de Acero al Carbono para Almacenamiento de Combustible Diesel de 6120 Gal [Tesis de Grado]. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/6336?show=full>
- Mora (2022). Criterio de Von Misses. https://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio_de_von_Mises.html

Muñoz (2021). Diseño de Tanques de almacenamiento de combustibles e implantación de la terminal según instrucción técnica complementaria MI-P02 y protección contra incendios. [Tesis de grado Escuela Técnica Superior de Ingeniería]. <https://idus.us.es/handle/11441/126876>

NACE (2002). Nace Corrosion Engineer's Reference Book. Third Edition. Texas: The Corrosion Society.

Yafac (2019). Diseño de tanques de almacenamiento de nafta con protección catódica para la refinería de Iquitos [Tesis de Grado]. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/8334>.

Química (2023). Combustibles. [Cita de página Web]. <https://www.quimica.es/enciclopedia/Combustible.html>

Repsol (2023). Diesel. <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/diferencias-gasolina-diesel/>

REPSOL (2019). Ficha de datos de seguridad. <https://petroperu.com.pe/Docs/spa/files/productos/fds-db5-s50.pdf>

Anexos

Anexo A: Esfuerzos Admisibles de Materiales de Planchas de Acero – API 650

Table 5.2a—Permissible Plate Materials and Allowable Stresses (SI)

Plate Specification	Grade	Nominal Plate Thickness t mm	Minimum Yield Strength MPa	Minimum Tensile Strength MPa	Product Design Stress S_d MPa	Hydrostatic Test Stress S_t MPa
ASTM Specifications						
A283M	C		205	380	137	154
A285M	C		205	380	137	154
A131M	A, B		235	400	157	171
A36M	—		250	400	160	171
A131M	EH 36		360	490 ^a	196	210
A573M	400		220	400	147	165
A573M	450		240	450	160	180
A573M	485		290	485 ^a	193	208
A516M	380		205	380	137	154
A516M	415		220	415	147	165
A516M	450		240	450	160	180
A516M	485		260	485	173	195
A662M	B		275	450	180	193

Anexo B: Dimensiones de Boquillas para Virolas – API 650

Table 5.6a—Dimensions for Shell Nozzles (SI) (Continued)

Dimensions in millimeters

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9 ^c
NPS (Size of Nozzle)	Outside Diameter of Pipe OD	Nominal Thickness of Flanged Nozzle Pipe Wall ^a t_n	Diameter of Hole in Reinforcing Plate D_R	Length of Side of Reinforcing Plate ^b or Diameter $L = D_o$	Width of Reinforcing Plate W	Minimum Distance from Shell- to-Flange Face J	Minimum Distance from Bottom of Tank to Center of Nozzle	
							Regular Type ^d H_N	Low Type C
28	711.2	e	714	1440	1745	300	826	720
26	660.4	e	664	1340	1625	300	776	670
24	609.6	12.7	613	1255	1525	300	734	630
22	558.8	12.7	562	1155	1405	275	684	580
20	508.0	12.7	511	1055	1285	275	634	525
18	457.2	12.7	460	950	1160	250	581	475
16	406.4	12.7	410	850	1035	250	531	425
14	355.6	12.7	359	750	915	250	481	375
12	323.8	12.7	327	685	840	225	449	345
10	273.0	12.7	276	585	720	225	399	290
8	219.1	12.7	222	485	590	200	349	240
6	168.3	10.97	171	400	495	200	306	200
4	114.3	8.56	117	305	385	175	259	150
3	88.9	7.62	92	265	345	175	239	135
2 ^f	60.3	5.54	63	—	—	150	175	h
1½ ^f	48.3	5.08	51	—	—	150	150	h
1 ^f	33.4	6.35	—	—	—	150	150	h
¾ ^f	26.7	5.54	—	—	—	150	150	h

Anexo C: Módulos de Sección de Anillos Rigidizadores – API 650

Table 5.19a—Section Moduli (cm³) of Stiffening-Ring Sections on Tank Shells (SI)

Dimensions in millimeters

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6
Member Size	As-Built Shell Thickness				
	5	6	8	10	11
Top Angle: Figure 5.24, Detail a					
65 × 65 × 6	6.58	6.77	—	—	—
65 × 65 × 8	8.46	8.63	—	—	—
75 × 75 × 10	13.82	13.97	—	—	—
Curb Angle: Figure 5.24, Detail b					
65 × 65 × 6	27.03	28.16	—	—	—
65 × 65 × 8	33.05	34.67	—	—	—
75 × 75 × 6	35.98	37.49	—	—	—
75 × 75 × 10	47.24	53.84	—	—	—
100 × 100 × 7	63.80	74.68	—	—	—
100 × 100 × 10	71.09	87.69	—	—	—
One Angle: Figure 5.24, Detail c (See Note)					
65 × 65 × 6	28.09	29.15	30.73	32.04	32.69
65 × 65 × 8	34.83	36.20	38.51	40.32	41.17
100 × 75 × 7	60.59	63.21	66.88	69.48	70.59
102 × 75 × 8	66.97	70.08	74.49	77.60	78.90
125 × 75 × 8	89.41	93.71	99.86	104.08	105.78
125 × 75 × 10	105.20	110.77	118.97	124.68	126.97
150 × 75 × 10	134.14	141.38	152.24	159.79	162.78
150 × 100 × 10	155.91	171.17	184.11	193.08	196.62
Two Angles: Figure 5.24, Detail d (See Note)					
100 × 75 × 8	181.22	186.49	195.15	201.83	204.62
100 × 75 × 10	216.81	223.37	234.55	243.41	247.16
125 × 75 × 8	249.17	256.84	269.59	279.39	283.45
125 × 75 × 10	298.77	308.17	324.40	337.32	342.77
150 × 75 × 8	324.97	335.45	353.12	366.82	372.48
150 × 75 × 10	390.24	402.92	425.14	443.06	450.61
150 × 100 × 10	461.11	473.57	495.62	513.69	521.41
Formed Plate: Figure 5.24, Detail e					
h = 250	—	341	375	392	399
h = 300	—	427	473	496	505
h = 350	—	519	577	606	618
h = 400	—	615	687	723	737
h = 450	—	717	802	846	864
h = 500	—	824	923	976	996
h = 550	—	937	1049	1111	1135
h = 600	—	1054	1181	1252	1280
h = 650	—	1176	1317	1399	1432
h = 700	—	1304	1459	1551	1589
h = 750	—	1436	1607	1709	1752
h = 800	—	1573	1759	1873	1921
h = 850	—	1716	1917	2043	2096
h = 900	—	1864	2080	2218	2276
h = 950	—	2016	2248	2398	2463
h = 1000	—	2174	2421	2584	2654

NOTE: The section moduli for Details c and d are based on the longer leg being located horizontally (perpendicular to the shell) when angles with uneven legs are used.

Anexo D: Cargas de Levantamiento para Cálculo de Anclajes – API 650

Table 5.20a—Uplift Loads (SI)

Uplift Load Case	Net Uplift Formula, U' (N)	Allowable Anchor Bolt or Anchor Strap Stress (MPa)	Allowable Shell Stress at Anchor Attachment (MPa)
Design Pressure	$[P_i \times D^2 \times 785] - W_1$	$5/12 \times F_y$	$2/3 F_{0y}$
Test Pressure	$[P_t \times D^2 \times 785] - W_3$	$5/9 \times F_y$	$5/6 F_{0y}$
Wind Load	$P_{WR} \times D^2 \times 785 + [4 \times M_{WS}/D] - W_2$	$0.8 \times F_y$	$5/6 F_{0y}$
Seismic Load	$[4 \times M_{re}/D] - W_2 (1 - 0.4 A_y)$	$0.8 \times F_y$	$5/6 F_{0y}$
Design Pressure ^a + Wind	$[(F_p P_i + P_{WR}) \times D^2 \times 785] + [4 M_{WS}/D] - W_1$	$5/9 \times F_y$	$5/6 F_{0y}$
Design Pressure ^a + Seismic	$[F_p P_i \times D^2 \times 785] + [4 M_{re}/D] - W_1 (1 - 0.4 A_y)$	$0.8 \times F_y$	$5/6 F_{0y}$
Frangibility Pressure ^b	$[3 \times P_f \times D^2 \times 785] - W_3$	F_y	F_{0y}

where

A_y is the vertical earthquake acceleration coefficient, in % g;

D is the tank diameter, in meters;

F_p is the pressure combination factor;

F_{0y} is the minimum yield strength of the bottom shell course, in MPa;

F_y is the minimum yield strength of the anchor bolt or strap; bolts are limited to specified material minimum yield strength or 380 MPa, whichever is less, in MPa; anchor strap material minimum yield strength shall not exceed the minimum yield strength of the shell;

H is the tank height, in meters;

M_{WS} equals $P_{WS} \times D \times H^2/2$, in N-m;

M_{re} is the seismic moment, in N-m (see Annex E);

P_i is the design internal pressure, in kPa (see Annex F);

P_f is the failure pressure, in kPa (see Annex F);

P_t is the test pressure, in kPa (see Annex F);

P_{WR} is the wind uplift pressure on roof, in kPa; for supported cone roofs meeting the requirements of 5.10.4, P_{WR} shall be taken as zero;

P_{WS} is the wind pressure on shell, in N/m^2 ;

W_1 is the corroded weight of the roof plates plus the corroded weight of the shell and any other corroded permanent attachments acting on the shell, in N;

W_2 is the corroded weight of the shell and any corroded permanent attachments acting on the shell including the portion of the roof plates and framing acting on the shell, in N;

W_3 is the nominal weight of the roof plates plus the nominal weight of the shell and any other permanent attachments acting on the shell, in N.

^a Refer to 5.2.2 concerning the pressure combination factor applied to the design pressure.

^b Frangibility pressure applies only to tanks designed to 5.10.2.6 d.

Anexo E: Hoja de Cálculo – Tanque de Almacenamiento de Techo Cónico

Hoja de Cálculo - Tanque de Almacenamiento Techo Cónico

I. DISEÑO DE FONDO DE TANQUE

Diámetro	4.6	m	D
Altura total	5	m	H
Altura liquido (diseño)	4.2	m	HL

* Condiciones de diseño

Temperatura	10	°C	T
Presión interior	0	kPa	Pi
Velocidad de viento	120	km/h	V
Presión exterior	0	kPa	Pe
Gravedad especifica	0.85	-	G
Carga de nieve	100	kg/m2	
Tolerancia corrosión	1.5	mm	CA

* Para iniciar el cálculo debemos de seleccionar el material

* API 650, agrupa a los materiales en grupos y en rangos de trabajo

* La selección del material depende de temperatura, esfuerzo de material y corrosión

* Para el diseño emplearemos materiales del grupo I, aceros semi muertos (Killed Steel)

Especificación	Fy (MPa)	Ft (MPa)	Sd (MPa)	St (MPa)	
ASTM A283M	205	380	137	154	
ASTM A285	205	380	137	154	
ASTM A131	235	400	157	171	Densidad
A36	250	400	160	171	7850

Fy: Esfuerzo de fluencia

Ft: Esfuerzo de tensión

Sd: Esfuerzo de diseño

St: Esfuerzo prueba hidrostática

* De acuerdo con API, el minimo ancho de plancha sera de 1800 mm.

* Los fondos de placas anulares solo serán usados con los grupos IV, V , VI.

* La placa anular es usada para tanques con diametros superiores a 30 m.

* La placa anular es usada para reducir esfuerzos que se producen en la unión pared - fondo.

* El espesor minimo de la placa de fondo sin corroer sera de 6 mm.

* El diámetro del fondo será como mínimo 50 mm más grande que el diámetro exterior de la envolvente.

tfondo mín	6	mm
CA	1.5	mm
Tfondo final	7.5	mm
Tfondo elegido	8	mm

II. DISEÑO DE CORAZA DE TANQUE

- * Para tanques con diámetro < 61m se emplea el método de pie.
- * API 650 presenta una tabla en el punto 5.6.1.1 donde da a conocer el espesor de plancha de acuerdo al diámetro del tanque.
- * Para tanques con D > 3.2 pero < 15, el espesor mínimo será de 6 mm.
- * El ancho mínimo de plancha será de 1800 mm.

$$td = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{S_d} + CA$$

$$tt = \frac{4.9 * D * (H - 0.3)}{S_t}$$

Sd: Esfuerzo de diseño

St: Esfuerzo de diseño de prueba hidrostática

td: Espesor de diseño de envoltente

tt: Espesor de diseño de prueba hidrostática

H: Nivel de líquido de diseño

Ancho de virolas	3000	mm
#cantidad de virolas	1.667	
Tmin	6	mm

ITEM	Altura (m)	td (mm)	tt (mm)	tmáx (mm)	tfinal (mm)
Virola #1	5	2.0627956	0.619520468	6	6
Virola #2	2	1.7035644	0.224081871	6	6
Virola #3	0	0	0	0	0
Virola #4	0	0	0	0	0
Virola #5	0	0	0	0	0
Virola #6	0	0	0	0	0
Virola #7	0	0	0	0	0
Virola #8	0	0	0	0	0
Virola #9	0	0	0	0	0
Virola #10	0	0	0	0	0

III. ANILLOS DE REFUERZO SUPERIORES E INTERMEDIOS (WIND GIRDERS)

- * Todos los tanques de techo abierto deben de contar con una viga de viento en la parte superior para mantener la redondez y estabilidad.
- * Todos los tanques deben ser reforzados por vigas de viento cuando lo requiera por 5.9.6.
- * El diseño también es válido para tanques de techo flotante.
- * Para techos austosoportantes, tanques con juntas frágiles, tanques con brida

techo - envolvente, deberá ser suministrada con un ángulo en la parte superior no menor que 50x50x5 o 2"x2"x3/16".

* El TOP ANGLE hace referencia al perfil de coronamiento, e indica lo mínimo que se debe cumplir, pueden ir TOP ANGLE y TOP WINDER o el de mayor área que cumpla para ambas condiciones de diseño.

* El tamaño mínimo de los ángulos de anillos estabilizadores será de 2 1/2"x2 1/2"x1/4" y para planchas será con un espesor no menor que 1/4" o 6 mm.

* Anillos rigidizadores se deben diseñar por viento y vacío (Anexo V), solo si la presión externa es mayor que 2 kPa pero mejor que 6.5 kPa

$$Z = \frac{6 * H_2 * D^2}{0.5 * F_y} * \left(\frac{P_{wd}}{1.72}\right)$$

$$P_{wv} = 1.48 * \left(\frac{V}{190}\right)^2$$

Z: Módulo mínimo de sección requerida (cm³)

D: Diámetro nominal del tanque

H₂: Altura de la coraza del tanque, incluye el borde libre (m)

F_y: Límite elástico de material de virola y anillo rigidizador o 210 Mpa, el que sea menor

P_{wd}: presión de diseño de viento P_{wv} + 0.24 (kPa)

P_{wv}: Presión de diseño de viento

V: Velocidad de diseño (Ráfagas de 3 segundos), API contempla una velocidad de 190 km/h

D	4.6	m
H ₂	5	m
F _y	210	MPa
V	120	km/h
P _{wv}	0.5904	kPa
P _{wd}	0.8304	kPa

Z (sección mínima) **2.92** cm³

NOTA: Detalle a y b es usado para anillos superiores, detalles c y d son utilizados para anillos intermedios, sección y es para módulos Z grandes

* Ir a la tabla **5.19a** y elegir el área del perfil a seleccionar, la columna a escoger depende del espesor de la chapa donde irá soldada.

Perfil 6.67 cm³
Z_p > Z_{mín} **OK**

CRITERIO DE ANILLOS INTERMEDIOS

$$H1 = 9.47 * t * \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 * \left(\frac{1.72}{P_{wd}}\right)}$$

H1: Altura máxima del tanque sin rigidizar (m)

t: Espesor nominal de virola de menor espesor (mm)

D: Diámetro nominal del tanque (m)
 Pwd: Presión de diseño de viento (kPa)

CONDICION: Si $H1 > H$, no necesita viga intermedia

D	4.6	m
Pwd	0.8304	kPa
t	5	mm
H1	111.148	m
H1 > H	OK	

*Otra comprobación para saber si el tanque necesita anillos intermedios es por el método de la altura transformada.

$$W_{tr} = W * \sqrt{\left(\frac{t_{uniforme}}{t_{actual}}\right)^5}$$

W: Ancho de cada virola (mm)
 tuniforme: Espesor nominal de virola más delgada (mm)
 tactual: Espesor nominal de la virola analizada (mm)

CONDICION: Si la suma $H_{transformada} > H1$, necesita viga intermedia

ÍTEM	Ancho (m)	tunif(mm)	tactual (mm)	Wtr (m)	Ws (N)
1	3	5	6.000	1.902	20031.74918
2	2	5	5.000	2.000	11128.74954
3	0	0	0.000	0.000	0
4	0	0	0.000	0.000	0
5	0	0	0.000	0.000	0
6	0	0	0.000	0.000	0
7	0	0	0.000	0.000	0
8	0	0	0.000	0.000	0
9	0	0	0.000	0.000	0
10	0	0	0.000	0.000	0
SUMA				3.902	

Htransf > H1 **OK**

* La ubicación de la viga intermedia se sitúa en la mitad de la altura de la transformada, medida desde la parte superior del tanque.

* Otra condición para saber si el tanque necesita adicionalmente más vigas intermedias es que la mitad de la transformada sea mayor que H1.

CONDICIÓN: $H_{transformada}/2 > H1$

Htransf/2 > H1

NO

* La viga intermedia no debe ser localizada a menos de 150 mm de la soldadura horizontal, siempre a 150 mm de estas o superiores.

* De igual manera que se calculó la sección mínima Zp se debe calcular el área para poder determinar el perfil de la viga intermedia.

D	4.6	m
Htransformada/2	1.951	m
Fy	210	MPa
V	120	km/h
Pwv	0.5904	kPa
Pwd	0.8304	kPa

Z (sección mínima) **1.14** cm³

* Se deberá soportar todas las vigas rigidizadoras en donde estas tanto el largo como ancho superen en 16 veces el espesor de la placa menos gruesa.

* La separación de estos soportes o cartelas debe ser menos a 24 veces el ancho o largo del perfil.

* Cuando la viga rigidizadora se coloca a más 600 mm, estos deben de tener un perfil mínimo de 65x65x6 para tanques de 5 mm de espesor y de 75x75x6 para tanques con espesores mayores que 5mm.

IV. DISEÑO DE TECHO DE TANQUE

* Para el diseño se considera techo auto soportado tipo cónico.

* El ángulo de inclinación de techo debe ser mayor a 9.5° pero menor a 37°.

* De acuerdo con API, el mínimo tamaño del perfil de coronamiento (TOP ANGLE) es de 50x50x5 mm para tanques menores que 11m, para mayores de 18m sera de 75x75x10.

Diámetro	4.6	m
Perfil de coronamiento	50x50x5	mm

NOTA: Este perfil se debe de comparar con el anillo de rigidización de viento y elegir el que cumple con ambos requerimientos, se puede emplear ambos, pero es más común solo utilizar uno de los dos.

Zpc	3.05	cm ³
Zelegido; Max (Zpc,Zmin)	6.67	cm ³
Wind Ring		

$$t = \frac{2 * 1000 * D}{\sin \theta} * \sqrt{\frac{B}{1000 * E}} + CA$$

$$t = \frac{2 * 1000 * D}{\sin \theta} * \sqrt{\frac{U}{1.33 * 1000 * E}} + CA$$

E: Modulo de elasticidad (Mpa)

B: Combinación de cargas más grande con la carga de nieve balanceada (kPa)

U: Combinación de cargas más grande con la carga de nieve desbalanceada (kPa)

Θ: Angulo del cono en grados

CA: Tolerancia de corrosión (mm)

* El espesor de la plancha del techo no debe ser menor que 5 mm, pero tampoco más grande que 13mm, esto sin considerar cualquier tolerancia de corrosión.

$$B = D_L + 0.4 * (L_r \text{ or } S_u \text{ or } S_b) + P_e$$

$$B = D_L + (L_r \text{ or } S_u \text{ or } S_b) + F_{pe} * P_e$$

DL: Carga muerta de peso de tanque o componentes

Lr: Carga viva = 1kPa pero no menor a 0.72 kPa

Fpe: Factor de combinación = 0.4

Pe: Presión externa (kPa)

Su: Carga de nieve (kPa)

E (Modulo Young)	199000	Mpa
Densidad del acero	7850	kg/m3
Angulo	20	°
	0.349	Rad

* Para iniciar el cálculo debemos de empezar asumiendo un espesor para posteriormente reemplazarlo en la ecuación.

tmin sin corroer	5	mm
tmax	13	mm
tinicial	8	mm

Área de techo	17.686	m2
Volumen	0.141	m3
Peso de techo	10895.530	N
Carga de techo (DL)	0.616	kPa
Carga de nieve	100	kg/m2
	0.981	kPa
Carga máx 1 - B1	1.016	kPa
Carga máx 2 - B2	1.616	kPa
CA	1.5	mm

h (Altura del techo)	0.837	m
----------------------	-------	---

$$t = \frac{2 * 1000 * D}{\sin \theta} * \sqrt{\frac{B}{1000 * E}} + CA$$

tcalculado (Minimo)	3.9240	mm
tseleccionado	6.5	
tcomercial	8	mm

Wr (Peso de techo)	10895.5305	N
Wr (Techo + 10% Acce)	11985.08351	N
Wrc (Peso corroído)	8852.6185	N

COMPROBACIÓN DE ÁREA DE PARTICIPACIÓN REQUERIDA (5.10.5.2)

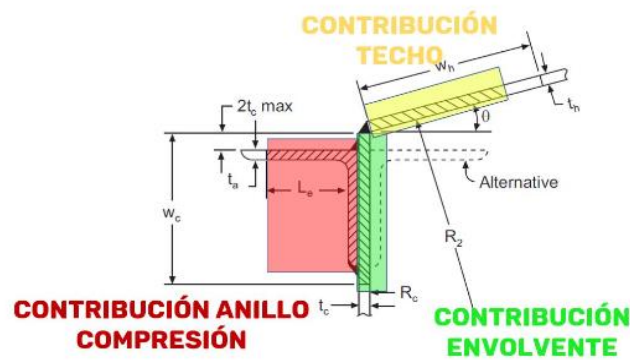
$$A_{req} = \frac{p * D^2}{8 * F_a * \tan \theta}$$

Fa (Esfuerzo admisible en la unión techo-pared)	150	Mpa
---	-----	-----

p (Combinación de cargas máxima)	1.6161	kPa
----------------------------------	--------	-----

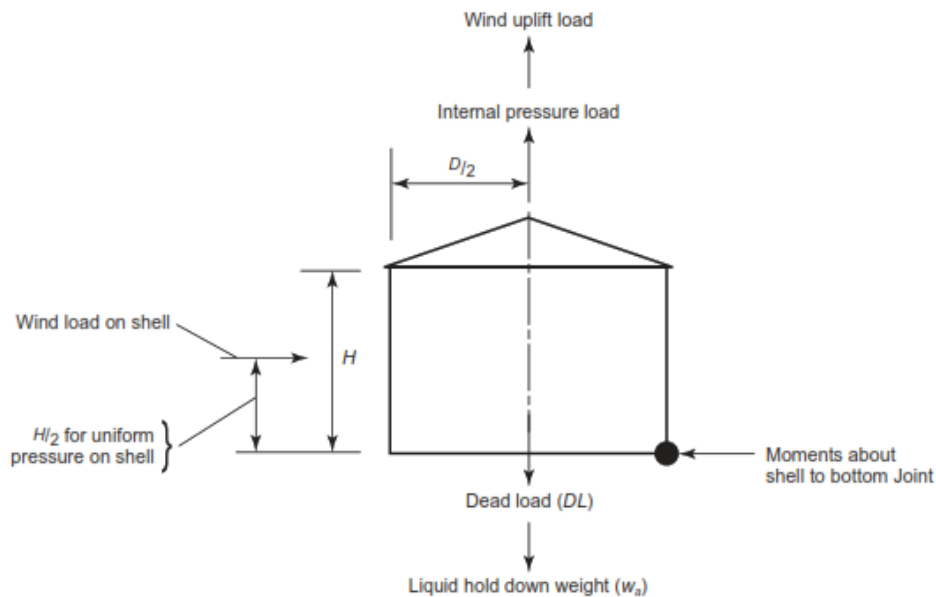
Arequerida	0.000078	m2
A mín	78.294	mm2

* Para comprobar que el área de aporte del anillo, la de la envolvente y la del techo son mayores al área mínima requerida se deben de calcular



Esquema de colores detallado, FIGURA F-2 NORMA API 650

VII. CARGAS DE VIENTOS EN TANQUES (ESTABILIDAD)



* Para que el tanque sea considerado auto soportado debe de cumplir los siguientes

requisitos:

$$1) 0.6M_w + M_{pi} < \frac{MDL}{1.5} + MDLR$$

$$2) M_w + F_p(M_{pi}) < \frac{MDL + MF}{2} + MDLR$$

$$3) M_{ws} + F_p(M_{pi}) < \frac{MDL}{1.5} + MDLR$$

M_w: Momento de vuelco de fondo-pared debido al viento vertical

M_F: Momento de fondo-pared debido al peso del liquido

MDL: Momento de techo-pared

M_{pi}: Momento de presión interna fondo-pared

F_p: Factor de combinación de presión

M_{ws}: Momento de vuelco debido al viento horizontal

$$P_{ws} = 0.89 * \left(\frac{V}{190}\right)^2 \quad P_{wr} = 1.48 * \left(\frac{V}{190}\right)^2$$

$$M_{ws} = P_{ws} * D * \frac{H^2}{2}$$

P_{ws} (vertical) 0.3550 kPa

P_{wr} (horizontal) 0.5904 kPa

M_{ws} 20.4133 N-m

As (Área trans. Pared) 23 m²

Ar (Área trans. Techo)	0.41857	m ²
Fs (Fuerza viento pared)	8.1653	N
Fr (Fuerza viento techo)	0.2471	N
Ms	20.4133	N-m
Mr	0.5683	N-m
Mw	20.9816	N-m

MOMENTO DE PARED INTERNA

Mpi (Momento debido a la presión interna)	0	Nm
MDL (Momento debido al peso de pared y techo)	96728.867	Nm
MDLR (Momento debido al peso del techo y adicional)	27565.69208	Nm
MF (Momento debido al peso del líquido)	1338660.979	Nm

CONDICIÓN #1

**NO
ANCLAJE**

CONDICIÓN #2

**NO
ANCLAJE**

CONDICIÓN #3

**NO
ANCLAJE**

VIII. CARGAS DE SISMO TANQUES ANCLADOS

* Para el correcto análisis de sismos, lo primero es encontrar a que grupo y zona de sismo se encuentra el tanque a ser analizado

* Lugares de USA serán de acuerdo con ASCE 7 Methods

* Encontrar el espectro de aceleración del suelo S_p

Zona grupo **SUG** **II** (Anexo E3.1. API 650)

Tabla N° 1 FACTORES DE ZONA "Z"	
ZONA	Z
4	0,45
3	0,35
2	0,25
1	0,10

Para Perú esta es la tabla de espectros de aceleración

Sp = Z	0.35
Ss	0.875
S1	0.4375

* Para encontrar los coeficientes Fv y Fa, se encuentran en las tablas E.1, E.2

* Cuando no se conoce las propiedades del suelo se asume una clase de sitio con un valor de D.

Fa (Coef. De suelo)	1.15
Fv (Coef. De suelo)	1.5625
I (Factor de importacia)	1.25
Clase Sitio	D

* Como siguiente paso debemos encontrar los periodos de vibración

PERIODO CONVECTIVO (E.4.5.2)

Ks (Coef. Sloshing)	0.5782	-
Tc (Periodo)	2.232	s

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 * H}{D}\right)}}$$

$$T_c = 1.8 * K_s * \sqrt{D}$$

* Ahora se calcula los espectros de respuesta de aceleración

COEFICIENTE DE ESPECTROS DE ACELERACIÓN

Q (Factor de escala)	1	Según ASCE 7 does not apply
Sp = So	0.35	

De la tabla E.4 se extraen los valores de Rwi y Rwc

Rwi	4	
Rwc	2	$A_i = 2.5 * Q * F_a * S_0 * \left(\frac{I}{R_{wi}}\right)$
Ai (Coef. Impulsivo)	0.3145	

* Para el Coef. Espectral convectivo se necesita el periodo Tc y TL

K (Coef. Espectral)	1.5	E.2
Sds	1.00625	
Av (Acel. vertical)	0.4729	E.2
Cd (Factor deflexión)	2.5	E.2
Ge (gravedad específica.)	0.68920125	
Fp (operación >=0.4)	0.4	
T0 (periodo 0)	0.135869565	s
Ts (Periodo)	0.679347826	s
TL (Periodo L)	4	s

Tc < TL E.4.6.1.4

Ac (Coef. convectivo)	0.2871
------------------------------	--------

CARGAS DE DISEÑO (E.6.1)

Ws (Peso de pared)	31160.499	N
Wr (Peso del techo)	11985.084	N
Wf (Peso del fondo)	40953.798	N
Wp (Peso fluido)	582026.5127	N

ESFUERZO CORTANTE EN LA BASE (V)

Wi (Peso efectivo)	465295.2753	N	$Wi = \left(1 - 0.218 * \left(\frac{D}{H}\right)\right) * W_p$
Vi	172758.8664	N	
Wc (Peso convectivo)	123072.3941	N	$NWc = 0.230 * \frac{D}{H} * \tanh\left(\frac{3.67 * H}{D}\right) * W_p$
Vc	35334.99707	N	
V (Esf. Cortante)	176335.4415	N	

CENTRO DE ACCIÓN DE FUERZAS EFECTIVAS LATERALES

*Según E.6.1.2 y $D/H < 1.333$

Xi (Altura del fondo hasta el centro del tanque impulsivo)	2.0676	m	$Xi = \left(0.5 - 0.094 * \frac{D}{H}\right) * H$
Xc (Altura del fondo hasta el centro del tanque convectivo)	3.792	m	$Xc = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67H}{D} * \sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right)}\right) * H$
Xs (Altura del centro de gravedad de la pared del tanque)	2.5	m	$Xs = \frac{H}{2} \quad Xr = H + \frac{h}{3}$
Xr (Altura del centro de gravedad del techo del tanque)	5.279	m	$Xis = \left(0.5 + 0.06 * \frac{D}{H}\right) * H$
Xis (Altura del fondo al centro impulsiva de la cimentación)	2.776	m	
Xcs (Altura del fondo al centro convectivo en la cimentación)	3.8357	m	$Xcs = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1.937}{\frac{3.67H}{D} * \sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right)}\right) * H$

MOMENTOS DE VUELCO

Mrw (Momento de pared del anillo)	371888.7278	N-m
Ms (Momento de losa)	470501.7723	N-m

RELACIÓN DE ANCLAJE J

$$Wa = 99 * ta * \sqrt{Fy * H * Ge} \leq 201.1 * HDGe$$

ta (Espesor de placa anular)	8 mm	
Wa	23246.26671	
Wa (Reducido)	3187.763	N/m
Ws (Peso total del tanque)	31160.499	N
wrs (Carga del techo en la pared del tanque)	829.3414	N/m
wint (Carga uplift)	0	N/m
wt (Peso de tanque y del techo en el fondo)	2985.579428	N/m
J (Relación)	3.133625871	
Condición	ANCLAJE	

ANCLAJE POR FUERZA CORTANTE (E.7.6)

* Para que un tanque resista esfuerzos de corte por sismos debe cumplir la condición que V no exceda Vs

$$Vs = \mu * (Ws + Wr + Wf + Wp) * (1 - 0.4 * Av)$$

μ (Factor de fricción)	0.4	-
Vs	216044.6109	N
CONDICIÓN	OK	

FREEBOARD (BORDE LIBRE E.7.2)

SD1 (Espectro de aceleración en un segundo)	0.68359375	
SDS (Espectro de aceleración en periodo corto)	1.00625	

$$\delta_s = 0.42 * D * Af$$

δs (Altura de onda)	1.109	m
Af (Coeficiente de aceleración chapoteo)	0.574	-
δmín	0.777	m

CÁLCULO DE PERNOS DE ANCLAJE

Wsc (Peso pared corroído)	17314.29212	
W1 (Peso corroído del techo + peso corrido de pared)	26166.9106	N

W2 (Peso de pared del tanque corroído)	17314.29212	N
W3 (Peso nominal del techo + peso nominal de pared)	43145.582	N

CARGA DE VIENTO

$$P_{WR} * D^2 * 785 + \left(4 * \frac{M_{WS}}{D}\right) - W_2$$

U1	15164.75107	N
-----------	-------------	---

CARGA DE SISMO

$$\left(4 * \frac{M_{rw}}{D}\right) - W_2 * (1 - 0.4 * A_v)$$

U2	309342.6415	N
-----------	-------------	---

DISEÑO DE PRESIÓN + VIENTO

$$(Fp * Pi + P_{WR}) * D^2 * 785 + \left(4 * \frac{M_{WS}}{D}\right) - W_1$$

U3	16342.92427	N
-----------	-------------	---

DISEÑO DE PRESIÓN + SISMO

$$(Fp * Pi * D^2 * 785) + \left(4 * \frac{M_{rw}}{D}\right) - W_1 * (1 - 0.4 * A_v)$$

U4	302164.7171	N
-----------	-------------	---

U Máx (Diseño)	309342.6415	N
-----------------------	-------------	---

Fy (Fluencia de pernos)	250	Mpa
Sa (Esfuerzo admisible)	200	Mpa

#Pernos mín	4.817	
N pernos	10	

Carga x Pernos (Tb)	30934.264	N
S (Esfuerzo pernos)	63.0188	Mpa
Ar (Área mín de pernos de anclaje)	154.67132	mm2
CA (Corrosión x perno)	2	mm

At (Área efectiva)	206.2284	mm ²
dmín (Diámetro de perno)	16.204	mm

d (elegido)	25	mm
e mín (Excentricidad)	67.052	mm
A (Área perno)	490.8738521	mm ²
$em = 54 + \frac{d}{2} + 500 * E_t * D * T$		

Et (Coefi. Expansión)	0.000012	
ΔT	20	°C

IX. DISEÑO DE SILLETAS

*Diseño efectuado según AISI VOL 2 Part 7, Anchor Bolt

a (Ancho de la placa superior)	6	in	$amín = g + 2j$
b (Longitud de la placa superior)	6	in	$bmín = e + d + 1/4$
cmin (Espesor mínimo de placa superior)	0.5168	in	
c (Espesor)	0.8		
d (Diámetro de perno)	1	in	
e mín (Excentricidad mínima de perno)	1.458	in	
e (Excentricidad)	3	in	$emín = 0.886d + 0.572$
$emín = 0.886 * d + 0.572$			

f mín (Distancia de cara delantera a agujero de perno)	0.625	in
$fmín = \frac{d}{2} + 1/8$		

f (Distancia)	2	in
g (Distancia entre placas verticales)	2	in
$gmín = d + 1$		

g (Distancia entre placas verticales)	4	in
--	----------	----

P (Carga de perno)	10.4315	kips	$P = MÍN(1.5 * Tb; Sy * Aperno)$
S (Esfuerzo del material)	25	ksi	

S' (Esfuerzo en placa superior)	10.4315	ksi
	71.8730	Mpa

OK

m (Espesor de placa de fondo)	0.3145	mm
R (Radio nominal)	90.551	in
Z (Factor de reducción)	0.8863	-
t (Espesor de pared)	0.236	in
h (Altura de silletas)	10	in
j min (Espesor de placa vertical)	0.5	in

$$j \text{ mín} = \frac{1}{2}; 0.04 * (h - c), \text{ elegir el máx}$$

j (Espesor de placa)	0.5	in
k min (Ancho de la placa vertical)	0.8345	in

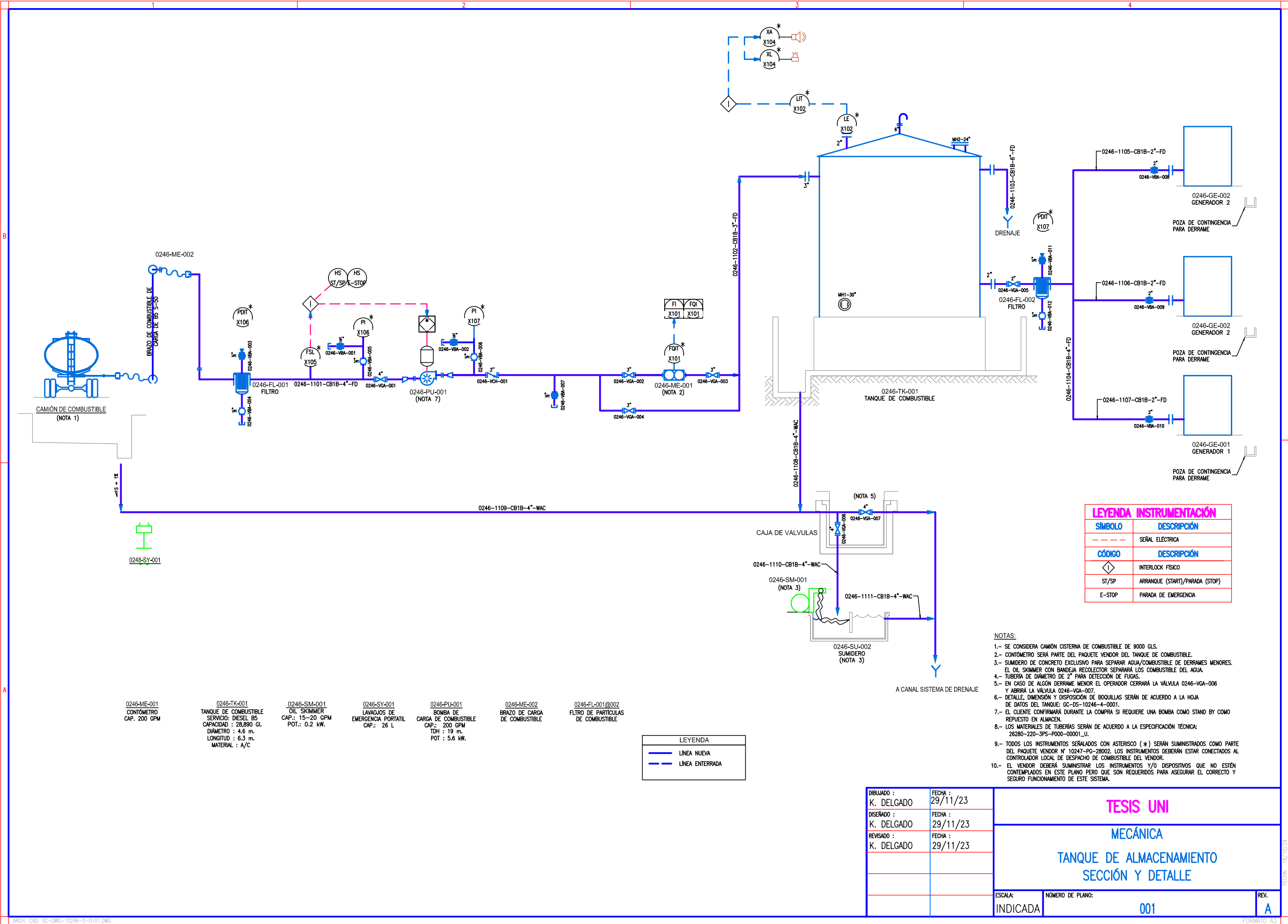
$$k \text{ mín} = \frac{P}{25 * j}$$

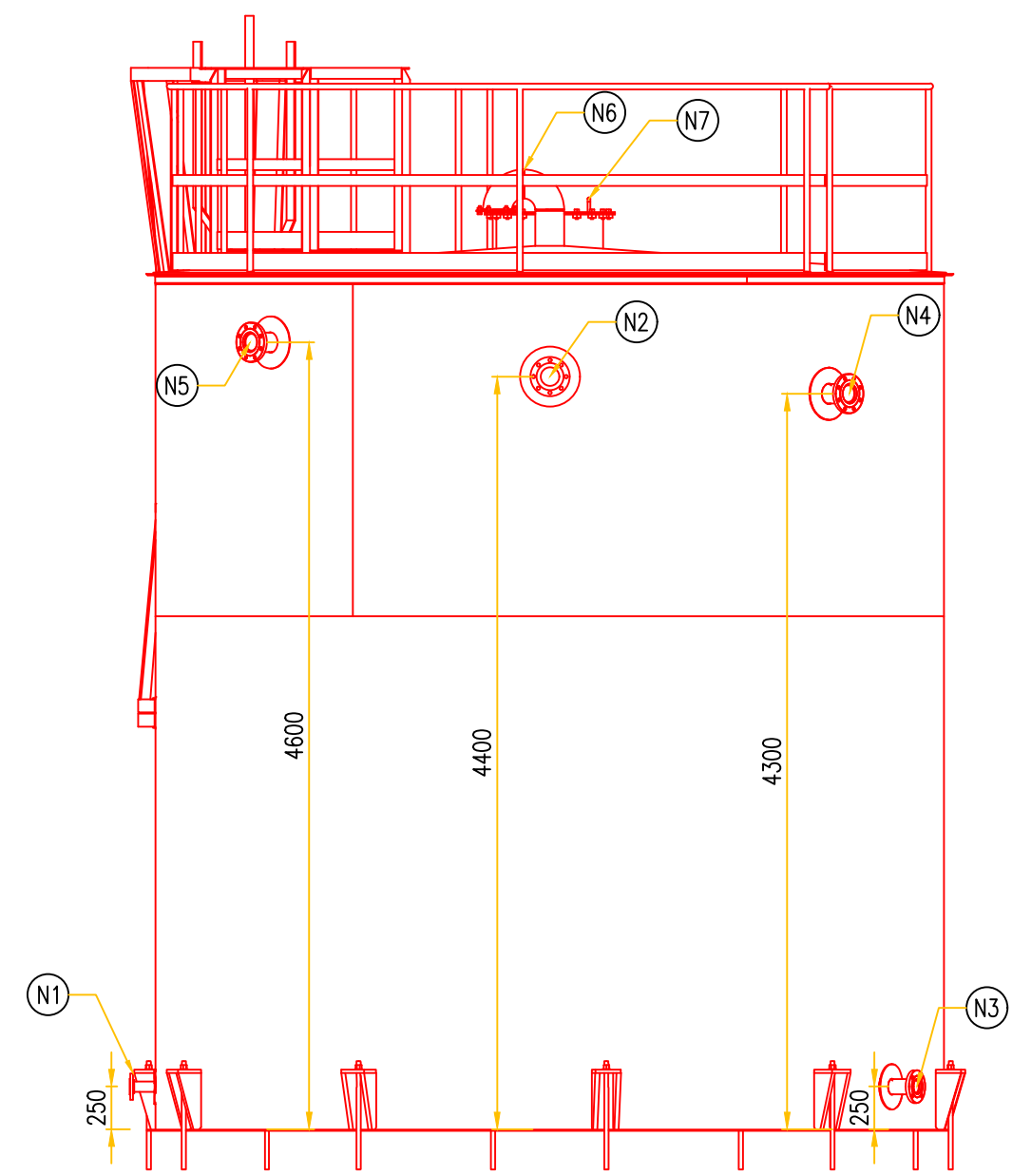
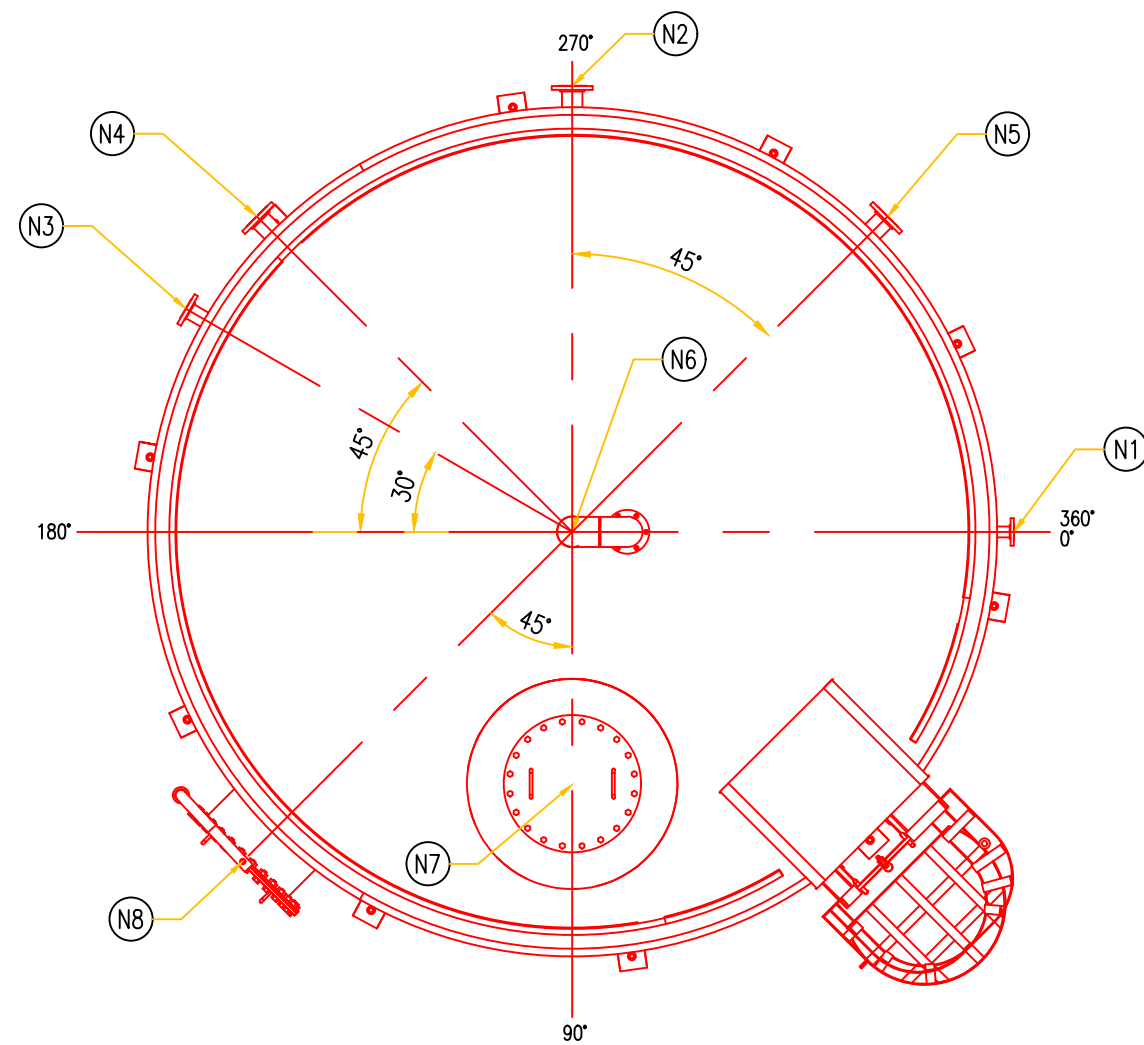
k (Ancho de la placa vertical)	1	in
S máx diseño	25	ksi

S' (Esfuerzo en la pared vertical)	16.05382	ksi
	110.61085	Mpa

OK

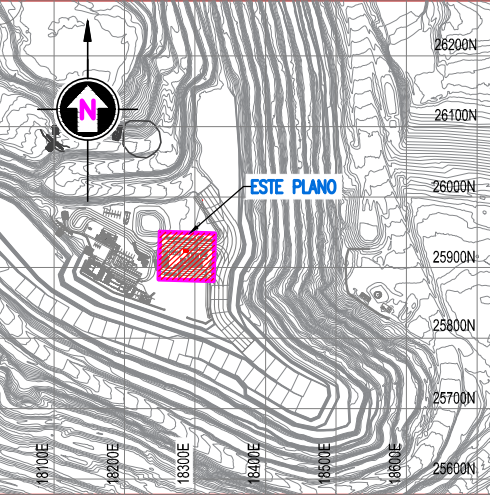
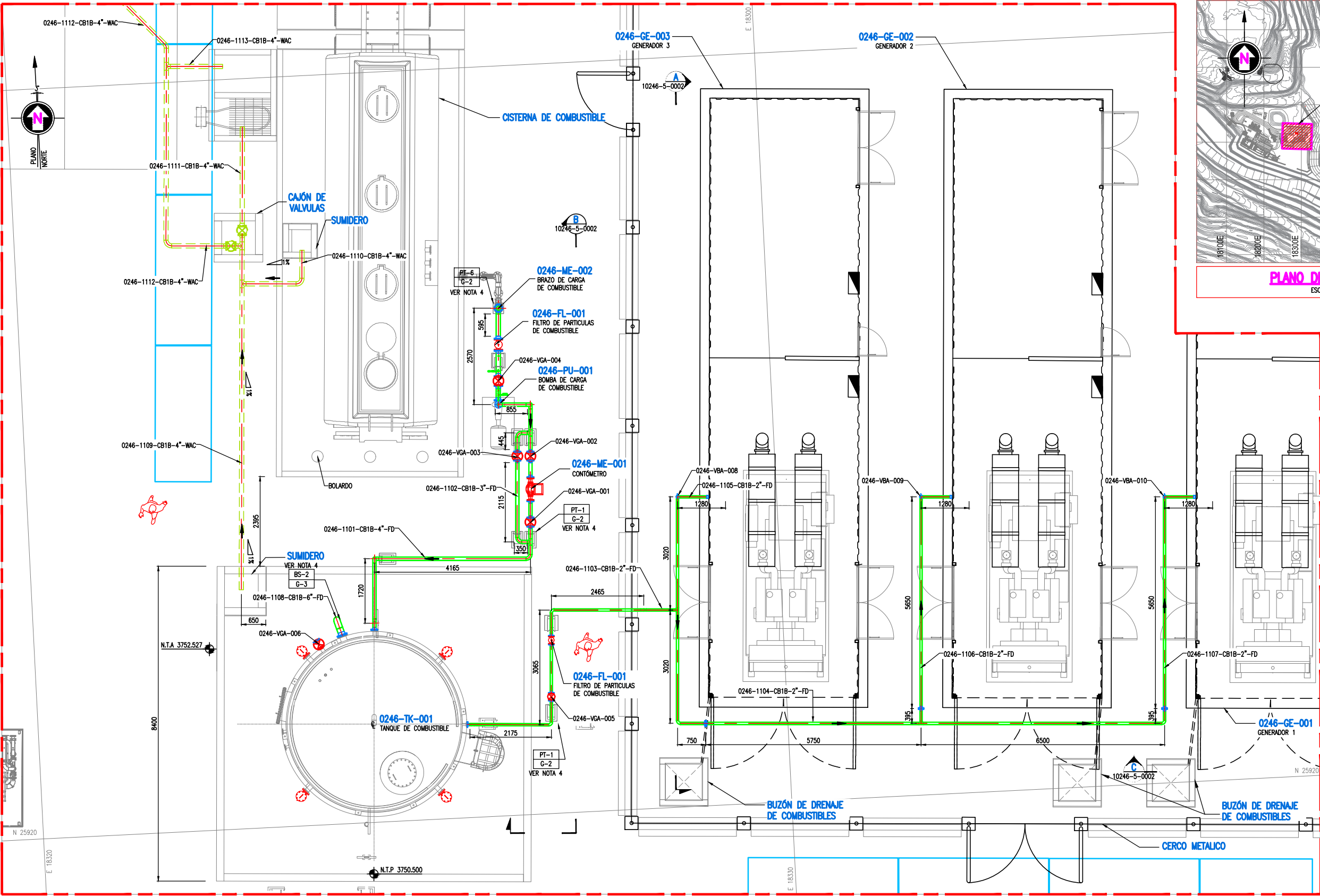
Anexo F: Diagramas PFD y Planos de Planta





DESCRIPCIÓN	ÍTEM	DÍAMETRO	UBICACIÓN	PROYECCIÓN	ÁNGULO
CONEXIÓN PARA TUBERÍA DE DESCARGA	N1	2"	250 mm	180	0°
CONEXIÓN PARA TUBERÍA DE LLENADO	N2	3"	4400 mm	180	90°
CONEXIÓN PARA TUBERÍA DE DRENAJE	N3	3"	250 mm	180	210°
CONEXIÓN PARA TUBERÍA DE REBOSE	N4	4"	4300 mm	180	225°
CONEXIÓN PARA CAMARA DE ESPUMA	N5	4"	4600 mm	180	315°
CONEXIÓN PARA VENTEO	N6	6"	TECHO	-	-
ENTRADA DE HOMBRE EN TECHO	N7	24"	TECHO	-	-
ENTRADA DE HOMBRE EN VIROLA	N8	24"	VIROLA	180	135°

DIBUJADO : K. DELGADO	FECHA : 29/11/23	TESIS UNI	
DISEÑADO : K. DELGADO	FECHA : 29/11/23		
REVISADO : K. DELGADO	FECHA : 29/11/23		
		MECÁNICA	
		TANQUE DE ALMACENAMIENTO SECCIÓN Y DETALLE	
		ESCALA: INDICADA	NÚMERO DE PLANO: 001
		REV.	0



PLANO DE UBICACIÓN
ESC. 1:5000

- NOTAS:
- 1.- TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILIMETROS (S.I.C.).
 - 2.- TODAS LAS ELEVACIONES Y COORDENADAS ESTÁN EN METROS (S.I.C.).
 - 3.- TOPOGRAFIA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE MYSRL DWG N° CHQUG_S4_INF_V28JUN21_Test Stope.v2 (POR CONFIRMAR).
 - 4.- VER ESTANDAR DE SOPORTES YANACOCCHA: MY-0000-5-00001_0 AL MY-0000-5-00007_0
 - 5.- LOS SOPORTES (TIPO, LONGITUD, Y UBICACIÓN) SERÁ VALIDADO POR EL CONSTRUCTOR PREVIO A LA FABRICACIÓN.
 - 6.- LOS NIVELES MOSTRADOS EN ESTE PLANO SON REFERENCIALES Y DEBERÁN SER VERIFICADOS AL MOMENTO DEL MONTAJE POR EL CONTRATISTA.

LEYENDA	
—	LÍNEA NUEVA
---	LÍNEA ENTERRADA

LEYENDA GRÁFICA	
N.T.P. :	NIVEL TOPE DE PLATAFORMA
N.T.C. :	NIVEL TOPE DE CONCRETO
N.T.A. :	NIVEL TOPE DE ACERO
B.O.P. :	NIVEL BAJO DE TUBERÍA
P.T. :	PUNTO DE TRABAJO

PLANTA
ESC. 1:50

DIBUJADO :	FECHA :
K. DELGADO	29/11/23
DISEÑADO :	FECHA :
K. DELGADO	29/11/23
REVISADO :	FECHA :
K. DELGADO	29/11/23

TESIS UNI	
MECÁNICA	
TANQUE DE ALMACENAMIENTO SECCIÓN Y DETALLE	
ESCALA:	NÚMERO DE PLANO:
INDICADA	001
REV.	A