



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA CÁMARA DE VACÍO PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS CON MATERIA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

LÓPEZ AGUIRRE RICARDO ESTEBAN

ricardo.lopez@epn.edu.ec

Director:

IRRIBARRA CAZAR ESTEBAN FELIPE

esteban.irribarra@epn.edu.ec

Codirector

SOTO AYMAR LUIS RICARDO

luis.soto@epn.edu.ec

Quito, noviembre 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de titulación "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA CÁMARA DE VACÍO PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS CON MATERIA" fue desarrollado por el señor RICARDO ESTEBAN LOPEZ AGUIRRE, bajo mi supervisión y ha sido revisado en su totalidad, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Escuela Politécnica Nacional, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor RICARDO ESTEBAN LOPEZ AGUIRRE para que lo sustenten públicamente.

Fis. Esteban Felipe Iribarra Cazar

DIRECTOR DEL PROYECTO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de titulación “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA CÁMARA DE VACÍO PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS CON MATERIA” fue desarrollado por el señor RICARDO ESTEBAN LOPEZ AGUIRRE, bajo mi supervisión y ha sido revisado en su totalidad, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Escuela Politécnica Nacional, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor RICARDO ESTEBAN LOPEZ AGUIRRE para que lo sustenten públicamente.

Ing. Luis Ricardo Soto Aymar.

CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, RICARDO ESTEBAN LÓPEZ AGUIRRE, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Ricardo Esteban López Aguirre.

DEDICATORIA

A mis padres Mario y Monika, por su apoyo incondicional y motivación diaria, por que creyeron en mí y porque supieron generar las palabras concretas que me sacaron adelante, enseñándome a siempre superarse y entregarse por los objetivos propuestos, porque gracias a esas enseñanzas, hoy puedo ver alcanzada mi meta, permitiéndome hoy alcanzar un gran paso en mi camino profesional, y por qué el sentimiento de orgullo ha sido el mayor impulso.

A mis hermanos por sus consejos y apoyo incondicional en todos los instantes de mi vida.

A mis tíos, primos, abuelos y amigos.

A mis tutores, por compartir sus conocimientos y permitir que este sueño sea una realidad

Gracias a todos por haber creado y plantado el deseo de superación y constante aprendizaje.

Mil palabras no serán suficientes para poder agradecer de todo corazón su apoyo, comprensión, paciencia y consejos.

A todos, dedico este trabajo.

Ricardo Esteban López Aguirre

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Politécnica Nacional, por ser cuna y fuente de conocimiento por acogerme como mi segundo hogar durante estos años de formación.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica, por formar profesionales competentes y en la cual no solo he adquirido conocimiento y habilidades.

A mi director, Esteban Irribarra, y a mi codirector Ricardo Soto, por proporcionarme sus conocimientos y soporte durante el desarrollo de este proyecto de titulación; no cabe duda de que son excelentes docentes y valiosos seres humanos.

A mis padres por todos sus consejos y apoyo para alcanzar una meta más en mi vida.

Asimismo, agradezco de todo corazón a mis hermanos y familiares que con cada consejo me indicaron lo orgulloso de tenerlos en mi vida y de lo que les puedo entregar por mejorar cada día más.

Agradezco a los todos docentes que implantaron todos los conocimientos para poder desarrollarme tanto en el ámbito personal como profesional en la Escuela Politécnica Nacional.

Ricardo López

TABLA DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
TABLA DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE de SÍMBOLOS	xii
RESUMEN.....	i
ABSTRACT	ii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Tipos de presión y vacío.....	4
1.2. El vacío.....	6
1.2.1. Alcances de vacío.....	6
1.3. Tanques y recipientes a presión.	7
1.3.1. Tanques a presión.....	7
1.3.2. Recipientes a presión.	7
1.4. Cámara de vacío	9
1.4.1. Medición del vacío.....	10
1.5. Clases de materiales para construcción de recipientes a presión.....	11
1.5.1. Aceros al carbón.....	11
1.5.2. Aceros de baja aleación.....	11
1.5.3. Aceros de alta aleación.....	11
1.5.4. Materiales no ferrosos.	11
1.6. Accesorios para cámaras de vacío	11

1.6.1. Bombas de vacío.....	11
1.6.2. Conectores de accesorios para cámaras de vacío.....	16
1.6.3. Tipos de cámaras de vacío.....	19
1.7. Códigos de diseño.....	21
1.7.1. Diseño de recipientes a presión según el código ASME sección VIII.....	21
1.7.2. Normativas para integridad mecánica en recipientes a presión.	22
2. METODOLOGÍA.....	23
2.1. Levantamiento de los requerimientos generales de la cámara.....	23
2.1.1. La casa de la calidad.....	23
2.1.2. Casa de la calidad del sistema cámara de vacío.	25
2.2. Especificaciones técnicas.....	25
2.3. Análisis funcional.....	26
2.3.1. Desarrollo de diagramas funcionales.....	26
2.4. Soluciones para cada módulo de funcionamiento.....	28
2.4.1. Módulo 1.- Sistema de contención de la presión de vacío.	29
2.4.2. Módulo 2.- Soporte de la cámara de vacío.....	31
2.5. Evaluación de las soluciones de los módulos.....	32
2.5.1. Módulo 1.- Sistema de contención de la presión de vacío.	32
2.5.2. Módulo 2.- Soporte de la cámara de vacío.....	33
2.6. Selección de los materiales.....	34
2.6.1. Proceso de selección de materiales.....	35
2.6.2. Ingeniería de la cámara.....	40
2.6.3. Especificaciones del diseño.....	41
2.7. Validación de la solución.....	45
2.7.1. Cálculos numéricos.....	46
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
3.1. Cálculo del cuerpo del recipiente y tapas en base a la presión interna.....	47
3.1.1. Cálculos preliminares.....	47
3.1.2. Presiones de funcionamiento.....	47

3.1.3. Cálculo del espesor.	48
3.1.4. Tamaño óptimo del recipiente.	50
3.2. Cálculo de esfuerzos generados por cargas internas y externas	51
3.2.1. Esfuerzos generados por el propio peso del recipiente.	51
3.2.2. Esfuerzos en los soportes.	54
3.2.3. Cálculo de las orejas de izaje	60
3.2.4. Dimensionamiento de las bridas en los recipientes a presión.	62
3.3. Cálculo de esfuerzos Von Misses	66
3.4. Diseño de la soldadura y juntas.	69
3.4.2. Cálculo de la soldadura	72
3.5. Pruebas en los recipientes a presión	74
3.6. Procesos de producción para la construcción de la cámara de vacío	74
3.6.1. Obtención de las partes y generación de planos de fabricación.	74
3.6.2. Ensamble de la cámara de vacío.	75
3.7. Verificación y validación del modelo por simulación.	75
3.7.1. Verificación de la simulación.	76
3.7.2. Validación de la simulación.	84
3.7.3. Tiempo de vaciado de la cámara.	85
3.7.4. Conexiones de tubería de la cámara de vacío.	86
3.7.5. Accesorios de la cámara de vacío.	88
4. CONCLUSIONES	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tipos de presiones.....	5
Figura 1.2. Tipos de vacío.....	7
Figura 1.3. Clasificación recipientes a presión.	8
Figura 1.4. Clasificación de los recipientes a presión por su forma.	9
Figura 1.5. Aplicaciones de las cámaras de vacío.	10
Figura 1.6. Funcionamiento y partes de una bomba de vacío.....	12
Figura 1.7. Tipos de bombas de acuerdo con su método de funcionamiento.	13
Figura 1.8. Rangos de funcionamiento de las bombas de vacío.	14
Figura 1.9. Tipos de bombas de vacío.	14
Figura 1.10. Tipos de bombas de vacío.	15
Figura 1.11. Representación diámetro nominal.....	16
Figura 1.12. Conexiones ISO-KF.....	17
Figura 1.13. Conexiones ISO-K.	17
Figura 1.14. Geometría conexión CF.....	18
Figura 1.15. Conexión Atornillada ISO-F.....	18
Figura 1.16. Tipos de cámaras con diferentes conexiones.....	20
Figura 1.17. Normas empleadas para el proceso de diseño de un recipiente a presión...22	
Figura 2.1. Casa de la calidad.	24
Figura 2.2. Nivel 0 del análisis funcional.	26
Figura 2.3. Primer modo de operación.....	27
Figura 2.4. Segundo modo de operación.	27
Figura 2.5. Nivel 2 del análisis funcional.	28
Figura 2.6. Posibles soluciones para el cuerpo de la cámara de vacío.	29
Figura 2.7. Alternativas para el diseño de tapas para el sistema.	30
Figura 2.8. Soluciones posibles para el soporte de la cámara.	31
Figura 2.9. Bosquejo, agrupación de las soluciones por cada módulo.	34
Figura 2.10. Materiales en diagrama Ashby.....	35
Figura 2.11. Diagrama de Ashby para la biblioteca de materiales.....	36
Figura 2.12. Gráfica de Ashby aplicada las consideraciones de la tabla 2.9.	38
Figura 2.13. Ampliación de la selección de materiales que cumplen con los requisitos. ...39	
Figura 2.14. Accesorios disponibles en el laboratorio con conexión en común.	41
Figura 2.15. Geometría de las paredes del recipiente de presión.	42
Figura 2.16. Geometría correspondiente a las tapas del sistema.....	43
Figura 2.17. Geometría para la unión de las tapas del recipiente a presión.	43
Figura 2.18. Geometría para la sección de sujeción.	43

Figura 2.19. Geometría para el módulo de sujeción de instrumentos.....	44
Figura 2.20. Goniómetro motorizado.....	44
Figura 3.1. Distribución de las secciones del recipiente a presión.....	50
Figura 3.2. Representación de valores para el cálculo de esfuerzos del sistema.....	55
Figura 3.3. Diagrama de cuerpo libre del sistema.	56
Figura 3.4. Diagrama de esfuerzo cortante.	56
Figura 3.5. Diagrama del momento flector	57
Figura 3.6. Disposición de medidas para el diseño de orejas de izaje.	61
Figura 3.7. Representación de cotas para una brida.....	63
Figura 3.8. Elemento aislado del tanque para cálculo de esfuerzos.....	66
Figura 3.9. Diagrama de cuerpo libre (Esfuerzos del tanque).	66
Figura 3.10. Localizaciones típicas de las uniones soldadas	70
Figura 3.11. Tipos de uniones soldadas.....	71
Figura 3.12. Representación de la soldadura para la cámara de vacío.....	72
Figura 3.13. Resultado de la simulación de los soportes, Tensiones.	76
Figura 3.14. Resultado de la simulación de los soportes, deformación.	77
Figura 3.15. Grafica de convergencia viga de soporte	77
Figura 3.16. Resultado de la simulación de las orejas de sujeción, Tensiones.	78
Figura 3.17. Resultado de la simulación de las orejas de sujeción, deformación.	79
Figura 3.18. Gráfica de convergencia simulación orejas de izaje.....	79
Figura 3.19. Resultado de la simulación del cuerpo del tanque, tensiones.	80
Figura 3.20. Resultado de la simulación del cuerpo del tanque, deformación.	81
Figura 3.21. Gráfica de convergencia conjunto cámara de vacío.....	81
Figura 3.22. Resultado de la simulación perforación brida ISO-100, tensiones.....	82
Figura 3.23. Resultado de la simulación perforación brida ISO-100, deformación.	83
Figura 3.24. Gráfica de convergencia correspondiente a la perforación del tanque.	83
Figura 3.25. Comportamiento del sistema con bombas de pre-vacio y vacío.....	86
Figura 3.26. Diagrama de conexiones bomba de pre-vacio.	87
Figura 3.27. Cámara de vacío ensamblada con una posible solución.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Factores de conversión de las unidades de medida de presión.	6
Tabla 1.2. Diferentes tamaños de bridas y su distribución.	19
Tabla 2.1. Nomenclatura para especificaciones técnicas.....	25
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de la cámara de vacío.....	26
Tabla 2.3. Criterios para la evaluación del módulo 1 (cuerpo de la cámara).	32
Tabla 2.4. Resultados del proceso para el módulo 1 (cuerpo de la cámara).	32
Tabla 2.5. Criterios para la evaluación del módulo 2 (tapa de la cámara).	33
Tabla 2.6. Resultados para la evaluación del módulo 2 (tapa de la cámara).....	33
Tabla 2.7. Criterios para la evaluación del módulo 3 (soporte de la cámara).	33
Tabla 2.8. Resultados para la evaluación del módulo 3 (soporte de la cámara).....	33
Tabla 2.9. Consideraciones para la selección de materiales.	37
Tabla 2.10. Propiedades mecánicas acero AISI 304.....	45
Tabla 2.11. Propiedades mecánicas acero ASTM A 36.	45
Tabla 2.12. Propiedades mecánicas PMMA.	45
Tabla 3.1. Parámetros para presión solicitada de diseño.	48
Tabla 3.2. Dimensiones para las orejas de izaje en pulgadas.....	61
Tabla 3.3. Resumen valores calculados para bridas DN40 ISO-KF y DN 100 ISO-K.	65
Tabla 3.4. Consideraciones para el mallado de los soportes de la cámara de vacío.....	76
Tabla 3.5. Consideraciones para el mallado de los soportes de la cámara de vacío.....	78
Tabla 3.6. Consideraciones para el mallado del cuerpo de la cámara de vacío.	80
Tabla 3.7. Consideraciones para el mallado del cuerpo de la cámara de vacío.	82
Tabla 3.8. Comparación valores calculados vs simulados	84
Tabla 3.9. Valores para el comportamiento de las bombas.....	86

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

δ =densidad del aire	E =eficiencia de soldadura
t =espesor de diseño.	D = diámetro interior=590 [mm].
r =Radio.	C =corrosión permitida=6,35 [mm].
g =gravedad	A =distancia optima de los soportes.
f =margen de diseño]	t = espesor.
e = espesor del sistema	S =esfuerzo máximo permitido del material.
c =ancho elipse.	P =presión de diseño.
b =longitud elipse.	θ = ángulo en contacto
a =ancho elipse.	h =altura.
V_{t_2} = Volumen de la sección cilíndrica.	E = factor de eficiencia de la soldadura
V_{t_1} = volumen de la sección 2.	D = diámetro interior
S =esfuerzo a la tensión del material del recipiente a presión.	t_s = espesor de diseño
R =radio interior del recipiente a presión.	t_{nom} =espesor nominal
R =radio exterior.	t_1 =espesor de la sección.
R =radio del exterior	m_t =masa total del sistema.
Q = carga de los soportes.	m_{aire} =masa total del aire.
P_a = presión aire.	k_1 =valor adimensional.
P_h = presión hidrostática.	S_t =esfuerzo a la tensión del material de la brida.
P =presion máxima de funcionamiento del tanque	S_{pi} =Esfuerzo por presión interna.
P = presión de diseño.	P_{atm} = presión atmosférica.
P_{o_1} = presión solicitada para el diseño.	K_4 =valor adimensional.
L =distancia entre las tangentes del sistema	h_a =altura de la capa de aire, equivalente al diámetro de la cámara.

RESUMEN

El objetivo de la investigación presente es diseñar y simular una cámara de vacío para el estudio de la interacción de partículas cargadas con materia. Se presenta como proyecto factible, proponiendo una solución a la construcción de cámaras de vacío dentro del país. Este estudio, presenta criterios de selección de módulos de operación y materiales. El cálculo de valores de diseño mecánico se realiza en base al código ASME sección VIII de diseño de recipientes a presión, por otra parte, la selección de materiales se ejecutó con el método gráfico de Ashby. Se verificó por medio de simulaciones, ejecutadas en SolidWorks, los comportamientos de los materiales bajo condiciones preestablecidas. También se propusieron soluciones a adoptar para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, basadas en el análisis de catálogos de proveedores. Como resultado final se presenta un modelo virtual de la cámara de vacío con todos sus elementos acoplados, incluyendo planos de fabricación y montaje.

Palabras clave: Diseño, simulación, cámara de vacío

ABSTRACT

The objective for the present investigation is design and simulate a vacuum chamber for the study of the interaction of charged particles with matter. It is presented as a feasible project, proposing a solution for the manufacturing of vacuum chambers in the country. This study presents selection criteria for: operation modules and materials. The mechanical design values calculation is taken from VIII section of ASME code, about pressure vessel design and the material selection is executed with the Ashby graphic method. The behavior of materials under pre-established conditions is verified by simulations executed in SolidWorks. Also proposed solutions to be adopted to guarantee the correct functioning of the system, based on the analysis of supplier catalogs. As a result of this work, a virtual model of the vacuum chamber with all its elements coupled including manufacturing and assembly drawing is presented.

Keywords: Design, simulation, vacuum chamber

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA CÁMARA DE VACÍO PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS CON MATERIA

INTRODUCCIÓN

Investigaciones científicas fundamentales requieren de equipos e instrumentos de última tecnología. Por ejemplo, para el estudio de la interacción de partículas cargadas con materia, se requiere la creación de ambientes con condiciones especiales. En este caso se requiere que la presión en el sistema sea baja de tal manera que el camino libre de un electrón al moverse en dicho ambiente crezca (Vokhmyanina et al., 2015).

Estos ambientes son creados por medio de bombas de vacío, siendo empleadas para la extracción de compuestos químicos no deseados dentro del sistema, proceso o producto. Las bombas de vacío poseen límites de presiones entre los cuales su funcionamiento es óptimo, por lo cual la evacuación de los sistemas de vacío se realiza en varias etapas, usándose para cada una de ellas un tipo diferente de bomba (Manrique, 2016). En esta investigación, se solicita emplear sistemas de pre- vacío y sistemas de vacío, teniendo en cuenta que la presión de trabajo para la cámara corresponda a un valor de 10^{-7} [Torr] ($1,33 * 10^{-5}$ [Pa]).

En muchas ocasiones requerimientos de investigaciones fundamentales han llevado a desarrollar la tecnología en áreas poco exploradas, lo que a su vez ha permitido encontrar nuevas aplicaciones que han transformado a la sociedad (radiación de sincrotrón, rayos X, la radioactividad entre otros) (Bachiller, 2019).

En el caso concreto del Ecuador, los escasos procedimientos, conocimientos y tecnología relacionada a la ingeniería mecánica de alto y ultra alto vacío retrasa el desarrollo de investigaciones fundamentales. En su defecto, causa que todos los instrumentos, equipos y accesorios sean importados dificultando la solución de problemas que afectan a los investigadores en relación con la seguridad, versatilidad, parámetros de funcionamiento entre otros.

El diseño, elaboración y comercialización de accesorios para cámaras de vacío, en la actualidad ecuatoriana, se encuentra resumido a importaciones. Considerando que: distintas compañías requieren de esta tecnología para aprovechar al máximo sus procesos y poder ofrecer un producto que cumpla con todas las necesidades del mercado y

exigencias de normas de calidad. Entre las industrias que requieren mejorar la calidad de sus productos y desempeño se presentan las siguientes:

- Alimenticia: permite la esterilización, pasteurización, deshidratación y congelamiento rápido de diferentes alimentos.
- Salud: esterilización de instrumental médico.
- Constructora: secado por vacío para la creación de concreto seco, con mayor dureza que el concreto común.
- Electrónica: creación de películas a base de sustratos implementadas en circuitos.
- Investigación: creando espacios de vacío para el estudio de un haz molecular o atómico moviéndose a altas velocidades.

Se considera que se impulsará a la transformación de la matriz productiva ecuatoriana con: la implementación de cámaras de vacío a procesos de fabricación de productos que en la actualidad se generan a presión ambiente, permitiendo fabricar productos terminados y hábiles para exportación. De esta manera, es posible un impulso en la matriz, tomando en consideración que la economía ecuatoriana se caracteriza por proveer al mercado internacional materia prima.

Ejemplos evidentes de la importación de cámaras de vacío, se pueden presentar con la empresa multinacional Multivac. Actualmente dispone de una sucursal en Ecuador, que oferta productos para almacenar implementos médicos, bienes industriales o productos alimenticios, en ambientes de vacío. Dicha empresa ratifica los beneficios del uso de vacío en este tipo de áreas productivas e indica que el soporte técnico está centrado en expertos radicados a nivel global (Multivac, 2019).

Objetivo general

Diseñar y simular una cámara de vacío para el estudio de la interacción de partículas cargadas con materia.

Objetivos Específicos

- Definir y analizar características esenciales de diseño relacionadas con la fabricación de la cámara de vacío.
- Identificar las diferentes conexiones solicitadas para el conjunto cámara de vacío.
- Plantear el sistema de tuberías para el bombeo permitiendo alcanzar la presión solicitada.
- Especificar materiales para la construcción de la cámara de vacío.

- Diseñar y simular una cámara de vacío capaz de tener una presión de trabajo de 10^{-7} [Torr].
- Generar planos de fabricación y determinar el equipamiento a utilizar para la construcción de la cámara.

Alcance

El presente trabajo de titulación se enfocará en estudiar las características de cámaras de vacío, diferentes presiones de trabajo, mecanismos para crear vacío y los diferentes estándares de sistemas de vacío. Como conocimientos aplicados al trabajo se presentan los siguientes:

1. Selección de materiales. - Permitiendo seleccionar la aleación óptima para la fabricación.
2. Mecánica de materiales. - Identificación de los esfuerzos y deformaciones a los cuales se someterán los elementos.
3. Dibujo mecánico. - ofreciendo planos de fabricación y montaje.
4. Diseño asistido por computadora (CAD). - presentando el sistema en un esquema virtual y evaluándolo por medio de una simulación.
5. Procesos y tipos de soldaduras. - permitiendo determinar electrodos a emplear y proceso de soldadura para su fabricación.
6. Conceptos de seguridad. - obteniendo un sistema confiable.
7. Manejo de normas. - logrando el cumplimiento de estándares internacionales y nacionales.

Así, el presente trabajo permitirá mostrar las diferentes opciones que un diseño mecánico ofrece, adaptándose a los requerimientos que se plantean, además de ofrecer un producto que cumpla con normas internacionales de seguridad y funcionamiento. Es importante recalcar que: el estudio en mención propone ofrecer una alternativa diferente a la importación de estos sistemas. Considerando que se entregará las herramientas necesarias para la fabricación local.

Finalmente, en el proyecto PIJ 16 03 se estudia la interacción de electrones con elementos dieléctricos. Para que esta investigación pueda ser llevada a cabo, es indispensable el diseño de una cámara de vacío en la cual se desarrollarán las investigaciones.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Tipos de presión y vacío

La presión, es una de las magnitudes empleadas dentro del área industrial. Esto es debido a que gracias a ella es posible determinar diferentes variables de proceso como: el nivel del fluido, flujo, velocidad, entre otras.

La presión puede clasificarse en dos grandes distribuciones:

- a) Presión relativa. – adquiere como punto de referencia la presión atmosférica.
- b) Presión absoluta. – el punto de referencia se establece en el cero absoluto de presión.

Las presiones que poseen una magnitud mayor a la presión atmosférica son más fáciles de comprender tomando el concepto: “la presión ejercida sobre un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza aplicada e inversamente proporcional al área en contacto” $(P = \frac{F}{A})$ (Mott, 2006). En tanto que las presiones que bordean la atmosférica y presiones debidas a un fluido en reposo, adquieren el concepto de presión hidrostática definiéndose como: el resultado de la multiplicación de densidad, la gravedad y la altura $(P = \rho * g * h)$ (Mott, 2006). Adicional se presenta la presión de gas y vacío absoluto relacionada con la ley de gases ideales. $(P = n * R * \frac{T}{V})$ (Gutiérrez, 2002).

Tomando en cuenta las consideraciones de presión descritas en el párrafo anterior, la presión puede adoptar diferentes contextos. Los cuales se detallan a continuación:

- **Presión atmosférica.** - presión ejercida por los gases que rodean la tierra (atmosfera). Esta presión es inversa a la altitud “A una mayor altitud, menor presión atmosférica”.
- **Presión atmosférica normalizada.** – magnitud definida a condiciones normalizadas, adopta un valor exacto de 101,325 [kPa] (760 [Torr]). La presión nombrada, se encuentra presente en el nivel del mar, con humedad relativa del 65%, densidad del aire $1,2 \frac{kg}{m^3}$ y temperatura ambiente de 20 [°C].
- **Presión barométrica.** – identificada como la presión atmosférica corregida por la altitud geopotencial local, misma que varía en contorno de la presión atmosférica normalizada.
- **Presión relativa normalizada.** – esta presión se la conoce también con el nombre de presión a referencia constante, su magnitud es referenciada con la presión atmosférica.

- **Presión diferencial.** – presión obtenida de la diferencia entre dos presiones $A - B$.
Como ejemplo se puede referenciar a: presión relativa y vacío relativo.

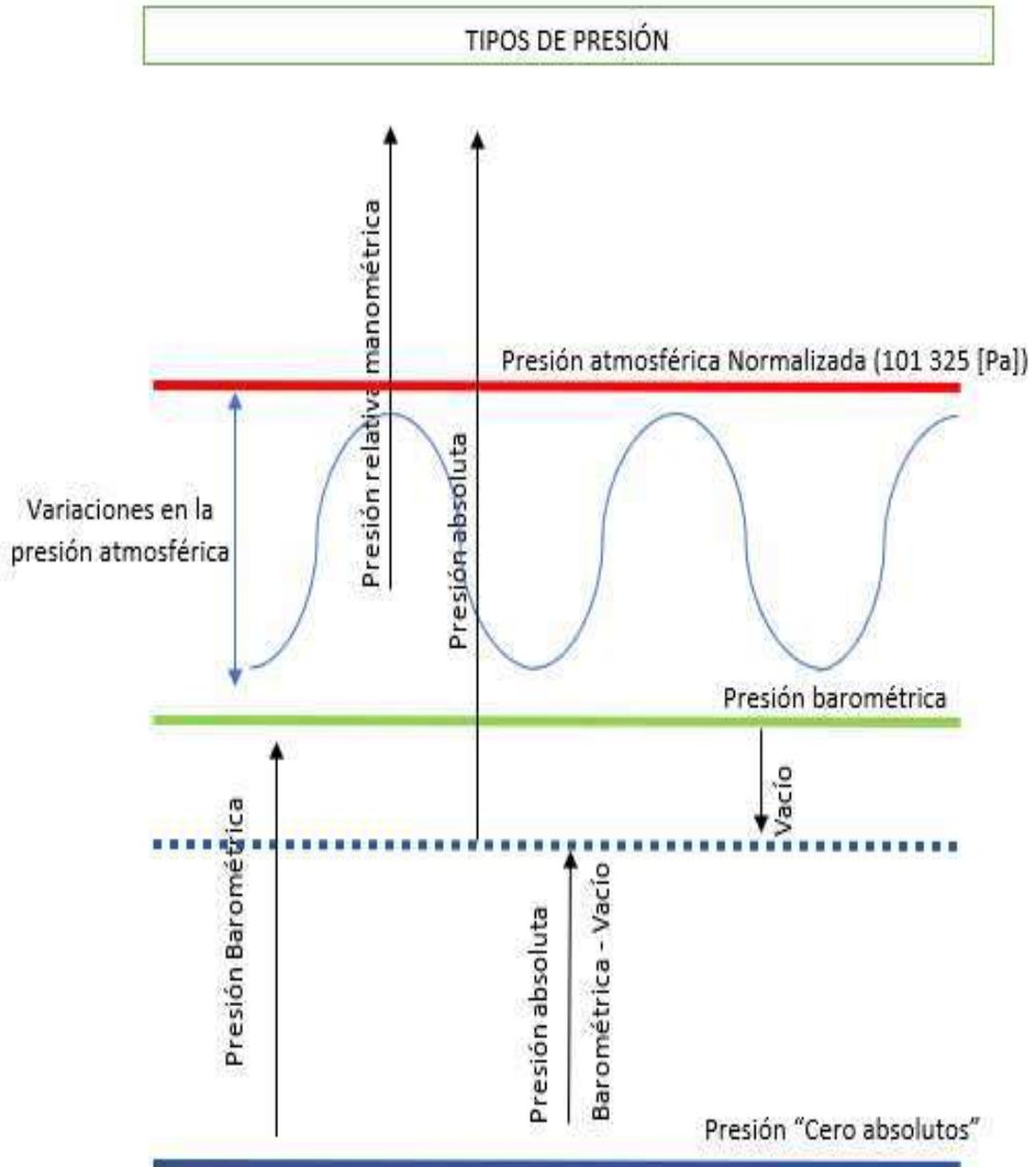


Figura 1.1. Tipos de presiones.

Fuente: (INEN, 2019)

A continuación, en la tabla 1.1, se presentan algunas transformaciones importantes a tomar en cuenta:

Tabla 1.1. Factores de conversión de las unidades de medida de presión.

	mbar	bar	torr	psi	atm	Pa
mbar	1	0,001	0,75	0,0145	0,000987	100
bar	1000	1	750	14,6	0,987	100000
torr	1,33	0,00133	1	0,0192	0,001316	133,32
psi	68,9	0,0689	51,7	1	0,068	6897
atm	1013,25	0,981	735,6	14,696	1	101325
Pa	0,01	0,00001	0,0075	0,000145	0,000987	1

Fuente:(López, 2018)

1.2. El vacío

Se denomina vacío al entorno de un espacio, donde la densidad de las partículas es menor a lo normal. Como es el caso del espacio o tanques de almacenamiento con presión del fluido interior menor a la presión atmosférica (López, 2018).

1.2.1. Alcances de vacío

Entre las diferentes presiones que se consideran dentro de la clasificación del vacío, se enuncia los diferentes siguientes conceptos:

- **Vacío relativo.** - (gauge vaccum) (G.V.) es conocida como presión negativa o vacío negativo. Esta presión posee una magnitud inferior a la presión atmosférica local.
- **Cero absolutos.** – caso teórico caracterizado por tener una ausencia total de moléculas.
- **Vacío absoluto.** – zona de vacío en la cual se toman las dimensiones respecto al cero absoluto, considerándolo una presión absoluta de fluido.
- **Bajo vacío.** - (low vaccum) (L.V.) presión absoluta de fluido con un rango de 100 [kPa] a 100 [Pa].
- **Medio vacío.** – (médium vaccum) (M.V.) presión absoluta de fluido con un rango de 100 [Pa] a 0,1 [Pa].
- **Alto vacío.** – (high vaccum) (H.V) presión absoluta de fluido con un rango de 0,1 [Pa] a 10 [μ Pa].
- **Ultra alto vacío.** – (ultra high vaccum) (U.H.V) presión absoluta menor a 10 [μ Pa].

En la figura 1.2, de color rojo se evidencia la zona con la cual se diseñará la cámara de vacío (Alto vacío). Además, se gráfica los alcances del vacío.

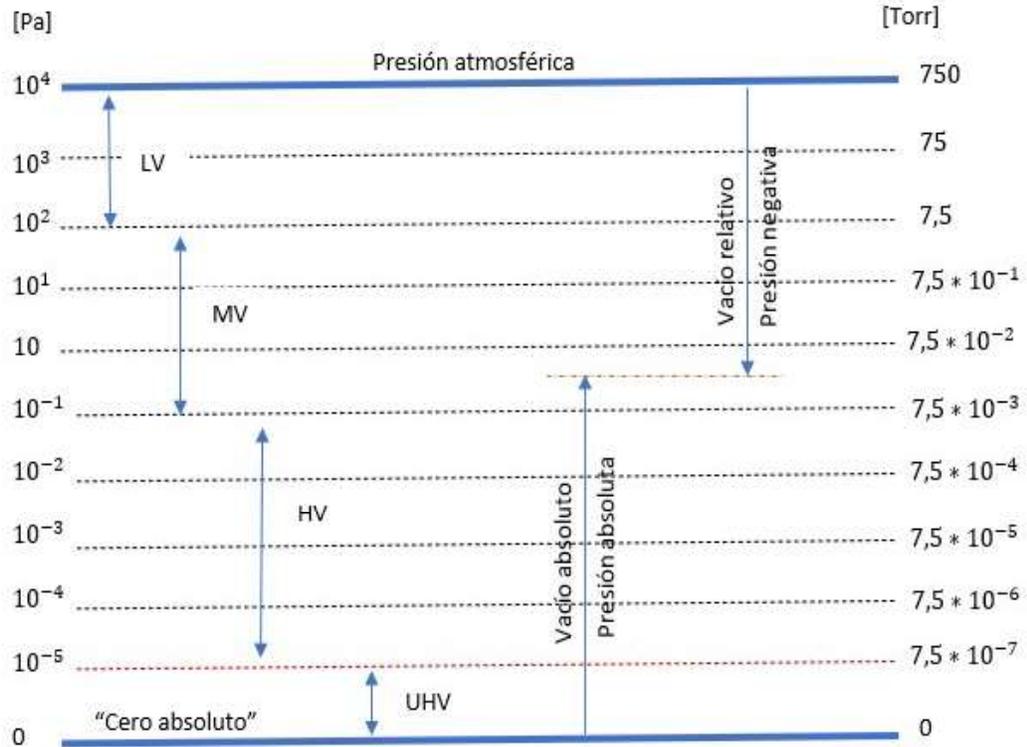


Figura 1.2. Tipos de vacío.

Fuente: (Diaz, 2018)

1.3. Tanques y recipientes a presión.

1.3.1. Tanques a presión.

Son depósitos que cumplen con la condición de procesar o almacenar fluidos, en lo normal se encuentran a presión atmosférica o presiones relativamente bajas.

Un tanque de almacenamiento se diseña con la intención de trabajar con presiones desde la atmosférica hasta de 1,0 [psig] (108,21 [kPa]), tomando como referencia el tope del tanque. Este tipo de tanques no podrán utilizarse para el almacenamiento de líquidos los cuales se encuentren a temperaturas iguales o mayores a su punto de ebullición (Diaz, 2018).

1.3.2. Recipientes a presión.

Los recipientes o contenedores a presión se encuentran instalados en diferentes tipos de industrias modernas, comenzando con pequeños compresores de aire, recipientes para la industria alimenticia y hasta reactores para procesos químicos en: campos petroleros, centrales eléctricas y nucleares. Otra utilización actual es el uso de estos sistemas en procesos de calefacción, refrigeración de aire, oxígeno, acetileno etc. (Massa Julio, 2015).

La función principal de un recipiente a presión, caracterizado por ser un recipiente cerrado, es soportar líquidos o gases almacenados a una presión interna o externa que difiera en una magnitud considerable a la presión atmosférica. Se diferencia de un tanque debido a la presión sometida (Román, 2008).

1.3.2.1. Tipos de recipientes a presión.

Los recipientes a presión pueden verse clasificados por la forma en la cual se presentan o por el uso de acuerdo con la figura 1.3. Para el caso de estudio actual, el sistema se adhiere a la clasificación de cilíndrica – horizontal (resaltada de color rojo).

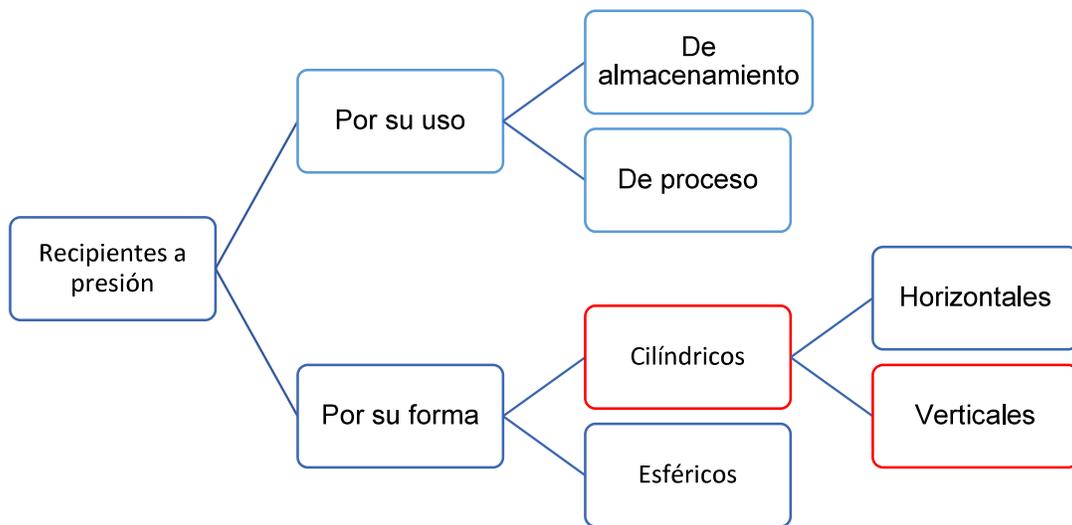


Figura 1.3. Clasificación recipientes a presión.

Fuente: (Román, 2008)

1.3.2.2. Clasificación de los recipientes acuerdo con su uso.

Según el uso del recipiente a presión se puede dividir a los recipientes de presión en dos tipos: recipientes de proceso y recipientes de almacenamiento.

La funcionalidad de los recipientes de almacenamiento es: mantener de fluidos a presiones establecidas y controladas.

Los recipientes de proceso son conjuntos con los cuales se realizan acciones relacionadas con intercambiadores de calor, procedimientos de reacción, torres de fraccionamiento, torres para destilar, entre otros (Diaz, 2018).

1.3.2.3. Clasificación de los recipientes acuerdo con su forma.

En la figura 1.4 se muestra la clasificación de los recipientes tomando en consideración la forma con la que se fabricaron. Se puede observar que la cámara de vacío que se desea construir pertenece a la clasificación de recipientes horizontales (resaltado con rojo). Además, en la figura 1.4 se presentan características dominantes en cada tipo.

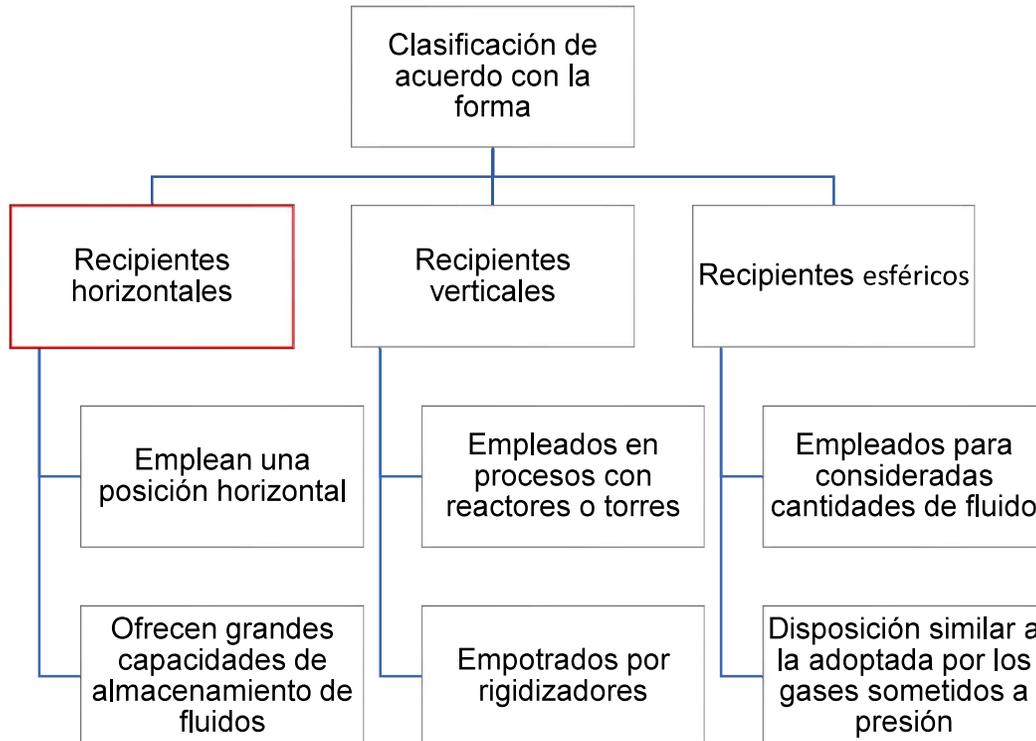


Figura 1.4. Clasificación de los recipientes a presión por su forma.

Fuente: (Román, 2008)

1.4. Cámara de vacío

Una cámara de vacío se define como: un recipiente compuesto por paredes rígidas, del cual se extrae mediante bombas de vacío aire y otro tipo de gases. La baja presión que resulta de este proceso es conocida con el nombre de vacío.

Las cámaras en general poseen varias compuertas cubiertas con bridas las cuales permiten que los instrumentos o dispositivos sean instalados en las diferentes caras de la cámara, acoplándose de esta manera a la aplicación que se le designe.

Entre las múltiples funciones que presenta el estado de vacío, se resaltan las explicadas en la figura 1.5.

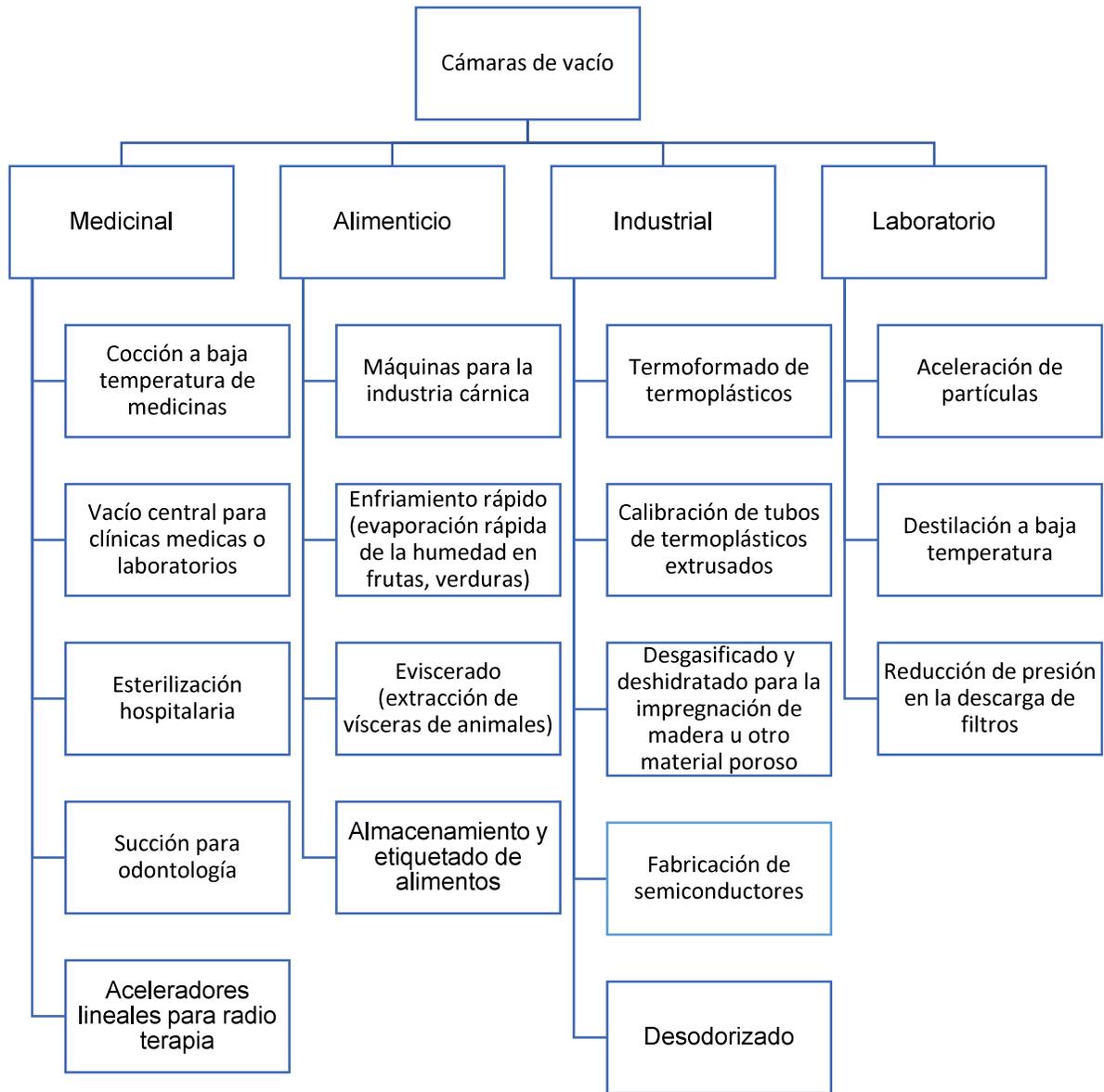


Figura 1.5. Aplicaciones de las cámaras de vacío.

Fuente: (VEQ, 2015)

1.4.1. Medición del vacío.

Para cuantificar las magnitudes de presión se pueden emplear varios instrumentos. Principalmente se dividen en tres categorías:

- Manómetros de membrana: por medio de deformación de diafragma o de membrana, empleados para vacíos bajos.

- Manómetros térmicos: miden la conductividad térmica de los gases, empleados para vacíos medios.
- Manómetros de ionización: magnifican el grado de ionización del gas, empleados para alto vacío y ultra alto).

(Departamento de Física Ciudad Universitaria, 2019)

1.5. Clases de materiales para construcción de recipientes a presión

1.5.1. Aceros al carbón.

Este tipo de acero es el más común y económico en el mercado. Es recomendado para recipientes en los cuales no exista presiones ni temperaturas altas (Malo, 2013).

1.5.2. Aceros de baja aleación.

Este tipo de materiales presenta porcentajes mínimos de elementos como el: níquel, cromo, etc. Este tipo de material no es considerado como resistente a la corrosión, pero poseen una alta resistencia mecánica para temperaturas elevadas (Malo, 2013).

1.5.3. Aceros de alta aleación.

Comercialmente son conocidos como aceros inoxidable. Su costo comúnmente es más elevado que el resto de los materiales mencionados. Una de las grandes virtudes de este material es retardar el proceso de corrosión , permitiendo que los elementos tengan una mayor vida útil (Malo, 2013).

1.5.4. Materiales no ferrosos.

El objetivo de la implementación de este tipo de materiales es: poder contener y almacenar sustancias con un nivel de corrosión elevado. Dentro de la industria alimenticia es empleado este material, proveyendo: tenacidad para servicios a baja temperatura y sanidad del sistema (Malo, 2013).

1.6. Accesorios para cámaras de vacío

Los sistemas de vacío emplean diferentes accesorios para el desarrollo correcto, seguro y fácil manejo para el operador (Schmalz, 2019).

1.6.1. Bombas de vacío.

La bomba de vacío fue inventada en el año 1650 por Otto Von Guericke, incentivado por trabajos realizados por Galileo y Torricelli, empleando las teorías de los hemisferios de Magdeburgo (Humbert, 2015).

Las bombas de vacío son dispositivos electromecánicos cuya función es extraer moléculas de gas de un recipiente cerrado (Malo, 2013).

El trabajo de las bombas de vacío se resume a un rango limitado de presiones; debido a esto, la eliminación de fluidos se realiza en varias etapas. Estos dispositivos de vacío presentan dos presiones de trabajo, una mínima que es la presión más baja que se puede obtener y también una superior a la salida o presión previa. Si la presión sobrepasa el valor máximo, la bomba cesa en su actividad (López, 2018).

1.6.1.1. Funcionamiento de las bombas de vacío.

El funcionamiento se resume en el proceso para la extracción de aire o gas de un recipiente. Este proceso se logra en base a una bomba rotatoria. La bomba rotatoria se compone de un cilindro excéntrico y dos paletas, como se puede visualizar en la figura 1.6. El giro de las paletas genera una diferencia de presión entre el área exterior e interior del sistema, permitiendo que el aire que se encuentra en el interior de la cámara de vacío sea extraído. Posteriormente el movimiento empuja el aire hacia una salida. (Humbert, 2015)

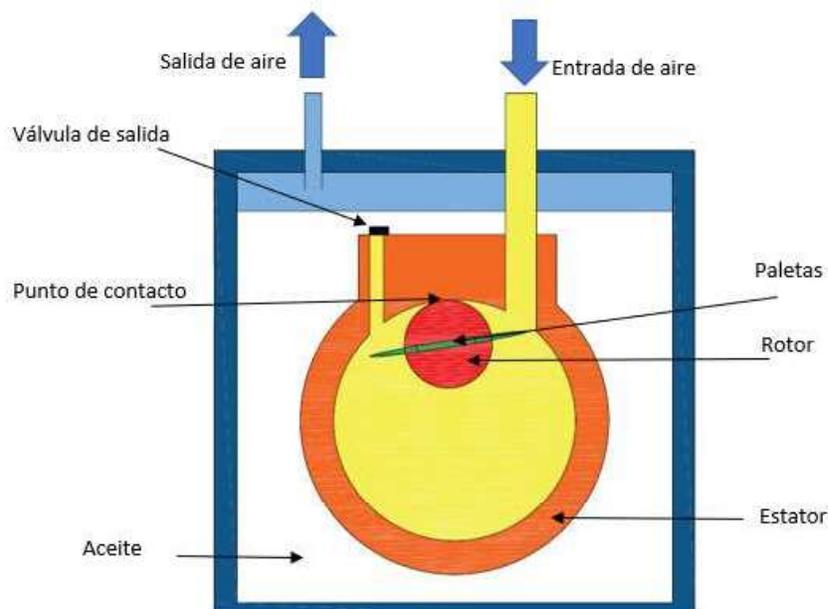


Figura 1.6. Funcionamiento y partes de una bomba de vacío

Fuente: Propia

Entre las partes principales de una bomba de vacío, se puede enumerar las siguientes:

1. Tubo de succión: es el conducto por el cual ingresan los gases a la bomba.
2. Rotor: eje por el cual las paletas se encuentran conectadas.

3. Paletas: generan la diferencia de presión y empujan el aire hacia el exterior.

4. Tubo de descarga: es el conducto por el cual los gases se expulsan.

1.6.1.2. Tipos de bombas de vacío.

En el mercado actual, se puede encontrar diversos tipos de bombas de vacío en función de la tecnología que usan y el vacío final que alcanzan. Estos tipos de bombas operan por medio de mecanismos de transferencia o captura de gas.

En la figura 1.7, pintada de color rojo, se encontrará la bomba rotativa de paletas; que se empleará en el sistema de cámara de vacío, considerando que es un accesorio que ya se dispone en el laboratorio del departamento de Física.

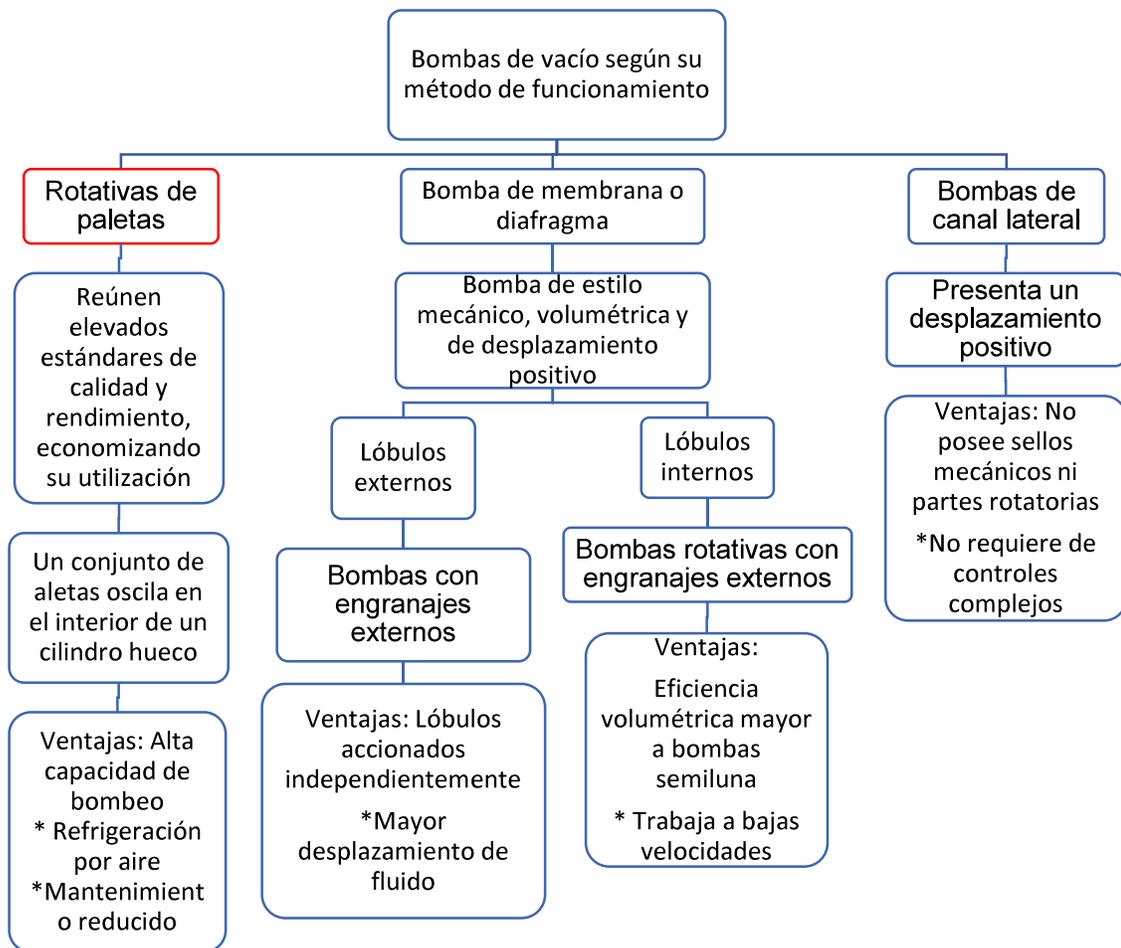


Figura 1.7. Tipos de bombas de acuerdo con su método de funcionamiento.

Fuente: Propia.

1.6.1.2.1. Clasificación de las bombas de vacío.

Dependiendo de la aplicación y de los factores ambientales, las bombas de vacío pueden clasificarse en 3 tipos. Descritos en la figura 1.8.

Bombas de vacío sin aceite	Bombas de vacío con aceite	Bombas combinadas de canal lateral
<ul style="list-style-type: none"> • Presentan un diseño con paletas móviles y camisas, que modifican su tamaño de acuerdo con la posición. • La presión aumentara cuando disminuya el volumen de la cámara. • Consiguen niveles de vacío de hasta 100 mbar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento similar a las bombas sin aceite. • El aceite aplicado consigue mayor estanqueidad en las cámaras. • Mayores niveles de diferencia de presión que las bombas que utilizan aceite. 	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestas por una turbina de aspas inclinadas dentro de un canal cerrado. • El sistema permite conseguir mayores caudales de trabajo a comparación que las bombas de paletas.

Figura 1.9. Tipos de bombas de vacío.

Fuente: Propia.

1.6.1.2.2. Aplicaciones de las bombas de vacío.

Las aplicaciones de las bombas de vacío son varias. Según la función y la presión de trabajo, se las puede identificar de acuerdo con la figura 1.9 (Schmalz, 2019).

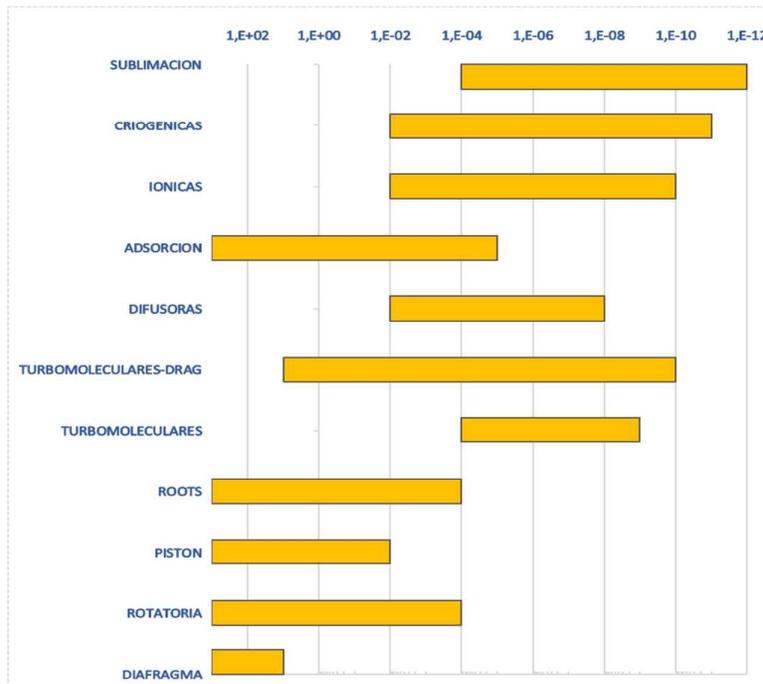


Figura 1.8. Rangos de funcionamiento de las bombas de vacío.

Fuente: Propia.

En la figura 1.10, se presenta una distribución de bombas empleadas en la generación de vacío. En la segunda columna se describe a la bomba, en la tercera columna, se describe las ventajas de la bomba y en la última columna se presentan las respectivas desventajas.

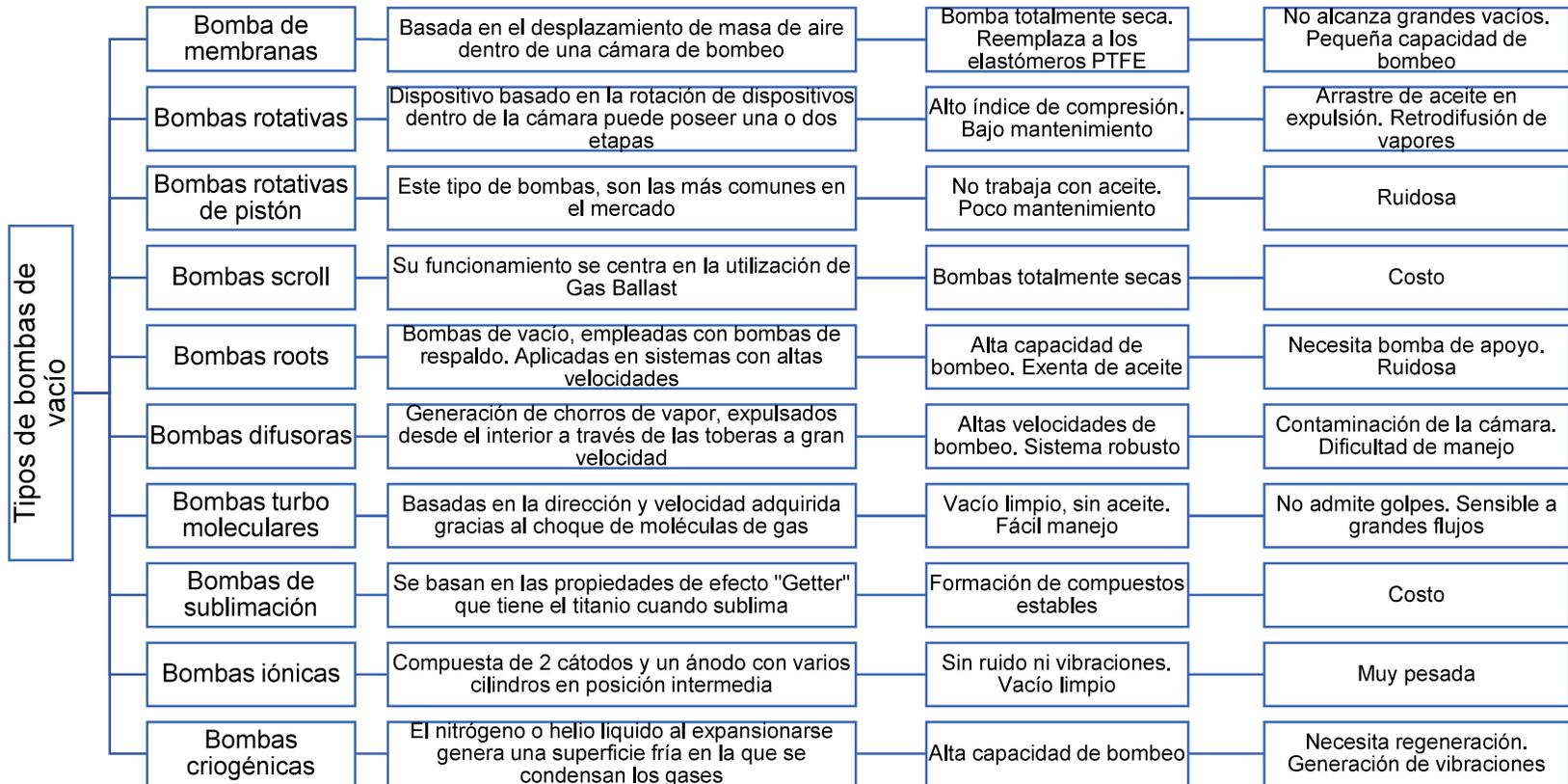


Figura 1.10. Tipos de bombas de vacío.

Fuente: Propia.

1.6.2. Conectores de accesorios para cámaras de vacío.

Entre los principales accesorios de conexión, se presentan componentes de vacío como: bridas, reducciones, flexibles, codos, colectores y pasamuros.

Existen varias alternativas para elementos de conexión de los componentes de vacío. La selección adecuada del tipo de conexión a emplearse en el sistema, depende de: relación efectividad, complejidad en la instalación o desmontaje, calidad del material, estanqueidad o la disponibilidad dentro del mercado (Leybold Hispánica, 2018).

Dentro de la amplia gama de productos, se presenta el concepto de diámetro nominal (DN). Este término refiere a la magnitud del diámetro interior de un tubo. En base a la norma ISO 6708; la abreviatura DN acompañada de un número adimensional refiere al diámetro interno de la tubería en [mm] (Bochen, 2019).

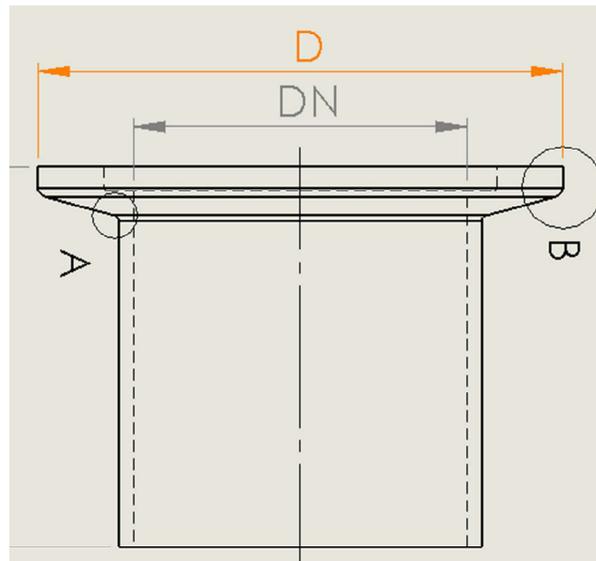


Figura 1.11. Representación diámetro nominal.

Fuente: Propia.

Entre las conexiones estándar establecidas, se enumeran las siguientes:

1.6.2.1. Conexiones ISO-KF.

Este tipo de conexión permite un rápido montaje y reemplazo de componentes en sistemas de vacío. Consta de dos bridas simétricas ISO-KF (1), un anillo de centrado (2) y un anillo de sujeción (3). Empleado en operaciones en las cuales se requiere de alto vacío. Las conexiones ISO-KF se pueden aplicar sin el uso de herramientas. El ajuste se realiza simplemente girando la tuerca mariposa del anillo de sujeción (Aerlinkon, 2016).

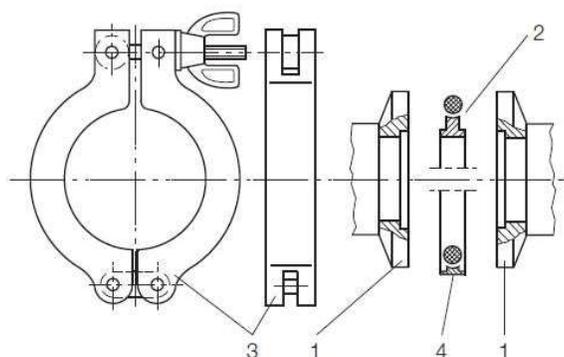


Figura 1.12. Conexiones ISO-KF.

Fuente:(Aerlinkon, 2016)

1.6.2.2. Abrazadera ISO-K.

La conexión de bridas por sujeción, según las normas: DIN 28404 e ISO1609, permite acoplar componentes de DN63 a DN630. Este tipo de enlace se compone de dos bridas de sujeción (1), un anillo de centrado (2) y varias abrazaderas (3) que permiten que la conexión sea montada y apretada. Dado que el anillo de centrado puede ser firmemente insertado en el centro de la ranura de la brida, las conexiones son rápidas y fáciles de aplicar (Aerlinkon, 2016).

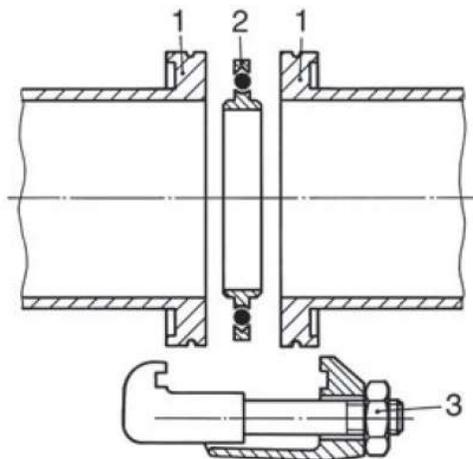


Figura 1.13. Conexiones ISO-K.

Fuente: (Aerlinkon, 2016)

1.6.2.3. Bidas y componentes CF.

La conexión de brida CF, consta de dos bridas geoméricamente idénticas con una junta plana hecha de cobre, pernos, tuercas y arandelas. Los componentes CF están hechos de aceros inoxidable seleccionados y resistentes a la corrosión.

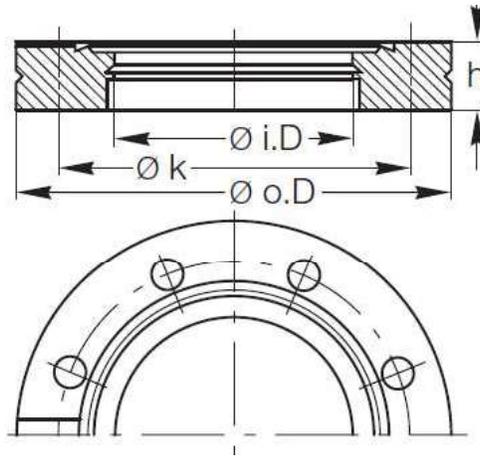


Figura 1.14. Geometría conexión CF.

Fuente:(Aerlinkon, 2016)

1.6.2.4. Conexión atornillada ISO-F o DIN.

La conexión por medio de pernos atornillados (ISO-F), incorpora dos placas externas a la brida, con sus respectivas perforaciones, un anillo de centrado y un perno con su correspondiente tuerca. Las bridas de sujeción pueden presentar placas soldadas fijas (ISO-F o DIN). Esta conexión es empleada en la ingeniería de vacío para interconectar válvulas, bombas y otros componentes.

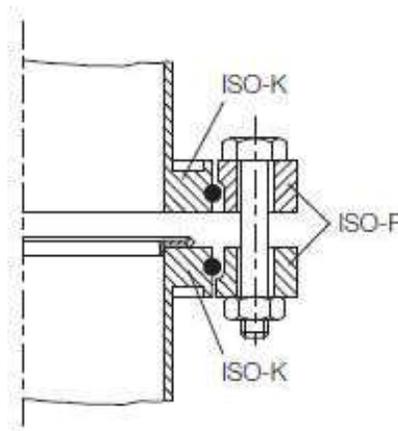


Figura 1.15. Conexión Atornillada ISO-F.

Fuente: (Aerlinkon, 2016)

En la tabla 1.2, se presenta un resumen de la utilización de estándares según el tamaño de brida deseado.

Tabla 1.2. Diferentes tamaños de bridas y su distribución.

Tipo	DN								
	10	16	25	40	50	63	100	160	200
ISO-KF	*	*	*	*	*				
ISO-K						*	*	*	*
ISO-F						*	*	*	*
CF		*	*	*	*	*	*	*	*

Fuente: (Cryovac, 2012)

1.6.2.4.1. Material de las conexiones.

Los accesorios tipo brida se fabrican según la norma ISO 1609 o DIN 28404. Son componentes de vacío estándar para todas las líneas de vacío y alto vacío (Inficon, 2019).

Además de bridas también se disponen de accesorios importantes para el funcionamiento óptimo de una cámara de vacío, como son:

- Reducciones de vacío. - permiten la conexión de accesorios cuando existe una variación de diámetro entre los mismos.
- Flexibles de vacío. - tubería construida mediante una malla flexible, permite conectar accesorios que se encuentran a longitudes mayores a 1 [m].
- Codos de vacío de 90 °. - accesorios que facilitan la conexión de accesorios cuando se solicita un tramo curvado.
- Conectores de vacío en T y en cruz. - elementos que permiten una distribución de conexiones o fluidos.
- Pasamuros de vacío ópticos, mecánicos y eléctricos. - Capaces de generar una manipulación de los artículos dentro de la cámara de vacío.

1.6.3. Tipos de cámaras de vacío.

Las cámaras de vacío pueden identificarse según su forma y disposición de conexiones.

En la figura 1.16, se presenta las formas más comunes de esta clasificación. El sistema que se diseñara encaja en la clasificación de cámaras mixtas, resaltada con rojo

En la segunda columna de la figura 1.6. se describe a los tipos de cámaras. En la tercera columna una subclasificación de las cámaras y en la cuarta columna las ventajas de la cámara correspondiente.

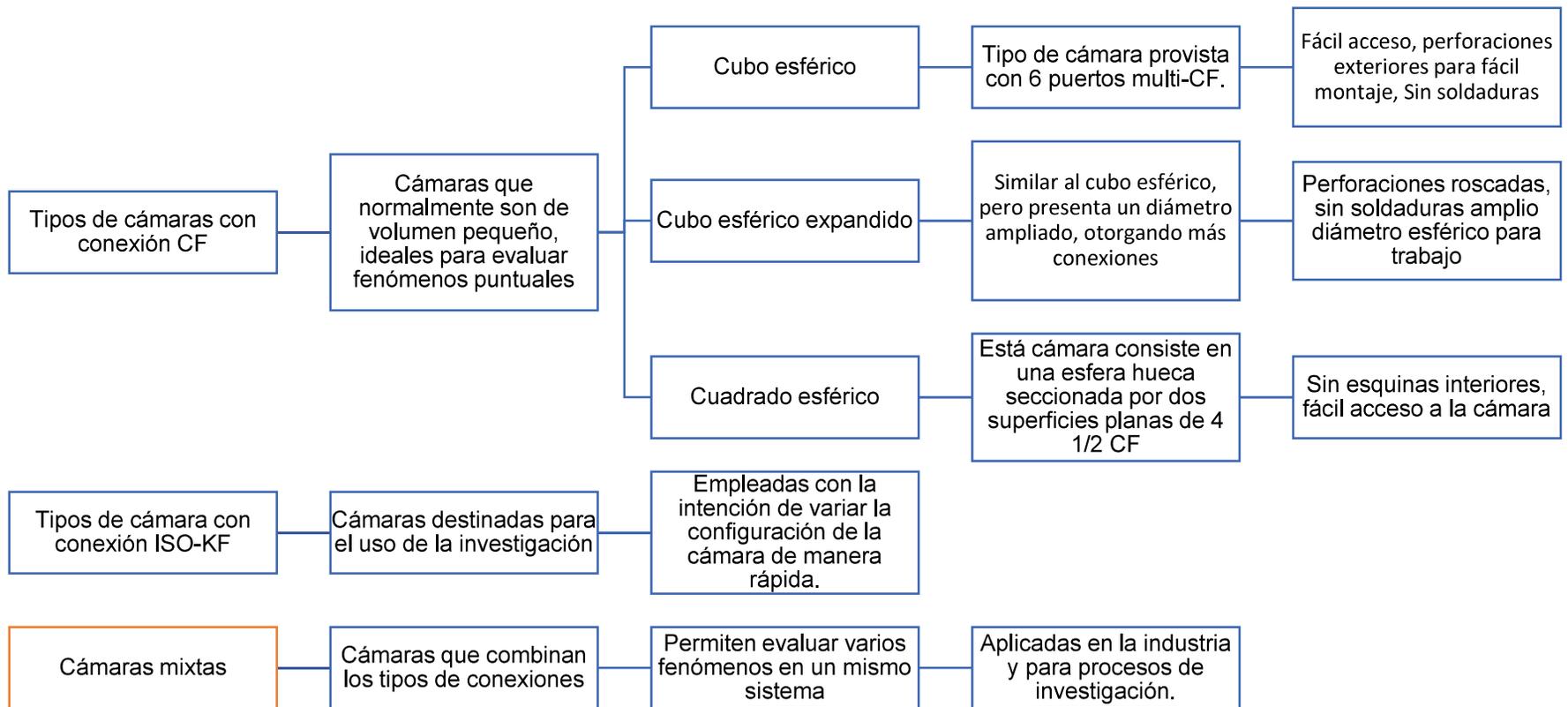


Figura 1.16. Tipos de cámaras con diferentes conexiones.

Fuente: Propia.

1.7. Códigos de diseño

El objetivo de emplear los códigos de diseño es evitar contratiempos que puedan afectar a seres humanos o a los materiales del sistema. Por lo cual, dichos códigos reúnen una serie de experiencias y buenas prácticas.

Es cierto que en la actualidad existen varias normas que son de aplicación y elaboradas por países con reconocida capacidad técnica en el tema. Para el estudio de cámaras de vacío, se tomará como referencia el código que reúne todos los criterios de diseño: "SECTION VIII PRESSURE VESSEL, BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE" generado por la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos ("AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME).

Luego de lo mencionado, los códigos utilizados para recipientes de presión dependiendo la región son:

- Europa: EN-13445.
- Alemania: A.D Merkblatt Code.
- China: GB-150.

Entre las diferentes reglas que incluyen estos códigos, resaltan ciertos requerimientos como son:

- Utilización del Know-how y tecnología.
- Reducción del costo.
- Transmisión de los requerimientos del diseño.

1.7.1. Diseño de recipientes a presión según el código ASME sección VIII.

La normativa en mención se encuentra caracterizada por tres subsecciones y apéndices obligatorios. Las subsecciones son:

- A) General.
 - Requerimientos.
- B) Métodos de fabricación.
 - Recipientes soldados.
 - Recipientes forjados.
 - Recipientes soldados por soldadura tipo brazing.
- C) Materiales.
 - Aceros al carbono y de baja aleación.
 - Materiales no ferrosos.

- Aceros de alta aleación.
- Aceros ferríticos aplicadas un tratamiento térmico.

Los fundamentos y principales consideraciones de la división A, se encuentran aplicados a recipientes que poseerán una presión máxima de 19,61 [MPa], si se dispone de presiones que sobrepasaran esta magnitud, es necesario complementar las especificaciones con las reglas de diseño para altas presiones.

1.7.2. Normativas para integridad mecánica en recipientes a presión.

En la tabla a continuación, se presentan las diferentes normas empleadas para recipientes a presión. Iniciando desde el diseño hasta norma de fractura y adecuación (Manrique, 2016).

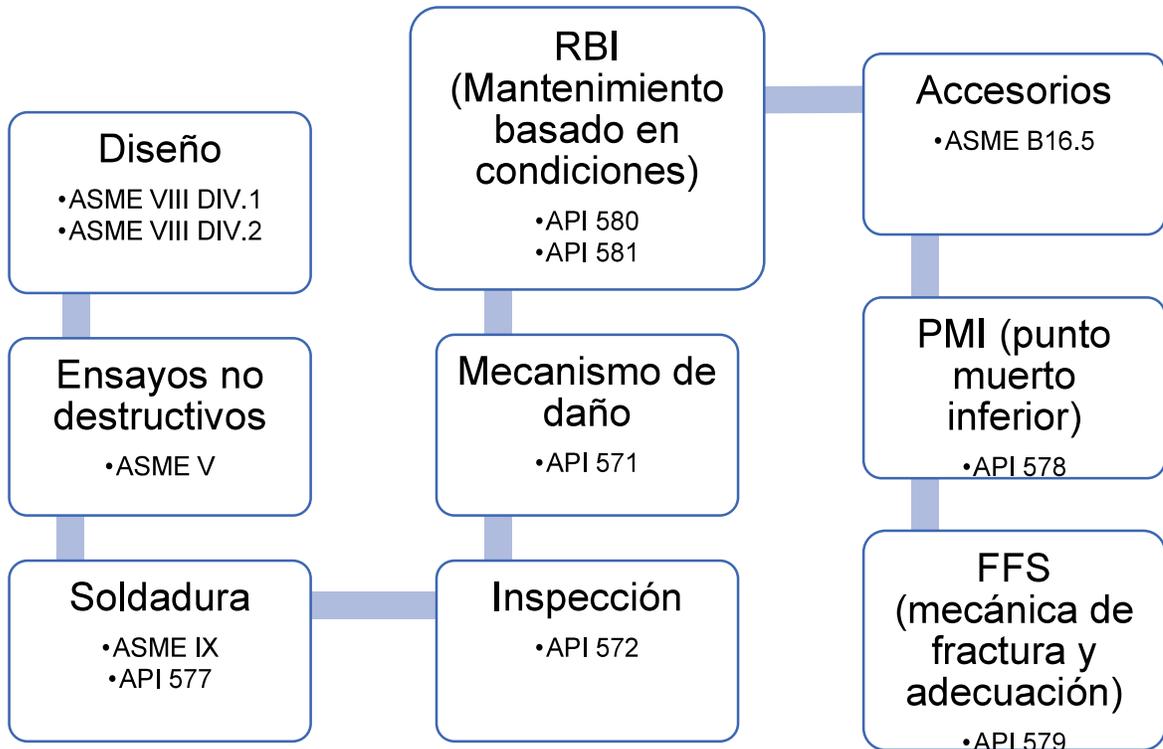


Figura 1.17. Normas empleadas para el proceso de diseño de un recipiente a presión.

Fuente: Propia

2. METODOLOGÍA

2.1. Levantamiento de los requerimientos generales de la cámara

2.1.1. La casa de la calidad.

La casa de la calidad se encuentra estructurada por matrices que: facilitan el desarrollo en función de la calidad (QFD), debido a la transformación de las demandas del usuario en requerimientos técnicos.

2.1.1.1. Voz del usuario.

En este apartado, se describen los requerimientos del cliente para la cámara de vacío. Permitiendo conducir la investigación a un proceso de diseño.

Los requerimientos del cliente para la cámara de vacío son:

- Ser capaz de soportar una presión de 10^{-7} [Torr] ($1,33 * 10^{-5}$ [Pa]).
- Sea un sistema seguro, funcional y factible para su construcción.
- Disponga de conexiones estándar ISO – KF y ISO - CF que permitan la colocación de accesorios disponibles en el laboratorio.
- Sistema auto sostenible.
- Permitir que se pueda realizar la conexión de una pistola de electrones.
- Acceso al interior de la cámara para la colocación de artículos de ensayo.
- Transporte sencillo, relacionado con el peso del sistema.
- Dimensiones predefinidas: longitud entre tangentes equivalente a 1000 [mm] y diámetro exterior de la cámara de 600 [mm].
- Material disponible para fabricación en Ecuador.
- Accesorios operativos y de mantenimiento.
- Confiabilidad.

2.1.1.2. Voz técnica.

Describe los requerimientos técnicos que el producto deberá cumplir para poder satisfacer las solicitudes del usuario.

Los requerimientos técnicos son:

- Flujo másico de aire controlado por bomba para extracción de aire.
- Factibilidad de construcción y montaje.
- Conexiones hidráulicas seguras y dispuestas para reducir pérdidas de presión.
- Visualización de magnitudes de presión en diferentes puntos del sistema.
- Parámetros para un funcionamiento seguro.

2.1.2. Casa de la calidad del sistema cámara de vacío.

2.1.2.1. Conclusiones de la casa de la calidad.

La casa de la calidad brinda las especificaciones técnicas más relevantes. Para lograr un balance entre las demandas del cliente y las especificaciones técnicas que se plantean con base en los conocimientos ingenieriles. Las especificaciones más relevantes de la casa de la calidad son:

- Tiempo de construcción o entrega del sistema. - tiempo de entrega del sistema completo, teniendo en cuenta el caso de importación si fuera el caso. Considerado en un lapso de un mes.
- Tiempo de ensamblaje del sistema en obra. - relacionado a la cantidad de conexiones o modificaciones ya en campo, considerado una semana.
- Factibilidad de movilidad. - Relacionado al fácil transporte de todo el sistema a un lugar cercano (no mayor a 1 [m]). Considerado un tiempo de 10 [min].
- Nivel de ruido del sistema, considerado un máximo de 50 [dB].
- Peso del sistema. Considerado una magnitud máxima de 300 [kg].
- Dimensiones del sistema. Dado en especificaciones del cliente longitud entre tangentes equivalente a 1000 [mm] y diámetro exterior de la cámara de 600 [mm].

2.2. Especificaciones técnicas

Para el caso de la presente investigación, las especificaciones técnicas forman parte integral del estudio y complementan lo indicado en los planos de construcción respectivos. La importancia de definir los términos radica en definir la calidad de los trabajos y acabados del estudio (Riba, 2004).

Consolidando los resultados de la casa de la calidad, presentada en la figura 2.1. Es factible generar las especificaciones técnicas que el sistema deberá cumplir.

Tabla 2.1. Nomenclatura para especificaciones técnicas

	PROPONE		R/d
C	CLIENTE	R	REQUERIMIENTO
I	INGENIERÍA	D	DESEO

Fuente: Propia

Las fechas indicadas en la tabla 2.2, representan el día en el cual se define la solicitud o propuesta de diseño.

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de la cámara de vacío.

PROYECTO: PIJ 1603		PRODUCTO: Cámara de vacío		FECHA INICIAL: 09-06-2019	
Concepto	Fecha	Propone	Requerimiento o Deseo	Descripción	
Función	09/06/2019	Cliente	R	Crear una cámara de vacío	
		Cliente	R	Disponer de conexiones estándar	
Dimensión	09/06/2019	Ingeniería	D	Sistema con un volumen de 0,12 [m ³]	
Presión	09/06/2019	Cliente	R	Soportar una presión mínima de 10 ⁻⁷ [torr]	
Normas	09/06/2019	Ingeniería	R	Cumplir con la sección VII de la norma ASME	
Mantenimiento	09/06/2019	Ingeniería	R	El sistema debe de ser de fácil montaje y desmontaje	
Energía	09/06/2019	Ingeniería	D	El sistema debe tener el consumo correcto (sin fugas)	

Fuente: Propia.

2.3. Análisis funcional

2.3.1. Desarrollo de diagramas funcionales.

2.3.1.1. Nivel 0

En el nivel más bajo para este estudio, se observa el sistema de funcionamiento general de la cámara de vacío.

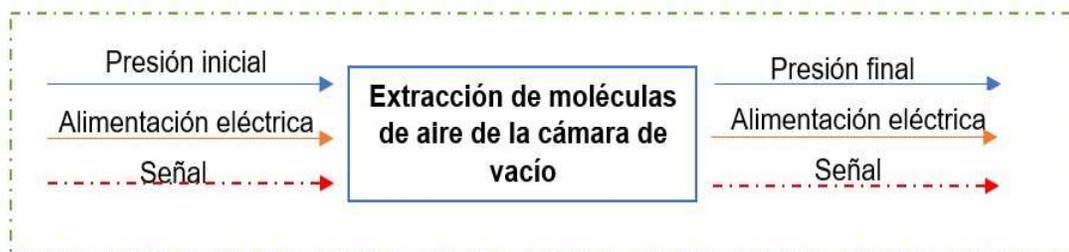


Figura 2.2. Nivel 0 del análisis funcional.

Fuente: Propia.

2.3.1.2. Nivel 1.

Dentro de esta sección, la cámara de vacío se divide en 2 subsecciones relevantes:

- Primer modo de operación. – representa el proceso del sistema soportando las presiones de vacío.

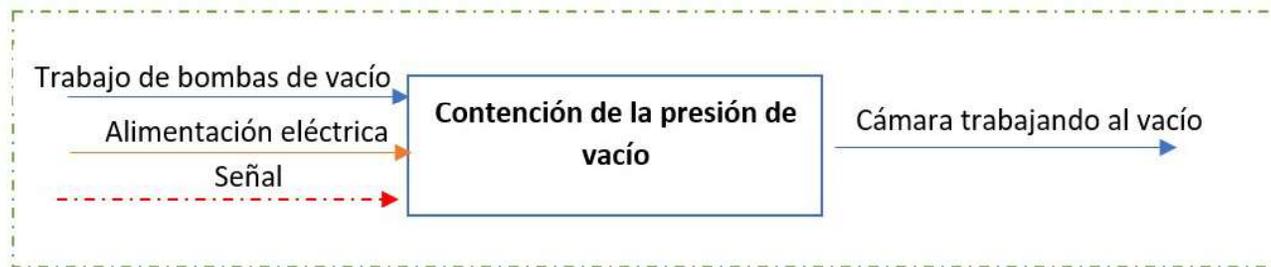


Figura 2.3. Primer modo de operación.

Fuente: Propia.

- Segundo modo de operación. – hace referencia a los soportes del sistema

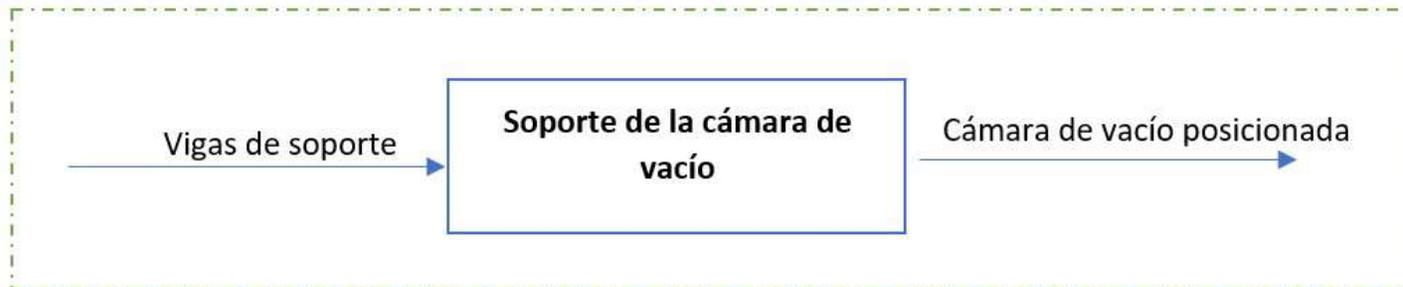


Figura 2.4. Segundo modo de operación.

Fuente: Propia.

2.3.1.3. Nivel 2.

La Síntesis del funcionamiento del sistema, cámara de vacío, se presenta en la figura 2.5.

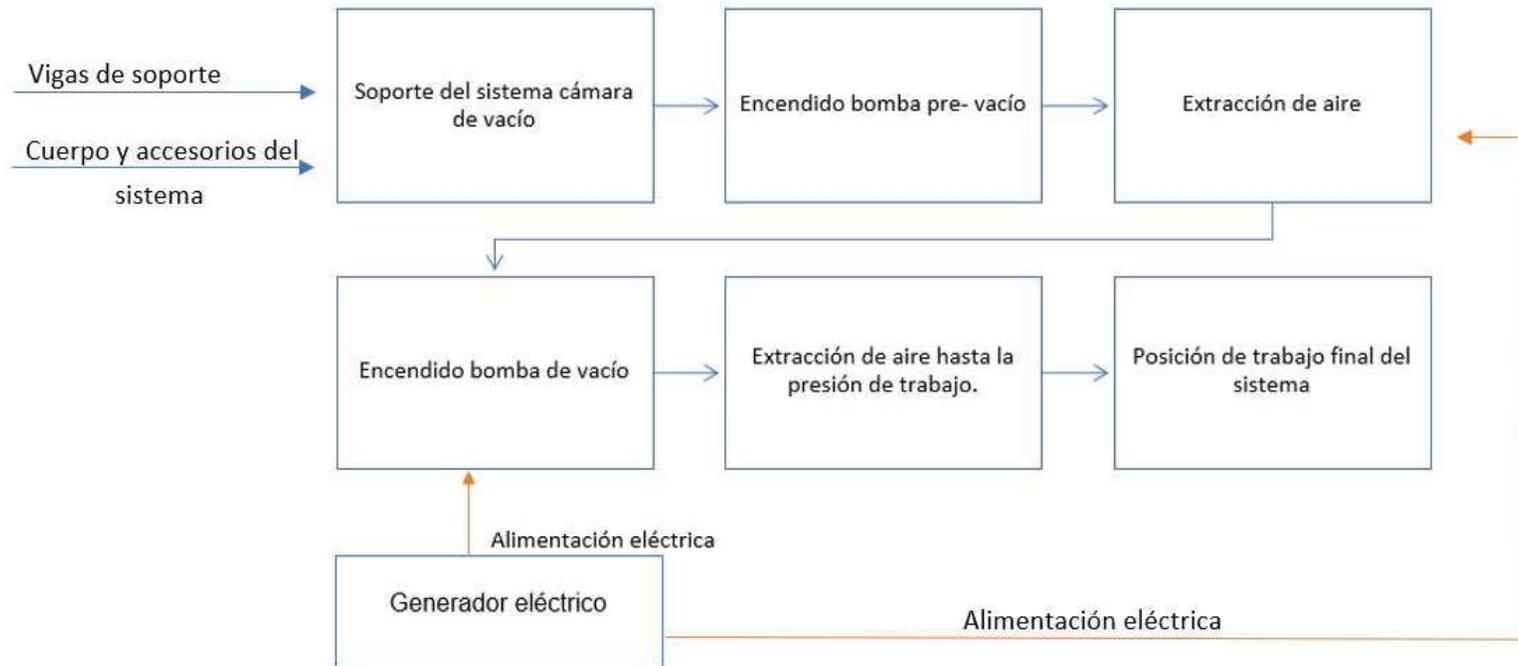


Figura 2.5. Nivel 2 del análisis funcional.

Fuente: Propia.

2.4. Soluciones para cada módulo de funcionamiento

Dentro de esta sección, se evaluará los niveles obtenidos en el análisis funcional. Identificando las posibles soluciones para cada sección.

2.4.1. Módulo 1.- Sistema de contención de la presión de vacío.

Este módulo cumple la función de soportar la presión interna de vacío.

2.4.1.1. Cuerpo de la cámara.

Como alternativas de diseño, se presentan las siguientes opciones:

	Alternativa 1: Cámara con forma cuadrada Ventajas: <ul style="list-style-type: none">• Fácil fabricación• Amplia apertura de tapa• Vaciado rápido• Menor costo Desventajas: <ul style="list-style-type: none">• Espacio de pruebas reducido• Reduce la cantidad de elementos que se pueden usar
	Alternativa 2: Cámara con forma esférica Ventajas: <ul style="list-style-type: none">• Estructura robusta• Gran capacidad de almacenamiento• Facilidad de montaje Desventajas: <ul style="list-style-type: none">• Poco espacio de pruebas• Mayor costo de fabricación
	Alternativa 3: Cámara con forma cilíndrica Ventajas: <ul style="list-style-type: none">• Estructura robusta• Facilidad de mantenimiento• Facilidad de montaje• Alta estabilidad Desventajas: <ul style="list-style-type: none">• Mecanismo complejo para fabricación• Posibilidad considerable de presentar falla en la soldadura

Figura 2.6. Posibles soluciones para el cuerpo de la cámara de vacío.

Fuente: Propia.

2.4.1.2. Cerramiento o tapas del sistema.

Como alternativas se presentan las siguientes:

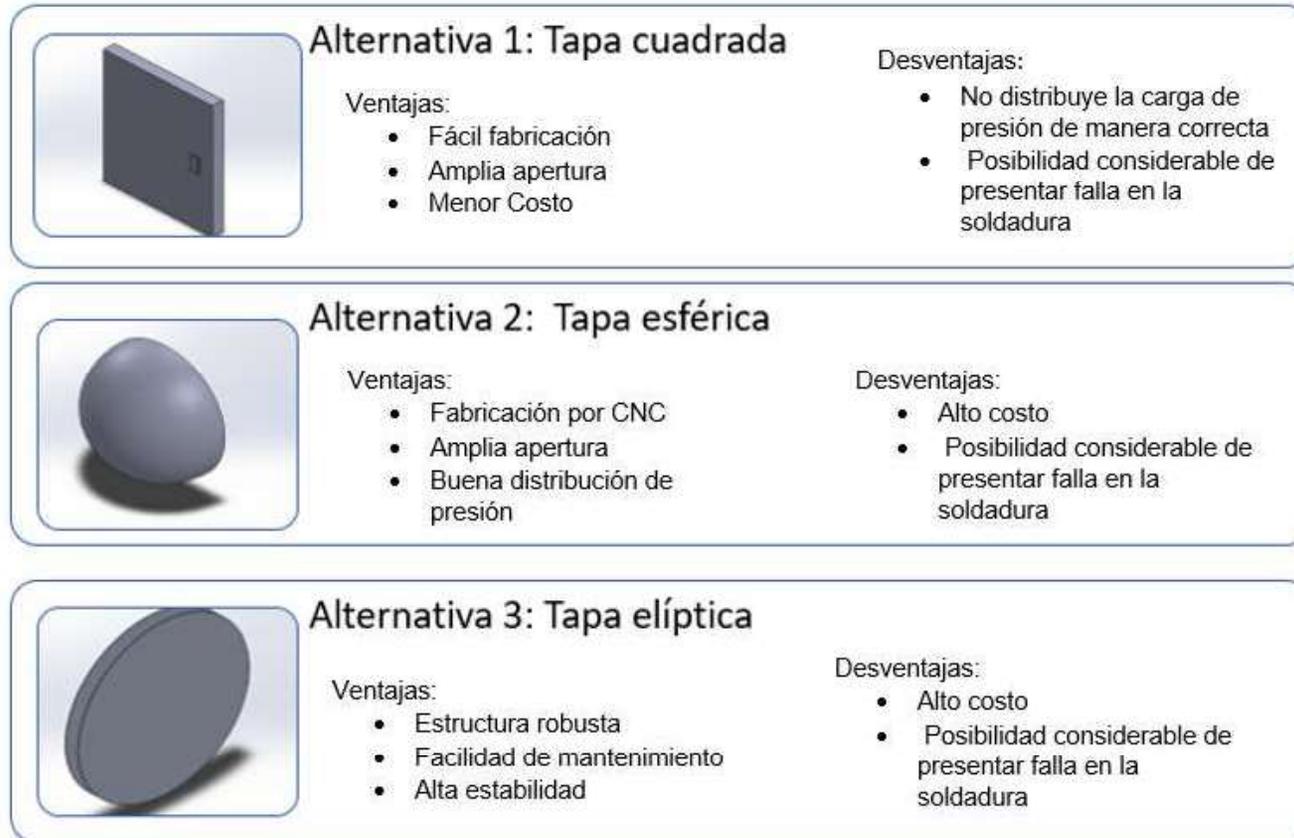


Figura 2.7. Alternativas para el diseño de tapas para el sistema.

Fuente: Propia

2.4.2. Módulo 2.- Soporte de la cámara de vacío.

La función principal de este módulo es brindar soporte y estabilidad a todo el sistema.

Como alternativas de diseño, se presenta las siguientes:

	<p>Alternativa 1: Soporte por caja metálica</p> <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none">• Fabricación sencilla• Alto soporte• Menor costo <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none">• Gran número de soldaduras• Impide el desplazamiento óptimo
	<p>Alternativa 2: Vigas de sujeción</p> <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none">• Fácil fabricación• Máxima estabilidad• Máximo soporte <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none">• Alto costo• Aumento de peso al sistema
	<p>Alternativa 3: Topes</p> <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none">• Estructura robusta• Fácil fabricación• Estabilidad media <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none">• Baja estabilidad• No permite conexiones en el inferior de la cámara

Figura 2.8. Soluciones posibles para el soporte de la cámara.

Fuente: Propia

2.5. Evaluación de las soluciones de los módulos

Dentro de esta sección, se tomarán en cuenta los aspectos más relevantes para los sistemas detallados en la sección 2.4. Evaluando los diferentes criterios de diseño.

El método que se aplica para la evaluación de soluciones es el **Método de criterios ponderados**. Basado en tablas, donde el criterio (o solución propuesta), se confronta con algunas soluciones posibles. Con la asignación de valores los criterios son ponderados y evaluados. Los valores empleados son:

- 1 si el criterio de la fila es superior al valor de la columna.
- 0,5 si el criterio de la fila es equivalente al valor de la columna.
- 0 si el criterio de la fila es inferior al valor de la columna.

Finalmente, la evaluación general para cada criterio resulta de la suma de los valores descritos en cada celda (Riba, 2004).

En cada subsección, se presenta las tablas resultantes del análisis. Las tablas detalladas para cada módulo se encuentran en la sección 2 de los Anexos.

2.5.1. Módulo 1.- Sistema de contención de la presión de vacío.

2.5.1.1. Cuerpo de la cámara.

Como consideraciones para la evaluación, se tomará en cuenta los aspectos mencionados en la primera columna de la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Criterios para la evaluación del módulo 1 (cuerpo de la cámara).

	Fácil fabricación	Fácil montaje	Alta estabilidad	Mecanismo robusto	Bajo costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Fácil fabricación		1	0	1	1	4	0,235
Fácil montaje y desmontaje	0,5		0,5	1	1	4	0,235
Alta estabilidad	1	1		0	1	4	0,235
Mecanismo robusto	0	0	0		1	2	0,118
Bajo costo	1	1	0	0		3	0,176
					SUMA	17	1

Tabla 2.4. Resultados del proceso para el módulo 1 (cuerpo de la cámara).

CONCLUSIONES	Fácil fabricación	Fácil montaje y	Mecanismo robusto	Bajo costo	Alta estabilidad	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0,118	0,072	0,029	0,076	0,078	0,374	2
Alternativa 2	0,039	0,090	0,029	0,050	0,039	0,249	3
Alternativa 3	0,078	0,072	0,059	0,050	0,118	0,378	1

Con los valores obtenidos del método de valores ponderados, la alternativa a ser tomada en cuenta es la alternativa 3 (cámara con forma cilíndrica).

2.5.1.2. Cerramiento o tapas del sistema.

Como consideraciones para la evaluación, se tomará en cuenta los aspectos mencionados en la primera columna de la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Criterios para la evaluación del módulo 2 (tapa de la cámara).

	Fácil fabricación	Fácil montaje	Alta estabilidad	Mecanismo robusto	Bajo costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Fácil fabricación		1	0	1	1	4	0,235
Fácil montaje y desmontaje	0,5		0,5	1	1	4	0,235
Alta estabilidad	1	1		0	1	4	0,235
Mecanismo robusto	0	0	0		1	2	0,118
Bajo costo	1	1	0	0		3	0,176
					SUMA	17	1

Tabla 2.6. Resultados para la evaluación del módulo 2 (tapa de la cámara).

CONCLUSIONES	Fácil fabricación	Fácil montaje y	Mecanismo robusto	Bajo costo	Alta estabilidad	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0,118	0,098	0,020	0,088	0,039	0,363	2
Alternativa 2	0,039	0,039	0,039	0,029	0,098	0,245	3
Alternativa 3	0,078	0,098	0,059	0,059	0,098	0,392	1

Con los valores obtenidos del método de valores ponderados, la alternativa a ser tomada en cuenta es la alternativa 3 (cámara con tapa elíptica).

2.5.2. Módulo 2.- Soporte de la cámara de vacío.

Como consideraciones para la evaluación, se tomará en cuenta los aspectos mencionados en la primera columna de la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Criterios para la evaluación del módulo 3 (soporte de la cámara).

	Fácil fabricación	Fácil montaje	Alta estabilidad	Mecanismo robusto	Bajo costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Fácil fabricación		1	0	1	1	4	0,235
Fácil montaje y desmontaje	0,5		0,5	1	1	4	0,235
Alta estabilidad	1	1		0	1	4	0,235
Mecanismo robusto	0	0	0		1	2	0,118
Bajo costo	1	1	0	0		3	0,176
					SUMA	17	1

Tabla 2.8. Resultados para la evaluación del módulo 3 (soporte de la cámara).

CONCLUSIONES	Fácil fabricación	Fácil montaje y	Mecanismo robusto	Bajo costo	Alta estabilidad	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0,064	0,039	0,039	0,080	0,078	0,301	3
Alternativa 2	0,064	0,078	0,059	0,032	0,118	0,351	1
Alternativa 3	0,107	0,118	0,020	0,064	0,039	0,348	2

Con los valores obtenidos del método de valores ponderados, la alternativa a ser tomada en cuenta es la alternativa 2 (Soporte por vigas).

Recopilando las soluciones por cada módulo, se presenta el bosquejo inicial en la figura 2.9.

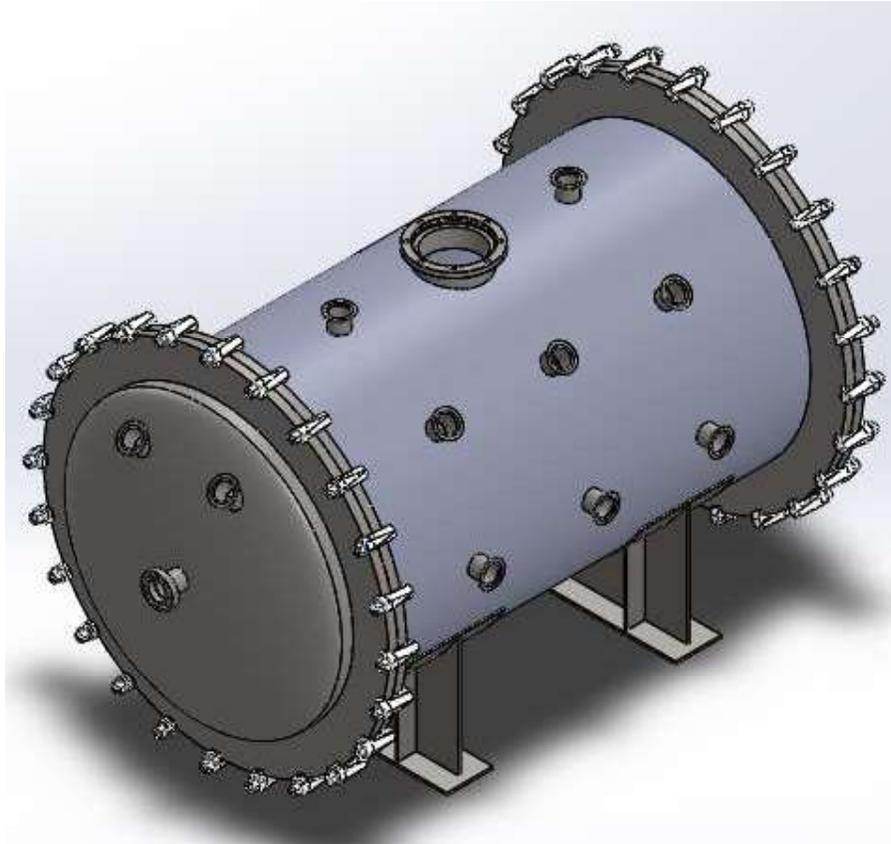


Figura 2.9. Bosquejo, agrupación de las soluciones por cada módulo.

Fuente: Propia

El proceso de evaluación entre propuestas propone una solución concreta a las necesidades del cliente. Sucesivas reuniones a lo largo del proceso encaminan el diseño hacia una solución considerada como la más satisfactoria.

2.6. Selección de los materiales

Los avances tecnológicos en la sociedad moderna han permitido e impulsado el descubrimiento y desarrollo de distintos materiales. Una selección acertada de material certifica a los diseñadores el adecuado funcionamiento del sistema.

Los procesos de selección parten desde la disponibilidad de una amplia gama de materiales, los cuales se evalúan, ya sea con el respaldo de: recomendaciones, mapas de materiales, información escrita disponible en fuentes bibliográficas o en software con bases de datos virtuales. En concreto, la selección y materiales se realiza tomando en cuenta las

propiedades exigidas por el componente a diseñar y sustentado en criterios como: precio, disponibilidad, vida de servicio, entre otros (Figuroa, 2018)

Como herramienta de ayuda para la selección de materiales, se empleará el software CES EDUPACK. El programa mencionado, es un instrumento de apoyo al aprendizaje de la ciencia de materiales. Propone encontrar dentro de su amplio catálogo (4050 materiales), aquel material que se adapte a las exigencias planteadas (Figuroa, 2018).

CES EDUPACK, es una herramienta empleada por más de 800 universidades alrededor del mundo. Sin embargo, esta herramienta también es aplicada por varias empresas mundialmente conocidas, como son: NASA, Ferrari, Renault, entre otras. (Figuroa, 2018).

En la figura 2.10, se representa las familias de los materiales agrupados en burbujas. Es importante mencionar que; para la selección del material adecuado, se evaluará entre todas las familias de materiales indicadas.

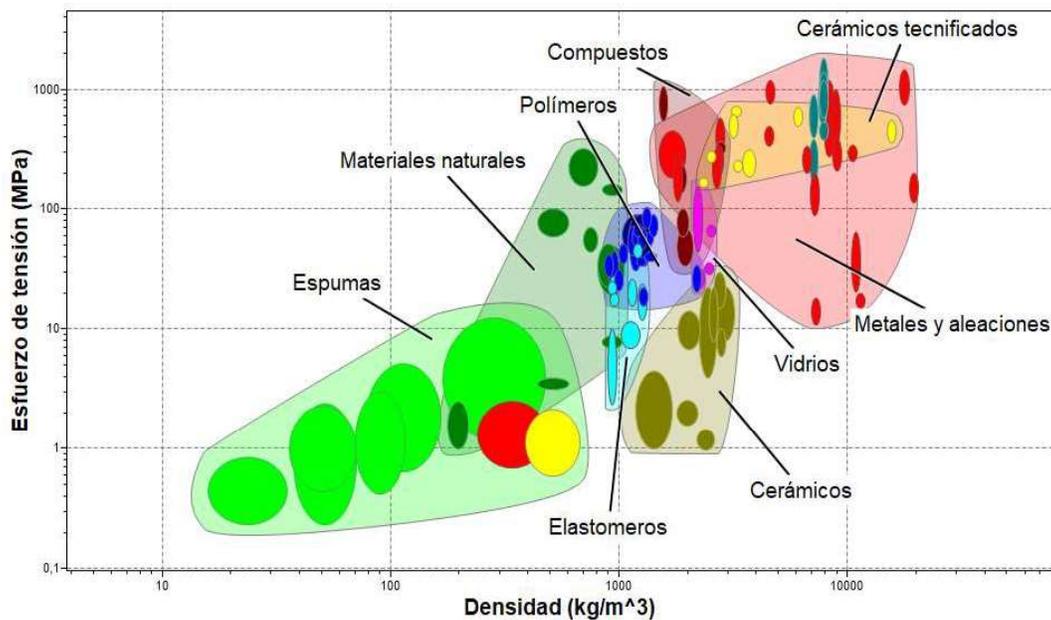


Figura 2.10. Materiales en diagrama Ashby

Fuente: Propia

2.6.1. Proceso de selección de materiales

Como proceso inicial, se aplica la definición del diagrama de Ashby (esfuerzo de tensión vs densidad) a toda la librería disponible en la base de datos del software CES EDUPACK.

La figura 2.11, representa la distribución de los materiales disponibles en la biblioteca del software, tanto en familias como por elemento.

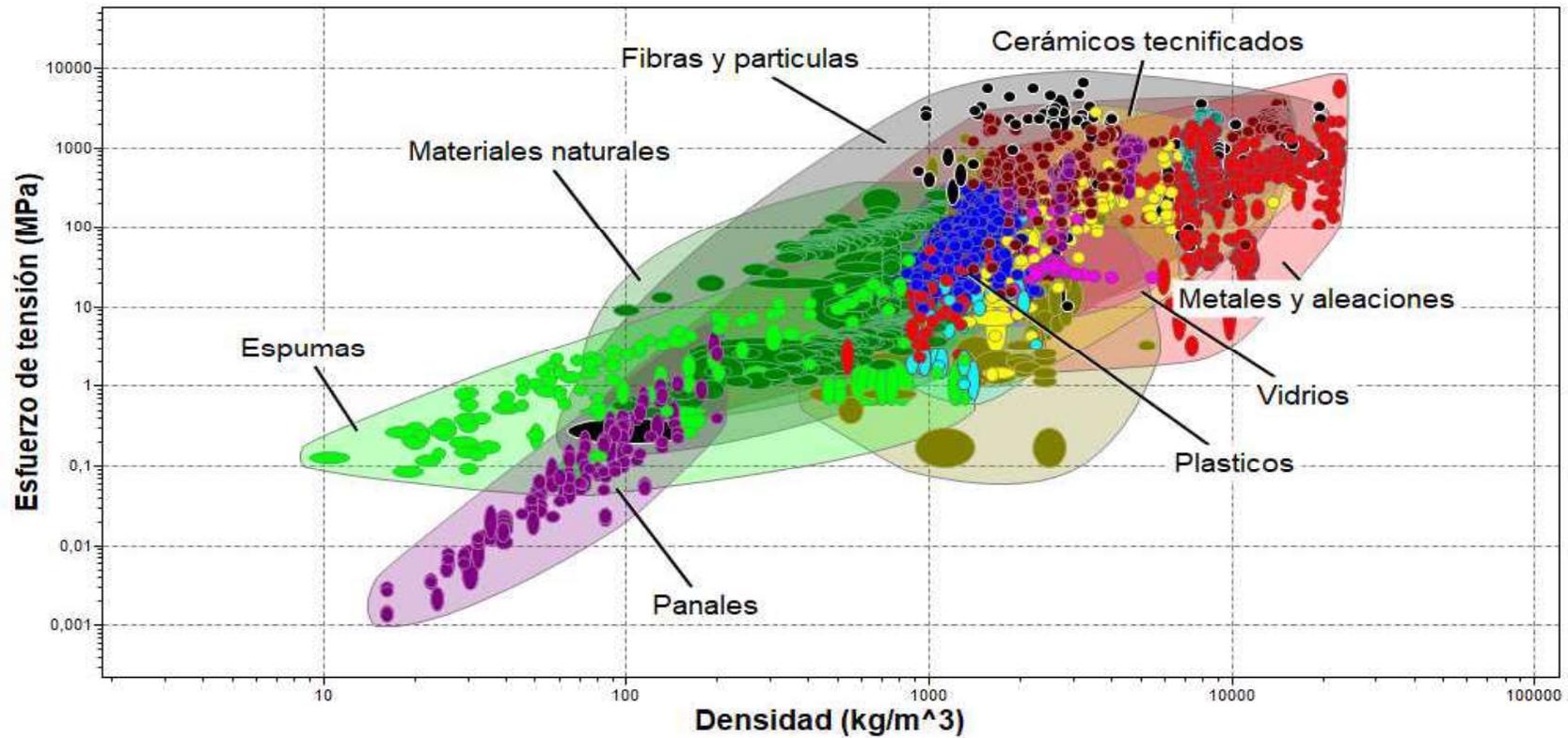


Figura 2.11. Diagrama de Ashby para la biblioteca de materiales.

Fuente: Propia

En la tabla 2.9, se presenta el resumen de las características con las cuales se busca el material más apropiado. Las características mencionadas, hacen referencia a las características técnicas (tabla 2.2) y a la casa de la calidad (figura 2.1).

Tabla 2.9. Consideraciones para la selección de materiales.

Propiedad		Unidad	Valor mínimo	Valor máximo
Composición	Carbono	%	0	0,3
	Silicio	%	0	0,03
Mecánicas	Módulo de Young	GPa	200	0
Térmicas	Temperatura de servicio	°C	-200	200
Proceso	Conformado en frío		Aceptable, Excelente	
	Prensado del material		Aceptable, Excelente	
	Soldabilidad		Excelente	
Durabilidad	Soporte al agua		Excelente	
Reciclable y fin de vida	Reciclable		SI	
	Downcycle		SI	
	Hábil para vertedero		SI	

Fuente: Propia

En la Tabla 2.9 se presentan celdas con el valor de cero. Esta configuración es aplicada debido a que la propiedad requiere que el valor en análisis disponga de un rango. Para el caso de composición de material, se requiere que los porcentajes de carbono o silicio tengan un valor menor o igual al valor máximo.

La composición del material es importante debido a que en general los sistemas de tanques para vacío poseen un recubrimiento post proceso de fabricación de galvanizado tanto al exterior, como al interior del sistema. El recubrimiento mencionado, aporta al sistema durabilidad y vida útil. (Figuroa, 2018).

Como consideración mecánica, se evalúa el módulo de Young, mismo que cuantifica el comportamiento elástico del material ante una carga (Callister, 2016).

Tomando en consideración las cámaras de vacío fabricadas por Neurtek, la temperatura de funcionamiento común debido a la alta presión oscila entre los $-185 [^{\circ}C]$ a $165 [^{\circ}C]$ (Neurtek, 2019).

Como consideración a tomar en cuenta es la factibilidad del material para malearse a la configuración deseada y la soldabilidad que posea.

La durabilidad y consideraciones de reciclaje se toman en cuenta con la intención de garantizar un ciclo cerrado del material después de terminar su vida útil.

En la figura 2.12, se evidencia la selección de materiales, teniendo en cuenta las consideraciones expresadas en la tabla 2.9. Al tener una visión muy reducida de los elementos seleccionados, en la figura 2.13, se emplea un acercamiento.

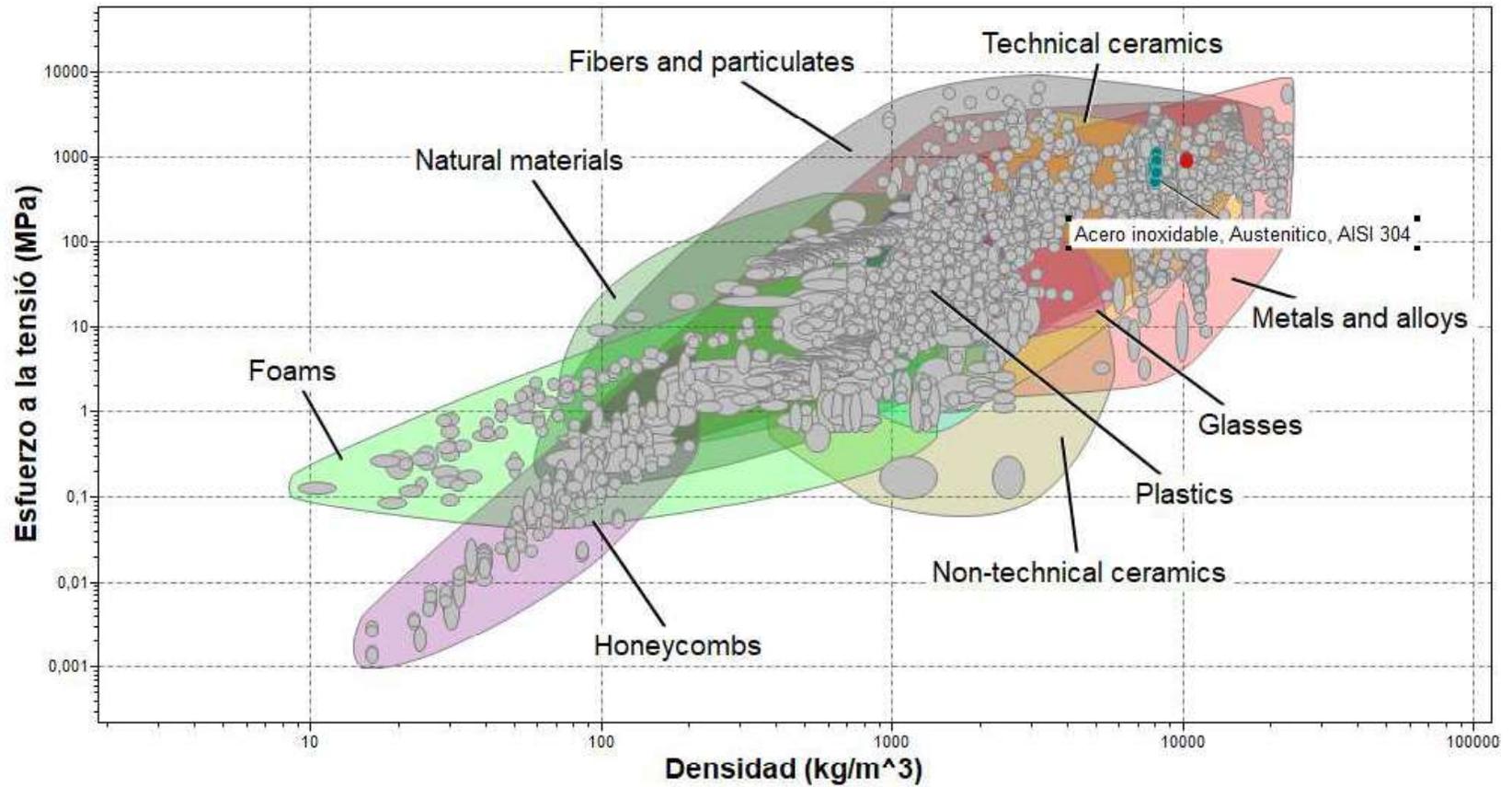


Figura 2.12. Gráfica de Ashby aplicada las consideraciones de la tabla 2.9.

Fuente: Propia.

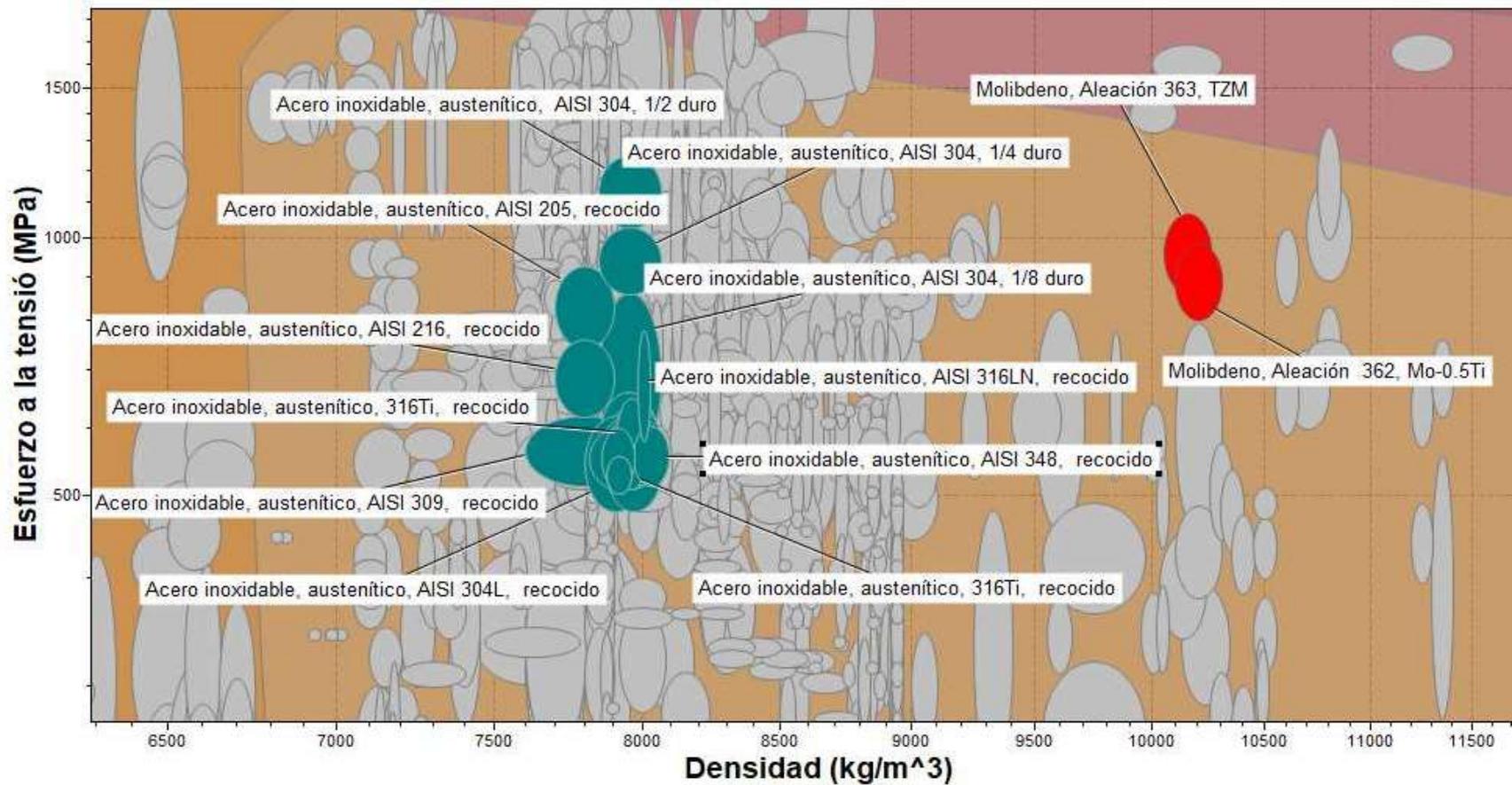


Figura 2.13. Ampliación de la selección de materiales que cumplen con los requisitos.

Fuente: Propia

La aplicación de condiciones presenta 14 materiales seleccionados de 4026 disponibles en la biblioteca, los mismos que se enlistan a continuación:

- Molibdeno, aleación 362.
- Molibdeno, aleación 363.
- Acero inoxidable, austenítico, 316Ti.
- Acero inoxidable, austenítico, AISI 205.
- Acero inoxidable, austenítico, AISI 216.
- Acero inoxidable, austenítico, AISI 301 (Presenta 2 variaciones en la composición).
- Acero inoxidable, austenítico, AISI 304 (Presenta 5 variaciones en la composición).
- Acero inoxidable, austenítico, AISI 309.
- Acero inoxidable, austenítico, AISI 316 (Presenta 2 variaciones en la composición).
- Acero inoxidable, austenítico, AISI 317.
- Acero inoxidable, austenítico, AISI 321.
- Acero inoxidable, austenítico, AISI 347.
- Acero inoxidable, austenítico, AISI 348.
- Acero inoxidable, austenítico, BS134S16.

Al disponer de 14 materiales factibles para la aplicación, se consulta y considera la sugerencia del código ASME sección VIII que indica que: El material más común con el cual se fabrican los tanques es el Acero inoxidable AISI 304. Para el desarrollo de esta investigación, se adopta la sugerencia.

2.6.2. Ingeniería de la cámara.

El diseño base original propuesto por el cliente se conserva en la presentación final. Se mantiene dimensiones del espacio interior, mismas que garantizan el montaje de los diferentes accesorios para experimentos.

Es importante recalcar que se realiza ajustes al diseño, permitiendo obtener un mejor acceso a la cámara central, así como un diseño mejorado de las rieles y placas para anclaje de los diferentes instrumentos de medición.

2.6.2.1. Diseño de las paredes

De acuerdo con el método de diseño integral flexible. Se provee a la cámara de dos puertas de acceso en sus caras laterales. Se coloca dos aperturas en forma elíptica, en las que se encaja las carillas de la cámara. En el espacio alrededor del centro se coloca bridas que permitan obtener una visión clara del interior del recipiente. Las puertas de acceso se montan sobre sistemas de clips atornillados a la pared de la cámara, asegurando el cierre

mediante un mecanismo de presión, que precargara la cámara antes de iniciar con el proceso de vacío.

2.6.2.2. Diseño de bridas.

Las diferentes bridas presentadas en el diseño deberán fabricarse de acero 304. La selección del número de perforaciones para las bridas; se realiza considerando la cantidad de accesorios con un mismo tipo de conexión dentro del laboratorio y las solicitudes del cliente. En la sección anexo 4, se presenta el listado detallado de los accesorios.

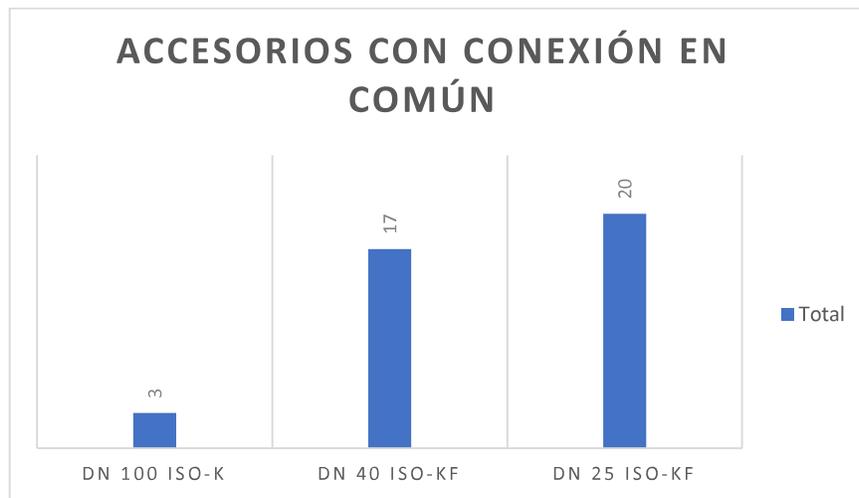


Figura 2.14. Accesorios disponibles en el laboratorio con conexión en común.

Fuente: Propia

2.6.2.3. Diseño del soporte.

Se presenta un perfil tipo H. Será cortado de una plancha de acero A36, por medio de corte con plasma (debido a la geometría) y soldado con la intención de asegurar la estabilidad del sistema.

2.6.2.4. Placas de centrado para instrumentos.

Estas piezas son de forma rectangular con diferentes perforaciones en forma de oblarga, las cuales permiten tener una mayor flexibilidad al momento de colocar los diferentes instrumentos para los estudios relacionados con electrones impulsados por una pistola.

2.6.3. Especificaciones del diseño

2.6.3.1. Módulo de pared.

Dentro de este módulo se considera que el elemento se someterá a una presión externa igual a la presión atmosférica y como presión interna a una presión homogénea de $1,33 \times 10^{-5}$ [Pa] (10^{-7} [Torr]) las paredes se encontrarán encastradas en los diferentes puntos de unión con respecto al resto de la cámara. Se modeliza como un cilindro que tiene

dimensiones de 600 [mm] de diámetro, 1000 [mm] de longitud y 5 [mm] de espesor (medidas de referencia solo para modelizado, previo al cálculo). El material que se utilizará será el acero AISI 304.

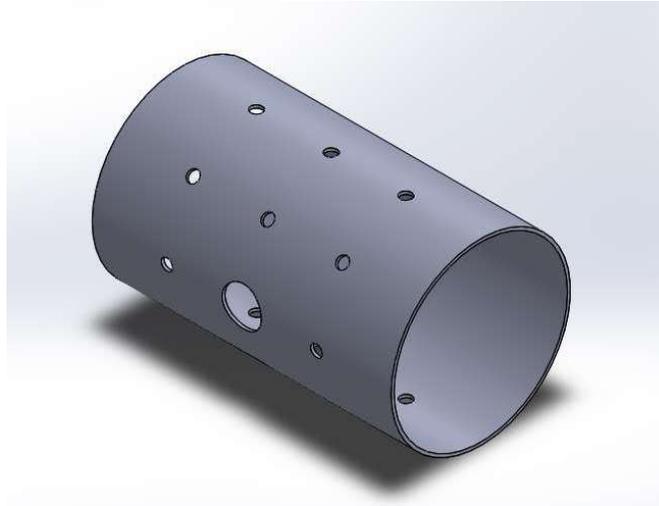


Figura 2.15. Geometría de las paredes del recipiente de presión.

Fuente: Propia

2.6.3.2. Modelo de tapa.

Para este diseño, se consideró que el elemento se encontrará sometido a una presión homogénea externa igual a la presión atmosférica (101,3 [MPa] y una presión interna homogénea de $1,33 * 10^{-5}$ [Pa] (10^{-7} [Torr]). El modelo es de forma elíptica, permitiendo la distribución correcta de las presiones en el interior. Presentando dimensiones equivalentes a 600 [mm] de diámetro, 105 [mm] de longitud y 5 [mm] de espesor (medidas de referencia solo para modelizado, previo al cálculo). Adicional se han adicionado perforaciones, mismas que facilitarían la soldadura de bridas para visualización y colocación de accesorios. El material que se utilizará será el acero AISI 304.

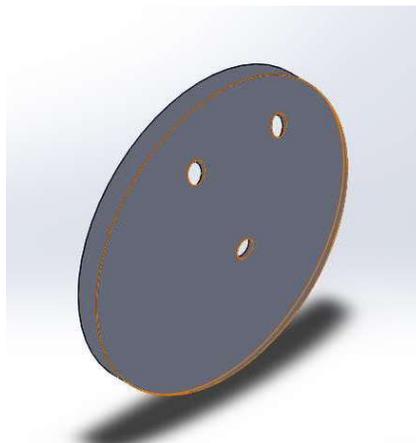


Figura 2.16. Geometría correspondiente a las tapas del sistema.

Fuente: Propia

2.6.3.3. Módulo de sujeción de tapas.

Para este módulo se empleará un estándar ISO-K, debido al diámetro de la compuerta. la intención es crear un sistema que oferte versatilidad y a su vez seguridad en el sistema. La selección de estos elementos estándar se encuentra en la sección Anexos 6.

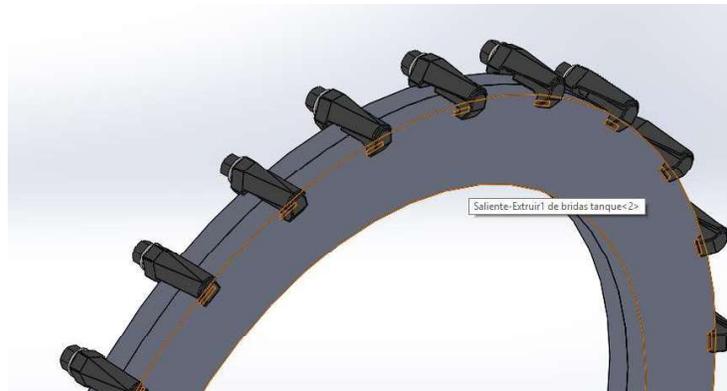


Figura 2.17. Geometría para la unión de las tapas del recipiente a presión.

Fuente: Propia

2.6.3.4. Módulo de soporte.

Se ha considerado varios aspectos funcionales y se ha determinado que la opción en relación costo, peso y beneficio es el acero rápido A36, se presentará en sección tipo H, permitiendo ofrecer al sistema mayor confiabilidad en el soporte.

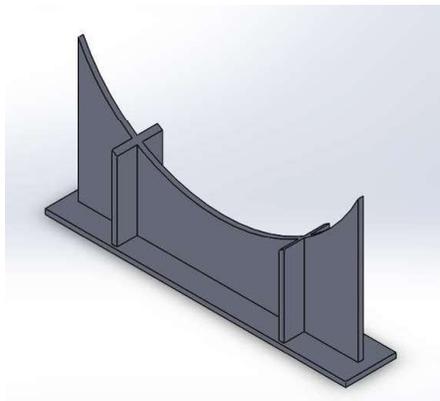


Figura 2.18. Geometría para la sección de sujeción.

Fuente: Propia

2.6.3.5. Sujeción de instrumentos.

Dentro de esta sección, se ha evaluado uno de los requerimientos principales que se realizó por parte del cliente; generar un sistema versátil para la colocación de accesorios

dentro de la cámara. El diseño presentado se presta para un gran número de confinaciones, permitiendo además colocar varios instrumentos gracias a la disposición de perforaciones oblongas. El material que se utilizará será el acero A 36.

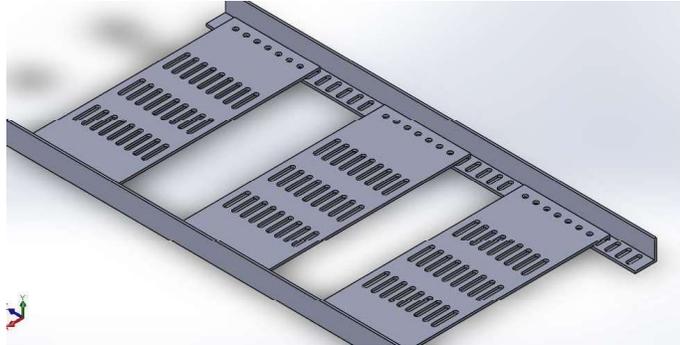


Figura 2.19. Geometría para el módulo de sujeción de instrumentos.

Fuente: Propia

Dentro del módulo de sujeción, se verán conectados diferentes artefactos, entre los principales se presentan:

- Goniómetros de rotación circular motorizada, 8MR190V. Dispositivo que permite generar rotaciones precisas de 360°.
- Goniómetros de rotación alrededor de un eje, 8MVG99V-80. Dispositivos especializados en investigaciones permiten obtener diferentes alturas de puntos de rotación.



Figura 2.20. Goniómetro motorizado.

Fuente: Propia

Recopilando todas las geometrías y la configuración respectiva de materias primas, se puede obtener que el sistema tendría una masa equivalente a 252,32 [Kg] y un volumen de 0,03 [m^3].

Como información para secciones próximas, se adjunta en la siguiente tabla las propiedades de los materiales seleccionados.

Tabla 2.10. Propiedades mecánicas acero AISI 304.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	$1,9 * 10^{11}$	Pa
Coefficiente de Poisson	0,29	N/D
Módulo cortante	$7,5 * 10^{10}$	Pa
Densidad de masa	8000	Kg/m^3
Límite de tracción	517017000	Pa
Límite elástico	206807000	Pa
Conductividad térmica	16	$\text{W}/(\text{m} * \text{K})$
Calor específico	500	$\text{J}/(\text{kg} * \text{K})$

Fuente: (Callister, 2016).

Tabla 2.11. Propiedades mecánicas acero ASTM A 36.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	$2 * 10^{11}$	Pa
Coefficiente de Poisson	0,26	N/D
Módulo cortante	$7,93 * 10^{10}$	Pa
Densidad de masa	7850	Kg/m^3
Límite de tracción	400000	kPa
Límite elástico	250000	kPa

Fuente: (Callister, 2016).

Tabla 2.12. Propiedades mecánicas PMMA.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	$2,77 * 10^9$	Pa
Densidad de masa	1190	Kg/m^3
Límite de tracción	61000000	Pa
Límite de compresión	105000000	Pa
Conductividad térmica	0,21	$\text{W}/(\text{m} * \text{K})$
Calor específico	1250	$\text{J}/(\text{kg} * \text{K})$

Fuente: (Callister, 2016).

2.7. Validación de la solución

La propuesta final con relación a la arquitectura de la cámara de vacío se presenta al responsable del proyecto durante una reunión de información. En dicha reunión se justificó

el cumplimiento, a nivel teórico del sistema dado al inicio del proyecto, así como la posible modificación y consideraciones extras añadidas a lo largo del proceso de diseño.

El resultado final obtenido, se considera positivo y la propuesta se encuentra aprobada por sus geometrías y funcionalidades que presta el sistema. Desde este punto se parte para el estudio más detallado que tiene relación con la fabricación.

2.7.1. Cálculos numéricos.

Los parámetros establecidos para análisis por medio de métodos numéricos, basados en la sección VII del código ASME. Dependen puntualmente de la condición de carga y análisis térmico. Con los valores expuestos se procederá a determinar la distribución de temperaturas y las tensiones térmicas a las cuales el sistema de vacío se encontrara sometido (ASME Sección VIII, 2017). Los procedimientos que se verán reflejados permitirán realizar un análisis de tensiones, para poder determinar la protección contra el colapso plástico, falla local, pandeo y carga cíclica.

El código ASME sección VII, establece recomendaciones para el procedimiento de análisis de estrés, modelación de componentes y validación del análisis:

- No se proporcionará un tratamiento detallado del elemento en estudio. Debido a la variabilidad en enfoques y procesos de diseño.
- Los análisis de estrés se incluirán en la validación de todos los resultados del sistema.

2.7.1.1. Condiciones de carga.

Todas las cargas que afecten al sistema se verán reflejadas dentro del análisis del diseño. Se considera como cargas suplementarias en adición a la carga de la presión en forma de cargas aplicadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Cálculo del cuerpo del recipiente y tapas en base a la presión interna

El cálculo y fabricación de los recipientes a presión se encuentra basado en el código ASME, Sección VIII. Esta norma en mención cubre a cabalidad el diseño, la selección de materiales, la fabricación, inspección, pruebas, criterios de aceptación y la documentación que resulte de las distintas etapas a cumplir.

Es importante recalcar que, para calcular un recipiente cilíndrico horizontal por presión interna, es necesario realizar por separado el cálculo del cuerpo y tapas.

3.1.1. Cálculos preliminares.

Al mismo tiempo de recibir la propuesta conceptual, se procedió con el desarrollo del diseño paramétrico de la posible solución. Se obtuvo los principales parámetros aproximados de diseño, como es el caso de: presión de trabajo, espesores de pared requeridos y consideraciones aplicables para el diseño de recipientes a presión.

Los primeros espesores para los elementos de pared se determinaron con aproximaciones hábiles para soportar los esfuerzos generados en el interior del recipiente a presión. Como punto adicional se define un aumento en el espesor tomando en cuenta el desgaste del material conforme al tiempo (corrosión).

3.1.2. Presiones de funcionamiento.

Para el cálculo de las magnitudes de presión, se considerará que: el sistema del recipiente a presión se encuentra recién fabricado y a temperatura ambiente. Debido a los factores que se involucran en el cálculo.

3.1.2.1. Presión operativa (P_o).

La presión en mención es considerada como la presión de trabajo, por lo cual es la presión manométrica a la cual el recipiente a presión se encontrará sometido en condiciones normales (León, 2001).

La presión que se toma en cuenta es la indicada por el cliente. 10^{-7} [Torr] ($1,33 * 10^{-5}$ [Pa])

3.1.2.2. Presión de diseño (P).

El cálculo de esta presión es importante, ya que será la magnitud aplicada en todas las ecuaciones de las partes consecutivas en el cálculo de recipientes sometidos a presión.

El valor de la presión de diseño, se representada por la ecuación 3.1 (León, 2001).

$$P = P_{o_1} + Ph + 3P_{atm} \quad (3.1)$$

Donde

P = presión de diseño.

P_{o_1} = presión solicitada para el diseño.

Ph = presión hidrostática.

P_{atm} = presión atmosférica=14,9 [hPa].

Tabla 3.1. Parámetros para presión solicitada de diseño.

SI	Po>300 [psi]	Po≤ 300 [psi]
	$P_{o_1}=1,1 P_o$	$P_{o_1}=P_o+ 30$ [psi]

Fuente:(León, 2001).

Tomando en consideración la tabla 3.1. Se obtiene que el valor de la presión inicial de diseño es equivalente a $P=30$ [psi] (206,84 [kPa]). Recalcando que, la cámara de vacío presenta un diseño horizontal y se manejará aire como gas, la presión hidrostática, se presenta en la ecuación 3.2:

$$Pa = \delta * g * h = 6,62 [Pa] \quad (3.2)$$

Donde:

Pa = presión aire.

δ =densidad del aire=1,125 [kg/m³].

g =gravedad=9,81 [m/2].

h =altura de la capa de aire, equivalente al diámetro de la cámara.

Al calcular la presión hidrostática, y la presión inicial, se remplaza los valores en la ecuación 3.1:

$$P = P_{o_1} + Pa + 3P_{atm} = 521,66 [kPa]$$

3.1.3. Cálculo del espesor.

Para el cálculo de la siguiente magnitud, se empleará formulas establecidas en la Sección VIII del código ASME, mismo que indica los parámetros de diseño para un recipiente a presión.

$$t = t_1 + f \quad (3.3)$$

Donde

t =espesor de diseño.

t_1 =espesor de la sección.

f =margen de diseño=3,157 [mm] .

3.1.3.1. Cálculo del espesor para la sección cilíndrica.

Para el cálculo del primer valor de referencia, como es el caso del espesor del cilindro, se empleará las ecuaciones aplicadas por la norma ASME VIII.

$$t_1 = \frac{P * D}{S * E - 0,6P} = 1,72 \text{ [mm]} \quad (3.4)$$

Donde:

t = espesor.

P =presión de diseño.

S =esfuerzo máximo permitido del material.

E = factor de eficiencia de la soldadura =0,85 (ASME Sección VIII, 2017).

D = diámetro interior=580 [mm].

3.1.3.2. Cálculo del espesor para las tapas.

La fórmula presentada por el código ASME sección VIII, para el cálculo del espesor en secciones esféricas es:

$$t_1 = \frac{PR}{2SE + 0,2P} = 0,44 \text{ [mm]} \quad (3.5)$$

Al calcular las dos secciones principales de la cámara de vacío, se determina que la máxima presión se localiza en la sección cilíndrica, por lo cual se toma el valor de espesor de dicha sección para todo el sistema. Aplicando la ecuación 3.3, se obtiene que el espesor de la cámara de vacío será de:

$$t = t_1 + f = 4,72 \text{ [mm]}$$

El valor calculado, no representa un espesor comercial, por lo cual se considerará un valor de 5 [mm] para el espesor en futuros cálculos.

3.1.4. Tamaño óptimo del recipiente.

En primer lugar, se procederá al cálculo de volúmenes del recipiente a presión. Es importante indicar que, para esta sección, se tomará en cuenta los requerimientos del cliente.

A continuación, se presenta la distribución de volúmenes por secciones, mismas que permitirán distribuir los cálculos de volumen.

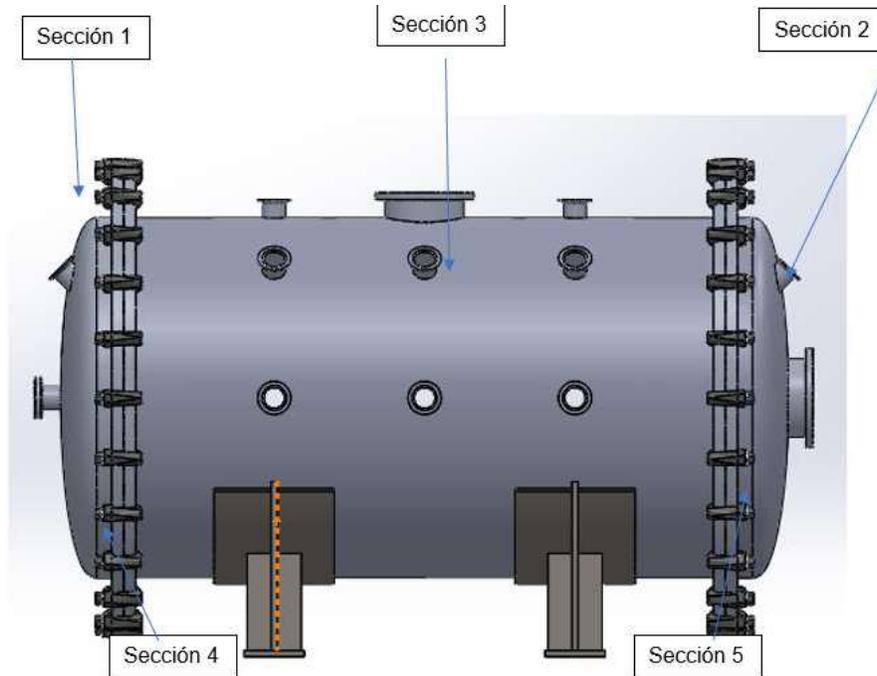


Figura 3.1. Distribución de las secciones del recipiente a presión.

Fuente: Propia

3.1.4.1. Cálculo del volumen sección elíptica.

Estas secciones se presentan en las tapas del recipiente a presión, en el diseño final se presentan dos tapas simétricas (sección 1 y 2). Permitiendo realizar una multiplicación por 2 de uno de los valores de volumen, para obtener el total de estos. (ASME Sección VIII, 2017)

$$V_{t_1} = \frac{2\pi}{3} * a * b * c = 0,015 [m^3] \quad (3.6)$$

Donde:

V_{t_1} = volumen de la sección 2.

r = radio.

a =ancho elipse.

b =longitud elipse.

c =ancho elipse.

$$Vt = Vt_1 * 2 = 0,03 [m^3]$$

3.1.4.2. Cálculo sección cilíndrica.

Para esta sección, se tomará en cuenta 3 secciones (sección 3,4 y 5).

$$Vt_2 = \pi * h * (r_{ext}^2 - r_{int}^2) = 0,01 [m^3] \quad (3.7)$$

Donde:

Vt_2 = Volumen de la sección cilíndrica.

r =Radio.

h =altura.

Para el cálculo de toda la sección del sistema, se aplicará una sumatoria de los valores de cada sección. Sumatoria de ecuaciones (3.6) y (3.7).

$$Vc = 0,013 [m^3]$$

3.2. Cálculo de esfuerzos generados por cargas internas y externas

Finalmente, al disponer con la geometría dimensionada en sus puntos principales: espesor de la pared y la presión interna del recipiente a presión. Se procederá a calcular si el recipiente a presión, basado en los parámetros anteriores, cumple con cargas de seguridad y los cimientos del sistema.

Dentro de la normativa ASME sección VIII, en el párrafo UG-22, se menciona que existen cargas de seguridad. Mismas que el diseño del recipiente a presión deberá soportar. Las cargas en mención se resumen al valor f presentado como sobreespesor.

3.2.1. Esfuerzos generados por el propio peso del recipiente.

Para el cálculo del valor en gestión, se procederá a emplear las dimensiones de espesor y volumen calculados previamente.

Según Shigley, el cálculo de la masa de un cuerpo puede calcularse con la ecuación 3.8:

$$m = \rho * Vt \quad (3.8)$$

Donde:

m =masa del cuerpo.

ρ =densidad del material

Vt =volumen total del sistema.

Dentro de la masa del sistema, se involucra el peso del aire al interior de la cámara, por lo cual el peso total del sistema se evidenciaría en la ecuación (3.9):

$$m_t = m_s + m_{aire} \quad (3.9)$$

Donde:

m_t =masa total del sistema.

m_{aire} =masa total del aire.

m_s =masa del recipiente a presión.

3.2.1.1. Masa del recipiente a presión.

Considerar el cuerpo como un cilindro es válido para el análisis, sin embargo, se tomará en cuenta el valor calculado en la sección 3.1.4.2 y los valores de densidad de la tabla 2.3

$$m_c = \rho_{acero304} * V_c = 104 [kg] \quad (3.10)$$

3.2.1.2. Masa del aire

Como lo menciona la normativa ASME sección VIII, las sustancias o gases sometidos a presión, adquieren propiedades diferentes a las evaluadas a presión ambiente. Por lo cual se procederá a calcular la densidad el aire con las condiciones de trabajo presentadas.

$$\rho_{aire} = \frac{P * M_A}{Z * R * T} = 2.26 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Donde:

ρ_{aire} =densidad de aire.

P =presión a la que se encuentra sometida.

M_A =masa molar del aire seco $0.028 \left[\frac{kg}{mol} \right]$.

Z =factor de compresibilidad adimensional 1.025.

R =constante molar de los gases $8.31 \left[\frac{J}{K \cdot mol} \right]$.

T = temperatura termodinámica.

Obtenida la densidad, se procede al cálculo de la masa del aire dentro del sistema con una operación de 30[psi].

$$m_{aire} = 2.26 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 0.23[m^3] = 0.52[kg]$$

Como valor final la masa del sistema se obtiene que presentara un valor equivalente a:

$$m_t = 621[kg] + 0.52[kg] = 104.52[kg]$$

3.2.1.3. Presión máxima de funcionamiento.

La expresión de la presión máxima (Pa) de trabajo del sistema, se encuentra descrita por la siguiente ecuación.

$$P_a = \frac{4B}{3 \left(\frac{D_o}{t} \right)} \quad (3.11)$$

Donde:

B = factor.

D_o = diámetro exterior.

P_a = presión máxima de diseño.

t = espesor de diseño.

Para determinar el valor de B, se emplea las ecuaciones para el cálculo del factor A y el cálculo de este factor, se emplea con las siguientes relaciones (3.13) y (3.14).

$$\frac{L}{D_o} = 1,69 \quad (3.12)$$

$$\frac{D_o}{t} = 118 \quad (3.13)$$

Como proceso de obtención de estos valores, se procederá a evaluarlos en la ilustración 2 de los anexos.

$$A = 0,0015$$

$$B = 7000 \left[\frac{lb}{pulg^2} \right]$$

Al obtener estos valores y reemplazarlos en la ecuación 3.11, se obtiene que la presión máxima de trabajo del sistema será:

$$P_a = \frac{4B}{3 \left(\frac{D_0}{t} \right)} = 467,02 [kPa]$$

Determinando que la presión máxima de trabajo presenta una magnitud mayor a la presión de diseño. Es válido indicar que el espesor en consideración es el indicado.

3.2.2. Esfuerzos en los soportes.

Al considerar un recipiente horizontal soportado por bases como las expuestas en este proyecto. Los soportes se comportan como una viga apoyada.

Para el cálculo de la viga de soporte, se toman las siguientes consideraciones:

1. La carga se presenta de forma diferente cuando se dispone el recipiente total o lleno hasta cierto nivel. Para el estudio se considera un recipiente lleno.
2. Se presenta en función del ángulo de agarre a los esfuerzos que soporta el recipiente.
3. Las cargas que el peso del sistema genera se encuentran combinadas.

El peso total del sistema lleno de aire se encuentra establecido por la siguiente ecuación.

$$W_{total} = m_t * g = 1025.34 [N] \quad (3.14)$$

Al considerar un recipiente cilíndrico horizontal, se encontrará sometido a los siguientes esfuerzos:

- Esfuerzos por flexión a nivel longitudinal.
- Esfuerzos cortantes en el eje tangencial.
- Esfuerzos alrededor del área circular.

Es importante mencionar, que los valores positivos obtenidos por medio de las ecuaciones indican que presentan esfuerzos a tensión y los valores con signo negativo representarían esfuerzos a compresión.

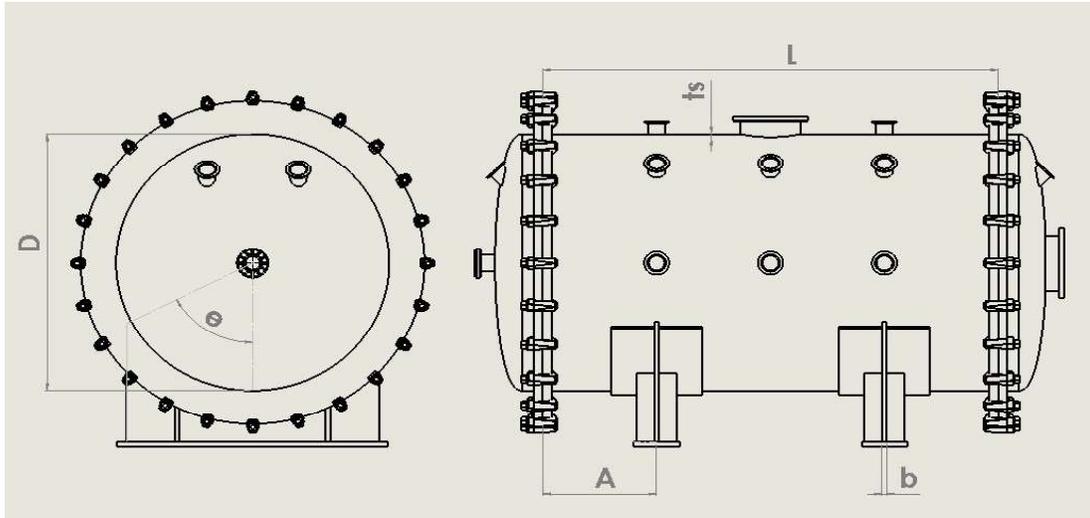


Figura 3.2. Representación de valores para el cálculo de esfuerzos del sistema.

Fuente: Propia

3.2.2.1. El esfuerzo por flexión a nivel longitudinal.

Considerando que se aplica carga solo a la mitad del sistema, la formula obtenida del código ASME para el esfuerzo cortante del material, se define por la ecuación 3.15.

$$S_1 = \pm \frac{\left(QA \left[1 - \frac{1 - \frac{A}{L} + \frac{R^2 - H^2}{2AL}}{1 + \frac{4H}{3L}} \right] \right)}{k_1 R^2 t_s} \quad (3.15)$$

Donde:

L =distancia entre las tangentes del sistema=1000 [mm].

R =radio del exterior=600 [mm].

E =eficiencia de la soldadura=0,85.

t_s = espesor de diseño=0,5 [mm].

D = diámetro interior=590 [mm].

θ = ángulo en contacto=120°.

k_1 =valor obtenido del anexo (ilustración 2) =0,335.

Para el cálculo de los valores en mención, es importante evaluar el diagrama de cuerpo libre del sistema, presentado en la figura 3.3.

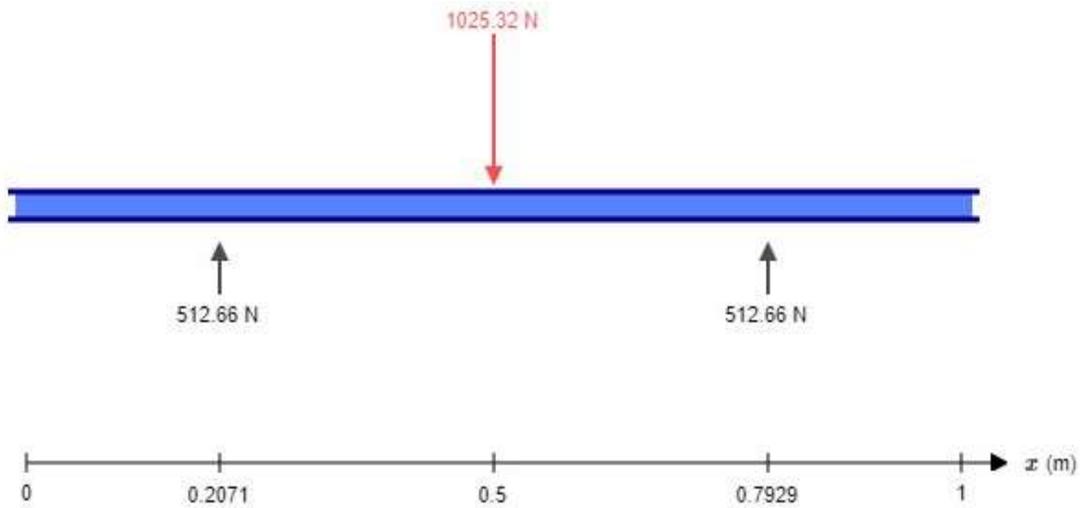


Figura 3.3. Diagrama de cuerpo libre del sistema.

Fuente: Propia.

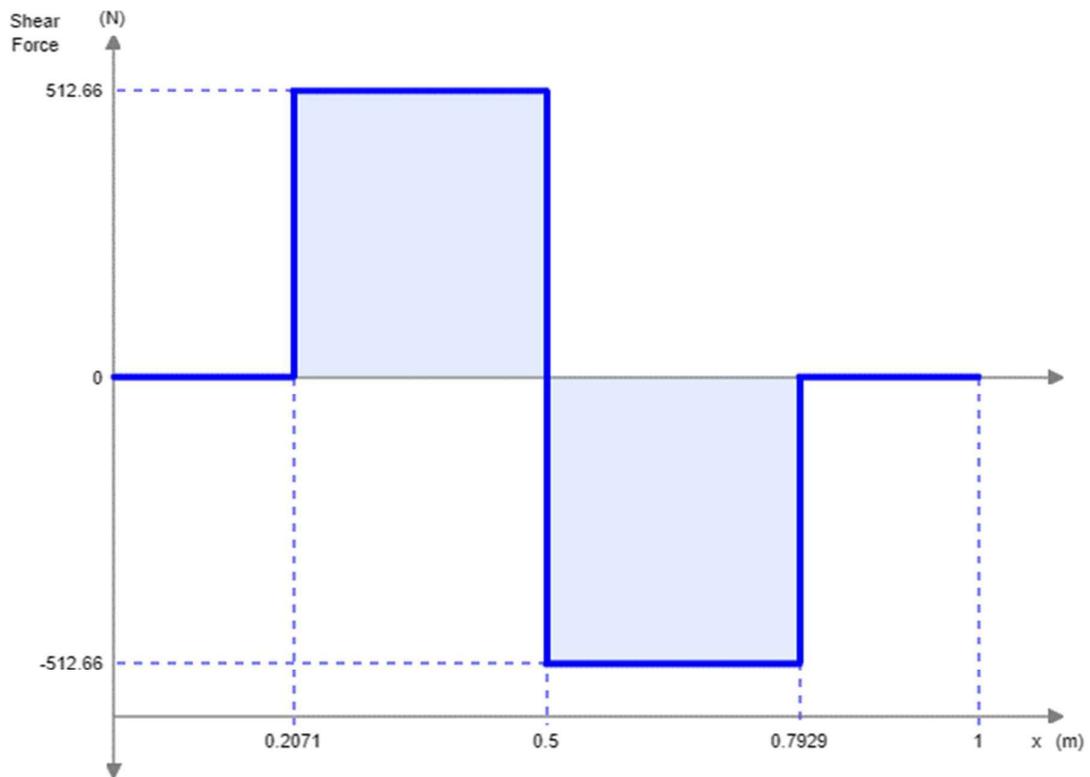


Figura 3.4. Diagrama de esfuerzo cortante.

Fuente: Propia.

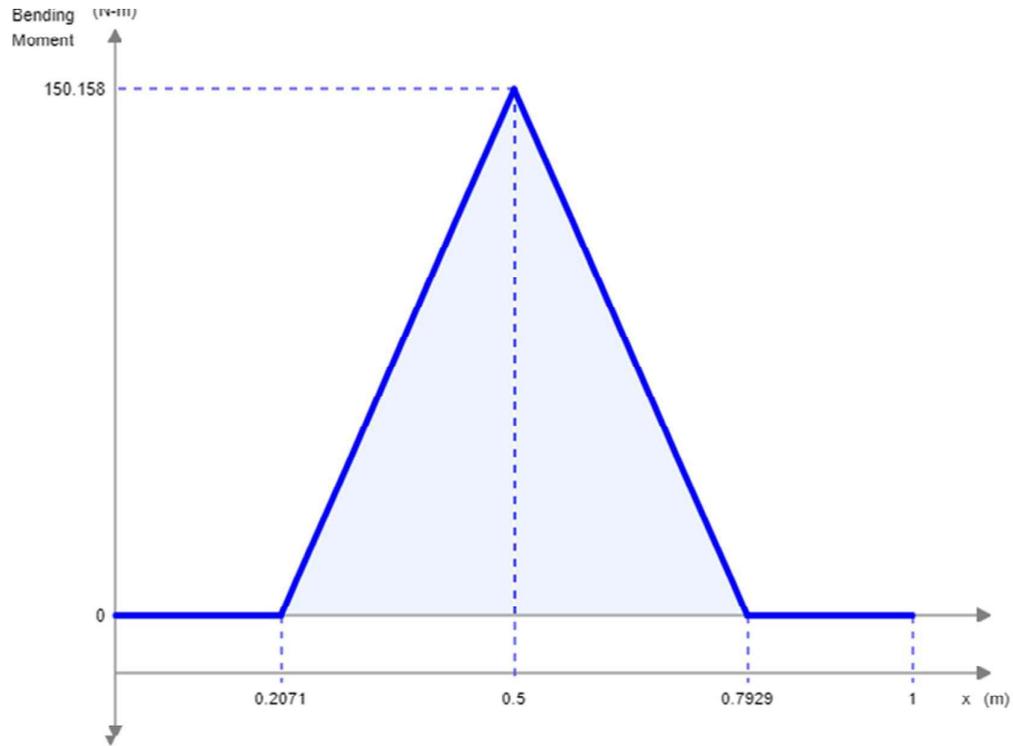


Figura 3.5. Diagrama del momento flector

Fuente: Propia

Realizando una evaluación de estabilidad el sistema, se obtiene que la carga soportadas es:

$$Q = \frac{W_t}{2} = 3048,55 [N] \quad (3.16)$$

Cálculo de la distancia óptima para los soportes

$$A = 0,5 * \frac{D}{2} = 0,15 [m] \quad (3.17)$$

El valor de H se expresa por la ecuación:

$$H = \frac{D}{4} = 0,15 [m] \quad (3.18)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 3.15:

$$S_1 = 1966,66 [kPa]$$

El esfuerzo por presión interna se verá calculado por la ecuación 3.19

$$S_{pi} = \frac{PR}{2t_s} = 6205,2 [Pa] \quad (3.19)$$

Como validación del proceso de tensión, la suma de $S_1 + S_{pi}$, no deben presentar una magnitud mayor al esfuerzo permitido del material multiplicado por la eficiencia de la soldadura.

$$S_1 + S_{pi} \leq S * E \quad (3.20)$$

$$1972565 [Pa] \leq 340 * 10^6 [Pa]$$

La condición en los soportes se cumple.

Para el análisis a compresión, el esfuerzo debido a la presión interna S_{pi} menos S_1 no deberá representar una magnitud mayor a la mitad del punto de fluencia del material.

$$S_1 \leq \frac{E_1}{29} \left(\frac{t}{R} \right) \left[2 - \left(\frac{2}{3} \right) * 100 * \left(\frac{t}{R} \right) \right] \quad (3.21)$$

Al reemplazar los valores descritos, en la ecuación 3.20, se determina que el valor de s_1 es menor al calculado. Por lo cual cumple con el requisito de diseño.

$$1966,66 [Pa] \leq 35285,5 [Pa]$$

3.2.2.2. Esfuerzo cortante tangencial.

Para el cálculo de los valores de esfuerzo cortante tangencial, se requerirá realizar una comprobación adimensional inicial.

$$A \leq \frac{R}{2} \quad (3.22)$$

$$300 \leq 300$$

Reemplazando los valores y comprobando que se cumple la condición de diseño Los esfuerzos tangenciales serán los descritos en la ecuación 3.23 y 3.24.

El esfuerzo tangencial localizado en el casco se define por la expresión.

$$S_2 = \frac{K_4 Q}{R t_s} = 1796,36 [kPa] \quad (3.23)$$

Donde:

R =radio exterior.

t_s =espesor de diseño.

K_4 =valor obtenido de la ilustración 2 de los anexos=0,88.

Q = carga de los soportes.

A =distancia optima de los soportes.

S_{pi} =Esfuerzo por presión interna.

Como condición de diseño, el valor de S_2 no debe superar en más de 0,8 veces el esfuerzo permitido por el material. Esta condición se cumple.

$$S_2 < 0,8S \quad (3.24)$$

$$1796,36 [Pa] < 5520 [Pa]$$

3.2.2.3. Esfuerzo circunferencial.

Para el cálculo del esfuerzo en mención, es necesario validar la siguiente condición

$$L < bR \quad (3.25)$$

Substituyendo los valores de la ecuación.

$$1000 [mm] < 6000[mm]$$

Al cumplirse la relación, el cálculo de los esfuerzos se representa con las ecuaciones 3.26 y 3.27.

Esfuerzo circunferencial, situado en la parte superior de los soportes.

$$S_4 = -\frac{Q}{4t_s(b + 1,56\sqrt{Rt_s})} - \frac{12k_6QR}{L * t_s^2} = -637,56 [kPa] \quad (3.26)$$

Esfuerzo circunferencial situado en la parte inferior de los soportes.

$$S_5 = -\frac{k_7Q}{4t_s(b + 1,56\sqrt{Rt_s})} = -1610,34 [Kpa] \quad (3.27)$$

Donde:

R =radio.

t_s =espesor de diseño.

b =ancho de los soportes=10mm.

k_6 = Valor obtenido de la ilustración 2 del anexo=0,0013.

k_7 =Valor obtenido de la ilustración 2 del anexo=0,760.

Q =carga de los soportes.

L =distancia entre tangentes=1000 [mm].

Como comprobación de diseño, los valores calculados en las ecuaciones 3.26 y 3.27, no deben ser mayores a 0,5 veces el punto de fluencia de compresión del material.

$$S_5 < 0,5 * S$$

$$S_4 < 0,5 * S$$

Reemplazando los valores, se determina que se cumplen las dos condiciones, por lo cual el elemento se encuentra dimensionado en su totalidad.

3.2.3. Cálculo de las orejas de izaje

Tomando en cuenta que, el recipiente a presión diseñado requerirá transporte, mantenimiento o desplazamiento. Es necesario que los tanques dispongan de este accesorio (ASME Sección VIII, 2017) .

$$t_o = \frac{W}{SD} = 1,6 [mm] \quad (3.28)$$

Donde:

W = peso del sistema.

S =esfuerzo a la tensión del material.

C =distancia presentada en la tabla 3.2.

Con el valor determinado, es conveniente analizar la norma ASME sección VIII, en la cual se establecen ciertos parámetros para el diseño de las orejas.

Según la tabla 3.2, la oreja de izaje seleccionada, se representa en la primera fila (marcada de rojo). Las dimensiones se encuentran expresadas en pulgadas.

Tabla 3.2. Dimensiones para las orejas de izaje en pulgadas.

Capacidad Max [kg]	A	B	C	D	F	E	G	H	CANT. PIEZAS
2000	3/4	4- 1/2	4- 1/2	1- 1/2	2- 1/4	1-1/2	3/4	3/8	2
4500	3/4	7- 3/4	7- 3/4	1- 1/2	2- 1/4	1-1/2	3/4	3/8	2
5800	1	8- 7/6	8- 7/6	1- 1/2	2- 1/2	1-1/2	3/4	3/8	2
13500	1- 1/2	8- 3/4	8- 3/4	1- 1/2	3- 1/2	1-1/2	3/4	1/2	2
24500	2	9- 3/4	9- 3/4	1- 5/8	3- 1/2	1-11/16	3/4	1/2	4

Fuente:(ASME Sección VIII, 2017).

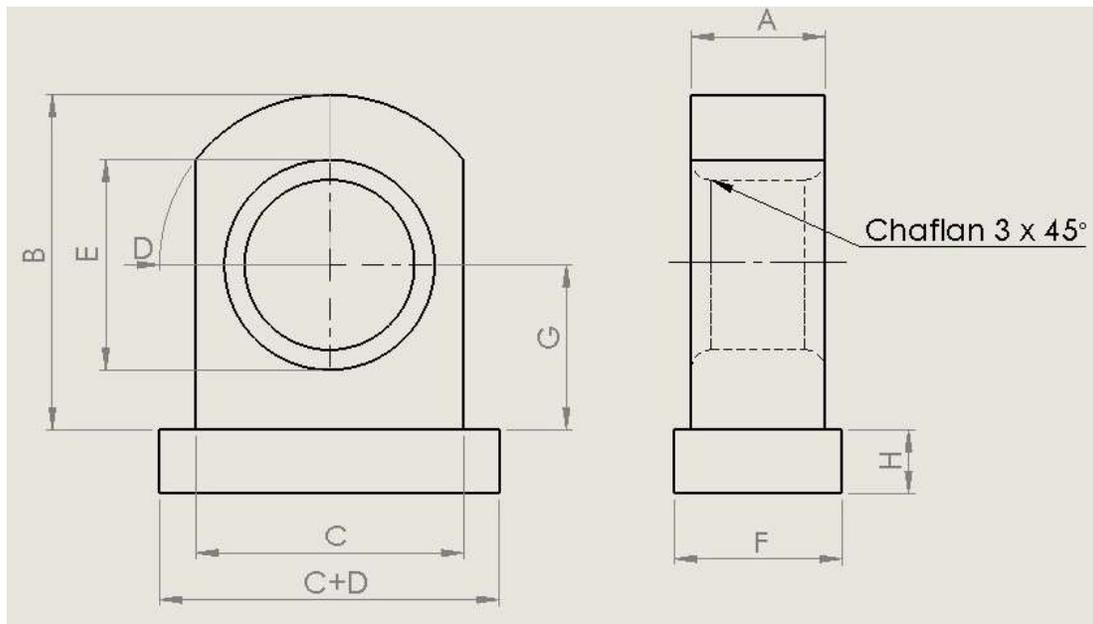


Figura 3.6. Disposición de medidas para el diseño de orejas de izaje.

Fuente: Propia.

3.2.3.1. Espesor mínimo requerido, para placa de respaldo.

$$t_c = \frac{W}{S(C + t_o)} = 0,46 [mm] \quad (3.29)$$

Considerando que el espesor calculado de la placa de respaldo es menor a 1 [mm], no es necesaria la aplicación del elemento. (León, 2001)

3.2.3.2. Área de soldadura aplicada.

$$A_s = 1,4142 * t_o * C = 109,68 [mm^2] \quad (3.30)$$

3.2.3.3. Área de soldadura requerida.

$$A_r = \frac{W}{S} = 50,32 [mm^2] \quad (3.31)$$

Como validación del proceso de soldadura, se realizará la siguiente comprobación expresada en la ecuación 3.32. Misma que es cumplida.

$$A_s \geq A_r \quad (3.32)$$

$$109,68 [mm^2] \geq 50,32 [mm^2]$$

3.2.4. Dimensionamiento de las bridas en los recipientes a presión.

Al diseñar recipientes a presión, accesorios y conexiones de entrada como: bridas de salida, válvulas para visualización y drenaje, permiten que el sistema pueda utilizarse con accesorios complementarios al recipiente a presión.

La instalación de bridas, dentro de un recipiente a presión, requiere perforaciones en el cuerpo del recipiente a presión o tapa. Realizando la operación de perforado, se permite que las líneas de esfuerzos que cruzaban por el área que se ha retirado, pasaran de manera tangente a la perforación.

Como procedimiento de control previo es necesario validar la necesidad de aplicar placas de refuerzo, como compensación del material retirado.

3.2.4.1. Cálculo de refuerzo para las aberturas.

Dentro de esta sección, se evaluará los diferentes tipos de bridas que se disponen en el sistema; DN 2.75 ISO-KF, DN40 ISO-KF, DN 100 ISO-K.

Se aplicará un ejemplo de cálculo para la brida DN 2.75 ISO-KF y se presentará un resumen de los valores calculados del resto de bridas en la tabla 3.3. Las fórmulas presentadas se han obtenido de la sección VIII del código ASME.

Es importante mencionar que las bridas evaluadas son de dimensiones estándar. Para esta sección solo se evaluará la necesidad de placa de refuerzo.

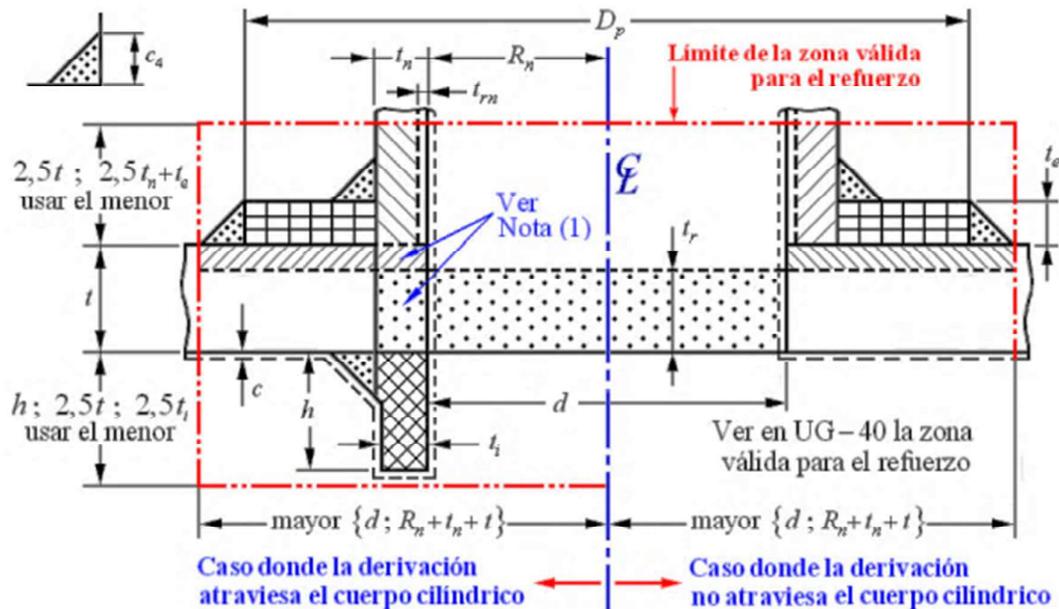


Figura 3.7. Representación de cotas para una brida.

Fuente: (León, 2001)

En la ecuación 3.33, se expresa el espesor requerido por el recipiente de presión.

$$t_r = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (3-33)$$

Donde:

P = presión de diseño.

R =radio interior del recipiente a presión.

S =esfuerzo a la tensión del material del recipiente a presión.

E =eficiencia de soldadura=85%.

C =corrosión permitida=6,35 [mm].

S_t =esfuerzo a la tensión del material de la brida.

t_{nom} =espesor nominal=3 [mm].

- Determinación del espesor requerido por el recipiente a presión.

$$t_t = 0,58 [mm] \quad (3.34)$$

- Determinación del espesor real del cuerpo.

$$t = t_r - C = 6,86 \text{ [mm]} \quad (3.35)$$

- Determinación del espesor del cuello de la brida por presión interna.

$$t_{rn} = \frac{PR_n}{S_t E - 0,6P} = 0,53 \text{ [mm]} \quad (3.36)$$

- Determinación del espesor real de la boquilla.

$$t_n = \frac{D_{nom} - d}{2} = 9,53 \text{ [mm]} \quad (3.37)$$

Donde R_n se obtiene de la siguiente formula.

$$R_n = \frac{d}{2} = 303,28 \text{ [mm]} \quad (3.38)$$

$$d = d_{ext} - 2t_{dom} + 2C = 606,55 \text{ [mm]} \quad (3.39)$$

- Determinación del límite de refuerzo por la parte interior.

$$H_2 \text{ el menor de } de = \begin{cases} 2,5t = 23,62 \text{ [mm]} \\ 2,5t_n = 23,62 \text{ [mm]} \end{cases} \quad (3.40)$$

- Determinación de la parte que ingresa de la boquilla.

$$h = H_2 - 2C = 10,92 \text{ [mm]} \quad (3.41)$$

- Determinación del límite de refuerzo por la parte exterior.

$$H_1 \text{ el menor de } de = \begin{cases} 2,5t = 23,61 \text{ [mm]} \\ 2,5t_n + t_c = 39,62 \text{ [mm]} \end{cases} \quad (3.42)$$

- Determinación del radio de la placa de refuerzo.

$$W \text{ el mayor de } de = \begin{cases} d = 107,95 \text{ [mm]} \\ \frac{d}{2} + t_n + t = 105 \text{ [mm]} \end{cases} \quad (3.43)$$

- Determinación del área del agujero del recipiente.

$$A = d_t = 1006,45 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.44)$$

- Determinación de las áreas que actúan como refuerzo.

$$A_1 \text{ el mayor de } de = \begin{cases} (t - t_r)d = 16,13 \text{ [mm}^2\text{]} \\ (t_n - t_{rn})(t_n - t) = 16 \text{ [mm}^2\text{]} \end{cases} \quad (3.45)$$

- Determinación de exceso en el cuello de la boquilla.

$$A_2 = t_n(2h) = 430,32 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.46)$$

- Determinación del área que ingresa.

$$A_3 = t_n(2h) = 211,62 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.47)$$

- Determinación del área del cordón de soldadura.

$$A_4 = 4(b^2) = 361,29 [mm^2] \quad (3.48)$$

- Comprobación si no se requiere refuerzo.

$$A \leq A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad (3.49)$$

$$987,09 [mm^2] \leq 1000,9 [mm^2]$$

Considerando que la condición se cumple, la brida, no requiere de placa de refuerzo. Sin embargo, se calcula el área disponible y diámetro de la placa de refuerzo como ejemplo para cálculos de las dos bridas restantes.

- Determinación del área disponible.

$$A_5 = A - (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) = 13 [mm^2] \quad (3.50)$$

- Determinación diámetro de la placa de refuerzo.

$$D_p = \frac{A_s}{t_e} + d + 2t_n = 3 [mm] \quad (3.51)$$

Tabla 3.3. Resumen valores calculados para bridas DN40 ISO-KF y DN 100 ISO-K.

Valor por calcular	Símbolo	Dimensión	DN40 ISO-KF	DN 100 ISO-K
Espesor requerido por el recipiente a presión	t_r	[mm]	8,37	10,4
Espesor real del cuerpo	t	[mm]	3	3
Espesor del cuello de brida	t_{rn}	[mm]	0,53	0,58
Radio nominal	R_n	[mm]	50,90	53,98
Espesor real de la brida	t_n	[mm]	8,54	9,53
Límite de refuerzo interior	H_2	[mm]	23,81	24,8
Sección que ingresa la boquilla	h	[mm]	10,1	12
Límite de refuerzo exterior	H_1	[mm]	23,81	24,8
Radio de la placa de refuerzo	W	[mm]	105,5	108,5
Área del agujero del recipiente	A	[mm ²]	1008	1100
Áreas que actúan como refuerzo	A_1	[mm ²]	16,13	15,8
Exceso en el cuello de la boquilla	A_2	[mm ²]	428,1	430
Área que ingresa al sistema	A_3	[mm ²]	200	215
Área del cordón de soldadura	A_4	[mm ²]	362,5	360
Requiere de placa de refuerzo			No	No
Área disponible	A_5	[mm ²]	100	150

3.3. Cálculo de esfuerzos Von Mises

Como parte del proceso de solución de los sistemas sometidos a presión (cámara de vacío), se aplica la teoría de membrana, misma que considera que debido a la distribución de la carga, el sistema no presenta esfuerzos ni momentos cortantes en ninguna sección del cuerpo.

En la figura 3.8. se grafica el aislamiento de un elemento del elemento de espesor e , limitado por planos meridianos y secciones normales.

En la figura 3.9, se presenta el diagrama de la disposición de esfuerzos relacionado al sistema de presión.

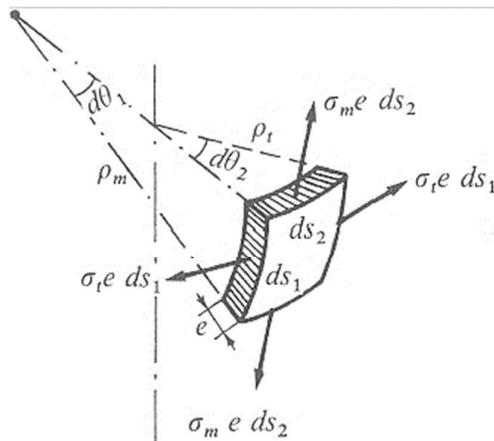


Figura 3.8. Elemento aislado del tanque para cálculo de esfuerzos.

Fuente:(Obando, 2019)

3.3.1.1. Recipientes cilíndricos y esféricos sometidos a presión interna.

Tomando en consideración que, la geometría del cuerpo en estudio, las tensiones tangenciales sobre las caras del elemento son nulas y $\rho_m = \infty$ y $\rho_t = r$, la ecuación

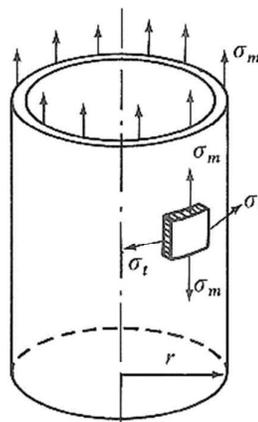


Figura 3.9. Diagrama de cuerpo libre (Esfuerzos del tanque).

Fuente: (Obando, 2019)

La tensión en dirección del meridiano se ve expresada por la ecuación 3.52 (Obando, 2019)

$$\sigma_m = \sigma_{yy} = \frac{P_a r}{2e} \quad (3-52)$$

Donde:

P =presion máxima de funcionamiento del tanque

r =radio del cuerpo

e = espesor del sistema

La tensión en el sentido Transversal se expresa con la ecuación

$$\sigma_t = \sigma_{xx} = \frac{P_a r}{e} \quad (3-53)$$

El esfuerzo máximo de Von Misses, se representa con la ecuación 3.54

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - (\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{xx}\sigma_{zz}) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{zy}^2)} \quad (3-54)$$

Para el cálculo de la deformación máxima se emplea la ecuación 3.55 (Callister, 2016).

$$e = \sigma_{VM} * E \quad (3-55)$$

Donde:

e =deformación

E =elasticidad del elemento

Reemplazando los valores de los esfuerzos en la ecuación 3.54, se obtiene un valor de esfuerzo máximo de Von Misses de 295000,185 [Pa], para el cuerpo del tanque y una deformación equivalente a 0,00698 [mm].

3.3.1.2. Tensión de Von Mises en la viga de soporte

Considerando que la viga de soporte presenta una carga solo en el sentido vertical, la ecuación del esfuerzo máximo de Von Mises, se expresa en la ecuación 3.57.

Aplicando la ecuación del esfuerzo cortante mencionada en el libro generado por el autor Callister, se presenta la ecuación 3.54.

$$\tau = 0,576 * \sigma_E \quad (3-56)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3(\tau_{xy}^2)} \quad (3-57)$$

Reemplazando los valores, se obtiene que el valor máximo de Von Misses, para la viga de soporte es de un valor de:

$$\sigma_{VM} = 22 * 10^6 [Pa]$$

Empleando los términos de la ecuación 3.54, se obtiene que la deformación máxima en la viga de soporte es de 0,0052 [mm]

3.3.1.3. Tensión de Von Mises en la oreja de izaje

Considerando que la oreja de izaje, presenta una carga solo en el sentido vertical, la ecuación del esfuerzo máximo de Von Mises, se expresa en la ecuación 3.58.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3(\tau_{xy}^2)} \quad (3-58)$$

Aplicando la ecuación del esfuerzo cortante mencionada en el libro generado por el autor Callister, se presenta la ecuación 3.59.

$$\tau = 0,576 * \sigma_E = 144 [MPa] \quad (3-59)$$

Donde:

σ_E = límite elástico del material

Reemplazando los valores, se obtiene que el valor máximo de Von Misses para la oreja de izaje, es de:

$$\sigma_{VM} = 42 * 10^5 [Pa]$$

Empleando los términos de la ecuación 3.55, se obtiene que la deformación máxima en la oreja de izaje es de 0,00052 [mm].

3.3.1.4. Tensión de Von Mises en la sección perforada del tanque

Considerando la geometría esférica que presenta el sistema en las tapas, los esfuerzos se representan de la siguiente forma (Obando, 2019)

$$\sigma_t = \sigma_m = \frac{P_a r}{2e} \quad (3-60)$$

Reemplazando los valores de la ecuación 3.60, en la ecuación 3.54, se obtiene un valor máximo de Von Misses equivalente a:

$$\sigma_{VM} = 109000 [Pa]$$

Y un valor equivalente a la deformación de:

$$e = 0,0006 [mm]$$

3.4. Diseño de la soldadura y juntas.

Las uniones de soldadas se identificarán por una categoría y un tipo de soldadura. El termino categoría de soldadura define la localización de la junta, pero no el tipo de junta soldada. Los diferentes tipos de soldadura se caracterizan por los siguientes aspectos:

1. Juntas a tope y juntas angulares, donde el ángulo del ápice es menor o igual a 30 grados. Producidos por una doble soldadura o por otros procesos que producen la misma calidad de material de aporte depositado en las dos partes de la superficie.
2. Juntas soldadas producidas por la soldadura a un lado de la superficie con platina de respaldo.
3. Juntas soldadas generadas a un solo lado sin platina de respaldo.
4. Junta de esquinas realizadas con soldaduras con penetración completa con o sin platina de respaldo.
5. Juntas angulares hechas con soldadura de penetración completa donde el ángulo del ápice es mayor a 30 grados.
6. Juntas de esquina hechas con soldadura de penetración parcial con o sin platina de respaldo.
7. Soldaduras de filete.

Fuente: (ASME Sección VIII, 2017).

Las soldaduras presentadas en todo el diseño del sistema se realizarán con el método de arco eléctrico sumergido, teniendo en cuenta que este proceso presenta la forma manual y automática. Al aplicar cualquiera de los procedimientos, es necesario que exista penetración completa y realizar un proceso de limpieza superficial.

Como proceso de validación de soldadura, según la norma ASME IX, es necesario que se realicen pruebas de radiografiado, de manera total o por puntos. Cuando se realiza el proceso de radiografía por puntos, la norma indica que se deben tomar capturas cada 15 metros de soldadura y la longitud de cada radiografía será de 15 centímetros como valor mínimo. Para el sistema en estudio, se deberá realizar las pruebas de manera total.

Es necesario que antes de realizar el procedimiento de soldadura, la superficie sea limpiada o preparada, permitiendo un proceso óptimo.

Generar los procesos de soldadura (WPS, WPQ), permitirán especificar preparación superficial, diámetro de electrodos, etc. Es importante, considerar soldadores calificados para el proceso de soldadura a efectuarse. Todos los procesos mencionados, deberán regirse al código ASME, sección IX "Welding and Brazing Qualifications" (2017).

El material de aporte o electrodo a aplicarse en la soldadura deberá ser compatible con el material base. Los electrodos que presentan estas características y permiten la soldadura de recipientes a presión son el 6010 y el 7018.

Según el código ASME, sección IX (2017). Es necesario que, al momento de aplicar soldadura a recipientes de presión, se emplee un gas inerte y se recomienda que se aplique una solución a base de ácido nítrico y ácido clorhídrico para pasivar las soldaduras.

3.4.1.1. Juntas soldadas.

Las categorías de uniones soldadas son empleadas para especificar los requerimientos con relación a:

- Tipo de junta permitida
- Grado de inspección

Según la normativa ASME, sección IX (2017), se localizan de acuerdo con la figura 3.10.

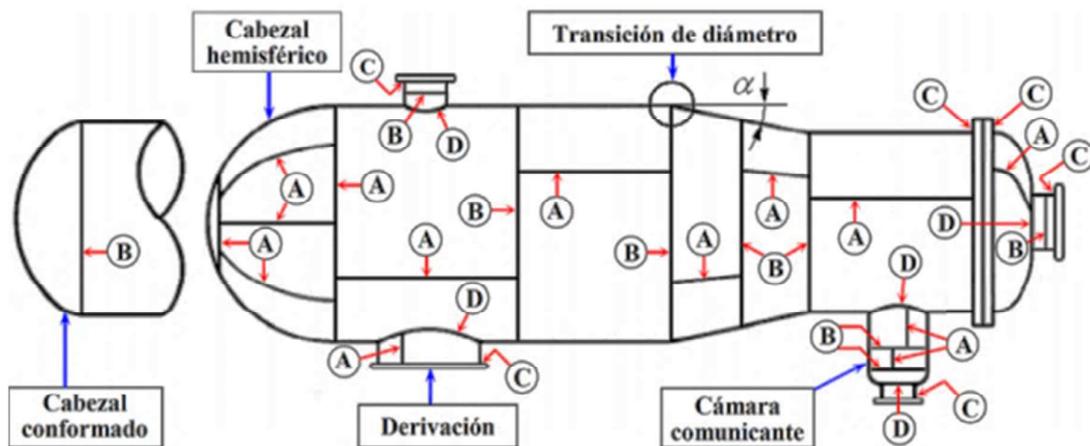


Figura 3.10. Localizaciones típicas de las uniones soldadas

Fuente: (León, 2001)

3.4.1.1.1. Categoría A

- 1) Uniones longitudinales en: Cuerpo principal, cámaras comunicadas, transiciones de diámetro, derivaciones.
- 2) Uniones soldadas en: recipientes esféricos, cabezales conformados o cabezales planos
- 3) Uniones circunferenciales con conexión de los hemisferios con: cuerpo principal, transiciones de diámetro

3.4.1.1.2. Categoría B

- 1) Uniones circunferenciales en: cuerpo principal, cámaras comunicadas, derivaciones, transiciones de diámetro
- 2) También uniones circunferenciales que conectan los cabezales conformados (excepto hemisféricos)

3.4.1.1.3. Categoría C

Uniones que conectan las bridas, las placas de tubos o los cabezales planos con el cuerpo principal

3.4.1.1.4. Categoría D

Uniones que conectan las cámaras comunicadas o las derivaciones.

3.4.1.2. Tipos de juntas

Los tipos de uniones soldadas, utilizadas en la fabricación de recipientes a presión, se detallan en la figura 3.11 y se describen a continuación.

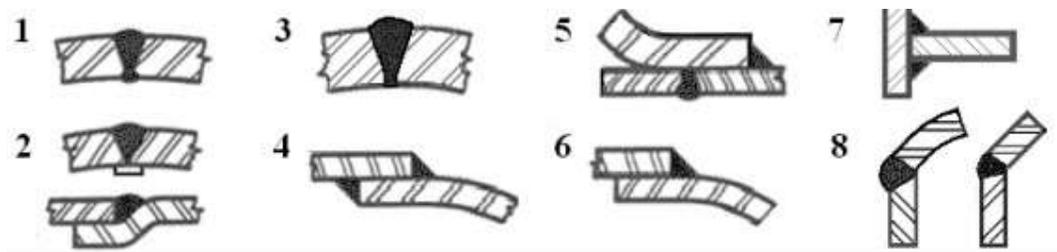


Figura 3.11. Tipos de uniones soldadas

Fuente: (León, 2001)

Las uniones tipo 1, son juntas a tope de doble arco de soldadura. No tienen limitaciones y se aplican a todas las categorías (A, B, C, D). Para el caso presente de la cámara de vacío, este tipo de soldadura se aplicará al cuerpo del tanque.

Las uniones tipo 2 son juntas a tope de simple arco, con respaldo. No presentan limitaciones

Las uniones tipo 3, son juntas a tope de simple arco de soldadura, sin respaldo. Se aplica solo en uniones circunferenciales, donde el espesor no es mayor a 16 [mm] y el diámetro exterior no es mayor a 600 [mm]. Aplicado en categorías A, B, C.

Las uniones tipo 4, son juntas a filete completas de doble solape. Para uniones longitudinales, considerando que el espesor no es mayor a 10 [mm]. Para el caso presente de la cámara de vacío, este tipo de soldadura se aplicará a las bridas.

Las uniones tipo 5 son juntas filete completas de simple solape. Se aplica a uniones circunferenciales para cabezales donde el espesor no es mayor a 13 [mm]. Aplicado en la categoría C.

Las uniones tipo 6 son juntas a filete completas de simple solape. Aplicadas a categorías A y B

Las uniones tipo 7 son juntas de esquina. Aplicados a las categorías C y D.

Las uniones tipo 8 son juntas en ángulo. Se aplican a categorías B, C y D.

3.4.2. Cálculo de la soldadura

Considerando que la mayor cantidad de esfuerzo se aplica en el cuerpo del tanque. Se tomará como referencia este elemento para el cálculo de la soldadura del sistema.

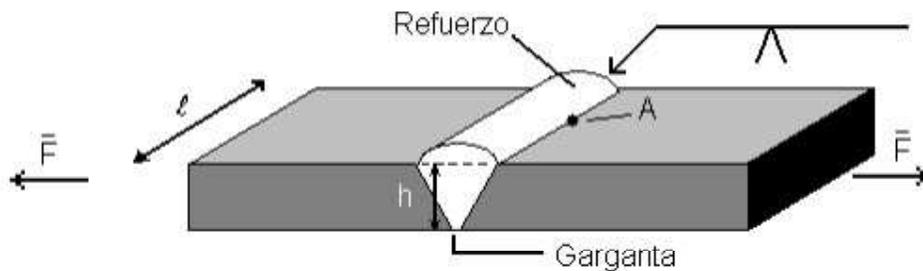


Figura 3.12. Representación de la soldadura para la cámara de vacío

Fuente: (Ringegni, 2008)

3.4.2.1. Garganta de soldadura

La fórmula del esfuerzo admisible (σ_{adm}) se encuentra expresada en la ecuación 3.61.

$$\sigma_{adm} = \frac{P}{h * l} \quad (3-61)$$

Donde

l = longitud del cordón de soldadura

h = altura de la garganta

P = carga

Considerando la norma ASME, sección VII (2017), la altura de la garganta se encuentra expresada por la ecuación 3.62:

$$h = \frac{1}{4 * t} \quad (3-62)$$

Donde

t =espesor de diseño [pulg]

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 3.62. Se obtiene que la altura de la garganta es $h=1.24$ [mm] (Ver Anexo 6). Aplicando la normativa ASME, sección VIII, se indica que se debe aplicar un refuerzo de 3 [mm] a la soldadura. Por consiguiente, el valor del esfuerzo admisible equivale a 295 [kPa].

Como condición para validar la soldadura, la tensión de trabajo deberá ser menor a la tensión del material de la soldadura mas solicitada, multiplicada por 0,6.

$$\sigma_{adm} = \frac{P}{h * l} \leq 0.6 * \sigma_{mat} \quad (3-63)$$

$$295[kPa] \leq 350 [kPa]$$

Por consiguiente, la soldadura es considerada como válida.

3.4.2.2. Resistencia de las uniones soldadas

Los electrodos que se emplean en juntas soldada varían en forma considerable. Tomando en cuenta lo mencionado, los electrodos se identifican con el siguiente código:

EXXXX

Iniciando el conteo desde la izquierda, la primera y segunda x indican la resistencia ultima en [kPsi].

La segunda x: posición del soldador

La tercera x: variables como corriente a utilizar, penetración, escoria, entre otros.

Considerando los valores calculados en la sección 3.4.2.1 y coincidiendo con la normativa ASME (2017), el electrodo seleccionado es el E6010

3.4.2.3. Tratamiento térmico posterior a la soldadura.

Tomando como referencia el código ASME IX, sección UCS-56, se debe aplicar un revenido o alivio de esfuerzos en el sistema.

3.5. Pruebas en los recipientes a presión

Las pruebas en los recipientes de presión se realizan durante y después de los procesos de fabricación. Estas técnicas, permiten llevar un control de calidad y garantizar el funcionamiento del sistema.

Las pruebas que se emplean dentro del proceso de fabricación son: líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido, entre otros. Cada compañía que fabrique cualquier conjunto soldado es responsable de realizar y emitir un informe (dossier) de las pruebas de calidad y procesos de fabricación.

Como proceso de validación después de la fabricación, el código ASME sección VIII, indica que se debería someter al sistema a pruebas neumáticas.

3.5.1.1. Pruebas neumáticas.

La presión neumática de prueba será alcanzada por la inyección de gases al sistema. Para el caso en estudio, se aplica helio, verificando los cambios de presión y posibles fugas existentes. Al aplicar pruebas neumáticas, el código ASME VIII, recomienda que la presión de prueba sea de un valor máximo de 1,25 veces la presión de trabajo.

3.6. Procesos de producción para la construcción de la cámara de vacío

La culminación del proceso de diseño de la cámara de vacío no supone el fin del trabajo sobre la composición de la cámara. Si bien se ha provisto toda la información necesaria para el montaje y fabricación del sistema, es durante la elaboración del plan de fabricación cuando se deberá efectuar las adaptaciones correspondientes para facilitar la labor del ensamblado en campo.

3.6.1. Obtención de las partes y generación de planos de fabricación.

El punto de partida de la mayoría de las piezas a emplear dentro del proceso de construcción de la cámara son planchas del material escogido, que serán una serie de piezas en bruto de estas, se obtendrán los componentes definitivos.

Los planos de todos los procesos se encontrarán en la sección de anexos.

Las planchas que se han determinado para el proceso de fabricación son:

- Plancha de acero AISI 304: se comenzará el proceso con una placa de 1220 x 6000x5 [mm] de ancho, longitud y espesor respectivamente. Esta placa permite el corte de los

elementos con las respectivas sobredimensiones de cara al proceso de fabricación. Las operaciones indicadas debido al espesor y complejidad se deben realizar mediante corte por plasma.

- Plancha de acero ASTM A36: los elementos de acero son generados únicamente para las vigas de soporte de la cámara, dichos elementos se deberán fabricar de una plancha de 1220 x 6000x5 [mm] de ancho, longitud y espesor respectivamente.

3.6.2. Ensamble de la cámara de vacío.

El montaje final de la cámara de vacío requiere una operación previa de preparación superficial externa, esto debido a la soldadura que se realizara en acero AISI 304, permitiendo de esta manera generar la fundición adecuada para la unión de los elementos.

En una primera instancia, se debe realizar un proceso de tratamiento mediante inyección de arena a presión, la cual permita obtener una cierta rugosidad que favorezca la adhesión de la soldadura y galvanizado, proporcionando un buen comportamiento óptico en el interior de la cámara.

Al finalizar este tratamiento, se procede a adjuntar los componentes o bridas pequeñas. Las bridas, permiten el funcionamiento óptimo de los accesorios. Para lo cual, se montan sobre las secciones perforadas. Se instalarán los sistemas de cierre de la cámara y los correspondientes conectores, se ensamblará las vigas de soporte de la cámara.

El ensamble de la cámara culmina con la unión de las tapas del sistema al resto de la estructura de acero AISI 304 y la instalación de todos los dispositivos electrónicos que permiten la extracción del aire y control de los fenómenos en el interior de la cámara.

3.7. Verificación y validación del modelo por simulación

Los procesos de verificación y validación de cualquier modelo permiten emular el comportamiento del sistema bajo ciertas condiciones preestablecidas. Los modelos en la actualidad cada vez son más empleados debido a su gran aporte en la solución de problemas, solvencia en la toma de decisiones y sin afectar la seguridad humana (Rodríguez, 2016).

Es importante indicar que según la publicación de Rodríguez los modelos sometidos a una simulación presentan imitaciones aproximadas del fenómeno en estudio y nunca imitan exactamente el sistema del mundo real. Debido a lo mencionado, un modelo debe ser verificado y validarse.

3.7.1. Verificación de la simulación.

Verificar una simulación, implica comparar la estructura del modelo propuesto directamente con la estructura del sistema real (Rodríguez, 2016).

3.7.1.1. Resultados de la simulación de los soportes.

El elemento de estudio se configura con las siguientes consideraciones:

- Dispone de una sujeción fija en la parte inferior.
- Dispone de una carga distribuida en la parte superior, equivalente a 1000 [N].
- Presenta características de mallado según la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Consideraciones para el mallado de los soportes de la cámara de vacío.

Descripción	Valor
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	10.2907 [mm]
Tolerancia	0.514537 [mm]
Número total de nodos	21240
Número total de elementos	10436
Cociente de aspecto máximo	70.779

Fuente: Propia

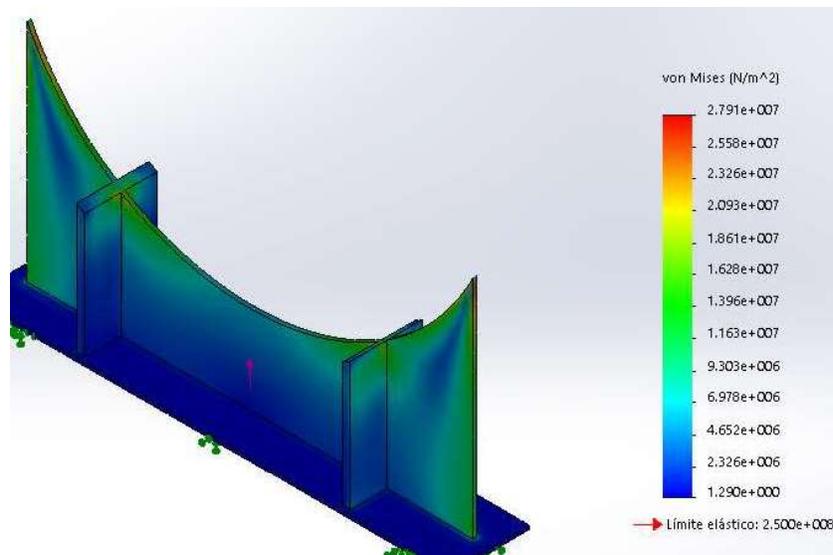


Figura 3.13. Resultado de la simulación de los soportes, Tensiones.

Fuente: Propia.

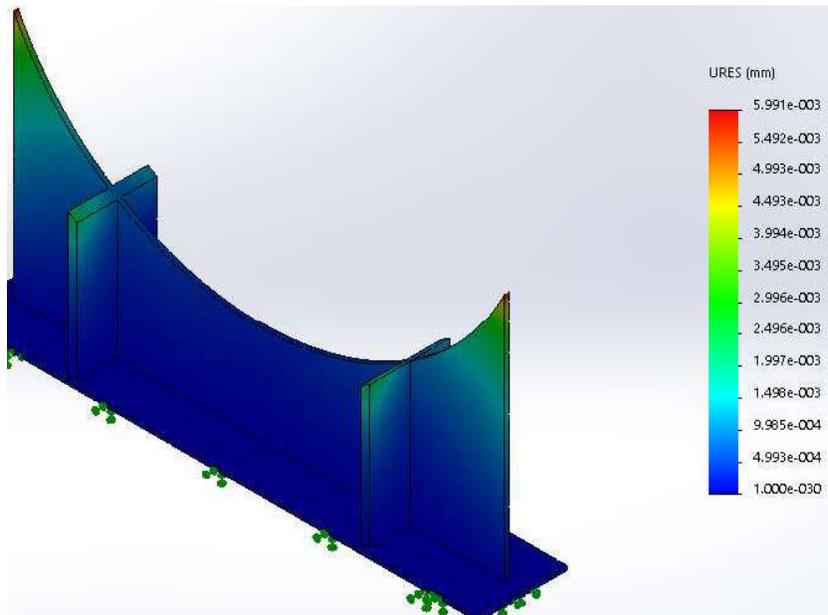


Figura 3.14. Resultado de la simulación de los soportes, deformación.

Fuente: Propia.

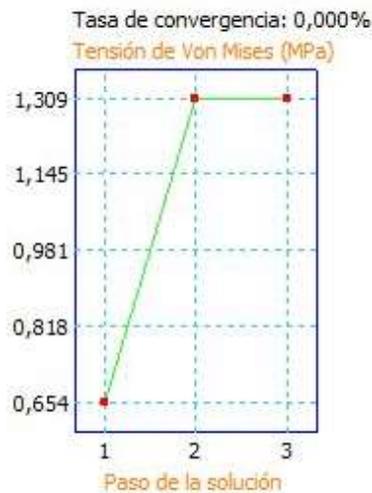


Figura 3.15. Grafica de convergencia viga de soporte

Fuente: Propia

En la gráfica 3.9, se presenta la gráfica de convergencia de la simulación correspondiente a la viga de soporte de la cámara de vacío.

3.7.1.2. Resultados de la simulación de las orejas de izaje.

El elemento de estudio se configura con las siguientes consideraciones:

- Dispone de una sujeción fija en la parte inferior.
- Dispone de una carga distribuida en la parte interior del anillo, equivalente a 1000 [N].
- Presenta características de mallado según la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Consideraciones para el mallado de los soportes de la cámara de vacío.

Descripción	Valor
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	2,67798 mm
Tolerancia	0,133899 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	19674
Número total de elementos	12617
Cociente de aspecto máximo	47,769
con cociente de aspecto < 3	99,8

Fuente: Propia

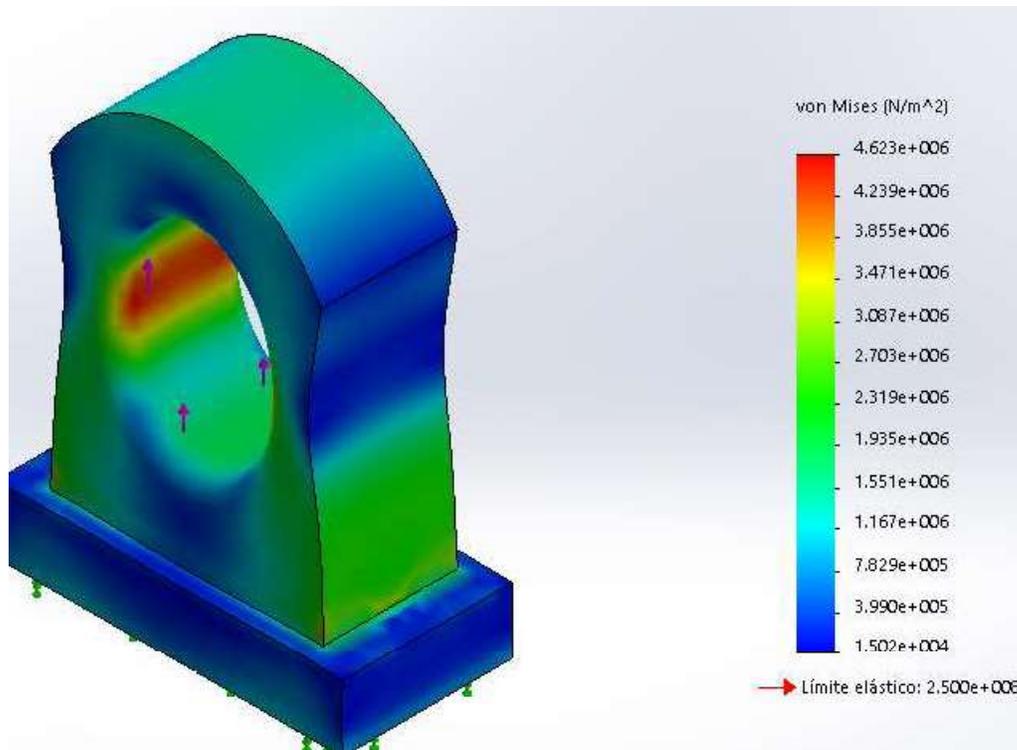


Figura 3.16. Resultado de la simulación de las orejas de sujeción, Tensiones.

Fuente: Propia.

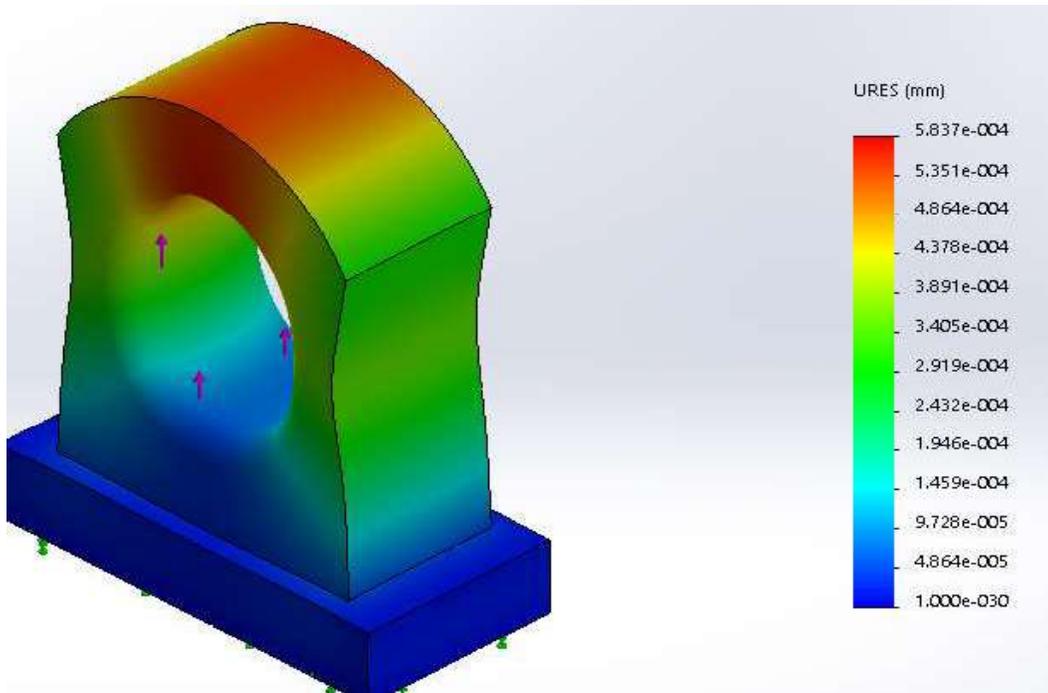


Figura 3.17. Resultado de la simulación de las orejas de sujeción, deformación.

Fuente: Propia.

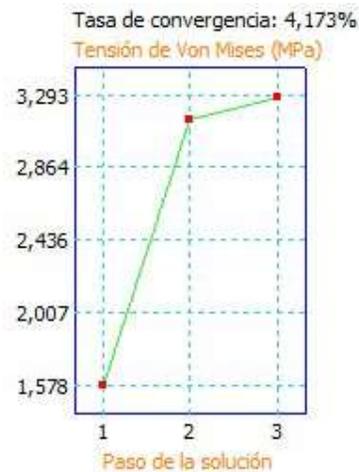


Figura 3.18. Gráfica de convergencia simulación orejas de izaje

Fuente: Propia

En la gráfica 3.12, se presenta la gráfica de convergencia de la simulación correspondiente a la oreja de izaje empleada en la cámara de vacío.

3.7.1.3. Resultados de la simulación del cuerpo de la cámara de vacío.

El elemento de estudio se configura con las siguientes consideraciones:

- Dispone de una sujeción fija en la parte inferior.

- Dispone de una carga distribuida en la parte interior de la cámara de vacío, equivalente a 700 [Pa].
- Presenta características de mallado según la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Consideraciones para el mallado del cuerpo de la cámara de vacío.

Descripción	Valor
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Control de malla	Definida
Tamaño de elementos	41,146 mm
Tolerancia	2,0573 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	26,823
Número total de elementos	13585
Cociente de aspecto máximo	123,86

Fuente: Propia.

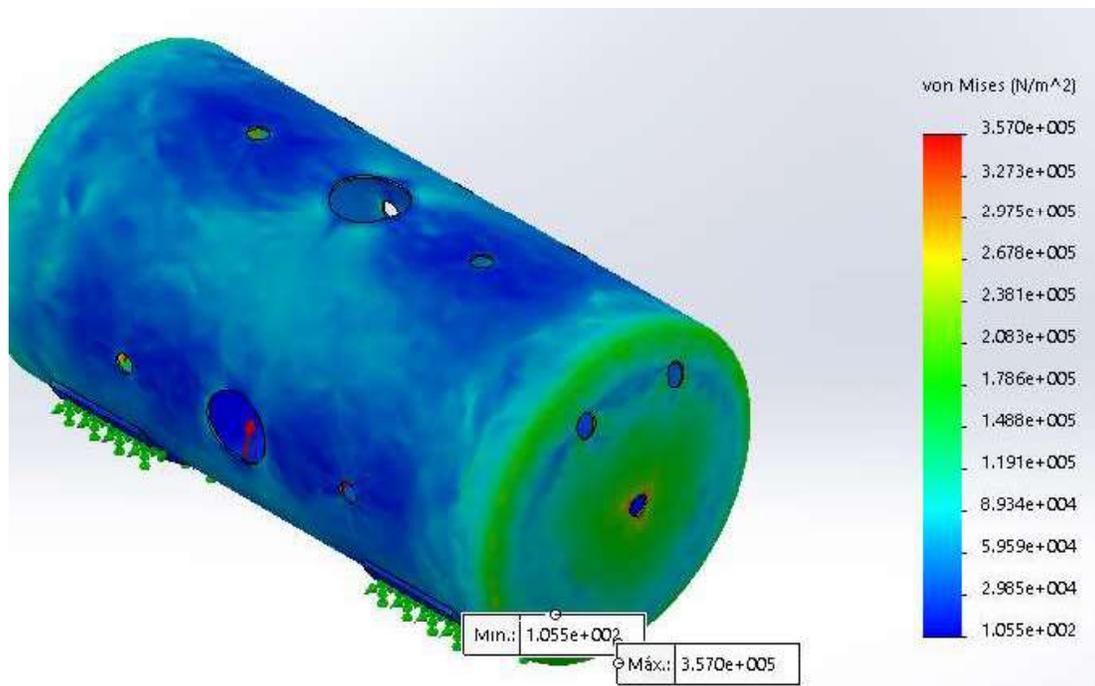


Figura 3.19. Resultado de la simulación del cuerpo del tanque, tensiones.

Fuente: Propia.

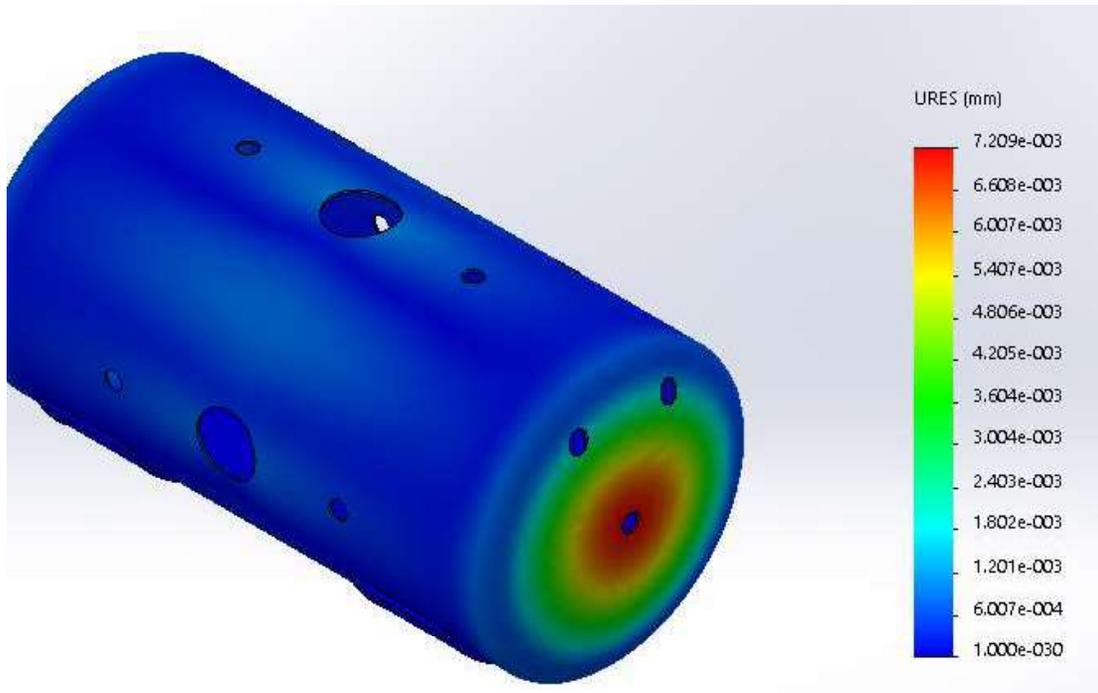


Figura 3.20. Resultado de la simulación del cuerpo del tanque, deformación.

Fuente: Propia.

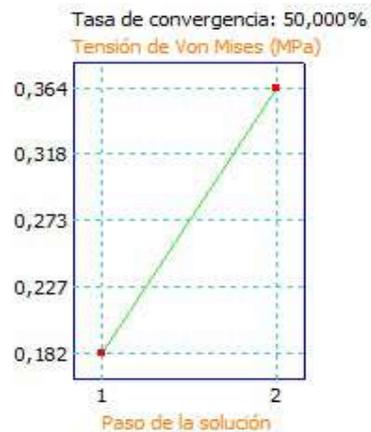


Figura 3.21. Gráfica de convergencia conjunto cámara de vacío

Fuente: Propia

En la figura 3.12, se presenta la convergencia de la simulación correspondiente a la cámara del tanque de vacío.

3.7.1.4. Resultados de la simulación de la perforación de bridas.

Para esta sección, se evalúa los puntos más críticos obtenidos en la sección 3.4.1.3. Permitiendo evaluar la necesidad de placas de respaldo.

El elemento de estudio se configura con las siguientes consideraciones:

- Dispone de una sujeción fija en la parte lateral del elemento.
- Dispone de una carga distribuida en la parte interior de la cámara de vacío, equivalente a 700 [Pa].
- Presenta características de mallado según la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Consideraciones para el mallado del cuerpo de la cámara de vacío.

Descripción	Valor
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	5,23279 mm
Tolerancia	0,26164 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	21,423
Número total de elementos	10914
Cociente de aspecto máximo	3,549

Fuente: Propia

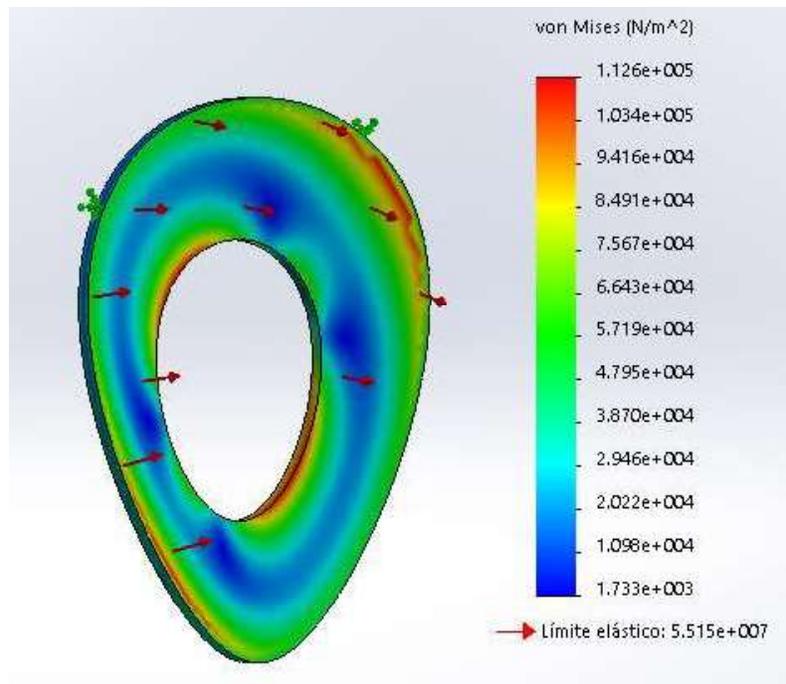


Figura 3.22. Resultado de la simulación perforación brida ISO-100, tensiones.

Fuente: Propia.

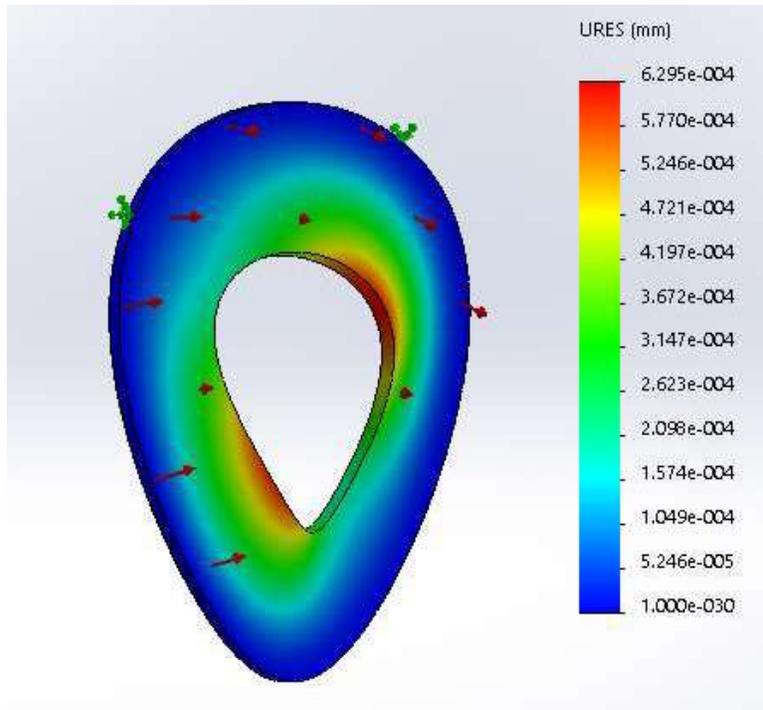


Figura 3.23. Resultado de la simulación perforación brida ISO-100, deformación.

Fuente: Propia.

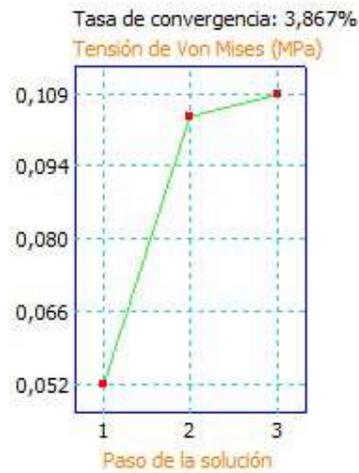


Figura 3.24. Gráfica de convergencia correspondiente a la perforación del tanque.

Fuente: Propia

En la figura 3.18, se presenta la convergencia de la simulación correspondiente a la cámara del tanque de vacío.

3.7.2. Validación de la simulación.

Como proceso de validación, se realiza una comprobación entre los valores obtenidos por medio de cálculos y por simulación.

Se emplea la técnica de estadística del error relativo, permitiendo analizar el porcentaje de error generado en base a los datos reales y los simulados. Tomando en cuenta esta consideración se emplea la fórmula de porcentaje de error relativo absoluto, de tal manera permitirá determinar la confiabilidad del modelo. La expresión matemática que plasma lo descrito se establece en la ecuación 3.61.

$$\%error\ relativo = \left| \frac{dato\ simulado - dato\ real}{dato\ real} \right| * 100 \quad (3.64)$$

Como un proceso de validación, se seleccionaron variables específicas que son representativas para el sistema y agrupan en gran medida el comportamiento del objeto de estudio.

Tabla 3.8. Comparación valores calculados vs simulados

Sección en análisis	Valor en análisis	Magnitud	Valor simulado	Valor calculado	% error
Cuerpo del tanque	Esfuerzo máximo Von Mises	[Pa]	3,57E+05	2,95E+05	21%
Cuerpo del tanque	Deformación máxima	[mm]	7,20E-03	6,98E-03	3%
Orejas de izaje	Esfuerzo máximo Von Mises	[Pa]	4,62E+06	4,20E+06	10%
Orejas de izaje	Deformación máxima	[mm]	5,80E-04	5,20E-04	12%
Perforación del tanque	Esfuerzo máximo Von Mises	[Pa]	1,12E+05	1,09E+05	3%
Perforación del tanque	Deformación máxima	[mm]	6,30E-04	6,00E-04	5%
Soporte	Esfuerzo máximo Von Mises	[Pa]	2,79E+07	2,20E+07	27%
Soporte	Deformación máxima	[mm]	5,91E-03	5,20E-03	14%

Fuente: Propia

Al evaluar la tabla 3.8, se obtiene las siguientes observaciones:

- El valor elevado de la tasa de error con el esfuerzo máximo, para el cuerpo del tanque se relaciona con la geometría evaluada. Para el valor calculado, se tomó como

geometría a un cilindro completo sin perforaciones, a diferencia de la simulación que se presenta el cuerpo con perforaciones.

- La diferencia entre los valores calculados y simulados en la oreja de izaje, puede relacionarse a los redondeos que presenta la figura en las esquinas y en el cálculo manual se considera como una forma recta.
- Al evaluar el área de soporte de la cámara y sus valores obtenidos, la diferencia de resultados se acopla a las consideraciones en el cálculo manual. Debido a que la viga se calcula como estructura con patines rectos y en la simulación el patín superior, presenta una configuración circular.
- El promedio de error permite determinar la validez de la simulación. Como afirma Isidro (2000), una simulación es válida si presenta un valor promedio error menor al 12%

3.7.3. Tiempo de vaciado de la cámara.

Para el cálculo de esta sección, se toma en referencia las fórmulas empleadas en el documento establecido por Wekker J. (Características y dimensionamiento de sistemas de bombeo) (Wekker, 2004).

La expresión que determina la presión del sistema, en función del tiempo y caudal de extracción de la bomba, se expresa en la ecuación 3.62.

$$P_2 = \frac{P_1}{e^{Q \cdot T / V}} \quad (3-65)$$

Donde

P_2 Presión de vacío del sistema.

P_1 Presión máxima de vacío.

V volumen por evacuar.

T Tiempo.

Q Caudal de extracción de aire ($0,45 \left[\frac{m^3}{min} \right]$, bomba de pre-vacío y $15 \left[\frac{m^3}{min} \right]$, bomba de vacío).

Los valores de caudales y presiones máximas de operación se extraen de la ficha de datos técnicos de cada bomba, disponibles en el laboratorio de física.

Con la expresión identificada y con la ayuda de una hoja de cálculo, es factible la representación gráfica del comportamiento de la presión en función del tiempo para el sistema estudiado (figura 3.19).

El resultado del cálculo de la presión de trabajo permite determinar dos tiempos importantes en el funcionamiento del sistema:

- El tiempo en el que la bomba de pre-vacío, llega al valor máximo de operación (15 [Torr] o 2000 [Pa]), es equivalente a 10 [min].
- El tiempo en el que la bomba de vacío llega al valor máximo de operación (10^{-7} [Torr] o $1,33 * 10^{-5}$ [Pa]), es equivalente a 13 [min].

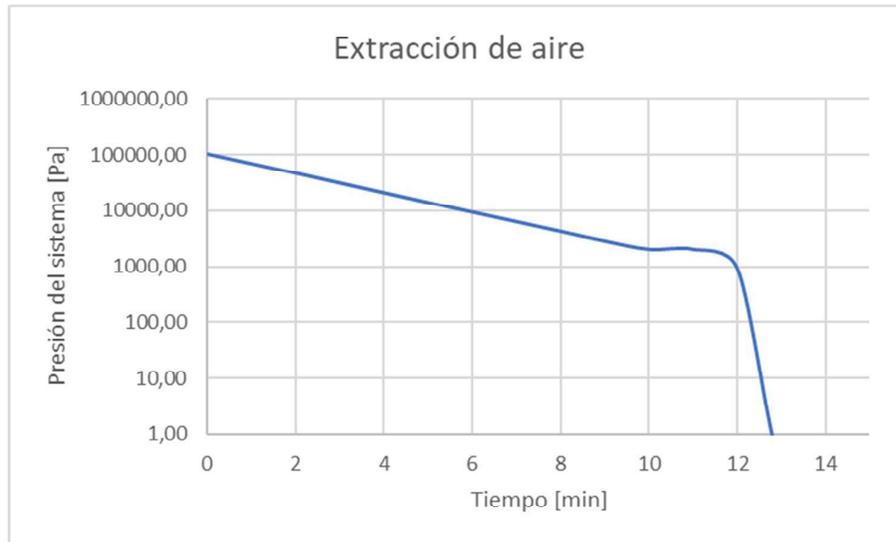


Figura 3.25. Comportamiento del sistema con bombas de pre-vacío y vacío.

Fuente: Propia.

Tabla 3.9. Valores para el comportamiento de las bombas

Tiempo[<i>min</i>]	Presión tanque [Pa]	Tiempo[<i>min</i>]	Presión tanque [Pa]
0	1,01E+05	10	2,00E+03
1	6,80E+04	11	2,00E+03
2	4,57E+04	12	9,00E+02
3	3,07E+04	13	2,29E-01
4	2,06E+04	14	8,43E-02
5	1,38E+04	15	3,10E-02
6	9,29E+03	16	1,14E-02
7	6,24E+03	17	4,19E-03
8	4,19E+03	18	1,54E-03

Fuente: Propia

3.7.4. Conexiones de tubería de la cámara de vacío.

Considerando que, el laboratorio de física dispone de la bomba de pre vacío, misma que incluye sus accesorios, por lo cual no es necesario un estudio a profundidad del tipo de

tubería a emplearse. Sin embargo, en la figura 3.20, se genera el diagrama de conexiones para la bomba de pre-vacio

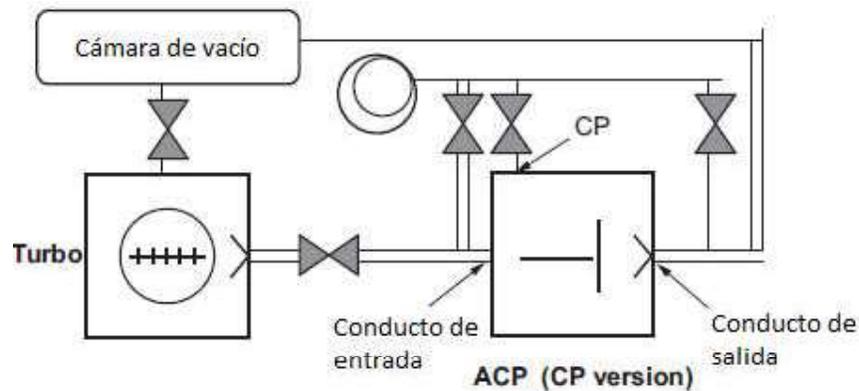


Figura 3.26. Diagrama de conexiones bomba de pre-vacio.

Fuente:(«Vacuum Technology and Vacuum Pumps from the leader», 2019).

En la figura 3.20, se representa las conexiones a la cámara de vacío de la bomba de pre-vacio y bomba de vacío.

La representación gráfica, correspondiente a la tubería a ocuparse en el sistema, se presenta en forma de líneas rectas.

La representación gráfica de válvulas de control de caudal, se expresan con el símbolo de doble triángulo.

La bomba de pre-vacio, se representa con un cuadrado y presenta el nombre de ACP, (nombre de la serie del producto)

3.7.4.1. Funcionamiento del circuito.

Previo al encendido del circuito, es necesario realizar las siguientes comprobaciones:

- Comprobar que la entrada de la bomba esté conectada de manera correcta a la línea de bombeo.
- Comprobar que las líneas de escape no presenten obstrucciones y que todas las válvulas del sistema estén abiertas.
- Conectar la bomba de vacío y pre vacío a la red eléctrica.
- Revisar los manómetros, comprobando que la presión de entrada de aire no sea más alta a la presión atmosférica.
- Verificar que la temperatura ambiente, se encuentre en el rango de operación de la máquina. (12 a 40 [°C])

Encendido del sistema

- Colocar el interruptor en la posición "ON", la bomba de pre-vacío arranca automáticamente.
- Se inicia el proceso de purga automáticamente.
- Al alcanzar la presión de 15 [Torr], encender la bomba de vacío. (los tiempos de funcionamiento, se encuentran en la sección 3.5.3)

Apagado del sistema

- Apagar la bomba de vacío y esperar 5 minutos.
- Aislar la línea de bombeo de pre-vacío (válvula de entrada de la bomba, cerrada) y dejarla funcionar durante 1 hora con la purga abierta.
- Colocar el interruptor principal en la posición "OFF".

3.7.5. Accesorios de la cámara de vacío.

Como complemento del diseño de la cámara de vacío, los accesorios disponibles en el laboratorio y a utilizarse en la cámara de vacío, se modelan. Permitiendo generar un plano del ensamble completo del sistema. La digitalización de los accesorios de la cámara de vacío, se presentan en la sección 3 de los anexos. En la figura 3.21, se presenta una posible combinación de elementos estándar, conectados a la cámara de vacío.

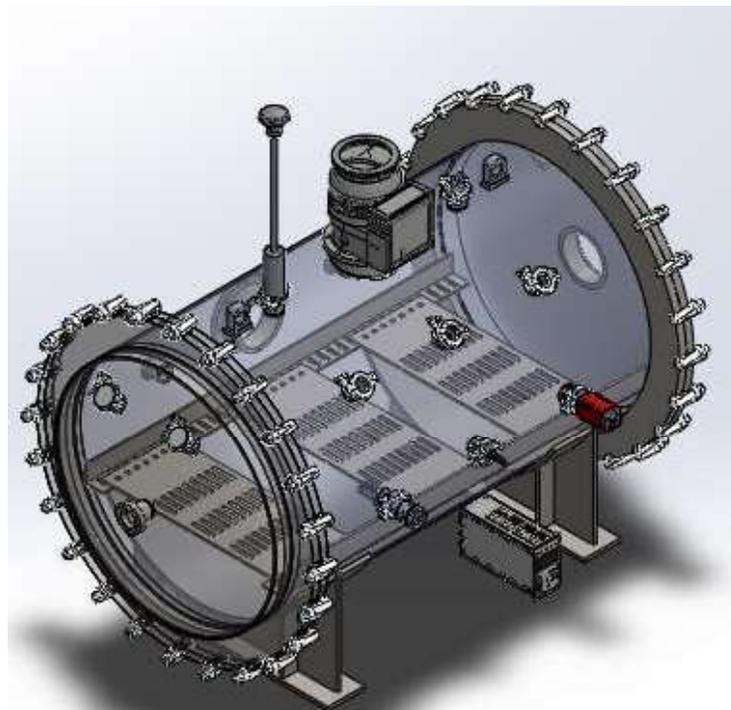


Figura 3.27. Cámara de vacío ensamblada con una posible solución.

Fuente: Propia.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo, permitió realizar el cálculo y simulación de un recipiente sometido a presión de vacío. La aplicación de normas y códigos, como son el código ASME IX y el código ASME sección VIII, permiten presentar un sistema seguro y hábil para fabricación.

La ejecución de este trabajo refuerza los conocimientos adquiridos por el estúdiante con relación al diseño de recipientes a presión horizontales, realizando cálculos del cuerpo de la cámara de vacío, orejas de izaje, soportes y placas de refuerzo en las bridas con base en el código ASME sección VIII.

El proceso de selección de materiales es un método complejo, requiere de un número considerable de factores, por consiguiente, la labor no es sencilla. La utilización de software especializado logra simplificar procesos y aclarar el panorama al momento de la selección del material a utilizarse.

Una vez concluidas las evaluaciones correspondientes y aplicando los métodos conocidos y mencionados con anterioridad, se concluye que el diseño presentado cumple con los requerimientos del cliente y es apto para la fabricación. Es importante recalcar que la simulación del sistema completo, con todos sus componentes ensamblados, requiere de un alto valor computacional. Por lo cual la simulación se reduce a evaluaciones parciales del sistema.

El proyecto ha culminado, presentando un diseño de la cámara de vacío. Tomando en consideración trabajos previos relacionados al diseño de recipientes a presión, se ha realizado una revisión centralizada y se ha implementado una solución que cumple, en gran medida, los parámetros de diseño. El diseño adjunta un estudio por medio de métodos numéricos, de la cámara que permite justificar tanto la arquitectura como los materiales que se han aplicado en base a consideraciones técnicas y cálculos. Así mismo se ha trabajado sobre los procesos de fabricación y pruebas post – fabricación, previniendo las operaciones necesarias para el ensamblaje.

Finalmente, el empleo de programas de dibujo y diseño como SOLIDWORKS y AUTOCAD, permiten plasmar los dibujos, simular los elementos y alternar soluciones del sistema en formato digital. De manera especial SOLIDWORKS debido a que actualmente es uno de los CADs de dibujo más versátiles

Referencias bibliográficas.

- Aerlinkon. (2016). *Flanges and Fittings*. Leybold vaccum.
- ASME Section VIII. (2017). *ASME BPV Code, Section VIII, Division 1: Design & Fabrication of Pressure Vessels* (p. 150).
- Bachiller, R. (2019). Partículas y espacio vacío | Opinion Home | EL MUNDO. Recuperado 12 de septiembre de 2019, de <https://www.elmundo.es/opinion/2017/01/25/58879c6f22601d843e8b4599.html>
- Bochem. (2019). ¿Qué significa DN? Recuperado 2 de octubre de 2019, de <http://www.bochem.com/es/Informaci%C3%B3n+%C3%BAtil/DN.html>
- Callister, W. D. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Barcelona: Reverté.
- Cryovac. (2012). *Catálogo Cryovac*. Recuperado de http://www.cryovac.es/pdf/120914_cryovac_vacio.pdf
- Departamento de Física Ciudad Universitaria. (2019). *Técnicas de Vacío*. Recuperado 15 de septiembre de 2019, de http://materias.df.uba.ar/4aa2017c2/files/2016/03/vacio_lab04_Acha.pdf
- Diaz, F. (2018). *Recipientes a presión*.
- Figuroa, M. (2018). *Procesos para la selección de materiales*. Universidad Politécnica de Catalunya, Cataluña.
- Guiterréz, N. (2002). *Tipos de presión y vacío*. 3, 4.
- Humbert, A. (2015). BOMBA DE VACIO | Que es, tipos, para que sirve y como funciona. Recuperado 10 de marzo de 2019, de <https://como-funciona.co/una-bomba-de-vacio/>
- INEN. (2019). Metrología INEN : La presión y sus tipos de medición. Recuperado 12 de septiembre de 2019, de <http://inenmetrologia.blogspot.com/2018/09/la-presion-y-sus-tipos-de-medicion.html>

- Inficon. (2019). Bridas de adaptacion ISO-K/ ISO-KF. Recuperado 10 de marzo de 2019, de <https://products.inficon.com/getattachment.axd/?attaName=8EABE5D9-EE28-478A-994F-FE4C7DF1E85D>
- León, J. (2001). *Diseño y Calculo de Recipientes a Presión* (2001.^a ed.). Mexico: Mollendo.
- Leybold Hispánica. (2018). Elementos de conexión | Productos | Leybold. Recuperado 15 de septiembre de 2019, de Leybold Online Shop website: <https://www.leyboldproducts.es/productos/elementos-de-conexion/>
- López, C. (2018). *Sistemas de vacio*. Recuperado de http://materias.df.uba.ar/I4ba2017c2/files/2012/07/vacio_lab04_Acha.pdf
- Malo, A. (2013). *Diseño de una camara de vacio para medidas acopladas de campos termicos y desplazamientos*. Zaragoza.
- Manrique, E. (2016). *Metodologia de diseno para tanques a presion.pdf*. Universidad Autonoma de Mexico, Ciudad de Mexico.
- Massa Julio, G. J. (2015). *Compendio de Calculo Estructural II* (Vol. 2). Cordoba: Universidad Nacional de Cordoba.
- Megyesy, E. (1992). *Manual de recipientes a presión* (Septima). Mexico: Editorial Limusa S.A.
- Mott, R. (2006). *Mecanica de Fluidos* (Sexta edición). Mexico: Pearson Educación.
- Multivac. (2019). Multivac, especialistas en soluciones de empaque. Recuperado 12 de septiembre de 2019, de <https://ec.multivac.com/es/>
- Neurtek. (2019). Cámara de vacío y temperatura—Neurtek [Shop Item]. Recuperado 9 de noviembre de 2019, de <https://www.neurtek.com/es/ensayos-ambientales/industriales/camara-de-vacio-y-temperatura>
- Obando, P. (2019). *RECIPIENTES DE PARED DELGADA SOMETIDOS A PRESIÓN*. 4.
- Riba, C. (2004). *Diseño concurrente*. ETSEIB - UPC.
- Ringegni, P. (2008). *Cálculo de uniones soldadas*. 21.

- Rodríguez, L. (2016). Aplicación de Técnicas de Validación de un Modelo de Simulación de Dinámica de Sistemas. Caso de Estudio. *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software*, 4(4), 187. <https://doi.org/10.18294/relais.2016.187-196>
- Román, G. (2008). *Analisis y diseño de un recipiente a presión para el almacenamiento de gas natural.pdf*. Instituto Politecnico Nacional, México, D.F.
- Schmalz, G. (2019). El sistema de vacío y sus componentes. Recuperado 10 de marzo de 2019, de <https://www.schmalz.com/es/saber-de-vacio/el-sistema-de-vacio-y-sus-componentes/>
- Vacuum Technology and Vacuum Pumps from the leader. (2019). Recuperado 17 de noviembre de 2019, de <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/>
- VEQ. (2015). El funcionamiento de una bomba de vacío y sus características. Recuperado 15 de septiembre de 2019, de <http://veqsa.com.ar/blog/como-funciona-una-bomba-de-vacio/>
- Wekker, J. (2004). *Sistemas de bombeo.pdf*.