

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Desarrollo de un Diseño Mecánico y Sistema de Refrigeración para un
Transformador de Potencia

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Christopher Daniel Murillo Camacho

Diego André Valarezo Romero

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedicamos principalmente a nuestros padres, por su sacrificio, amor y consejos necesarios para poder llegar hasta aquí y poder cumplir nuestros sueños.

A nuestros hermanos y abuelos por estar siempre presentes, y por el apoyo moral que nos han brindado a lo largo de nuestras vidas.

A nuestros amigos más cercanos, por confiar en nosotros y por ser esa distracción necesaria en momentos de arduo estrés.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestros padres: Germán y Paulina, Jorge y Alexandra, por creer en nuestras expectativas, y por los valores y principios que nos han inculcado.

Gracias a la Dra. Emérita Delgado quien nos ha guiado con su paciencia, y rectitud como docente, a lo largo de la trayectoria de este proyecto.

Especial agradecimiento al Dr. Jorge Amaya que ha sido un gran apoyo personal y profesional a lo largo del desarrollo de este proyecto y a lo largo de nuestra carrera.

A la empresa y sus colaboradores por abrirnos las puertas y permitirnos colaborar junto a ellos este proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Diego Valarezo, Christopher Murillo* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Valarezo Romero
Diego André



Murillo Camacho
Christopher Daniel

EVALUADORES



Dr. Jorge Luis Amaya Rivas

PROFESOR TUTOR



Dra. Emerita Delgado Plaza

PROFESOR DE LA MATERIA

RESUMEN

Los transformadores de potencia actualmente no son fabricados en Ecuador por lo que es necesaria su importación. Frente a la posibilidad local de fabricar la parte activa para un transformador de 5MVA es vital el diseño mecánico de los exteriores del transformador (Cuba, Cobertor, Orejas de izado), el reservorio de aceite dieléctrico, la brida soporte para la parte activa, además de establecer un modelo de transferencia de calor para seleccionar la configuración de los radiadores. Se realizó un análisis de esfuerzos en la viga que actúa como prensa y soporte de la parte activa. Para la cuba se determinó la cantidad de refuerzos óptimos, y mediante un modelo analítico se optimizó la cantidad de material utilizado en la cuba tomando la pared del tanque y el refuerzo como una viga, de modo que la cuba pueda resistir una presión de 2,5 atm. El cálculo del reservorio de aceite que comprende el espesor de casco, cabeza y silletas se logró mediante el uso de un manual de recipientes a presión basado en la norma ASME VIII. Se utilizó un software CAE para el diseño de los demás elementos mecánicos, además de realizar un análisis de elementos finitos para comprobar cálculos teóricos. Tomando en cuenta que la importación del transformador es susceptible a otros factores como tasas arancelarias, tiempo y transporte, los precios de importación de transformadores con características similares rondan entre \$ 60K y 80K y el costo de fabricación del transformador local es de \$ 72K.

Palabras Clave: Transformadores de potencia, Parte Activa, Aceite Dieléctrico, Software CAE.

ABSTRACT

Power transformers are not manufactured locally nowadays, which its import is needed. Due to the possibility to manufacture the active part of a 5MVA transformer, the mechanical design of its structure (Cask, Cover, lifting facilities) is vital, the non-conducting oil reservoir, the beam for the active part, additionally accomplish a pattern for the heat transfer to select the correct radiator configuration. A stress analysis was done to the beam that acts as press and holder for the active part. For the cask it was established the optimum quantity of reinforcements, through an analytic pattern the quantity of the material used in the cask was optimized by assuming the tank walls and reinforcements as a beam, making the cask able to resist an internal pressure of 2.5 atm. The oil reservoir calculus that includes the shell, the head and saddles was made with the help of a pressure containers handbook. A CAE software was used to the design of the remaining parts of the transformer, additionally, the previous calculus was tested by a finite analysis method. Knowing that the import of the transformer is sensitive to factors such as duty rates, time and shipping, the import prices to transformers with similar characteristics patrol between \$ 60K and \$ 80K, and the manufacturing cost of the designed transformer locally it's about \$ 72K.

Key Words: *Power Transformer, Active Part, Non-Conducting Oil, CAE Software.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE PLANOS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1.INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Definición del Problema.....	2
1.2 Justificación del proyecto	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Transformadores eléctricos.....	4
1.4.2 Tipos de transformadores	5
1.4.3 Partes fundamentales del transformador de potencia.....	6
CAPÍTULO 2.....	10
2.METODOLOGÍA.....	10
2.1 Alternativas de Solución	10
2.1.1 Sistema de Refrigeración.....	10
2.1.2 Estructura	11
2.1.3 Sistema de Reserva de Aceite.....	11
2.2 Metodología.....	12
2.3 Condiciones establecidas por el cliente / restricción	13

2.4	Matriz de decisión.....	15
2.5	Diseño estructural.....	16
2.5.1	Brida soporte de la parte activa	16
2.5.2	Cuba	21
2.5.3	Cobertor.....	29
2.5.4	Reservorio de aceite	30
2.6	Sistema de refrigeración.....	35
2.6.1	Disipación de calor del tanque.....	35
2.6.2	Disipación de calor del radiador.....	36
2.6.3	Ventiladores.....	36
CAPÍTULO 3.....		39
3.RESULTADOS	Y	ANÁLISIS
.....		39
3.1	Diseño estructural.....	39
3.1.1	Brida de la Parte Activa	39
3.1.2	Cuba	41
3.1.3	Reservorio de aceite	43
3.2	Sistema de refrigeración.....	45
3.3	Análisis de costos.....	46
CAPÍTULO 4.....		50
4.CONCLUSIONES	Y	RECOMENDACIONES
.....		50
4.1	Conclusiones.....	50
4.2	Recomendaciones.....	51
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

CAD	Computer Assisted Design
CAE	Computer Assisted Analysis
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ASTM	American Society for Testing Materials
ANSI	American National Standards Institute
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno
PRI	Periodo de Recuperación de la Inversión

SIMBOLOGÍA

V	Voltios
kV	Kilo Voltios
MVA	Mega Voltios Amperios
Hz	Hertz
MPa	Mega Pascales
Kg	Kilogramos
mm	Milímetros
Ton	Tonelada
CFM	Cubic Feet per Minute
°C	Grados Celsius

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de transporte y reparto de energía eléctrica.	2
Figura 1.2. Esquema representativo de un transformador eléctrico.	5
Figura 1.3. Bridas de Soporte de Devanados. Brindan ajuste al núcleo y consecuentemente a los devanados.	6
Figura 1.4. Los refuerzos estructurales cruzan vertical y horizontalmente parte de la cuba.	7
Figura 1.5. La tapa contiene los bushings de las 3 fases del transformador.	7
Figura 1.6. Las orejas de izado usado para acoplar ganchos y levantar el transformador.	8
Figura 1.7. Tanque de expansión, aquí el aceite dieléctrico se almacena herméticamente.	8
Figura 1.8. Sistema de refrigeración por radiación y convección natural.	9
Figura 2.1. Consideraciones de solución.	10
Figura 2.2. Esquema de partes convencionales del sistema de refrigeración y sistema de reserva de aceite.	11
Figura 2.3. Metodología del diseño de la estructura y sistema de refrigeración de un transformador de potencia.	13
Figura 2.4. Dimensiones de la parte activa/restricción.	14
Figura 2.5. Diseño de forma de las bridas de la parte activa.	16
Figura 2.6. Diagrama de cuerpo libre de las bridas.	17
Figura 2.7. Diagrama de cuerpo libre de pernos horizontales.	18
Figura 2.8. Diagrama de cuerpo libre de los pernos verticales.	19
Figura 2.9. Apoyos de la parte activa del transformador de potencia.	20
Figura 2.10. Diagrama de cuerpo libre de orejas de izado.	21
Figura 2.11. Diseño de forma de la cuba del transformador de potencia con sus refuerzos.	22
Figura 2.12. Diagrama modelo de la viga.	23
Figura 2.13. Parámetros de la sección de la viga.	25
Figura 2.14. Dimensiones del elemento de gateo.	27
Figura 2.15. Diseño de forma de orejas de izado de la cuba.	29
Figura 2.16. Diseño de forma de cobertor de transformador de potencia.	29
Figura 2.17. Diseño de forma de reservorio de aceite.	31

Figura 2.18. Conexión del brazo metálico con la cuba.	34
Figura 2.19. Elementos del sistema de refrigeración/radiador.	35
Figura 2.20. Ventiladores ubicados en los radiadores	37
Figura 2.21. CFM necesarios en caso de una sobrecarga del transformador.	37
Figura 3.1. Análisis de elementos finitos realizados en el ensamble de la cuba.	43
Figura 3.2. Análisis de elementos finitos realizado a la Silleta del tanque reservorio. ..	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Pesos de la parte activa/características.	14
Tabla 2.2. Matriz de decisión de la mejor alternativa.	15
Tabla 2.3. Módulo de sección mínimo para diferentes valores de D	24
Tabla 2.4 Ecuaciones para reservorio.	32
Tabla 3.1. Análisis de elementos finitos de componentes de la brida de la parte activa.	39
Tabla 3.2. Cálculo de cantidad de refuerzos a utilizar.	41
Tabla 3.3. Cálculo de cantidad de refuerzos en el fondo de la cuba.	42
Tabla 3.4. Cálculos realizados para el reservorio de aceite.	43
Tabla 3.5. Cálculos de disipación de calor de la cuba y la parte activa.	45
Tabla 3.6. Configuración de radiadores utilizados.	45
Tabla 3.7. Costo de hora/hombre de mano de obra para fabricación de transformador de potencia.	46
Tabla 3.8. Lista de materia prima requerida para la construcción del transformador. ..	47
Tabla 3.9. Lista de accesorios para ensamblaje del transformador de potencia.	47
Tabla 3.10. Flujo de Caja para proyecto de venta de transformadores de potencia.	48
Tabla 3.11. Periodo de retorno de la inversión.	49

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1. Transformador de potencia 5MVA.	APÉNDICES
PLANO 2. Bidas de la parte activa.	APÉNDICES
PLANO 3. Cuba.	APÉNDICES
PLANO 4. Reservorio de aceite y base.	APÉNDICES
PLANO 5. Cobertor.	APÉNDICES
PLANO 6. Radiador.	APÉNDICES

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Las sociedades comenzaron a depender de la electricidad para casi todas sus actividades, como: el oficio, entretenimiento, manufactura, comunicación y salud, inmediatamente después de comenzar a darle uso por allá en el siglo XIX teniendo un crecimiento tecnológico exponencial que parece no terminar, dando paso a la **electrónica y computación** que emergió en el siglo XX. Poniendo a la energía eléctrica como columna vertebral de la sociedad (Jones, 1991).

Los aparatos eléctricos de uso cotidiano se encuentran sometidos al **potencial eléctrico** que pueden soportar. En Ecuador están configurados, usualmente y la mayoría de ellos, para soportar tensiones de 110V (Bastante común en los enchufes de nuestros hogares). Pero ¿Cuál es la fuente de esta energía?

El origen de la energía eléctrica utilizada en las ciudades se da mediante el proceso de **generación** de energía eléctrica que consiste en transformar alguna otra clase de energía ya sea química, eólica, térmica o mecánica en energía eléctrica, El lugar donde ocurre este proceso se denominan **centrales eléctricas** que producen la energía necesaria para satisfacer el consumo del sector residencial y microempresas, debido a que estas centrales se encuentran alejadas de los puntos de consumo es necesario **transportar** la energía generada en ellas, donde suelen alcanzarse potenciales de 6kV a 18kV. Para ello se utilizan subestaciones eléctricas elevadoras donde se emplea un **transformador de potencia** que eleva el potencial eléctrico de hasta 13.2, 33, 66 y 132 kV (**alta tensión**) para ser suministrado a redes de transporte y consecuentemente a la subestación reductora, la cual está cerca de la zona que va a alimentar, de la misma manera se utiliza esta clase de transformadores para reducir el potencial eléctrico a 10 y los 66 kV (**media tensión**) para suministrarla a una red de reparto ya dentro de las zonas urbanas donde las centrales transformadoras reducen la tensión hasta valores comerciales 400, 220, 110V (**baja tensión**) para uso doméstico o industrial. En la Figura 1.1 se puede observar el sistema de distribución y transporte de energía eléctrica.

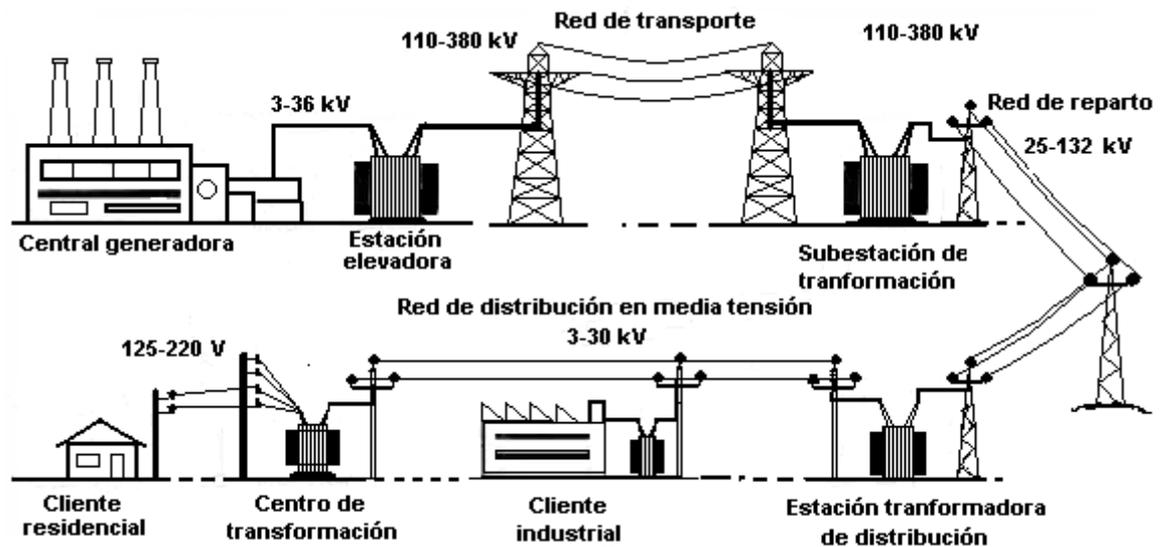


Figura 1.1. Esquema de transporte y reparto de energía eléctrica. [Elaboración propia]

Los **transformadores de potencia** transfieren energía eléctrica en cualquier zona del circuito que se encuentre entre el generador y los circuitos primarios que distribuyen la energía (NTE INEN 2110, 2013). Esto quiere decir que para que un transformador entre en esta categoría necesariamente debe interactuar con alta y media tensión. El diseño, comercialización y fabricación de transformadores en Ecuador tanto para la industria nacional como para exportación inicia sus operaciones desde el año 1974, pero ha sido limitado principalmente a *transformadores de distribución*¹, los cuales, al tener un tamaño reducido, su fabricación y costo son menores.

1.1 Definición del Problema

Actualmente en el mercado ecuatoriano no se fabrican de transformadores de tipo potencia, debido a que su gran tamaño implica una mayor dificultad en la fabricación de estos, además que el mercado nacional para este tipo de transformadores no había llegado a ser lo suficientemente grande como para motivar a las empresas a invertir en el proceso de fabricación, de modo que hasta el momento la solución de mayor factibilidad ha sido la de importar dichos transformadores. Este tipo de transformadores son utilizados para subtransmisión y transmisión de energía eléctrica en alta y media tensión. Se aplican en subestaciones transformadoras, centrales de generación y en grandes usuarios.

Se construyen en potencias normalizadas de 1.25 a 20 MVA, en tensiones de 13.2, 33, 66 y 132 kV (alta tensión) y frecuencias de 50 y 60 Hz.

Por la naturaleza de su aplicación, el Grupo INPROEL y la Compañía Anónima MORETRAN (fábrica de transformadores) evalúan la factibilidad de la fabricación de esta clase de transformadores completando el diseño de la parte activa de un transformador de potencia de 5MVA (núcleo y devanados). Sin embargo, se requiere también del diseño de la parte externa de dicho transformador que comprende el sistema mecánico y el sistema de enfriamiento.

1.2 Justificación del proyecto

Dicha empresa privada ha decidido comenzar la fabricación transformadores de potencia. Al momento se cuenta con capacidad de diseñar la parte activa de este tipo de transformadores; entonces, el presente proyecto de materia integradora propone diseñar la parte externa de los transformadores comprendiendo el tanque o cuba y los radiadores. Esto engloba la aplicación de dos áreas de Ingeniería Mecánica: Diseño Mecánico y Transferencia de Calor. A continuación, se describirá brevemente los componentes objeto de diseño de esta clase de transformadores.

La cuba es una estructura capaz de proteger al transformador de agentes externos (corrosión, temperatura, etc.), esta también almacena herméticamente aceite dieléctrico y a su vez es capaz de resistir una presión no mayor a dos atmósferas (IEEE Std C57. 12.00, 2015). Las paredes de la cuba deben contener refuerzos de modo que el espesor de pared del tanque no sea demasiado alto, ocasionando que el costo del transformador aumente, por lo tanto, es indispensable calcular la distancia a cada refuerzo para poder ahorrar material, en la cuba también irán adheridos ciertos elementos colocados en lugares estratégicos para izar el transformador y son capaces de poder soportar el peso bruto del transformador, a estos llamamos Elementos para izado. Un transformador de estas características al estar en operación es bastante probable que haya cierta pérdida de aceite dieléctrico (fenómeno que se describirá más adelante).

El tanque de expansión es utilizado para almacenar el aceite dieléctrico que es transportado al tanque cuando este lo requiera.

El sistema de enfriamiento está compuesto por radiadores conectados a la cuba, lugar donde el aceite se enfría por convección natural o convección forzada usando ventiladores (IEEE Std C57. 12.00, 2015). Para nuestro trabajo será necesario escoger uno de estos dos métodos de enfriamiento en base a la viabilidad y el calor que se desea disipar. Finalmente, se propone en conjunto también realizar el diseño de la brida que sostiene el núcleo, los devanados y los diferentes accesorios que componen la parte activa, capaz de soportar el peso de la parte activa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar el diseño mecánico y el sistema de refrigeración de un transformador de potencia de 5 MVA utilizado en subestaciones eléctricas de alta-media tensión, aplicando la norma ANSI C.57-12.10.2107.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diseño mecánico de los exteriores del transformador (Espesor de pared del tanque y refuerzos estructurales, Tapa, Orejas de izado, Soporte para el banco de radiadores) para proteger los devanados de golpes o agentes externos (corrosión, temperatura, etc.).
2. Calcular el tanque de expansión/reservorio de aceite dieléctrico para evitar que haya sobrecalentamiento debido a presiones elevadas.
3. Calcular la brida soporte para la parte activa que debe ser capaz de soportar el peso la misma, y ofrecer un prensado suficiente para el núcleo.
4. Establecer un modelo de la transferencia de calor para seleccionar el número y la posición de los radiadores.
5. Estimar el costo del proyecto y compararlo con precios de importación.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Transformadores eléctricos

Se definen como máquinas estáticas que transmiten, mediante un **campo electromagnético** alterno, la energía eléctrica, con determinado potencial a otro

sistema con **potencial** deseado (RAS Oliva, 1994). Consiste en un par de bobinas aisladas entre sí y **devanados** en el mismo núcleo de hierro. Una **corriente alterna** que circula por una de las bobinas induce en el núcleo un **campo eléctrico** proporcional (Amalfa, 2007).

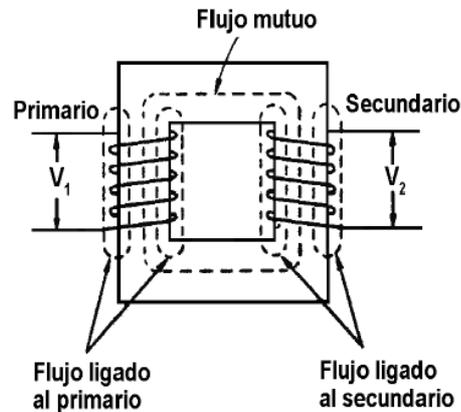


Figura 1.2. Esquema representativo de un transformador eléctrico. [Amalfa, 2007]

1.4.2 Tipos de transformadores

Los transformadores se pueden clasificar según su función en un sistema de generación y distribución de energía eléctrica (Pacheco Gorge & Saucedo Añez, 2018), de la manera como se ilustró en la figura 1.1

- **Transformadores para estaciones generadoras:** La energía producida en una estación de generación (en un rango de voltaje de 11 a 25 [kV]) es elevada por el transformador de generación (220/345/400 o 765 [kV]) para la fase de transmisión. Esta elevación de voltaje aprovecha la baja corriente en estas líneas por lo que lo hacen eficiente el transporte al reducir pérdidas.
- **Transformadores de transmisión:** Estos transformadores se ubican ya dentro del sistema de energía, entre la estación generadora y los transformadores de subtransmisión. Estos reducen el voltaje a niveles de subtransmisión (220 – 138 [kV])
- **Transformadores de subtransmisión:** Estos transformadores reducen los niveles de voltaje a niveles de alimentación primaria (33kV). Algunos de estos son usados por la industria directamente.
- **Transformadores de distribución:** Estos transformadores reducen el voltaje a niveles convencionales para uso doméstico o industrial (440/220/110 [V])

Cabe recalcar que los tres primeros tipos de transformadores mencionados se engloban dentro de la categoría “transformadores de potencia”, los tamaños de estos son mayores debido al nivel de potencia y voltaje que manejan. El objeto de diseño para este estudio entraría en la categoría de subtransmisión con potencia 5[MVA] y un voltaje en el primario de 33[kV].

1.4.3 Partes fundamentales del transformador de potencia

Parte Activa

La parte activa corresponde a los devanados encargados de crear un campo electromagnético capaz de transferir la energía y aumentar o disminuir la tensión, dependiendo el diseño y aplicación requerido.

Parte Externa/Estructural

La parte constructiva del transformador corresponde principalmente a los siguientes elementos:

Brida: La Brida hace de soporte para los devanados sosteniéndolos en la parte superior e inferior, además, ayudan a mantener firme la parte activa del transformador y la resistencia de estas bridas es esencial para el tiempo de vida del transformador.



Figura 1.3. Bridas de Soporte de Devanados. Brindan ajuste al núcleo y consecuentemente a los devanados. [Moretran, 2019]

Cuba: Es una estructura externa que principalmente protege al transformador de agentes externos y además hace la función de tanque manteniendo el aceite dieléctrico en contacto con las partes activas.



Figura 1.4. Los refuerzos estructurales cruzan vertical y horizontalmente parte de la cuba. [Moretran, 2019]

Tapa: Esta contiene los accesorios de gran importancia del transformador, es decir los bujes, aquellos están acoplados a la tapa con bridas.



Figura 1.5. La tapa contiene los bushings de las 3 fases del transformador. [Moretran, 2019]

Orejas de izado: Estas se pueden identificar fácilmente ya que se las encuentra en la parte superior de la cuba del transformador y su función principal es servir de agarre para poder transportar el transformador.



Figura 1.6. Las orejas de izado usado para acoplar ganchos y levantar el transformador. [Moretran, 2019]

Tanque de Expansión: El tanque con la ayuda de un relé de Buchholz permite disminuir la presión y permitir el paso de aceite hacia la cuba.



Figura 1.7. Tanque de expansión, aquí el aceite dieléctrico se almacena herméticamente. [Moretran, 2019]

Sistema de Enfriamiento: El sistema se encarga de disipar el calor generado por la pérdida de calor entregado al aceite en el trabajo que realizan las partes activas. Usualmente este sistema se basa en radiadores y el calor es disipado ya sea mediante convección forzada o convección natural.



Figura 1.8. Sistema de refrigeración por radiación y convección natural. [Moretran, 2019]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En el primer capítulo se describieron los tipos de transformadores existentes en el mercado junto con los parámetros a tomar en cuenta para el diseño de la estructura y sistema de refrigeración del transformador de potencia, dentro del presente capítulo se separar se desarrollará la metodología de diseño. En la figura 2.1, se analizaron las diferentes alternativas de solución.

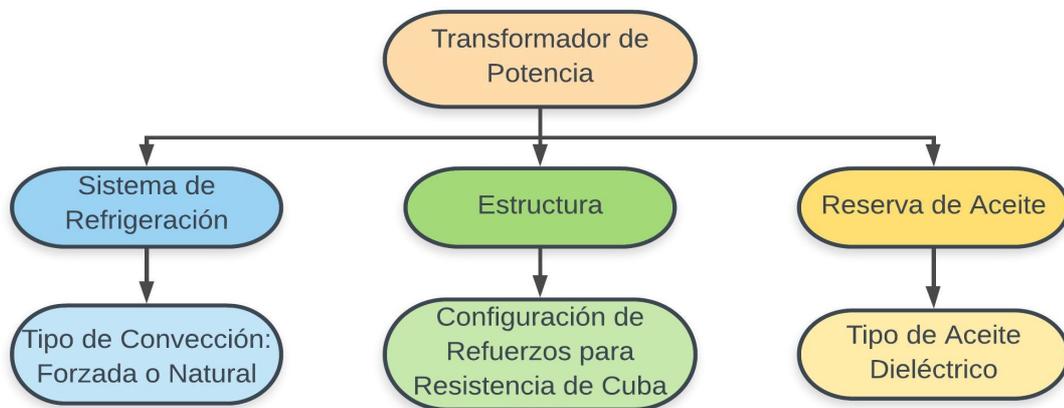


Figura 2.1. Consideraciones de solución. [Elaboración propia]

2.1 Alternativas de Solución

2.1.1 Sistema de Refrigeración

La refrigeración del aceite dieléctrico, para evitar sobrecalentamientos, se realizará mediante radiadores, estos están compuestos de obleas (aletas) las cuales permiten ampliar la superficie a través de la cual se va a disipar el calor. La importancia del sistema de refrigeración del transformador es de carácter sumamente importante, ya que al transmitirse corriente por los devanados estos elevan la temperatura del alambre de cobre, y si no se limita esta temperatura a la que recomienda la norma (IEEE Std C57. 12.00, 2015), los núcleos de la parte activa pueden llegar a fundirse, generando así gases de combustión, estos gases pueden acumularse dentro de la cuba y elevar la presión lentamente, llegando en ocasiones a explotar causando heridas graves a personas que

se encuentren en sus cercanías, y la pérdida total del transformador. La figura 2.2 muestra un esquema de las partes comunes principales del sistema de refrigeración y el sistema de reserva de Aceite. Ambos sistemas son mutuamente incluyentes ya que se encargan de mantener al aceite en las condiciones de presión y temperatura necesarias para que no existan fallas de alto calibre.

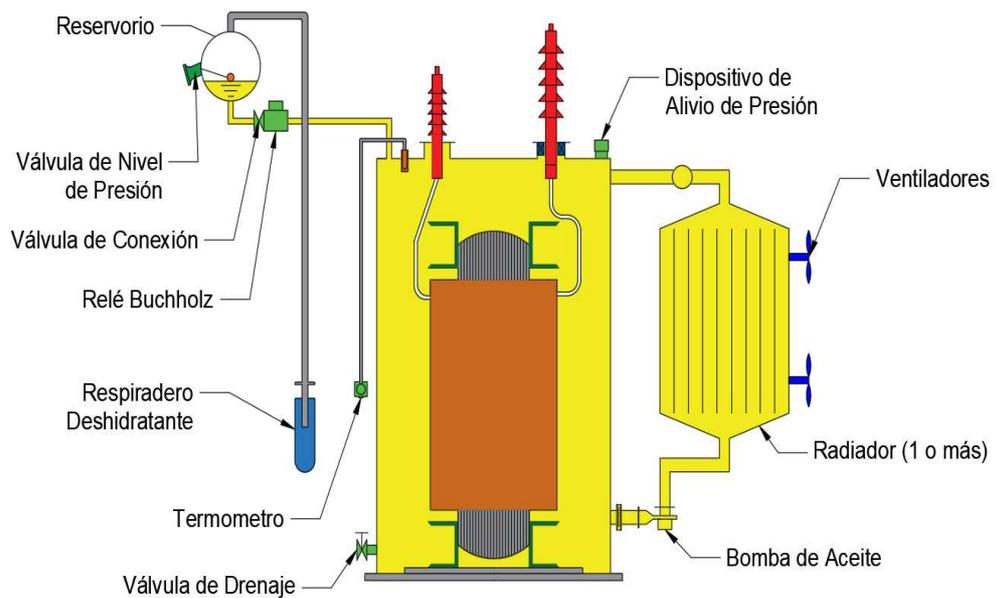


Figura 2.2. Esquema de partes convencionales del sistema de refrigeración y sistema de reserva de aceite. [Elaboración propia]

2.1.2 Estructura

En el diseño de la estructura externa que contiene a las partes activas del transformador fue necesario considerar ciertas características en base a la Norma ANSI C.57-12.10.2107, la norma describe las restricciones principales de los accesorios y elementos estructurales que debe contener el transformador, en el APÉNDICE B se encuentra una breve descripción de estos estándares relacionados con el diseño del transformador.

2.1.3 Sistema de Reserva de Aceite

En lo común se pensaría que un transformador de potencia, al estar completamente sumergido en fluido aislante, este no necesita una reserva,

puesto que, al estar completamente sellado, idealmente no debería tener fugas de aceite, pero existen pequeñas fallas o cortocircuitos durante el funcionamiento del transformador, que producen cambios en las propiedades del fluido, pudiendo así llegar a evaporarse o incluso perder su propiedad de aislante, para este tipo de casos se coloca en la parte superior del transformador, un relé Buschholtz, este se encarga de la detección del vapor presente durante las fallas del transformador, soltando alarmas de diferentes tipos, incluso llegando a parar su funcionamiento en casos críticos donde es necesario una intervención de agentes externos.

2.2 Metodología

La figura 2.3 muestra la metodología de diseño utilizada para el transformador de potencia.

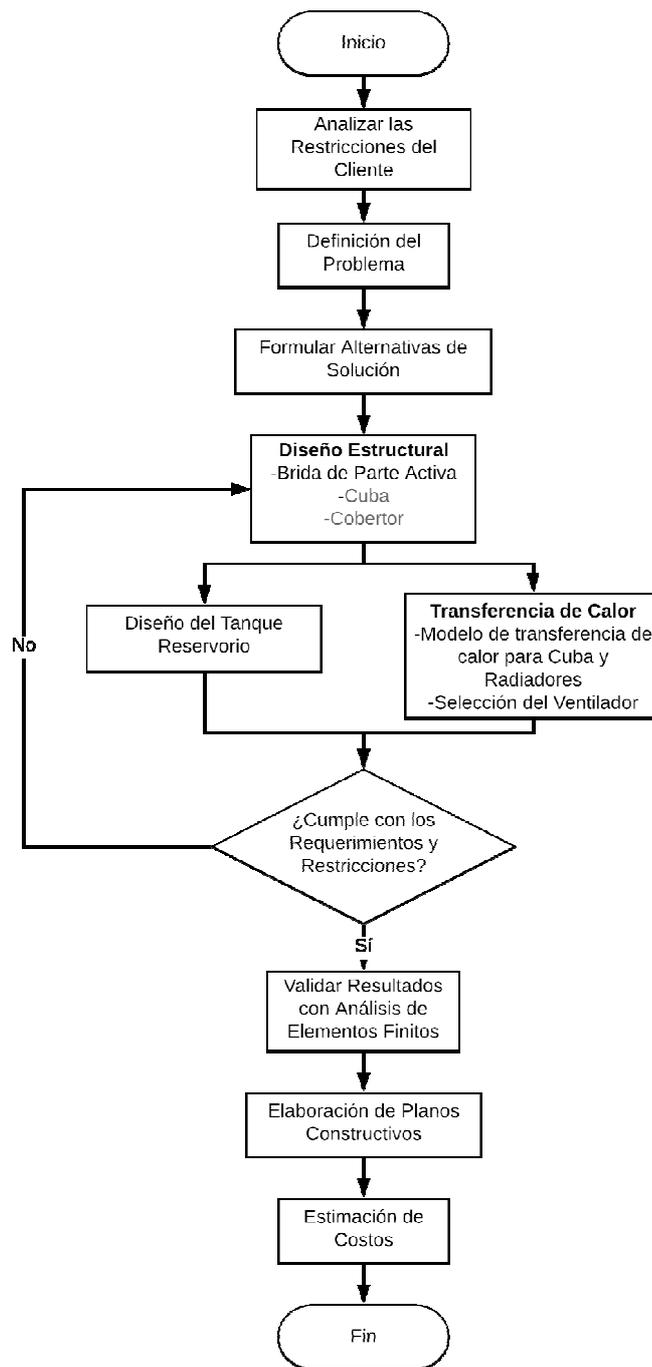


Figura 2.3. Metodología del diseño de la estructura y sistema de refrigeración de un transformador de potencia. [Elaboración propia]

2.3 Condiciones establecidas por el cliente / restricción

En la mayoría de los casos es bastante común tener un resumen de especificaciones técnicas o características especiales para tomar en cuenta en el

ámbito del diseño tanto mecánico como eléctrico de los transformadores de potencia, que se encuentren dentro del margen de las normas nacionales o internacionales, dentro de este informe se detallan principalmente la capacidad del transformador, los voltajes de las distintas fases, tipo de reserva de aceite, sistema de enfriamiento deseado. En la Figura 2.4 y en la Tabla 2.1 se detallan los parámetros eléctricos a ser considerados para el diseño del transformador de potencia.

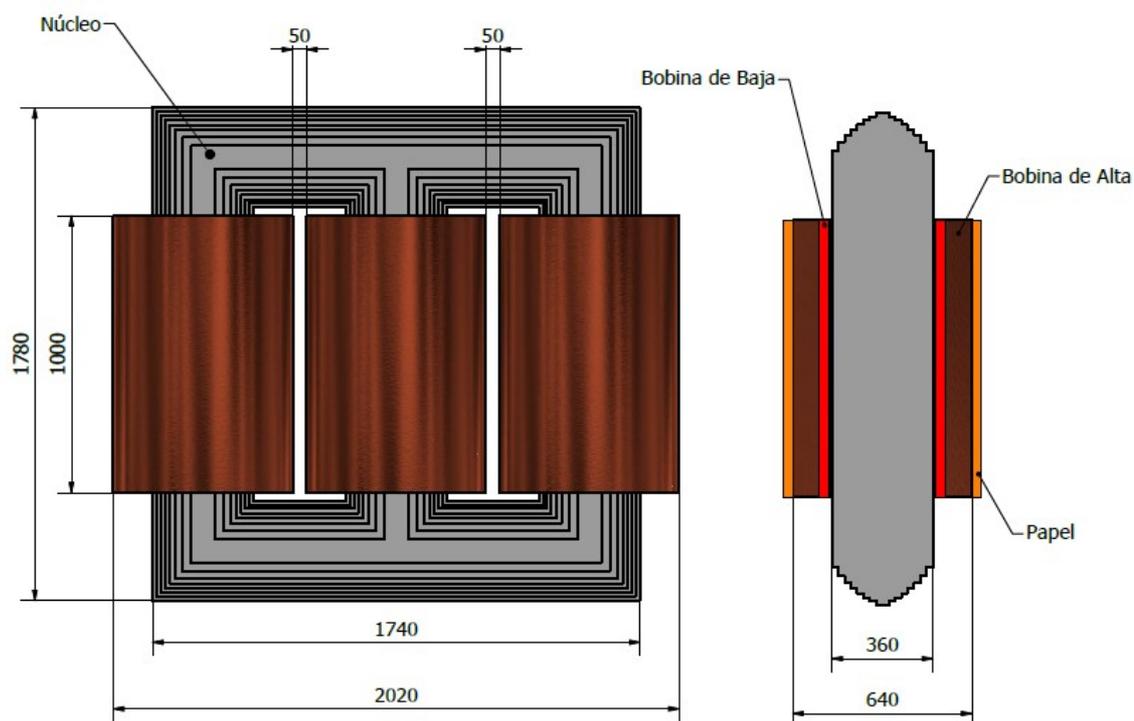


Figura 2.4. Dimensiones de la parte activa/restricción. [Elaboración propia]

Tabla 2.1. Pesos de la parte activa/características. [Elaboración propia]

Elemento	Peso [Kg]
Núcleo	4534
Bobina Alta Tensión	800
Bobina Baja Tensión	546
Papel	200
Total	6080

2.4 Matriz de decisión

Para tomar una decisión correcta respecto a ciertos aspectos que discrepan unos de otros dentro del diseño del transformador, se utilizó el método “Weighted Scored” (Anil & Rajendra, 2009), el método se encuentra desarrollado más detalladamente en el APÉNDICE A,

La tabla 2.5. muestra los resultados obtenidos de las calificaciones obtenidas para las distintas opciones detalladas en el APÉNDICE A.

Tabla 2.2. Matriz de decisión de la mejor alternativa. [Elaboración propia]

	Criterios de Selección	Peso	Opción A		Opción B		Opción C	
			Calificación	Total	Calificación	Total	Calificación	Total
1.1	Alta tasa de Mantenibilidad	2%	8	0,16	9	0,18	8	0,16
1.2	Facilidad de Ensamblaje	5%	8	0,4	9	0,45	8	0,4
1.3	Correcta Refrigeración del Fluido	17%	9	1,53	9	1,53	2	0,34
1.4	Bajo Riesgo de Ruptura de Estructura	24%	8	1,92	2	0,48	9	2,16
2.1	Tamaño Eficiente	3%	7	0,21	9	0,27	6	0,18
2.2	Peso menor a 25 Ton	3%	7	0,21	2	0,06	6	0,18
2.3	Espesor de Cuba menor a 40mm	6%	8	0,48	1	0,06	9	0,54
2.4	Facilidades de Izado y Gateo	3%	9	0,27	9	0,27	9	0,27
3.1	Correcto Funcionamiento del Aislante	22%	9	1,98	0	0	5	1,1
3.2	Partes Móviles Encapsuladas	9%	8	0,72	9	0,81	8	0,72
3.3	Prevención de Fuga de Fluido	32%	8	2,56	9	2,88	7	2,24
4.1	Bajo Costo de Producción	2%	8	0,16	8	0,16	8	0,16
4.2	Bajo Costo de Mantenimiento	2%	7	0,14	9	0,18	7	0,14
4.3	Bajo Costo de Repuestos	0,4%	8	0,03	9	0,036	8	0,032
	Total			10,77		7,37		8,62

Con el método Utilizado se concluye que la mejor alternativa a implementar en el proyecto es la Opción A, la cual se encuentra descrita dentro del Apéndice A.

2.5 Diseño estructural

En esta sección se realizó el diseño de forma de cada una de las subsecciones por separado, de forma tal que se entienda mejor cada uno de los elementos estructurales que se diseñaron.

2.5.1 Brida soporte de la parte activa

Se tomó en cuenta las restricciones del tamaño que ocupan las Bobinas y Núcleo del transformador, ya que este elemento estructural se encarga de mantener fija a la parte Activa. La longitud de las Bridas se la definió en 2220mm; se dejó espacio suficiente para mantenerlas unidas mediante pernos y conexiones eléctricas que puedan ser necesarias. La figura 2.5 muestra el diseño de forma de la Brida unida a la parte Activa.

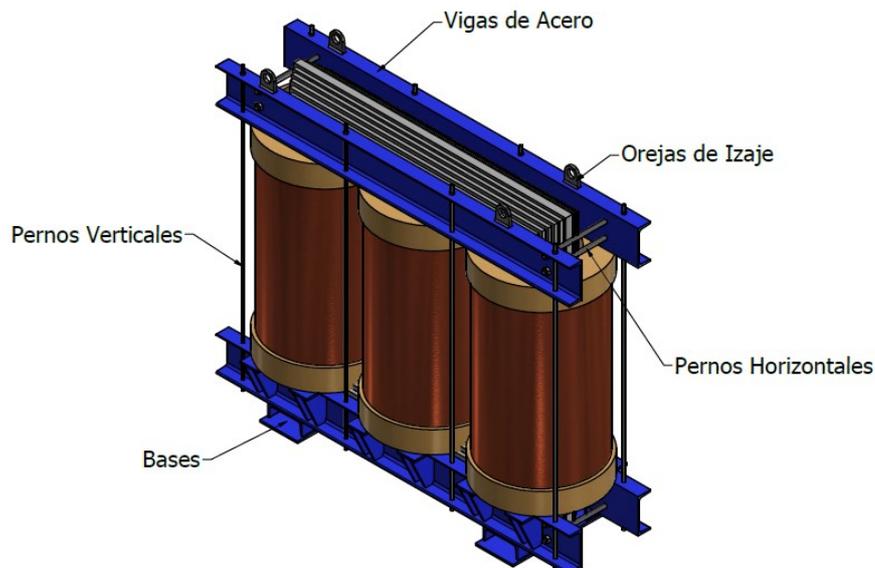


Figura 2.5. Diseño de forma de las bridas de la parte activa. [Elaboración propia]

Diseño de viga

Para el diseño de la Brida se realizó un diseño estático considerando el peso de la parte Activa (Núcleo y Bobinas) como fuerzas puntuales como se muestra en el DCL de la figura 2.6, utilizando como material acero estructural ASTM A36 con esfuerzo de fluencia $S_y = 250$ MPa y Resistencia última de rotura $S_{ut} = 450$ MPa.

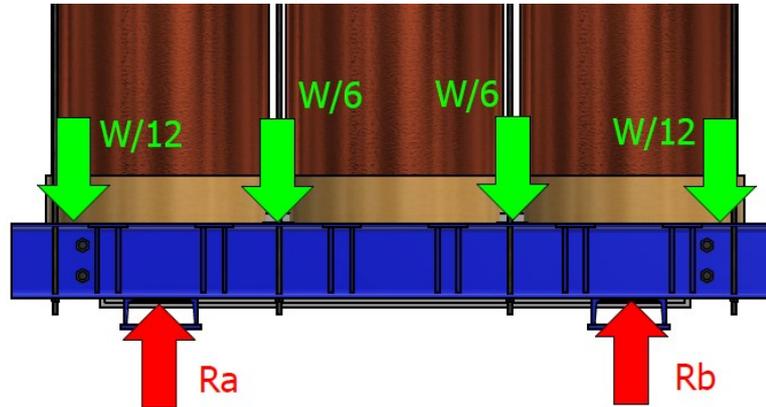


Figura 2.6. Diagrama de cuerpo libre de las bridas [Elaboración propia].

Se utilizaron las ecuaciones de equilibrio de fuerzas para obtener las reacciones de las vigas principales (R_A y R_B). (M. Gere & J. Goodno, 2009)

$$\sum M_A = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (2.2)$$

Para hallar el módulo de sección que resista el peso de la parte activa se combinaron las ecuaciones de teoría de falla estática. (L. Norton, 2011)

$$\sigma_{flexión} = \frac{M_{max}}{W_{viga}} \quad (2.3)$$

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_{flexión}} \quad (2.4)$$

$\sigma_{flexión}$: Esfuerzo de flexión.

M_{max} : Momento máximo.

W_{viga} : Modulo de sección del perfil.

η : Factor de seguridad.

S_y : Esfuerzo a la fluencia.

Dimensionamiento de Pernos

Horizontales

Estos se encuentran sometidos a una carga de compresión como se muestra en la figura 2.7.

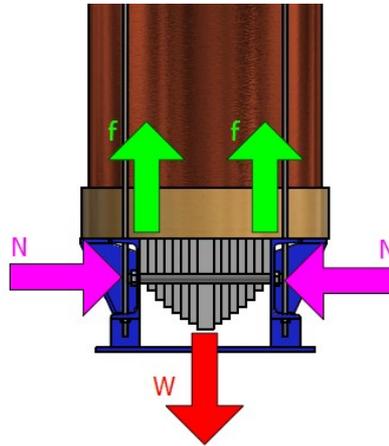


Figura 2.7. Diagrama de cuerpo libre de pernos horizontales [Elaboración propia].

Se utilizó la ecuación básica de rozamiento entre 2 superficies, para evitar que haya deslizamiento entre el núcleo y las vigas, en este caso ambas superficies son de Acero.

$$\sum F_y = 0 \rightarrow f = mg \quad (2.5)$$

$$f = \mu N \quad (2.6)$$

f: Fricción.

m: Masa

g: Aceleración de la gravedad.

μ : Coeficiente de rozamiento estático.

N: Fuerza normal a la fricción.

Para el dimensionamiento del perno se utilizó las mismas ecuaciones que las que se muestran en la sección que viene a continuación.

Verticales

Los pernos de agarre verticales están sometidos a una carga estática de tensión mostrados en los DCL de la figura 2.8.



Figura 2.8. Diagrama de cuerpo libre de los pernos verticales. [Elaboración propia]

Debido a que los pernos se encuentran sometidos a una carga estática, se utilizó una precarga inicial del 90% de la carga de prueba (L. Norton, 2011)

$$F_i = 0.9F_p \quad (2.7)$$

$$F_p = S_p A_t \quad (2.8)$$

F_i : Precarga inicial.

F_p : Carga de prueba

S_p : Resistencia de prueba

A_t : Área del esfuerzo de tensión del perno.

Adicionalmente se calculó la constante de junta, teniendo en cuenta que la rigidez del material es de 6 a 8 veces mayor que la rigidez del perno, se utilizó la siguiente ecuación:

$$C = \frac{K_b}{K_m + K_b} \quad (2.9)$$

C : Constante de la junta.

K_b : Rigidez del perno.

K_m : Rigidez del material.

Finalmente se utilizó la ecuación de factor de seguridad de carga, η_c para poder despejar el área del perno de sujeción, se comprobó los resultados con la ecuación de factor de seguridad de separación, $\eta_{\text{separación}}$.

$$\eta_c = \frac{S_p A_t - F_i}{C * P} \quad (2.10)$$

$$\eta_{\text{separación}} = \frac{F_i}{P(1 - C)} \quad (2.11)$$

η_c : Factor de seguridad de carga.

$\eta_{\text{separación}}$: Factor de seguridad de separación.

P: Carga externa.

Bases de la parte activa

Se diseñaron las bases que soportan las fuerzas de reacción en las vigas principales como se observa en la figura 2.9. Mediante un análisis de elementos finitos realizado por un software CAE se comprobó que el diseño fue satisfactorio para soportar el peso de la la parte activa.

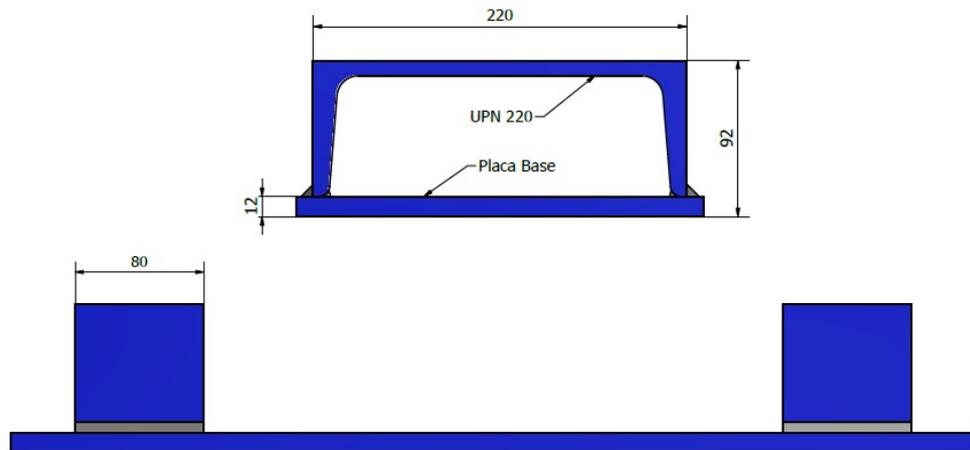


Figura 2.9. Apoyos de la parte activa del transformador de potencia. [Elaboración propia].

lizado de parte activa

El diagrama de cuerpo libre de estos elementos se muestra en la figura 2.10, por lo tanto, se utilizarán las ecuaciones de falla estática para elementos sometidos a cortante doble (L. Norton, 2011), las cuales se describen más adelante.

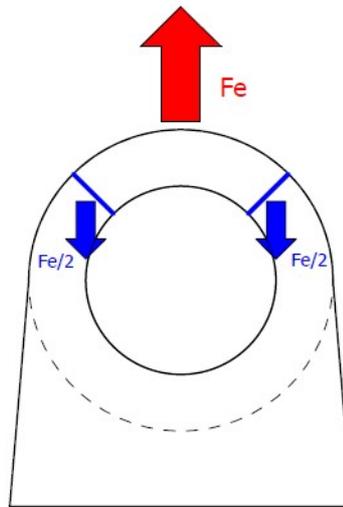


Figura 2.10. Diagrama de cuerpo libre de orejas de izado. [Elaboración propia].

$$A = t(R_o - R_i) \quad (2.12)$$

$$\tau_{xy} = \frac{F_e}{2A} \quad (2.13)$$

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau_{xy}} \quad (2.14)$$

A: Área cortante.

t: Espesor de la oreja.

R_o : Radio externo de la oreja.

R_i : Radio interno de la oreja.

F_e : Fuera de elevación.

τ_{xy} : Esfuerzo cortante.

S_{sy} : Esfuerzo cortante permisible.

η : Coeficiente de seguridad.

Adicional a esto se realizó un análisis de elementos finitos en un software CAE, donde se comprobó que el diseño fue satisfactorio para soportar las cargas de izaje.

2.5.2 Cuba

La Cuba contiene el aceite, el cual mantiene la parte activa del transformador de potencia aislada eléctricamente, por lo tanto, su tamaño está ligado al

tamaño dado del literal anterior, además de esto se consideraron los espacios de las conexiones que vaya a requerir la parte Activa con el medio exterior, por lo tanto, el tamaño mínimo de la estructura tuvo unas dimensiones de 2000x2420x880 mm, alto, largo y ancho respectivamente, la figura 2.10 muestra el diseño de forma de la estructura.

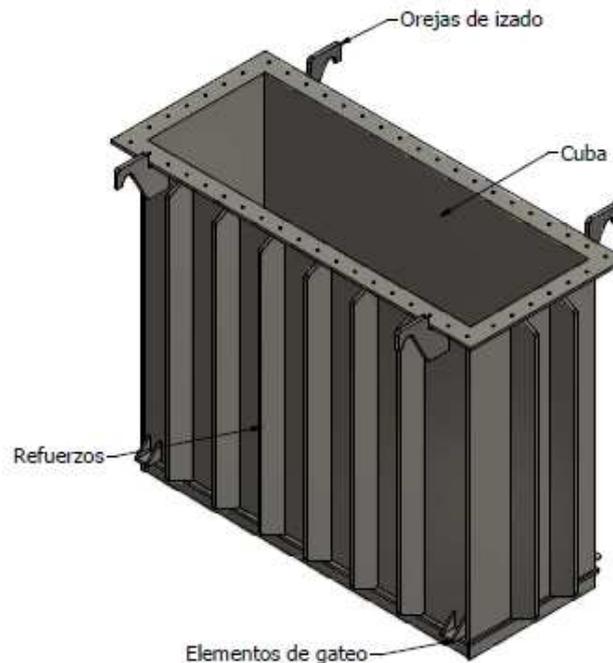


Figura 2.11. Diseño de forma de la cuba del transformador de potencia con sus refuerzos. [Elaboración propia].

Diseño de cuba y refuerzos

La presión de diseño para la cuba es 25% más que la presión de operación. La presión de operación no puede exceder 2 atm, por lo tanto, la presión de diseño es 2.5 atm (IEEE Std C57. 12.00, 2015). Se halló los 4 principales parámetros que constituyen las paredes del tanque, estos son: espesor de pared, espesor de los refuerzos, distancia entre refuerzos y longitud de dicho refuerzo. Para ello se tomó la sección de la pared del tanque constituida por la propia pared y el refuerzo, de modo que se lo modeló como una viga compuesta por ala y alma como se muestra en la figura 2.11.

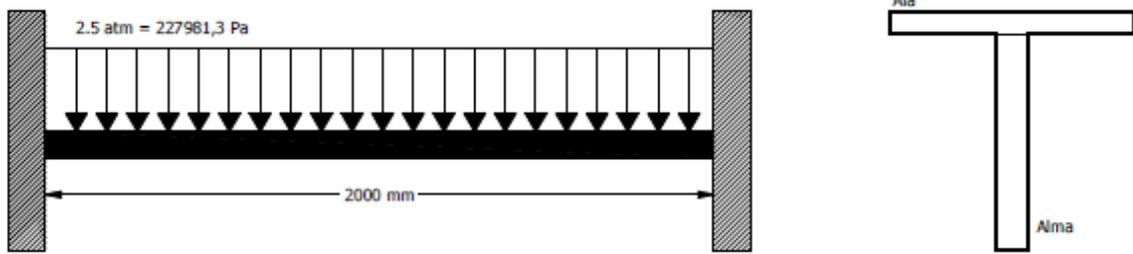


Figura 2.12. Diagrama modelo de la viga. [Elaboración propia].

La carga lineal en la viga dependió de la longitud del ala, la cual también es la distancia entre refuerzos, D , y se relacionan de la siguiente manera:

$$q = pD \quad (2.15)$$

p : Presión de diseño.

q : Carga lineal.

D : Distancia entre refuerzos.

Para hallar las reacciones en los apoyos, el cortante máximo y el momento flector máximo se utilizaron las siguientes ecuaciones.

$$R = V_{max} = \frac{qL}{2} \quad (2.16)$$

$$M_{max} = \frac{p}{12}(L^2) \quad (2.17)$$

R : Reacción de los apoyos.

L : Altura del tanque.

V_{max} : Fuerza cortante máxima.

Se fijó un factor de seguridad que depende de la fluencia del material y el esfuerzo de diseño, estos se relacionaron de la siguiente manera

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_d} \quad (2.18)$$

η : Factor de seguridad

S_y : Esfuerzo de fluencia máximo.

σ_d : Esfuerzo de diseño.

El esfuerzo de diseño dependió de momento flector máximo y el módulo de sección mínimo del perfil, entonces:

$$W_{min} = \frac{M_{max}}{\sigma_d} \quad (2.19)$$

W_{min} : Módulo de sección mínimo del perfil.

M_{max} : Momento máximo.

σ_d : Esfuerzo de diseño.

El módulo de sección se define como el segundo momento de inercia de la sección sobre la distancia que hay desde el eje neutro hasta la superficie. (L. Norton, 2011)

$$W = \frac{I_z}{c} \quad (2.20)$$

W : Módulo de sección.

I_z : Segundo momento de inercia de la sección.

c : Distancia desde el eje neutro a la superficie.

El material utilizado para este caso es acero ASTM A36, el cual posee un esfuerzo de fluencia de $S_y=250$ MPa, se fijó $\eta=2$ (véase Apéndice B) y se escogió un rango de longitud de ala o distancia entre refuerzos y se obtuvo valores de módulos de sección mínimos requeridos para dichos valores de D .

Tabla 2.3. Módulo de sección mínimo para diferentes valores de D . [Elaboración propia]

D [mm]	q [N/m]	R [N]	V[N]	M_{max} [Nm]	η [-]	W_{min} [mm ³]
200,00	45596,26	45596,26	45596,26	15198,75	2,00	129351,09
220,00	50155,89	50155,89	50155,89	16718,63		142286,20
240,00	54715,51	54715,51	54715,51	18238,50		155221,31
260,00	59275,14	59275,14	59275,14	19758,38		168156,42
280,00	63834,76	63834,76	63834,76	21278,25		181091,53
300,00	68394,39	68394,39	68394,39	22798,13		194026,64
320,00	72954,02	72954,02	72954,02	24318,01		206961,75
340,00	77513,64	77513,64	77513,64	25837,88		219896,86
360,00	82073,27	82073,27	82073,27	27357,76		232831,97

Consecuentemente se analizó la sección de la viga para determinar qué dimensiones de espesor de ala (espesor de la pared del tanque) y dimensiones

del alma (refuerzo) cumplen con un módulo de sección mínimo, con el objetivo de optimizar la cantidad de material utilizado en el tanque se evaluaron diferentes opciones resultantes.

Puesto a que la sección de la viga no es simétrica se plantearon diferentes valores de c lo cual comprende la existencia de dos módulos de sección siendo el menor el más crítico es decir el que está relacionado con c_2 , como se observa en la figura 2.12, además se restringieron los parámetros del alma para que dependan del espesor del ala para facilitar los cálculos.

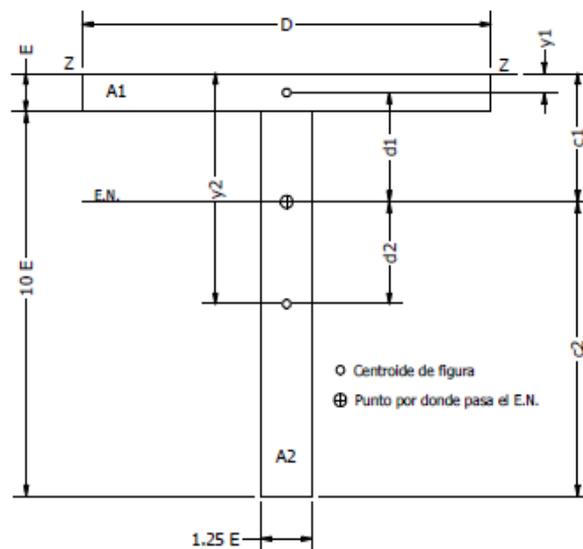


Figura 2.13. Parámetros de la sección de la viga. [Elaboración propia]

Se utilizaron las siguientes ecuaciones para obtener los valores de área, centro de gravedad, Inercia de los centros de masa y módulos de sección de acuerdo con la figura 2.12. (F. Megyesy, 1992):

$$y_1 = \frac{1}{2}E \quad (2.21)$$

$$y_2 = 6E \quad (2.22)$$

$$A_1 = ED \quad (2.23)$$

$$A_2 = 12.5E^2 \quad (2.24)$$

$$c_1 = \frac{y_1 A_1 + y_2 A_2}{A_1 + A_2} \quad (2.25)$$

$$c_2 = 11E - c_1 \quad (2.26)$$

$$I_{c_1} = \frac{1}{12} DE^3 \quad (2.27)$$

$$I_{c_2} = \frac{1}{12} (1.25E)(10E)^3 \quad (2.28)$$

$$d_1 = c_1 - \frac{E}{2} \quad (2.29)$$

$$d_2 = c_2 - 5E \quad (2.30)$$

$$I_{z_1} = I_{c_1} + A_1 d_1^2 \quad (2.31)$$

$$I_{z_2} = I_{c_2} + A_2 d_2^2 \quad (2.32)$$

$$I_z = I_{z_1} + I_{z_2} \quad (2.33)$$

$$W_1 = \frac{I_z}{c_1} \quad (2.34)$$

$$W_2 = \frac{I_z}{c_2} \quad (2.35)$$

A_1 : Área comprendida por el ala.

A_2 : Área comprendida por el alma.

y_1 : Distancia de la superficie Z-Z hasta el centroide 1.

y_2 : Distancia de la superficie Z-Z hasta el centroide 2.

c_1 : Distancia entre la superficie Z-Z y el eje neutro.

c_2 : Distancia entre la superficie inferior y el eje neutro.

d_1 : Distancia entre el centroide 1 y el eje neutro.

d_2 : Distancia entre el centroide 2 y el eje neutro.

D: Longitud de ala.

E: Espesor del ala.

E.N: Eje neutro.

Z-Z: Superficie superior.

Se debe cumplir que $W_2 \geq W_{min}$ para los diferentes valores de D y W_{min} con el objetivo de hallar un valor de E . Por lo tanto, para dicha tarea se utilizó el lenguaje de programación MATLAB. El código se muestra en el Apéndice C

La plancha metálica en el fondo del tanque tendrá el mismo espesor que las paredes del tanque y usando los mismos refuerzos, se utilizó el procedimiento anterior para encontrar una distancia entre refuerzos (Se ubicaron debajo del tanque y de manera transversal), se fijó la longitud de los refuerzos en 100mm. Para realizar el cálculo se utilizó el programa Excel usando las ecuaciones descritas anteriormente.

Elementos de gateo

El diseño de forma de este elemento se describió en la figura 2.13 donde además se especifica la distancia a la cual se aplica la fuerza de levantamiento. El tamaño de este se escogió en base a la Tabla B.x del Apéndice B ya que el peso total del transformador no excede las 23 Ton.

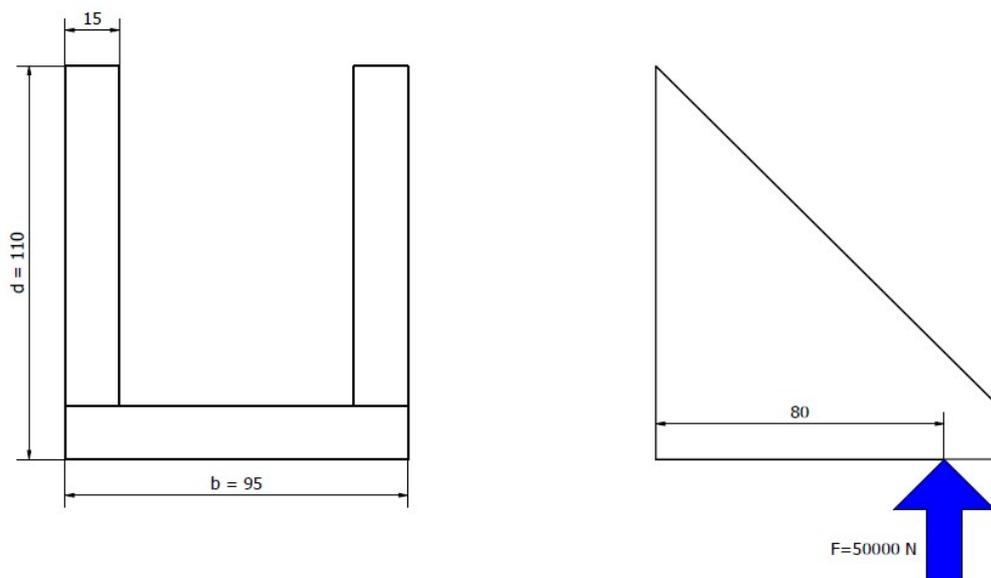


Figura 2.14. Dimensiones del elemento de gateo. [Elaboración propia]

Para saber el tamaño del cordón de soldadura que mantendrá unido este elemento a la cuba se utilizó el método de soldadura de línea (L. Norton, 2011), en el Apéndice D se encuentra una tabla con todos los tipos de factores geométricos que pueden analizarse, como en este caso tenemos el tipo 6, se utilizaron las siguientes ecuaciones;

$$W_w = \frac{2bd + d^2}{3} \quad (2.36)$$

$$A_w = b + 2d \quad (2.37)$$

$$f_s = \frac{V}{A_w} \quad (2.38)$$

$$f_b = \frac{M}{W_w} \quad (2.39)$$

$$|F_R| = \sqrt{f_s^2 + f_b^2} \quad (2.40)$$

$$\tau_{permisible} = 0.30Exx \quad (2.41)$$

$$t = \frac{|F_R|}{\tau_{permisible}} \quad (2.42)$$

$$w = \frac{1}{0.707} t \quad (2.43)$$

W_w : Módulo de sección del cordón de soldadura.

b : Longitud horizontal del cordón.

d : Longitud vertical del cordón.

A_w : Área del cordón de soldadura

f_s : Cortante por longitud.

f_b : Flexión por longitud.

V : Fuerza cortante.

M : Momento flexionante.

F_R : Fuerza resultante.

$\tau_{permisible}$: Esfuerzo permisible.

Exx : Resistencia a la rotura del electrodo.

t : Garganta de la soldadura.

w : Piernas de la soldadura.

Para una verificación de que el espesor de la placa utilizado en el elemento de gateo sea el correcto se comprobó mediante un análisis de elementos finitos utilizando realizado en un software CAE.

Elementos de Izado

El diseño de forma de estos se muestra en la figura 2.x, se realizó un análisis de elementos finitos en un software CAE para verificar su resistencia frente a las fuerzas ejercidas durante el izado del tanque completo.

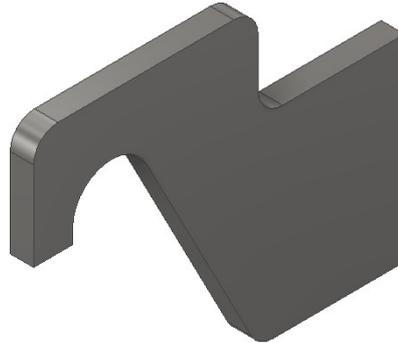


Figura 2.15. Diseño de forma de orejas de izado de la cuba. [Elaboración propia]

2.5.3 Cobertor

El Cobertor del transformador de potencia contiene la mayoría de accesorios y protecciones eléctricas necesarias para el funcionamiento óptimo del mismo, las distancias y tamaños de dichos accesorios dependerán de los que el cliente desee colocar, y en base a distancias eléctricas mínimas que están restringidas por la norma ANSI C.57-12.10.2015, este elemento además contiene orejas de izado individuales para el mismo, en la figura 2.13 se muestra el diseño de forma del Cobertor del Transformador de Potencia.

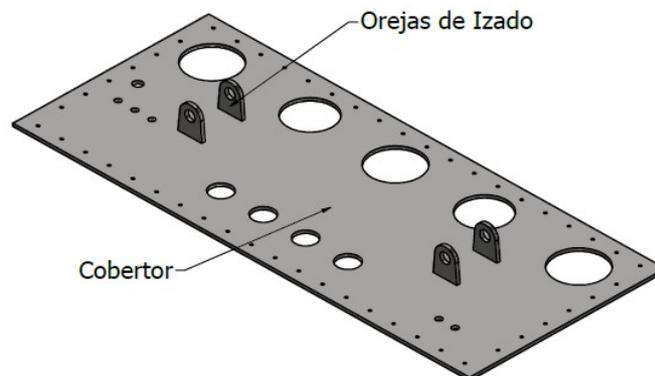


Figura 2.16. Diseño de forma de cobertor de transformador de potencia.

[Elaboración propia]

Dimensionamiento de pernos

Para dimensionar correctamente los pernos se utilizó las ecuaciones ya revisadas con anterioridad al momento de dimensionar los pernos de la parte activa, con la diferencia que la fuerza a resistir de los pernos es la presión interna del tanque, con las ecuaciones mostradas a continuación se logró obtener la fuerza a resistir por cada perno individualmente.

$$P_i = \frac{F_T}{A_s} \quad (2.44)$$

$$P = \frac{F_t}{N} \quad (2.45)$$

P_i : Presión interna del tanque.

F_T : Fuerza total.

A_s : Área de la superficie del cobertor.

P : Carga unitaria del perno.

N : Número de pernos en el cobertor.

Elementos de izado

Estos son los mismos que se diseñaron para la parte activa, ya que la fuerza de elevación a resistir es igual o menor a la de las orejas de izado de la parte activa.

2.5.4 Reservorio de aceite

La reserva de aceite se logró colocando un tanque cilíndrico horizontal sujeto mediante brazos metálicos a la cuba del transformador, el tanque tiene una capacidad del 20% del aceite que contiene el transformador armado, además debe estar a una distancia mínima de 635mm desde el buje de alta más cercano con el objetivo de evitar descargas (IEEE Std C57. 12.00, 2015). El diseño de forma del reservorio se muestra en la figura 2.14

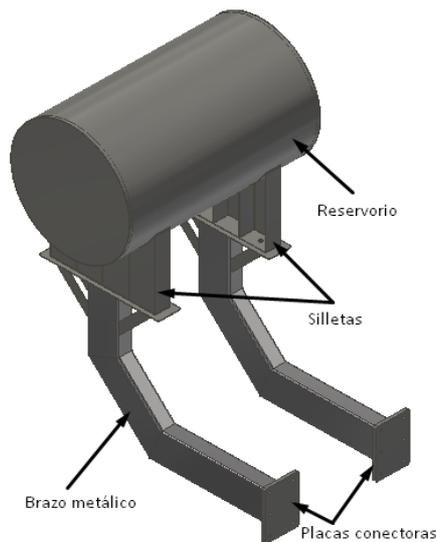


Figura 2.17. Diseño de forma de reservorio de aceite. [Elaboración propia]

El reservorio de aceite se debe llenar a la mitad de su capacidad, es decir, el 10% de aceite dieléctrico comprometido en el tanque principal. Para obtener la capacidad en milímetros cúbicos del tanque se utilizó la siguiente ecuación:

$$V_t = (0,1)(2)[LHA] - V_{PA} \quad (2.46)$$

V_t : Capacidad del tanque a diseñar.

V_{PA} : Volumen ocupado por parte activa

L : Longitud interna de la cuba.

H : Altura interna de la cuba.

A : Ancho interno de la cuba.

Se fijó la longitud del tanque (L)= 1200mm y se obtuvo un diámetro igual a:

$$d = \sqrt{4 \frac{V}{L \pi}} \quad (2.47)$$

d : Diámetro del tanque a diseñar.

V : Volumen del tanque.

L : Longitud del tanque.

Para el cálculo del espesor del casco, cabeza y silletas del tanque se utilizaron ecuaciones de (F. Megyesy, 1992). La carga de presión de diseño P en el reservorio es equivalente a:

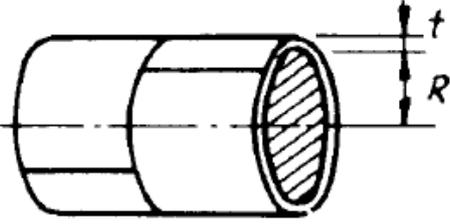
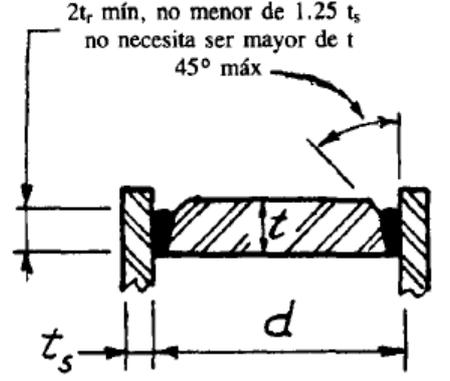
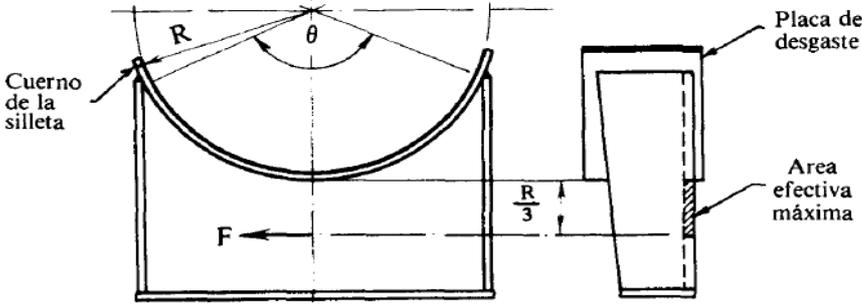
$$P = \eta * P_T \quad (2.48)$$

P_T : Presión de trabajo.

η : Factor de seguridad.

P: Presión de diseño.

Tabla 2.4 Ecuaciones para reservorio. [F. Megyesy, 1992]

Esquema		Ecuaciones	Descripción				
<p><i>Casco cilíndrico</i></p> 		$t = \frac{PR}{SE - 0,6P}$	<p>t: Espesor de casco. P: Carga de presión de diseño. R: Radio interior. S: Eesfuerzo de fluencia del material. E: Eficiencia de la junta.</p>				
<p><i>Cabeza circular plana</i></p> 				$t = d * \sqrt{\frac{CP}{SE}}$ $C = 0,33 * \frac{t_r}{t_s}$	<p>t: Espesor de cabeza. d: diámetro interior. C: factor de corrección . P: Carga de presión de diseño. S: Esfuerzo de fluencia del material. E: Eficiencia de la junta. tr: espesor mínimo requerido del casco. ts: Espesor real del casco.</p>		
<i>Sillets</i>							
							
Valores de la constante K_{11}							
Ángulo de contacto	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°
K_{11}	0,204	0,222	0,241	0,259	0,279	0,248	0,318
Ecuaciones				Descripción			

$F = K_{11} * Q$ $A_{ef} = e_{alma} * \frac{R}{3}$ $\sigma_{medio} = \frac{F}{A_{ef}}$ $\sigma_{perm} = \frac{2}{3} * S$ $\sigma_{medio} < \sigma_{perm}$	<p>F: Fuerza horizontal. K₁₁: Coeficiente tabulado. Q: Carga sobre la silleta. A_{ef}: Área efectiva. e_{alma}: espesor del alma. S: Esfuerzo de fluencia del material. σ_{perm}: Esfuerzo permitido. σ_{medio}: Esfuerzo medio.</p>
---	--

Base del reservorio

La base es un accesorio desmontable donde el reservorio de aceite es apoyado, tal como se muestra en la figura 2.17, este debe soportar el peso completo del reservorio, es decir, en un brazo se tiene que:

$$P_R = \frac{1}{2} * (m_T + m_S + m_{ac}) * g \quad (2.49)$$

P_R: Peso del reservorio.
m_T: Masa del tanque.
m_S: Masa de las silletas.
m_{ac}: Masa del aceite.
g: Gravedad.

La masa fue calculada mediante el un software CAE añadiendo las propiedades del acero ASTM A36 al dibujo tridimensional. Utilizando un perfil comercial de tubería rectangular de medidas 200x100x6 mm para la estructura del brazo metálico se hizo un análisis de elementos finitos fijando la placa conectora y añadiendo la fuerza producida por el peso del reservorio.

El accesorio que conecta el brazo metálico con la cuba, el cual se muestra en la figura 2.18, es digno de un análisis riguroso que se genera un esfuerzo flexionante producido por el peso del brazo metálico y el reservorio. El momento que se produce en la placa equivale a:

$$M_P = \left(\frac{1}{2} * (m_R + 2 * m_{BM}) * g \right) * B \quad (2.50)$$

M_P = Momento en la placa
 m_R = Masa del reservorio
 m_{BM} = Masa del brazo metálico
 B = Brazo de palanca
 g = Gravedad

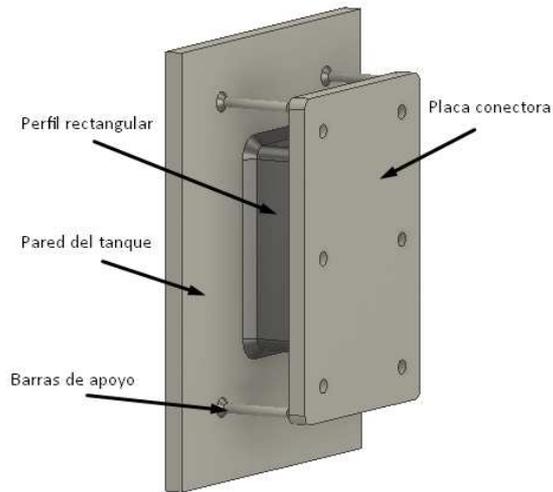


Figura 2.18. Conexión del brazo metálico con la cuba. [Elaboración propia]

Se simuló el comportamiento de esta placa mediante el análisis de elementos finitos. Por último, se dimensionaron los pernos que sostienen la base, utilizando las ecuaciones básicas de cortante simple (M. Gere & J. Goodno, 2009), como se muestran a continuación.

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau_{xy}} \quad (2.51)$$

$$\tau_{xy} = \frac{P_T}{6A_c} \quad (2.52)$$

$$A_c = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.53)$$

$$\eta_{AP} = \frac{S_y}{\sigma_{AP}} \quad (2.53)$$

$$\sigma_{AP} = \frac{P_T}{de} \quad (2.54)$$

2.6 Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración está compuesto por una cantidad determinada de bancos de radiadores como el que se muestra en la figura 2.19, el cual está conformado por un tubo colector y obleas. El aceite fluye del transformador al radiador y de vuelta al transformador debido al efecto termo-sifón. El calor del aceite se disipará en atmósfera debido a la convección natural del aire alrededor del radiador (Sony, Jayadeep Kumar , Pradeep M, & Anishek, 2015). El cliente proporcionó las pérdidas en watts de la parte activa, las cuales alcanzan un valor de 34390 Watts.

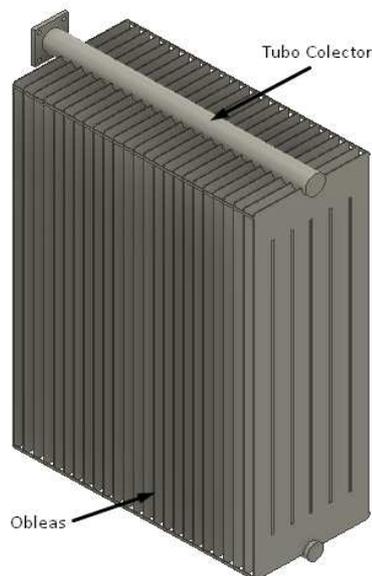


Figura 2.19. Elementos del sistema de refrigeración/radiador. [Elaboración propia]

2.6.1 Disipación de calor del tanque

Se modeló el tanque como una estructura de caja el cual disipa calor a través de sus caras. Se sabe, por norma (IEEE Std C57. 12.00, 2015), que la temperatura máxima en las caras deberá ser 65°C. La disipación debida a convección natural del tanque del transformador está dada por la siguiente ecuación (P. Incropera, P. Dewitt, L. Bergman, & S. Lavinne, 2011):

$$q_{conv} = h_{aire} * (T_{sup} - T_{env}) * A_{ef} \quad (2.55)$$

q_{conv} : Disipación de calor de la cuba.

h_{aire} : Coeficiente de convección del aire.

T_{sup} : Temperatura de la superficie.

T_{env} : Temperatura ambiente.

A_{ef} : Área efectiva.

2.6.2 Disipación de calor del radiador

Se utilizó un catálogo de radiadores, ubicado en el Apéndice E, donde especifica la disipación en Watts dependiendo del número de obleas y altura entre tubos colectores.

$$q_{rad-teo} = q_{PA} - q_{conv} \quad (2.56)$$

$$q_{rad-act} = W_{tab} * N_{ob} * N_b \quad (2.57)$$

$q_{rad-teo}$: Disipación necesaria de los radiadores.

$q_{rad-act}$: Disipación actual los radiadores.

q_{PA} : Pérdidas de la parte activa.

q_{conv} : Disipación de la cuba.

W_{tab} : Disipación de 1 oblea.

N_{ob} : Número de obleas por banco.

N_b : Número de bancos de radiadores.

Se debería cumplir que:

$$q_{rad-teo} \leq q_{rad-act} \quad (2.58)$$

2.6.3 Ventiladores

La función de los ventiladores que se muestran en la figura 2.20 es aumentar la eficiencia de los radiadores cuando es necesario sobrecargarlo térmicamente. Según lo indicado por el cliente se sabe que el transformador será sobrecargado con un 33% más de carga térmica.

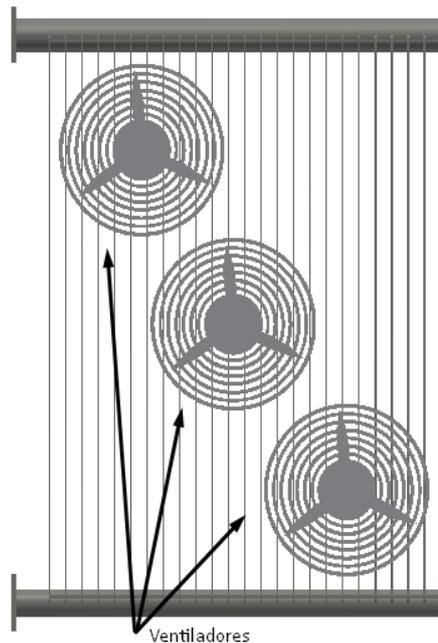


Figura 2.20. Ventiladores ubicados en los radiadores [Elaboración propia]

El método de selección de los ventiladores se realizó en base a la potencia aparente del transformador (MVA) y el porcentaje adicional requerido de carga térmica, dando como resultado la cantidad de CFM necesarios para refrigerar el radiador. El fabricante (California Turbo, 2020) proporciona una gráfica como la que se muestra en la figura 2.21 para obtener un resultado aproximado de los CFM necesarios para evitar una sobrecarga térmica del transformador.

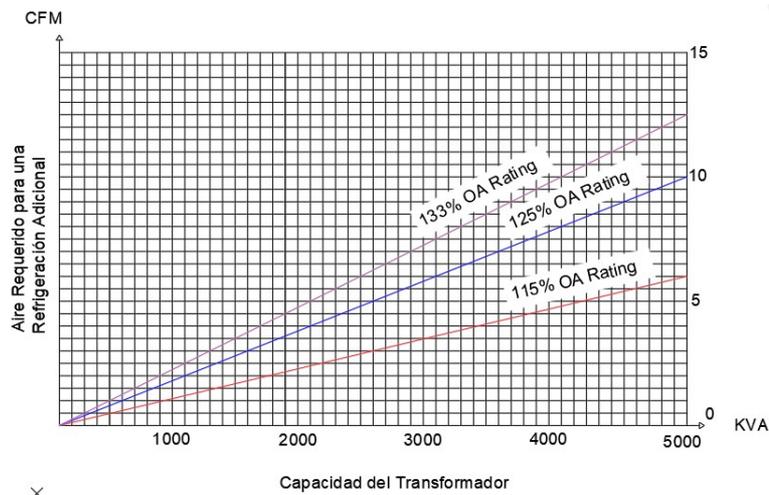


Figura 2.21. CFM necesarios en caso de una sobrecarga del transformador. [California Turbo, 2020].

Para la distribución de los ventiladores se parte del estudio realizado por Sachin B., Kishor, Van der Vekeen , & Sharma, 2014, que analizaron el rendimiento térmico de los radiadores de un transformador de potencia en dos partes; el efecto de la dirección de soplado y la compensación de ventiladores, sus estudios mostraron que el soplado horizontal es más eficiente que la configuración de soplado vertical, ya que la fuga lateral de aire fue menor para el horizontal, además un pequeño desplazamiento de 50mm en el ventilador superior e inferior aumentó la transferencia de calor en un 3%.

Fue posible hallar el número de ventiladores a utilizar mediante una ecuación proporcionada por el fabricante de ventiladores (California Turbo, 2020).

$$N = \frac{v_r}{v_f} \quad (2.59)$$

N: Cantidad de ventiladores.

v_r : CFM requeridos.

v_f : CFM que proporciona 1 ventilador.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

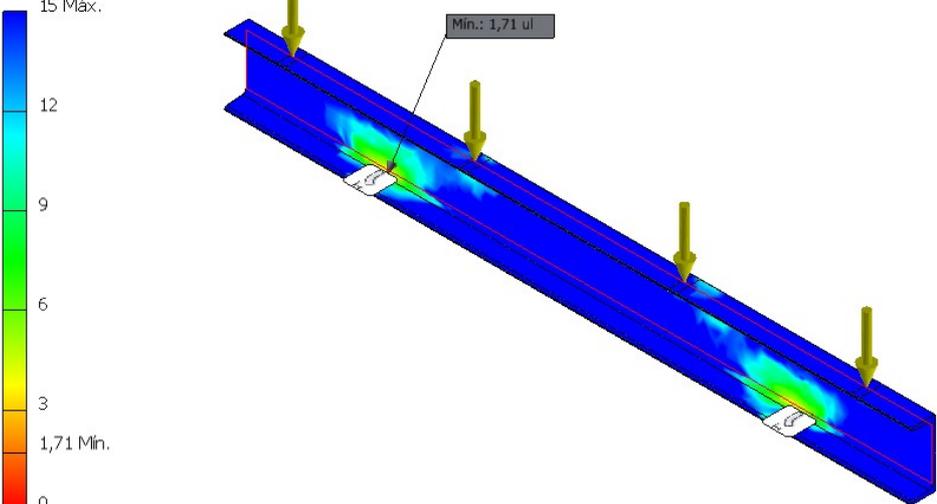
3.1 Diseño estructural

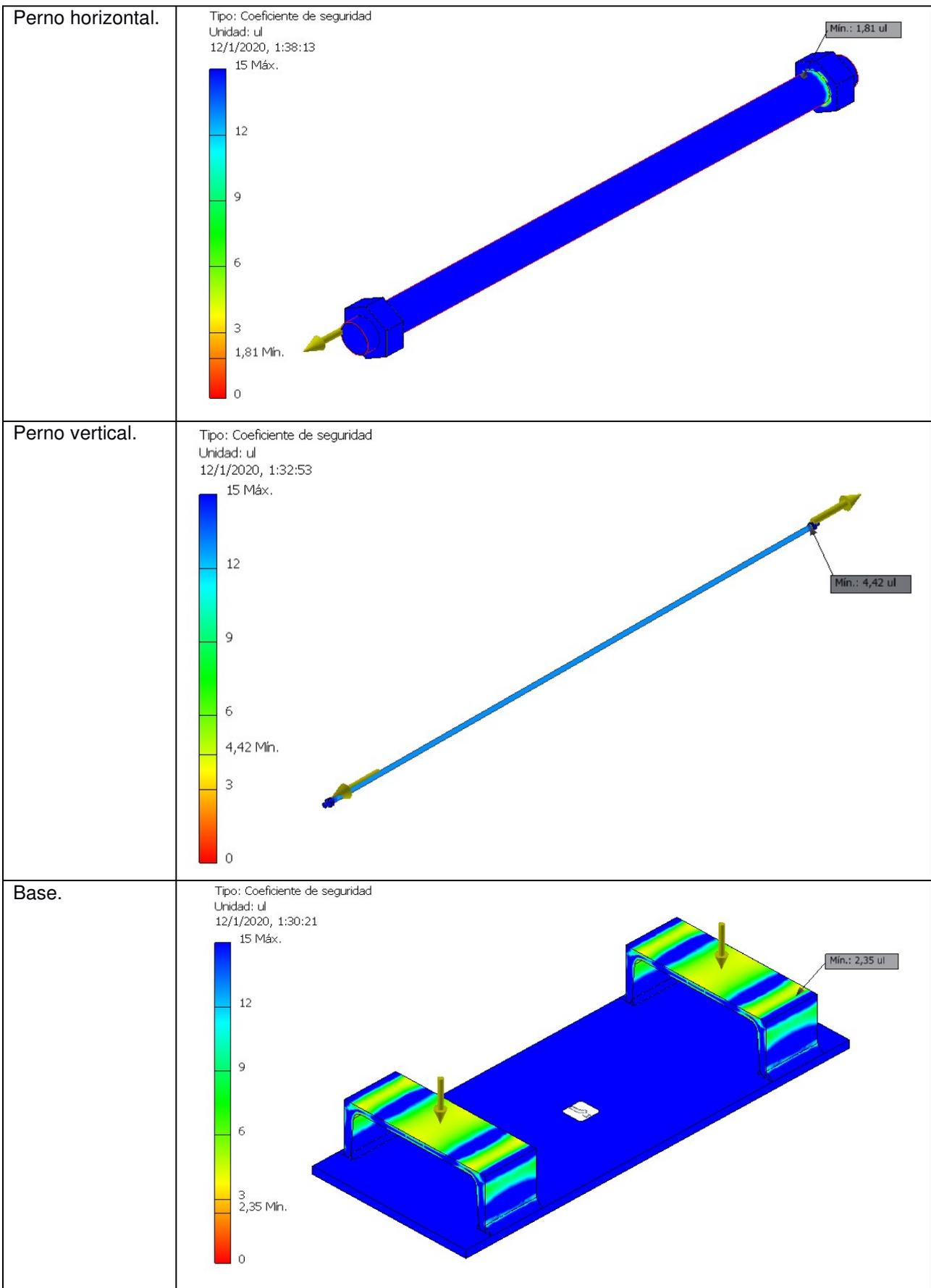
3.1.1 Brida de la Parte Activa

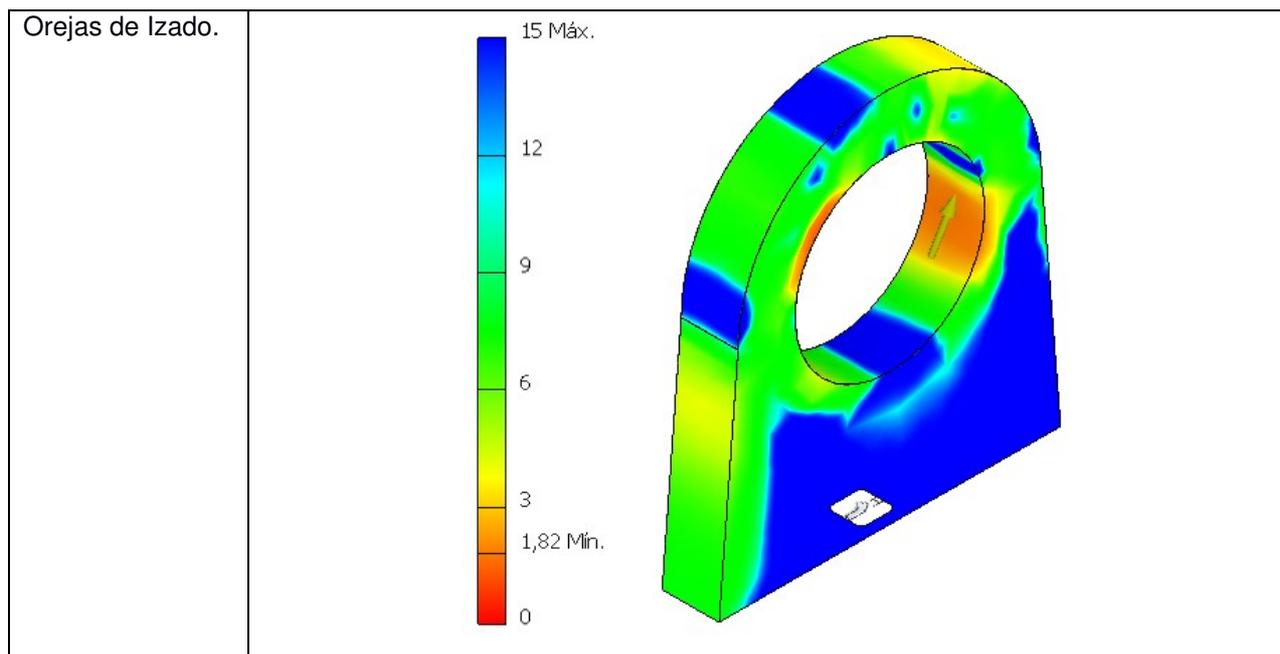
Los cálculos detallados de la brida y sus componentes se encuentran detallados en el Apéndice G. Adicional a esto se comprobaron los resultados de cada uno de sus componentes en base a un análisis de elementos finitos, con una convergencia de menos del 1%, se obtuvo que todos los elementos que conforman la brida analizados por separado tienen un factor de seguridad de 1.7 o mayor, los resultados de dicho análisis se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Análisis de elementos finitos de componentes de la brida de la parte activa.

[Elaboración propia]

Elemento	Resultado
Perfil estructural.	<p data-bbox="467 1137 702 1209">Tipo: Coeficiente de seguridad Unidad: ul 12/1/2020, 1:28:56</p>  <p data-bbox="467 1220 566 1243">15 Máx.</p> <p data-bbox="502 1310 526 1332">12</p> <p data-bbox="502 1400 526 1422">9</p> <p data-bbox="502 1489 526 1512">6</p> <p data-bbox="502 1579 526 1601">3</p> <p data-bbox="502 1646 574 1668">1,71 Mín.</p> <p data-bbox="502 1713 518 1736">0</p> <p data-bbox="917 1232 1013 1254">Mín.: 1,71 ul</p>





3.1.2 Cuba

Siguiendo la metodología descrita en el capítulo 2, se obtuvo que las configuraciones más óptimas de espesor de cuba y refuerzos fueron aquellas ligadas a una separación entre refuerzos de 200 y 360 mm, de modo que se realizó una comparación entre ambas para determinar cuál de ellas utiliza menos cantidad de acero, la tabla 3.2 muestra los cálculos de la cantidad de refuerzos a utilizar y el volumen de acero involucrado según la configuración.

Tabla 3.2. Cálculo de cantidad de refuerzos a utilizar. [Elaboración propia]

Distancia entre Refuerzos [mm]	200	360
Espesor de pared [mm]	15	18
Longitud de refuerzo [mm]	150	180
Espesor de refuerzo [mm]	20	25
y1 [mm]	7,5	9
y2 [mm]	90	108
A1 [mm ²]	3000	5400
A2 [mm ²]	3000	4500
c1 [mm]	48,75	54
c2 [mm]	116,25	144
I _{c1} [mm ⁴]	56250	174960
I _{z1} [mm ⁴]	5160937,5	11109960

I_{c2} [mm ⁴]	5625000	12150000
I_{z2} [mm ⁴]	10729687,5	25272000
I_z [mm ⁴]	15890625	36381960
W_1 [mm ³]	325961,5385	673740
W_2 [mm ³]	136693,5484	252652,5
η	2,11	2,17
Cantidad de Refuerzos	12	7
Volumen [mm ³]	144000000	138600000

Finalmente, se obtuvo que el espesor de pared y de los refuerzos deben ser 18 y 25 mm respectivamente, siendo la longitud del refuerzo 10 veces el espesor de pared es decir 180 mm, espaciados máximo 360 mm con una altura del transformador de 2000 mm.

Para el fondo del tanque, se obtuvo que, ubicando refuerzos estructurales del mismo espesor a los de las paredes de la cuba, pero con una longitud de 100mm y una separación entre refuerzos de 400mm, este será capaz de resistir el peso de la parte activa y la presión de diseño. Dichos cálculos se muestran en la tabla 3.3 a continuación.

Tabla 3.3. Cálculo de cantidad de refuerzos en el fondo de la cuba. [Elaboración propia]

Distancia entre refuerzos [mm]	400
y_1 [mm]	9
y_2 [mm]	68
A_1 [mm]	7200
A_2 [mm]	2500
c_1 [mm]	24,20618557
c_2 [mm]	93,79381443
I_{c1} [mm]	194400
I_{z1} [mm]	1859242,172
I_{c2} [mm]	2083333,333
I_{z2} [mm]	6878078,79
I_z [mm]	8737320,962
W_1 [mm ³]	360954,0602
W_2 [mm ³]	93154,55411
η	3,72
Cantidad de refuerzos	6,05

Adicionalmente, mediante un análisis de elementos finitos al ensamble completo de la cuba se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 1.5, por lo tanto, la cuba es capaz de resistir un 50% extra de presión por encima de la presión de diseño. La figura 3.1 muestra el resultado del análisis mencionado.

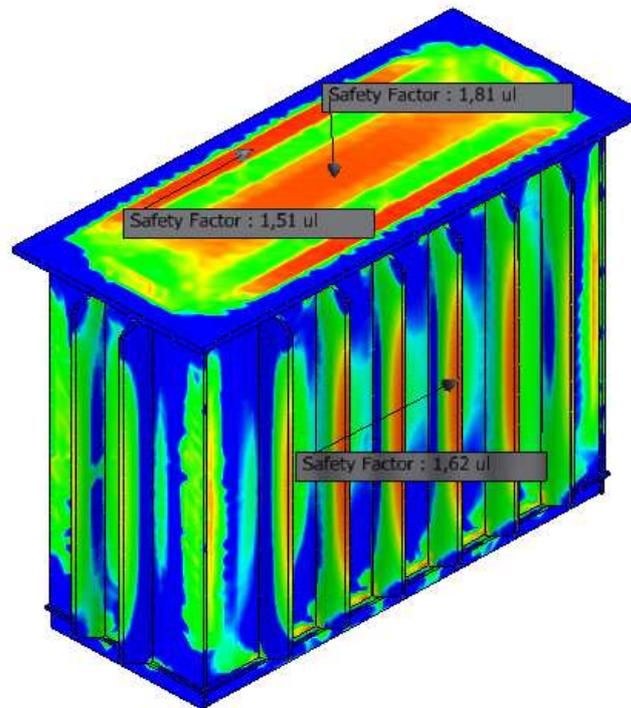


Figura 3.1. Análisis de elementos finitos realizados en el ensamble de la cuba.

[Elaboración propia]

3.1.3 Reservoirio de aceite

La tabla 3.4 muestra los cálculos realizados de los elementos que conforman el tanque reservoirio de aceite.

Tabla 3.4. Cálculos realizados para el reservoirio de aceite. [Elaboración propia]

Sistema	Americano	Internacional
Casco cilíndrico		
η	5	
Diámetro	30,31 [in]	770,00 [mm]
Longitud	47,24 [in]	1200,00 [mm]
Presión	33,06 [Psi]	227981,30 [Pa]
Presión de diseño	165,32 [Psi]	1139906,50 [Pa]
S	36000,00 [Psi]	34084,00 [Pa]
t	0,116549 [in]	2,96 [mm]
Espesor real	0,12 [in]	3,00 [mm]

Cabeza circular plana		
C	0,33	
t	0,68 [in]	17,19 [mm]
Espesor real	0,71 [in]	18,00 [mm]
Silleta		
Peso aceite	552,65 [lb]	251,21 [Kg]
Peso del reservorio	367,37 [lb]	166,99 [Kg]
F	93,84 [lb]	
K ₁₁	0,20	
Q	460,01 [lb]	
A _{ef}	0,60 [in ²]	
e _{alma}	0,12	
σ _{perm}	24000,00 [psi]	
σ _{medio}	157,25 [psi]	

El tanque del reservorio tuvo un diámetro de 770 mm y 1200 mm de longitud, el espesor del casco fue diseñado para resistir 5 veces la presión de diseño tomando en cuenta una costura longitudinal donde los esfuerzos son los mayores, fue necesario rolar una plancha de 3 mm de espesor. La cabeza del reservorio tiene 18 mm de espesor. El cálculo de las silletas se lo comprobó con un análisis de elementos finitos ya que una de las condiciones del diseño fue agregar nervaduras contra el pandeo de la silleta, fue necesario agregar 3 nervaduras a lo largo de la cavidad de la silleta. La figura 3.2 muestra el análisis realizado a las silletas que sujetan el tanque reservorio.

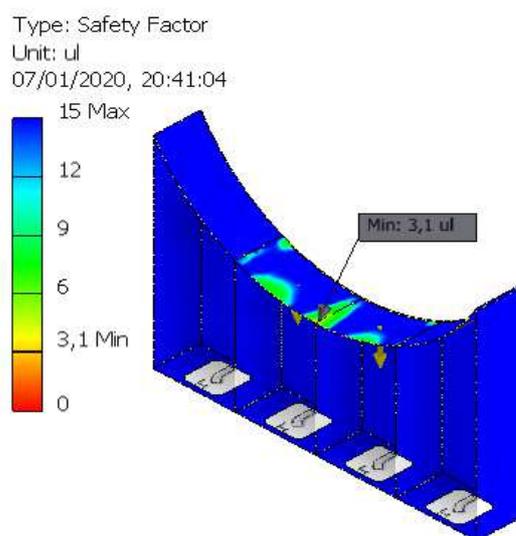


Figura 3.2. Análisis de elementos finitos realizado a la Silleta del tanque reservorio.

[Elaboración propia]

3.2 Sistema de refrigeración

Las pérdidas emitidas en forma de energía térmica en el núcleo y devanados de la parte activa equivalen al total de calor que la cuba y radiadores deberán disipar, entonces, mediante las ecuaciones 2.55, 2.56 y 2.57 se determinó la cantidad de calor que disipa la cuba y el radiador teóricamente. Los datos y cálculos relevantes se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Cálculos de disipación de calor de la cuba y la parte activa. [Elaboración propia]

Parámetro	Valor
Área [m ²]	16,72
Espesor [m]	0,18
Temp superficie [°C]	65
Temp ambiente [°C]	25
Coef. C.A. [W/m ² *K]	15
Disipación de la Cuba [W]	10032
Disipación de la PA [W]	34390
Disipación Rad. Teórico [W]	24358

De acuerdo con la tabla de disipación de los radiadores que se encuentra en el Apéndice E, se seleccionó un radiador de 1500 mm de altura y 520 mm de ancho concorde a las dimensiones de la Cuba.

Se cumplió con la desigualdad de la ecuación 2.58 mediante una configuración de 3 bancos de radiadores, obteniéndose una disipación total de los radiadores como se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Configuración de radiadores utilizados. [Elaboración propia]

Disipación de 1 oblea [W]	341
No. Obleas	25
No. Bancos	3
Disipación de la Configuración de Radiadores Actual. [W]	25.575

De la figura 2.21 se determinó que para una sobrecarga térmica del 33% en un transformador de 5MVA son necesarios 12500 CFM. Se seleccionó un ventilador modelo CFM18J000CS de 50 Hz y 5160 CFM cuyas especificaciones se

encuentran en el Apéndice F. Mediante la ecuación 2.59 se obtuvo que son necesarios 3 ventiladores de este tipo.

3.3 Análisis de costos

A pesar de que en el alcance de este proyecto no se ejecutó la construcción de este, se realizó un estimado del costo equivalente al ensamble del transformador completo, incluyendo sus partes activas, empezando por la tabla 3.7 que estima el costo de hora/hombre debido a las diferentes tareas a realizar en caso de que el cliente ejecute su construcción para la venta en un futuro.

Tabla 3.7. Costo de hora/hombre de mano de obra para fabricación de transformador de potencia. [Elaboración propia]

Costo de H/Hombre					
Nº	Área	Cantidad de Personas	H/Hombre	Precio H/Hombre	Costo Total H/Hombre
1	Bobinado	2	600	\$ 2,55	\$ 1.530,00
2	Corte Núcleo	2	2	\$ 3,13	\$ 6,26
3	Ensamble Brida	2	160	\$ 5,17	\$ 827,20
4	Secado	1	16	\$ 3,56	\$ 56,96
5	Conexiones	2	126	\$ 4,56	\$ 574,56
6	Soldadura	2	30	\$ 5,50	\$ 165,00
7	Ensamble Tanque	4	37	\$ 4,67	\$ 172,79
8	Despacho	2	30	\$ 5,50	\$ 165,00
9	Laboratorio	2	29	\$ 4,54	\$ 131,66
		Total H/Hombre	\$1000,00	Costo Total de Mano de Obra:	\$ 3.629,43

La tabla 3.8 muestra una cotización de la materia prima a emplear en caso de que se construya la estructura principal del transformador. (MultiAceros, 2020)

Tabla 3.8. Lista de materia prima requerida para la construcción del transformador. [Elaboración propia]

Lista de Materia Prima				
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Total
Viga UPN 220 x 6000 [mm]	Kg	352,8	\$ 1,35	\$ 476,28
Plancha A-36 2000x6000x25 [mm]	Kg	2400	\$ 0,74	\$ 1.776,46
Plancha A-36 2000x6000x18 [mm]	Kg	6912		\$ 5.116,20
Plancha L.C 1000x2500x4 [mm]	Kg	240		\$ 177,65
Tubo Rectangular 200x100x4 [mm]	UN	1	\$ 94,01	\$ 94,01
Tubería ASTM A--106 SCH 40 STD 3"	UN	1	\$ 67,74	\$ 67,74
Tubería ASTM A-106 SCH 40 STD 1/2"	UN	1	\$ 8,23	\$ 8,23
Alambre MIG ER70S-6	Kg	45	\$ 0,85	\$ 38,25
Total				\$ 7.754,82

La tabla 3.9 incluye el costo estimado de algunos de los accesorios necesarios para ensamblar el transformador, sin entrar en mucho detalle para evitar violar los derechos de autor.

Tabla 3.9. Lista de accesorios para ensamblaje del transformador de potencia. [Elaboración propia]

Lista de Accesorios				
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Total
Pernería	100UN	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Roscas y Arandelas	100UN	1	\$ 12,30	\$ 12,30
Aceite Dieléctrico	GL	1100	\$ 4,10	\$ 4.510,00
Radiadores	UN	3	\$ 765,00	\$ 2.295,00
Bujes de Alta y Baja	UN	7	\$ 130,00	\$ 910,00
Ventiladores	UN	3	\$ 150,00	\$ 450,00
Válvulas	UN	3	\$ 60,00	\$ 180,00
Total				\$ 8.407,30

De acuerdo con la tipología de proyectos de (Sapag Chain, 2011) el proyecto es un proyecto de modernización, de tipo ampliación, dado que se plantea expandir el catálogo de productos para la venta adicionando los transformadores de potencia. Dado que no contamos con datos suficientes de cómo se encuentra actualmente la empresa como para hacer un flujo de caja actual y compararlo con el que se tendría si se añadiera el nuevo producto, se estimó directamente el flujo de caja del proyecto como si se fuera a implementar desde 0. En la tabla 3.10 podemos observar que el VAN sale positivo lo que quiere decir que aparte de recuperar la inversión se tendrá un capital de \$105.278,27 al final los 5 años, el TIR, al ser un valor alto indica que el retorno de los intereses es alto, dando una mayor facilidad de recuperar la inversión de manera más rápida.

Tabla 3.10. Flujo de Caja para proyecto de venta de transformadores de potencia.

[Elaboración propia]

Años	0	1	2	3	4	5
Cantidad		2	2	2	2	2
Precio		\$ 90.000,00	\$ 90.000,00	\$ 90.000,00	\$ 90.000,00	\$ 90.000,00
Total de Ingresos		\$ 180.000,00	\$ 180.000,00	\$ 180.000,00	\$ 180.000,00	\$ 180.000,00
Costos						
Materia Prima		\$ 15.509,65	\$ 15.509,65	\$ 15.509,65	\$ 15.509,65	\$ 15.509,65
Accesorios		\$ 16.814,60	\$ 16.814,60	\$ 16.814,60	\$ 16.814,60	\$ 16.814,60
Gastos Administrativos (20%)		\$ 36.000,00	\$ 36.000,00	\$ 36.000,00	\$ 36.000,00	\$ 36.000,00
Total Costos		\$ 68.324,25	\$ 68.324,25	\$ 68.324,25	\$ 68.324,25	\$ 68.324,25
Utilidad antes de Impuestos		\$ 111.675,75				
Impuesto (15%)		\$ 16.751,36	\$ 16.751,36	\$ 16.751,36	\$ 16.751,36	\$ 16.751,36
Utilidad neta		\$ 94.924,39				
Inversión	\$ 150.000,00					
Capital Propio	\$ 150.000,00					
Flujo de caja	\$-150.000,00	\$ 94.924,39				
VAN (25%)	\$ 105.278,27			TIR	57%	

La tabla 3.11 muestra el PRI obtenido del flujo de caja del proyecto, dándonos a saber que la inversión se recuperará en un periodo de 2 años y 1 mes.

Tabla 3.11. Periodo de retorno de la inversión. [Elaboración propia]

PAYBACK						
Tiempo	0	1	2	3	4	5
Flujo de Caja	-150000,00	94924,39	94924,39	94924,39	94924,39	94924,39
TIR	0,57					
VAN (25%)	105278,27					
NORMAL	-150000,00	-55075,61	39848,78	134773,17	229697,57	324621,96
	27051,83					
	2,04	PRI		2 años y 1 mes		

El precio de fabricación del transformador diseñado es de \$68,324, y su precio de venta es de \$90,000, dando un margen de ganancia del 24%, mientras que el precio de un transformador de potencia de 5MVA y 69KV importado desde China fluctúa entre \$45,000 y \$55,000, de acuerdo con (Shenda Electric Group Co. , 2020), sin incluir costos de impuestos y transporte a la llegada al Ecuador, si se revendiera este transformador al mismo precio de venta que el diseñado, se tendría un margen de ganancia de 38%, con la desventaja del tiempo de espera que tomaría la importación del mismo.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se desarrolló un diseño mecánico de los componentes estructurales y un modelo simple de selección de radiadores para el sistema de refrigeración de un transformador de potencia de 5MVA en base a la norma IEEE C57.12.00-2015.
- El análisis y cálculo de los elementos mecánicos comprenden la selección y justificación de los perfiles estructurales utilizados para sostener la parte activa, así como los elementos de sujeción (barras roscadas) utilizados para prensar el núcleo de manera vertical y horizontal, así como los elementos de izado para levantar el conjunto; los mismos que fueron colocados para levantar la tapa.
- Mediante un modelo analítico se optimizó la cantidad de material utilizado en la cuba tomando la pared del tanque y el refuerzo como una viga, de modo que, se hallaron las dimensiones necesarias para que dicha porción pueda resistir una presión de 2,5 atm.
- La pernería utilizada para mantener el cobertor sujeto a la cuba fue diseñada para resistir tanto esfuerzos cortantes como esfuerzos de tensión debidos a la presión de operación dentro de la cuba.
- El cálculo del reservorio de aceite que comprende el espesor de casco, cabeza y silletas se logró mediante el uso de un manual de recipientes a presión basado en la norma ASME VIII.
- Mediante un análisis de elementos finitos en un software CAE se comprobaron los resultados de los cálculos teóricos.
- Se estimó la disipación de calor de la cuba y hallando la cantidad de radiadores necesarios se garantizó que el total de pérdidas de la parte activa será disipado por la cuba y los radiadores para mantener el aceite dieléctrico a una temperatura menor a 65°C.
- Puesto que el fabricante desea sobrecargar el transformador térmicamente un 33% adicional se halló el número de ventiladores necesarios para que, mediante convección forzada apaciguar dicha sobrecarga.

- El análisis del flujo de caja entregó resultados positivos y elevados para el VAN y el TIR, de manera que el periodo de recuperación de la inversión realizada fue de 2 años y 1 mes, debido a esto, se concluye que el proyecto tiene alta rentabilidad y tiene un gran alcance ya que sería implementado en un país en vía de desarrollo como lo es Ecuador.
- El precio de importación de un transformador de potencia de 5MVA y 69kV está en un rango entre \$60-60K y 80K USD lo que hace el diseño presentado en este estudio competitivo para el mercado internacional.

4.2 Recomendaciones

- El tap changer o conmutador puede variar la altura o el ancho del transformador debido a que existen diferentes tipos. Para este estudio no se definió uno en específico, debido a esto se recomienda que, si se requiere aumentar la altura del transformador, se deberá aumentar el espesor de pared del tanque de 18 mm a 20 mm, esto permite poder incrementar la altura 100 mm más y mantener el factor de seguridad con valor de aproximadamente 2 unidades.
- Para obtener una mejor apreciación del modelo con todas sus facultades es recomendable dibujar y colocar los accesorios restantes ya que así se podría dimensionar de mejor manera las tuberías, bridas, válvulas, entre otros accesorios mecánicos, así como los orificios que requiere la cuba para colocar dichos accesorios.
- Se recomienda rigidizar las partes más vulnerables de la cuba como lo son la tapa y la sección central de la cara más larga añadiendo refuerzos extra.
- Es recomendable emplear una inversión extra a un equipo de apilado de núcleos para agilizar el proceso de fabricación del transformador ya que este proceso es uno de los más tardados debido a que este es comúnmente tercerizado.

BIBLIOGRAFÍA

- Amalfa, S. (2007). *Transformadores Fundamentos y Construcción* (1 ed.). Buenos Aires: H.A.S.A.
- Anil, J., & Rajendra, S. (2009). Weighted Scoring Method. *Second International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology* (pág. 7). Mumbai: ICETET-09.
- California Turbo. (15 de 01 de 2020). *California Turbo*. Obtenido de California Turbo: <https://www.californiaturbo.com/>
- Duferco Group. (13 de 1 de 2020). *IPAC*. Obtenido de Por los caminos del acero: <http://www.ipac-acero.com/producto-detalle.php?id=47>
- F. Megyesy, E. (1992). *Manual de Recipientes a Presión*. México: Grupo Noriega Editores.
- IEEE Std C57. 12.00. (2015). *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*. New York: IEEE Standards Association.
- Jones, D. A. (1991). Electrical Engineering: The Backbone of Society. *IEE PROCEEDINGS A (Science, Measurement and Technology)*, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1049/ip-a-3.1991.0001>
- L. Norton, R. (2011). *Diseño de Máquinas*. México: Pearson Education.
- M. Gere, J., & J. Goodno, B. (2009). *Mecánica de Materiales* (7ma ed.). México: Cengage Learning.
- Moretran. (25 de Octubre de 2019). *Moretran Fábrica de Transformadores*. Obtenido de Moretran Fábrica de Transformadores: <http://www.moretran.ec/>
- MultiAceros. (16 de 01 de 2020). *Tienda Online Multi Aceros* . Obtenido de Sucursal Santiago - Colombia: <https://www.e-multiaceros.cl/categoria-producto/canerias/?SCID=1>
- NTE INEN 2110. (2013). *Transformadores. Definiciones*. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- P. Incropera, F., P. Dewitt, D., L. Bergman, T., & S. Lavinne, A. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). Estados Unidos: John Wiley & Sons.

- Pacheco Gorge, C., & Saucedo Añez, L. (2018). *Diseño Mecánico de una Mesa de Apilado de Núcleo para Transformadores de Potencia*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- RAS Oliva, E. (1994). *Transformadores de Potencia de Medida y de Protección* (7 ed.). Barcelona, España: Boixareu Editores.
- Sachin B., P., Kishor, J., Van der Vekeen , W., & Sharma, A. (2014). CFD Study on Thermal Performance of Radiators in a Power Transformer: Effect of Blowing Direction and Offset of Fans. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 9.
- Sapag Chain, N. (2011). *PROYECTOS DE INVERSIÓN Formulación y Evaluación* (Segunda ed.). Chile: Prentice Hall.
- Sony, R., Jayadeep Kumar , J., Pradeep M, K., & Anishek, S. (2015). Performance Analysis of an Oil Natural Air Natural Power Transformer Radiator. *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology* (pág. 8). Tailandia: ELSEVIER. doi:Anishek, S., Sony, R., Jayadeep Kumar, J., & Kamath, P. M. (2016). Performance Analysis and Optimisation of an Oil Natural 10.1016/j.protcy.2016.05.059

APÉNDICES

APÉNDICE A

Método de Matriz de Decisión para la selección de la mejor Alternativa

Según lo indicado por el Método “Weighted Scoring” (Anyl & Alejandra, 2009), es necesario especificar cada uno de los criterios de selección, siendo estos clasificados por Desempeño, Aspecto, Seguridad y Costo.

Tabla A.1 Criterios de Selección de la Matriz de Decisión. [Elaboración Propia]

Criterios	
1	Desempeño
1.1	Alta tasa de Mantenibilidad
1.2	Facilidad de Ensamblaje
1.3	Correcta Refrigeración del Fluido
1.4	Bajo Riesgo de Ruptura de Estructura
2	Aspecto
2.1	Tamaño Eficiente
2.2	Peso menor a 25 Ton
2.3	Espesor de Cuba menor a 40mm
2.4	Facilidades de izado y gateo.
3	Seguridad
3.1	Correcto Funcionamiento del Aislante
3.2	Partes Móviles Encapsuladas
3.3	Prevención de Fuga de Fluido
4	Costo
4.1	Bajo Costo de Producción
4.2	Bajo Costo de Mantenimiento
4.3	Bajo Costo de Repuestos

Las alternativas de solución se desarrollarán utilizando una matriz que servirá como la matriz de decisión, en esta los criterios son pesados de acuerdo con su importancia o la influencia que estos tengan sobre el proceso de diseño.

Es necesario emplear el método “Analytic Hierarchy Process” (AHP) para calificar el peso de cada categoría de criterios junto con los criterios entre sí.

Tabla A.2 Matriz de Escala de Importancia. [Elaboración propia]

Escala de Importancia	
Criterios con Igualdad de Importancia	1
Criterio A un poco más importante que B	3
Criterio A mucho más importante que B	7
Criterio A demasiado más importante que B	9
Valores intermedios de importancia	2,4,5,6,8
B respecto a A	1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9

Tabla A.3 Peso de las Categorías. [Elaboración propia]

Categorías	1	2	3	4	Total	Peso del Atributo (Relativo)
1	1	7	3	6	17	0,48
2	0,14	1	0,33	4	5,48	0,15
3	0,33	3	1	7	11,33	0,32
4	0,17	0,25	0,14	1	1,56	0,04
				TOTAL	35,37	1

Tabla A.4 Peso del Criterio de Desempeño. [Elaboración propia]

Criterio	1.1	1.2	1.3	1.4	Total	Importancia Relativa	Importancia Absoluta
1.1	1	0,33	0,14	0,11	1,59	0,04	0,02
1.2	3	1	0,17	0,13	4,29	0,11	0,05
1.3	7	6	1	0,5	14,5	0,36	0,17
1.4	9	8	2	1	20	0,50	0,24
				TOTAL	40,38	1	0,48

Tabla A.5 Peso del Criterio de Aspecto. [Elaboración propia]

Criterio	2.1	2.2	2.3	2.4	Total	Importancia Relativa	Importancia Absoluta
2.1	1	5	0,33	0,2	6,53	0,21	0,03
2.2	0,2	1	0,25	5	6,45	0,21	0,03
2.3	3	4	1	4	12	0,38	0,06
2.4	5	0,2	0,25	1	6,45	0,21	0,03
				TOTAL	31,43	1	0,15

Tabla A.6 Peso del Criterio de Seguridad. [Elaboración propia]

Criterio	3.1	3.2	3.3	Total	Importancia Relativa	Importancia Absoluta
3.1	1	9	8	18	0,68	0,22
3.2	0,11	1	6	7,11	0,27	0,09
3.3	0,13	0,17	1	1,29	0,05	0,02
			TOTAL	26,40	1	0,32

Tabla A.7 Precio del Criterio de Costo. [Elaboración propia]

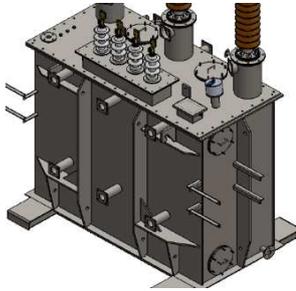
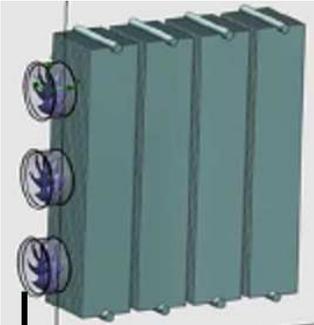
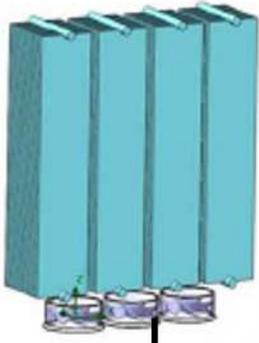
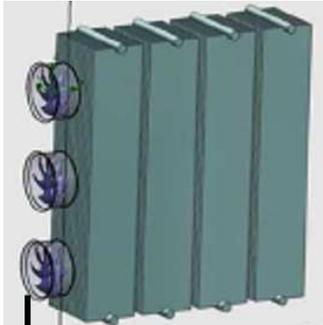
Criterio	4.1	4.2	4.3	Total	Importancia Relativa	Importancia Absoluta
4.1	1	2	6	9	0,57	0,02
4.2	0,50	1	4	5,5	0,35	0,02
4.3	0,17	0,25	1	1,42	0,09	0,004
			TOTAL	15,92	1	0,04

Una vez obtenidos los pesos absolutos para cada criterio, se califica la mejor alternativa con respecto a cada uno, utilizando la escala de importancia utilizada anteriormente, donde el rango de importancia va del 1 al 9, de manera que se pueda tomar la mejor decisión utilizando la siguiente sumatoria:

$$S = \sum w_i * r_i$$

La S más grande sería la mejor alternativa de solución a implementar. La matriz de decisión del proyecto la pueden observar en la tabla 2.5, siendo las alternativas de solución las planteadas en la siguiente tabla;

Tabla A.8 Posibles Alternativas de Solución. [Elaboración propia]

	Opción A	Opción B	Opción C
Configuración de Refuerzos de la Cuba.	Verticales.	Horizontales.	Mixtos (Verticales y Horizontales). 
Bomba para Refrigeración	No	No	Sí
Ubicación de los Ventiladores.	Flujo Horizontal 	Flujo Vertical 	Flujo Horizontal 
Tipo de Aceite	Aceite Mineral 	Aceite Vegetal 	No contiene Fluido Aislante.

APÉNDICE B

Breve descripción de los estándares, normas y reglamentos relacionados con el diseño del transformador.

En esta sección se dará una introducción de características a tomar en consideración para el diseño mecánico del transformador de potencia, sin profundizar en ellas, pero a su vez, se mantendrá la secuencia para aquellos que deseen complementar el estudio por interés propio. Dentro del diseño de los transformadores cada fabricante mantiene modelos de fabricación de carácter intelectual propio, lo que conlleva a que puedan ser más competitivos en el mercado, al brindar un mejor servicio, de mejor calidad, con el propósito de sobrepasar las expectativas del cliente.

Norma Internacional ANSI C.57-12.10-2107

Requerimientos estándares para transformadores de potencia sumergidos en líquido aislante. Este estándar está destinado principalmente para ser utilizado como base del rendimiento y seguridad del equipo, así como para ayudar en la selección adecuada de dicho equipo. El mismo cubre ciertos aspectos eléctricos, dimensionales y mecánicos con características de 50 Hz y 60 Hz, transformadores de potencia sumergidos en líquido y autotransformadores. Dichos transformadores pueden estar asociados con cualquier **intercambiador (switchgear)** de primaria o subestaciones, o ambas, con propósitos de reducción o aumento y una clasificación de base de la siguiente manera: 833 kVA o mayores - monofásico, 750 kVA o mayores - trifásico.

A continuación, se resumen las secciones con las principales características mecánicas que se establecen en la norma ANSI C.57-12.10-2107.

Condiciones de operación

El límite inferior de temperatura del líquido aislante se referencia de la norma IEEE C57.12.00-2015 sección 4.1.2.2, este establece que no puede ser menor a -20°C.

Aumento de temperatura en el líquido aislante: La temperatura del líquido aislante no debe exceder los 65°C medido cerca de la parte superior del tanque.

Construcción:

En la Tabla B.1 se listan los accesorios que por obligación deben estar ubicados según el segmento ilustrado en la Figura B.1. En la 3ra columna se encuentran el número de cláusulas que describen los requerimientos de cada accesorio.

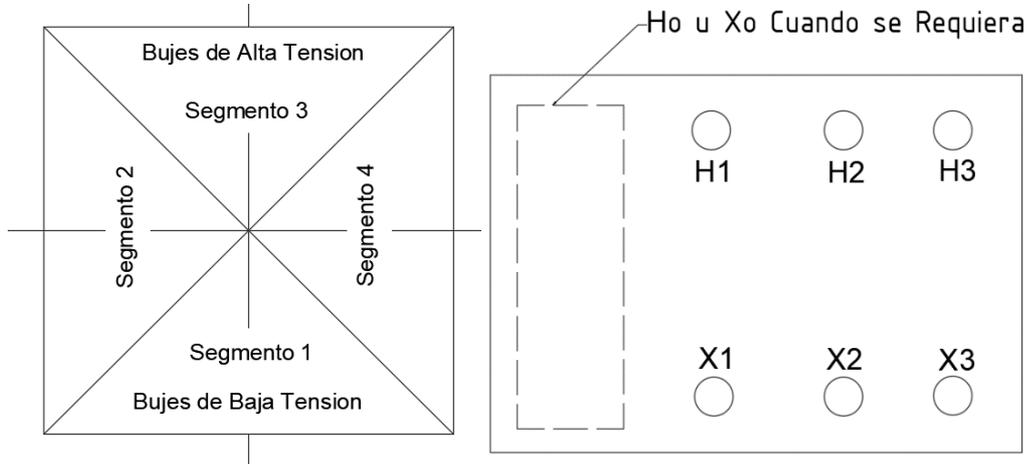


Figura B.1. Localización de segmentos (izquierda). Localización de boquillas en la tapa (derecha). [ANSI C.57-12.10].

Tabla B.1 - Accesorios externos del transformador con designación obligatoria de posición [ANSI C.57-12.10]

Accesorios	Ubicación	Cláusula
Manivela para operación de cambiador bajo carga	S1, S4, ver cláusula de ref.	5.1.1
Indicador de nivel de líquido	S1	5.1.2
Indicador de temperatura de líquido	S1	5.1.3
Indicador de temperatura de devanado	S1	5.1.4
Medidor de presión de vacío	S1 o S4	5.1.5
Válvula de purga de presión de vacío	S1	5.1.6
Dispositivo de alivio de presión	Cubierta principal	5.1.7
Válvulas de drenaje y filtro	S1	5.1.8
Bujes	Fig. 2.4 (der)	5.2
Facilidades de gateo	Ver ref.	5.3.4
Placa del fabricante	S1	5.4
Aterrizaje(s)	Ver ref.	5.5
Control auxiliar de enriamiento	S1 o S2	5.9
Intercambiador de carga	S1 o S2	6

Tabla B.2– Accesorios para el sistema de preservación de aceite –Tanque conservador sin diafragma [ANSI C.57-12.10]

Accesorio	Cláusula
Válvula de cierre	5.7.3.1
Válvula de drenaje	5.7.3.2
Nivel de indicador de líquido	5.7.3.3/5.1.2
Deshumidificador de aire	5.7.3.4
Relé para acumulación de gas	5.7.3.5
Relé Buchholz	5.7.3.6

Cambiador de carga: Un cambiador de carga de desenergizado con manivela de operación debe ser provisto. La manivela de operación debe estar en un lado del tanque en el segmento 1 o 4. Si el usuario requiere operar dicha manivela desde el suelo. Esta manivela deberá estar ubicada a no más de 2m de altura.

Indicador de nivel de líquido: Un medidor de nivel magnético de superficie vertical deberá ser provisto en el segmento 1 si este no está equipado con un tanque conservador, caso contrario este deberá estar en un lado del tanque conservador de manera que pueda ser legible para una persona de pie a nivel de la base.

El indicador deberá tener fondo negro con indicadores de color claro. El diámetro de este dependerá de la altura a la que se encuentre. Siguiendo las siguientes especificaciones:

- a) 82.6mm ± 6.4mm cuando el nivel del líquido es 2.44m o menos desde el nivel de la base.
- b) 140mm ± 12.7mm cuando el nivel del líquido es mayor a 2.44m desde el nivel de la base.

Alarmas de contacto deben ser provistas en el nivel mínimo de líquido en operación. Estos deben de estar acorde a la sección 5.1.10 y 5.1.11. Estas dos últimas secciones no se encuentran en este documento.

Indicador de temperatura de líquido: Se instalará un termómetro que mida la temperatura máxima del líquido en el costado del tanque en el segmento 1 y será

legible para una persona que se encuentre al nivel de la base. Los medidores, cuando se requiere tener controles de operación en sus cajas, se montarán entre 1,22m y 1,83m sobre la base. La escala mínima el rango debe ser de 0° C a 120° C.

Indicador de temperatura de devanado: Se instalará un termómetro que mida la temperatura máxima del devanado en el costado del tanque en el segmento 1 y será legible para una persona que se encuentre al nivel de la base. Los medidores, cuando se requiere tener controles de operación en sus cajas, se montarán entre 1,22m y 1,83m sobre la base. La escala mínima el rango debe ser de 0° C a 180° C.

Dispositivo de alivio de presión: Se debe proporcionar no menos de un dispositivo de alivio de presión (PRD) en la cubierta del transformador, y también en cada compartimento separado lleno de líquido aislante. El caudal mínimo para los PRD montados en la cubierta debe ser de 142m³/min, a una presión manométrica de funcionamiento de 69kPa cuando se prueba a 103 kPa.

Válvulas de drenaje y filtro: Una válvula combinada de drenaje y filtro inferior se ubicará en el costado del tanque en el segmento 1. Esto será una válvula de globo proporcionada para el drenaje del líquido a 25mm desde el fondo del tanque. El tamaño de la válvula de drenaje debe ser de 2in con rosca *NPT* y debe tener rosca de tubería cónicas (de acuerdo con *ASME B1.20.1*) con un tapón de tubo en el extremo abierto. Cuando se especifica una válvula métrica, debe ser *DN 50* de acuerdo con la válvula de drenaje *ISO 6708* y un dispositivo de muestreo *DN 15* separado. La válvula de drenaje de 2-in deberá tener un dispositivo de muestreo incorporado de 0.375-in que debe ubicarse a un lado de la válvula entre la válvula principal y el tapón de la tubería. El dispositivo de muestreo se debe proporcionarse con rosca macho de 5/16-in × 32 hilos por pulgada para la conexión del usuario y debe estar equipada con una tapa. La válvula métrica debe ser se suministra con una rosca G 3/4 según *EN10226-1* para la conexión del usuario y debe estar equipado de la misma manera con una tapa.

La válvula de filtro superior debe estar ubicada en el segmento justo debajo de la cubierta para transformadores con sistemas conservadores de líquidos. La válvula del filtro superior debe ser de 2-in *NPT* con roscas de tubería cónicas (de acuerdo con *ASME B1.20.1*) o si es una válvula métrica se especifica, debe ser una válvula *DN 50* de acuerdo con *ISO 6708* y un tapón de tubo en el extremo abierto.

Bujes: El nivel de aislamiento en los bujes de línea debe ser igual o mayor que el nivel de aislamiento de los devanados que están conectados. La disposición de estos se muestra en la figura B.1 (derecha).

Las características eléctricas y las dimensiones de los bujes para transformadores en exteriores están indicadas en *IEEE Std C57.19.00™* y *IEEE Std C57.19.01™* cuando corresponda. Las distancias eléctricas deben ser como se especifica en *IEEE Std C57.12.00™*.

A continuación, en la tabla B.3 se presentan las distancias eléctricas para el transformador de este estudio.

Tabla B.3 Distancias eléctricas [IEEE Std C57.12.00™]

Voltaje nominal del sistema, rms	Máximo voltaje nominal del sistema, rms	Distancia mínima entre las partes vivas de fases diferentes				Distancia mínima entre los aisladores de los bujes de fases diferentes			
		Transformadores de distribución		Transformadores de potencia		Transformadores de distribución		Transformadores de potencia	
(kV)	(kV)	mm	(in)	mm	(in)	mm	(in)	mm	(in)
15	-	140	(5.5)	165	(6.5)	76	(3)	89	(3.5)
69	72.5	635	(25)	635	(25)	483	(19)	483	(19)

Líneas neutro: Cuatro bujes de cubierta deberán ser provistas para conexión permanente en devanados Y en transformadores trifásicos.

Facilidades de izado, movimiento y gateo

Facilidades para izado: Se deben proporcionar facilidades menores para izado que sirven para levantar el cobertor por separado y también para el núcleo y la bobina desde el tanque utilizando cuatro cables de elevación, así mismo, las facilidades para izado del transformador completo deberán ser diseñadas para

levantarse con cuatro eslingas verticales. Las superficies de rozamiento deberán estar libres de orillas cortantes o filos, y se deberán proveer con agujeros con diámetro de 21mm para propósitos de candadeo.

Facilidades de movimiento: La base del transformador deberá estar hecha de una placa robusta o tener miembros que formen un rectángulo que permita rodar o deslizar una unidad completamente ensamblada en las direcciones de las líneas centrales de los segmentos.

Los puntos de apoyo se ubicarán de manera que el centro de gravedad del transformador, preparado para el envío, no caiga fuera de estos puntos de apoyo cuando la base está inclinada 15° o menos desde la horizontal, con o sin líquido aislante en el transformador.

La base deberá estar construida de tal manera que sus bordes extremos en los cuatro lados estén redondeados o con una pendiente de 45° hacia arriba aproximadamente. Una base de fondo plano con espesor de menos de 12.7mm no requiere bordes inclinados redondeados o hacia arriba.

Facilidades de gateo: Las provisiones de gateo deben estar ubicadas cerca de los extremos de las uniones de los segmentos y diseñado para gatear el transformador en su configuración completa. Las dimensiones están detalladas en la figura B.2 y la tabla B.4.

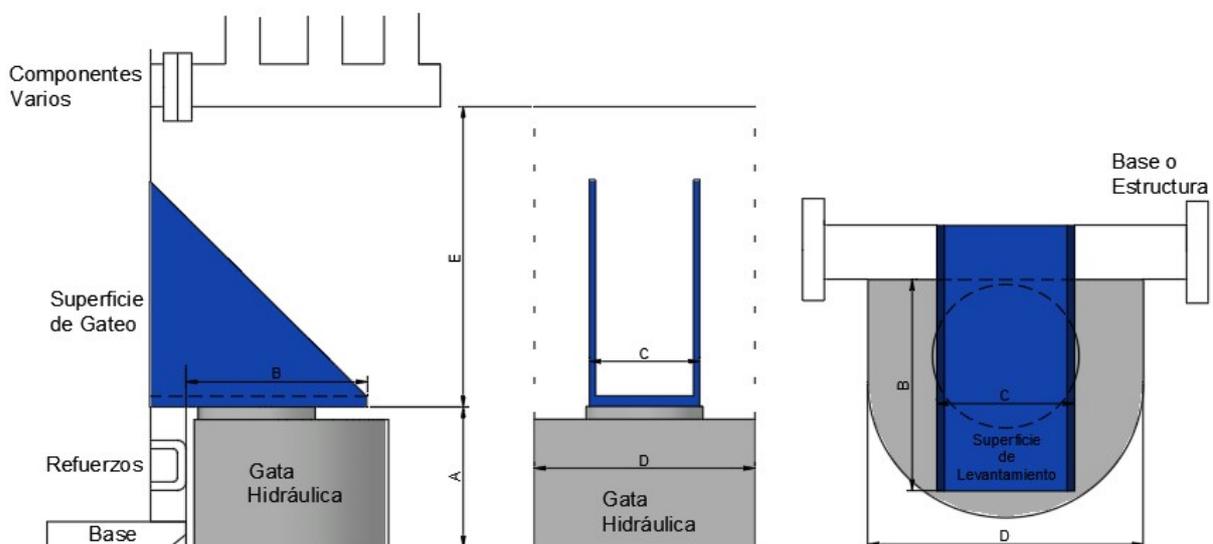


Figura B.2 Provisiones para gateo [IEEE Std C57.12.10™]

Tabla B.4 Dimensiones para las Provisiones de Gateo [IEEE Std C57.12.10™]

	<i>Peso total 2268kg o menos</i>	<i>Peso total (22680 - 90.718) kg o menos</i>	<i>Peso total 90718 kg o más</i>
Dimensión.	[mm]	[mm]	[mm]
A	127	330	559
B	63.5	254	305
C	63.5	254	305
D	254.0	305	356
E	508.0	508.0	609.6

Sistema de preservación de líquido

En estos sistemas, el interior del transformador deberá de estar sellado de la atmósfera con una temperatura máxima del líquido de 105 °C.

Sistema de tanque conservador sin diafragma: Un sistema de tanque conservador sin diafragma es un sistema que, por medio de un tanque auxiliar parcialmente lleno con líquido y conectado al tanque principal completamente lleno, sella el líquido aislante en el tanque principal de la atmósfera. La presión manométrica máxima interna del líquido aislante en el tanque principal no debe exceder los 34 kPa. Este debe estar provisto con los siguientes accesorios:

Válvula de cierre: Se proporcionará una válvula entre el tanque conservador y el tanque principal para cerrar el flujo de líquido. El tamaño de las válvulas será determinado por el fabricante.

Válvula de drenaje: Se proporcionará una válvula de drenaje en el lado del tanque conservador lo más cerca posible del fondo. El tamaño del drenaje, la válvula debe tener 2 in con roscas de tubería cónica (*NPT*, de acuerdo con *ASME B1.20.1*), con un tapón de tubería en el extremo abierto

Nivel de indicador de líquido: El tanque conservador deberá tener instalado al menos un indicador de nivel de líquido.

Deshumidificador de aire: Un deshumidificador de aire se debe proporcionar para minimizar la humedad normal en el aire que entra en contacto con el líquido

en el tanque conservador. El deshumidificador se llenará con gel de sílice que absorbe el 20% de su propio peso en humedad y debe estar provisto de una trampa de líquido aislante para evitar el continuo contacto entre el aire húmedo y el gel de sílice a menos que se suministren respiradores auto regeneradores.

Relé Buchholz: Si el transformador está equipado con un relé Buchholz, se ubicará en la conexión de la tubería entre el tanque principal y el tanque conservador para monitorear los movimientos acumulados de gas y líquido.

Tanques

Presión de diseño: El transformador, ensamblado completamente debe estar diseñado para resistir, sin deformación permanente, una presión 25% mayor que la presión máxima de operación.

Según *IEEE Std C57.12.10™* La presión de operación no puede exceder 2 atmósferas (203 kPa)

Vacío: Los tanques deben estar diseñados para la presión de vacío que soportan operando en campo.

Tapa / Cobertor: A menos que se especifique lo contrario por el usuario, la tapa deberá estar soldada al tanque.

Equipo de refrigeración auxiliar

Ventiladores: Cuando se requiere refrigeración por aire forzado, los motores de los ventiladores deben ser de 240 V, 60 Hz o 400 V, 50 Hz, monofásico, sin interruptor centrífugo, individualmente o se protegerá térmicamente.

Provisiones para enfriamiento por aire forzado futuro: Ya que una por requerimiento del fabricante es que el transformador utilice enfriamiento por aire forzado se proveerá:

- La disposición mecánica necesaria.
- Un indicador de temperatura del líquido operado térmicamente.
- Disposiciones para montar cualquier caja de terminales o gabinetes auxiliares necesarios para el circuito de enfriamiento (N/A).
- Disposición para montar los ventiladores.

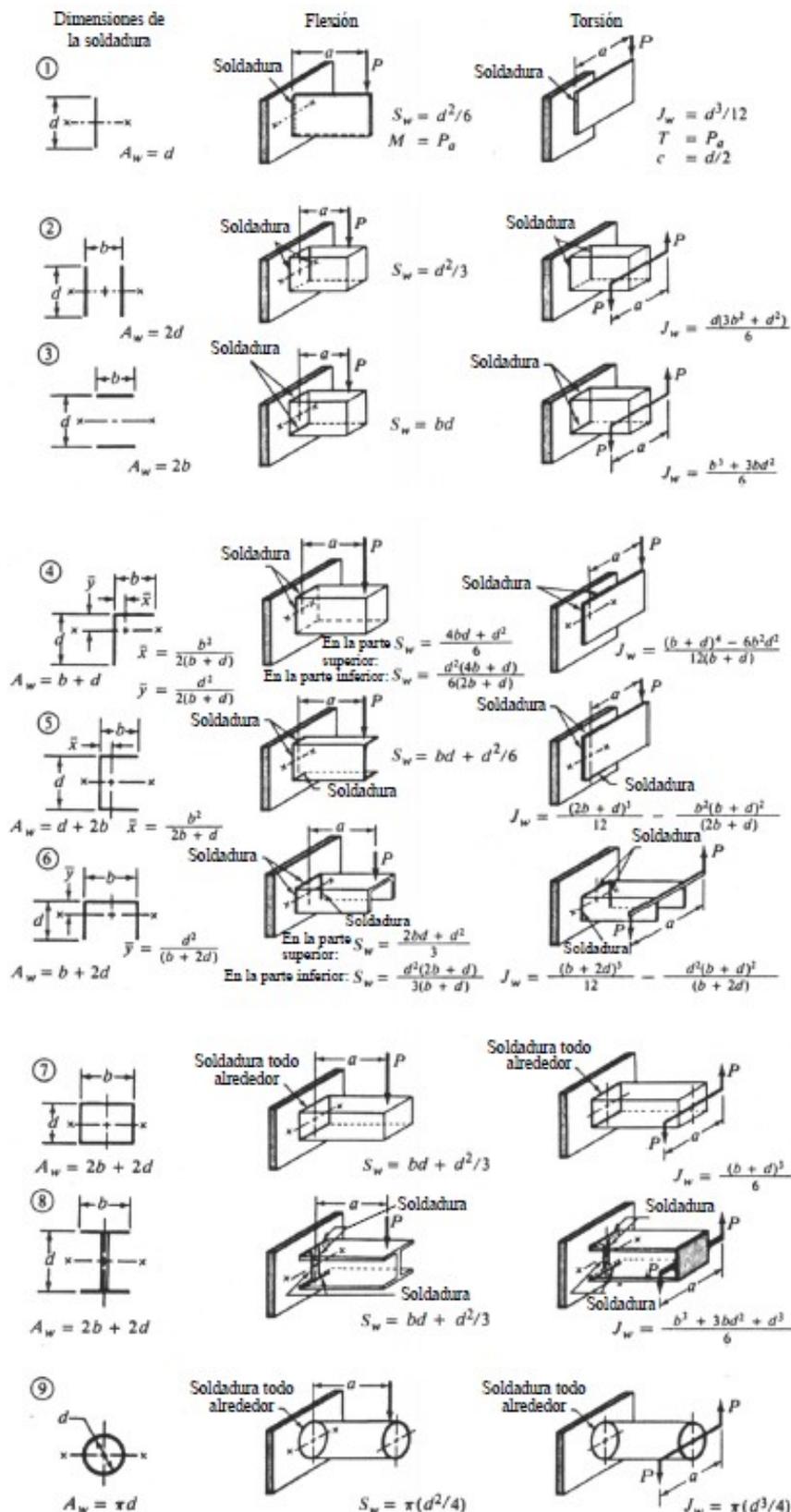
APÉNDICE C

Código utilizado para el diseño de la Cuba

```
syms x y;
ala=360; %se ingresa manualmente longitud de ala
MSmin=232831.9660; %se ingresa manualmente MSmin
y1=0.5*x;
y2=6*x;
A1=x*y;
A2=12.5*x^2;
c1=(y1*A1+y2*A2)/(A1+A2);
c2=11*x-c1;
Ic1=(1/12)*y*x^3;
Ic2=(1/12)*(1.25*x)*(10*x)^3;
d1=c1-(x/2);
d2=c2-(5*x);
Iz1=Ic1+A1*d1^2;
Iz2=Ic2+A2*d2^2;
Iz=Iz1+Iz2;
MS2p=(Iz/c2);
MS2=subs(MS2p,y,ala);
espesor=solve(MS2==MSmin,x);
e=vpa(espesor)
```

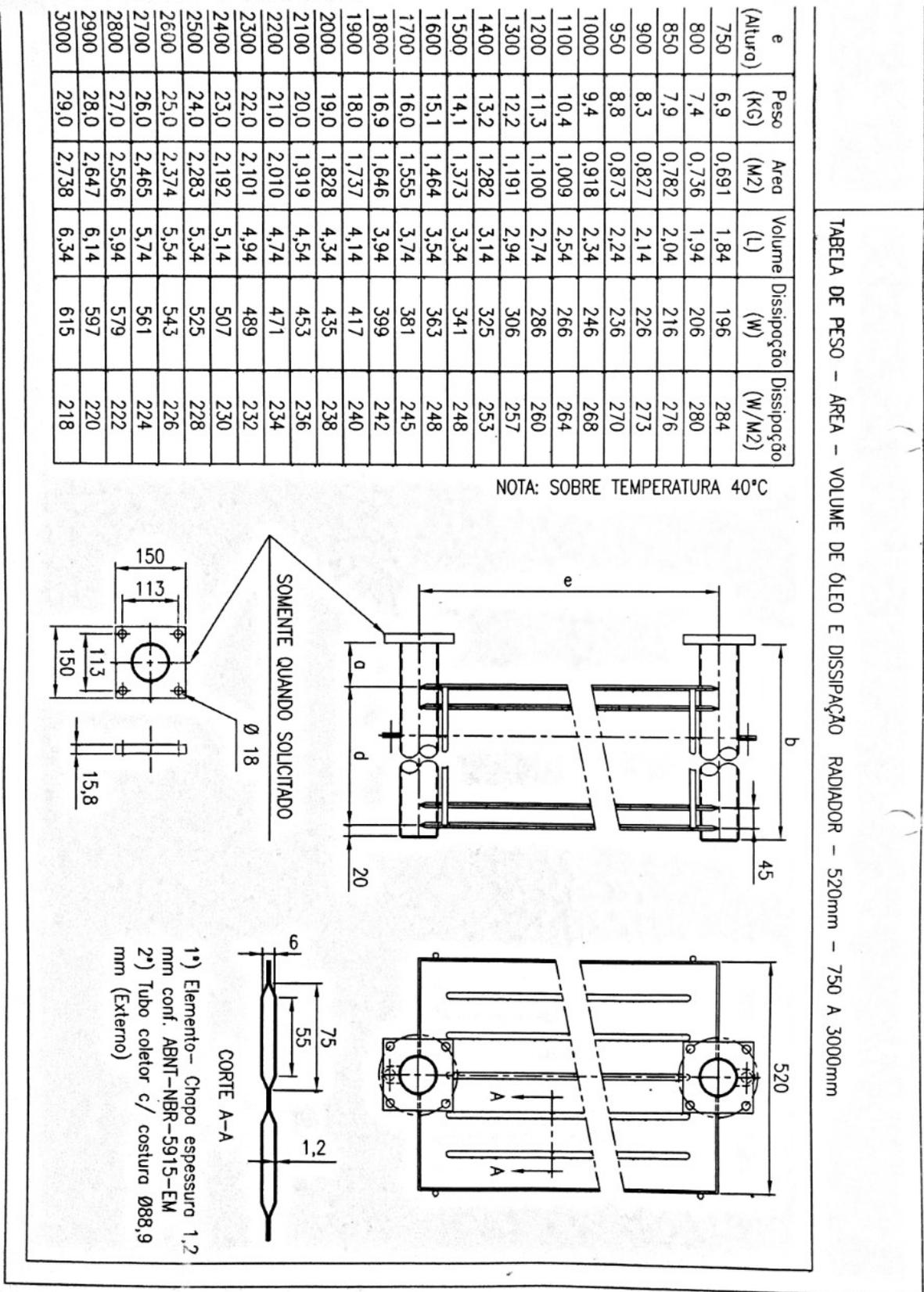
APÉNDICE D

Figura D.1 Factores geométricos para analizar la soldadura como una línea [L. Norton, 2011]



APÉNDICE E

Figura E.1 Catálogo utilizado para la disipación de los radiadores. [California Turbo, 2020]



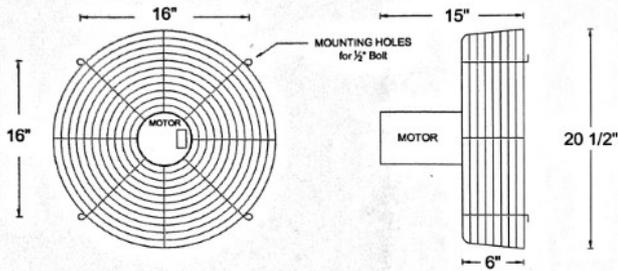
APÉNDICE F

Figura F.1 Catálogo del ventilador seleccionado. [California Turbo, 2020]

CFMASTER

18" DIAMETER TRANSFORMER COOLING FAN

Fan Dimensions:



Fan Ratings:

Model #	CFM18J000CS	
HP (kW)	1/2 (0.372)	
Hertz	50	60
RPM	1425	1725
Volts	190/380	208-230/460
Phase	3	3
CFM*	5,160	6,240
dbA** @ 6'	60	64
dbA** @ 10'	55	60
WT.-LBS.	42	42

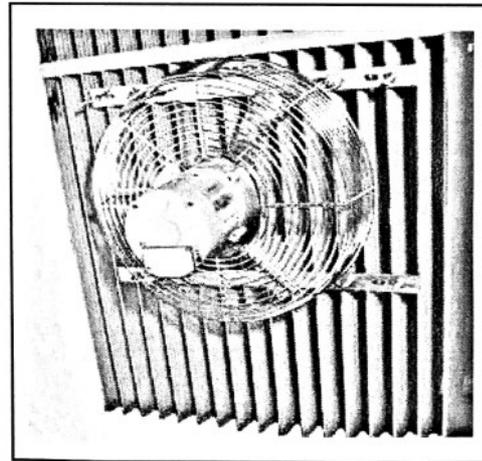
Electrical Data:

Phase	3	3	
Hertz	50	60	
Volts	190/380	208-230/460	
AMPS	Running/ Nameplate	1.9/0.95	1.7-1.8/0.9
	Starting/ Locked Rotor	10.93/5.45	10.85-12/6
	Power Factor	68	68

Guard: Heavy duty hot dip galvanized steel basket with discharge guard. Ribs are 0.375" with 0.25" and 0.148" rings. OSHA compliant (no opening greater than 1/2").

Motor: Totally enclosed, weatherproof, 48 Frame with a 56C-face, 5/8" stainless steel shaft, sealed ball bearings permanently lubricated, Class F insulation, condensation drain holes. Automatic overload protection. Foot mounted adapters are available.

Propeller: 3 Blades, die-cast aluminum, with a true airfoil design, clockwise rotation as viewed from the motor side.



* Test Method: AMCA 210-99, fig. 12/ ISO 5801, fig. 71b, fan installation type A, free inlet and free outlet. Other impeller arrangements will affect the performance.
 ** Sound levels listed here were determined under laboratory conditions. Many factors can influence fan sound levels that are beyond the control of the propeller manufacturer or California Turbo, Inc; including inlet geometry and obstructions in the airflow. Please use this information for comparison purposes only.
 NOTE: Electrical and noise data are supplied by the motor and propeller manufacturers, respectively. These values have not been independently verified by California Turbo, Inc. California Turbo, Inc. reserves the right to make product changes from time to time, without prior notification.
 MW-18/3-6/45°/AL/3HL/5/8x3/16 MDCAS5WJL



California Turbo, Inc.

10721 Business Drive Fontana, California 92337-8233

(909)854-2800

(909)854-2801 fax

www.californiaturbo.com

Form Code: LEE001

info@californiaturbo.com

5/20/10

APÉNDICE G

Cálculos Detallados

Selección de viga de la parte Activa

La imagen a continuación muestra las distancias a cada fuerza, con esto se logró obtener las reacciones mediante las ecuaciones 2.1 y 2.2

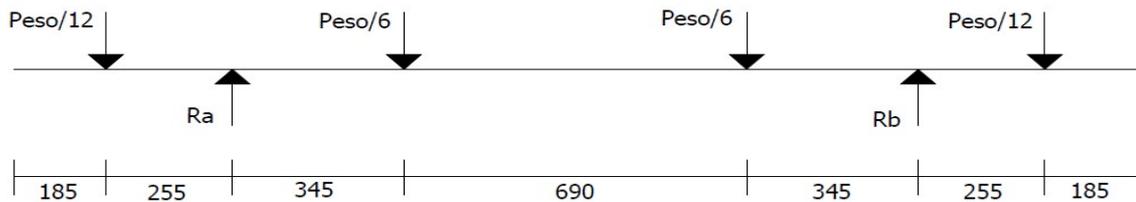


Figura G.1 Diagrama de Cuerpo Libre de la Viga. [Elaboración propia]

$$\sum M_A = 0$$

$$\left(\frac{Peso}{12} [N]\right)(0.250[m]) - \left(\frac{Peso}{6} [N]\right)(0.345[m]) - \left(\frac{Peso}{6} [N]\right)(1.035[m]) + R_b(1.38[m]) - \left(\frac{Peso}{12} [N]\right)(1.635[m]) = 0$$

$$R_b = 15250 N$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_a = \frac{Peso}{2} - R_b = 15250 N$$

A continuación, se muestran las figuras de los diagramas de fuerza cortante y momento flector, utilizados para hallar el momento máximo que sufre la viga a seleccionar.

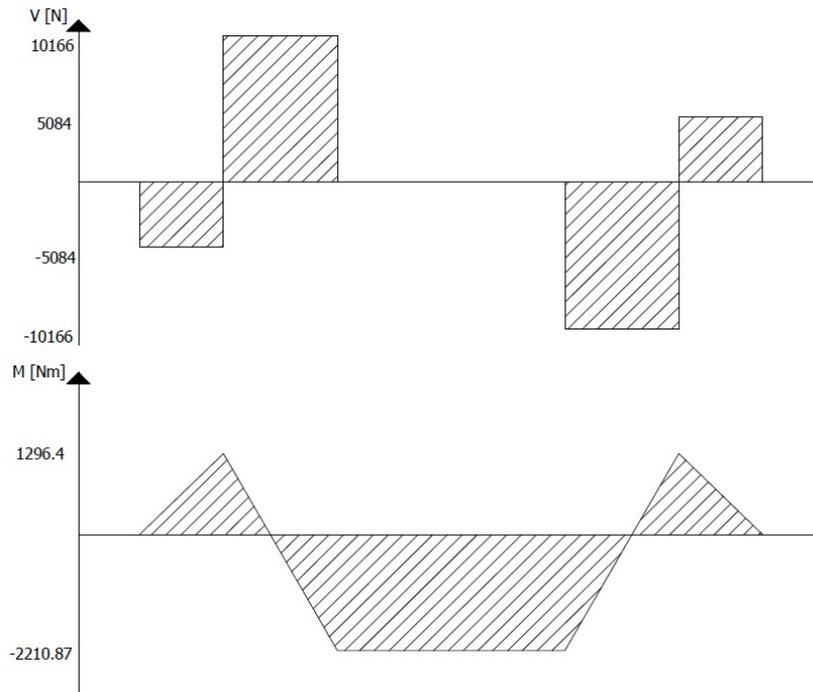


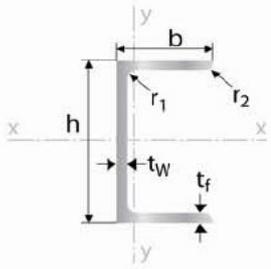
Figura G.2 Diagrama de fuerza cortante y momento flector de la viga. [Elaboración propia]

Se combinaron las ecuaciones 2.3 y 2.4 para obtener el módulo de sección de la viga a seleccionar

$$W = \frac{\eta M_{max}}{S_y} = \frac{(7)(2210.87[Nm])}{250 * 10^6[Pa]} = 6.19 * 10^{-5} m^3 = 61.9 cm^3$$

Con el módulo de sección obtenido, se revisó el catálogo de vigas UPN de la empresa de Acero IPAC (Duferco Group, 2020) y se seleccionó la viga adecuada para la aplicación, la cuál se muestra en la imagen adjunta encerrada en un recuadro rojo.

Tabla G.1 Propiedades elásticas de las vigas UPN. [L. Norton, 2011]



Largo normal:
6 metros / 12 metros
Recubrimiento:
Negro
Calidad de acero:
ASTM A-36 / ASTM A 572 Gr. 50
Norma de fabricación:
INEN 2229 / EN 10279
Observaciones:
Otras dimensiones y largos previa consulta.

➤ Aplicaciones

- Estructuras.
- Soporte de polipasto en puente grúas o teclas.
- Puentes.
- Rieles.



Designación	Dimensiones							Área	Peso	Propiedades Elásticas						Cons Tors	
	Altura		Ala		Distancias					Eje y-y			Eje x-x				
	h	s	b	t	r1	r2	d			lx	Sx	rx	ly	Sy	ry		Jt
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm			cm ²	kg/mt	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴		cm ³
UPN 80	80,00	6,00	45,00	8,00	8,00	4,00	46,00	11,00	8,64	106,00	26,50	3,10	19,40	6,36	1,33	2,16	
UPN100	100,00	6,00	50,00	8,50	8,50	4,50	64,00	13,50	10,60	206,00	41,20	3,91	29,30	8,49	1,47	2,81	
UPN120	120,00	7,00	55,00	9,00	9,00	4,50	82,00	17,00	13,40	364,00	6,037,00	4,62	43,20	11,10	1,59	4,15	
UPN140	140,00	7,00	60,00	10,00	10,00	5,00	98,00	20,40	16,00	605,00	86,40	5,45	62,70	14,80	1,75	5,68	
UPN160	160,00	7,50	65,00	10,50	10,50	5,50	115,00	24,00	18,80	925,00	116,00	6,21	85,30	18,30	1,89	7,39	
UPN180	180,00	8,00	70,00	11,00	11,00	5,50	133,00	28,00	22,00	1350,00	150,00	6,95	114,00	22,40	2,02	9,55	
UPN 200	200,00	8,50	75,00	11,50	11,50	6,00	151,00	32,20	25,30	1910,00	191,00	7,70	148,00	27,00	2,14	11,90	
UPN 220	220,00	9,00	80,00	12,50	12,50	6,50	167,00	37,40	29,40	2690,00	245,00	8,48	197,00	33,60	2,30	16,00	
UPN 240	240,00	9,50	85,00	13,00	13,00	6,50	184,00	42,30	33,20	3600,00	300,00	9,22	248,00	39,60	2,42	19,70	
UPN 260	260,00	10,00	90,00	14,00	14,00	7,00	200,00	48,30	37,90	4820,00	371,00	9,99	317,00	47,70	2,56	25,50	
UPN 280	280,00	10,00	95,00	15,00	15,00	7,50	216,00	53,30	41,80	6280,00	448,00	10,90	399,00	57,20	2,74	31,00	
UPN 300	300,00	10,00	100,00	16,00	16,00	8,00	232,00	58,80	46,20	8030,00	535,00	11,70	495,00	67,80	2,90	37,40	
UPN 320	320,00	14,00	100,00	17,50	17,50	8,75	246,00	75,80	59,50	10870,00	679,00	12,10	597,00	80,60	2,81	66,70	
UPN 350	350,00	14,00	100,00	16,00	16,00	8,00	282,00	77,30	60,60	12840,00	734,00	12,90	570,00	75,00	2,70	61,20	
UPN 380	380,00	13,50	102,00	16,00	16,00	8,00	313,00	80,40	63,10	15760,00	829,00	14,00	615,00	78,70	2,77	59,10	
UPN 400	400,00	14,00	110,00	18,00	18,00	9,00	324,00	91,50	71,80	20350,00	1020,00	14,90	846,00	102,00	3,04	81,60	

Dado que la viga seleccionada mediante el cálculo realizado no tiene la suficiente altura para un agarre correcto del núcleo de la parte activa, en cambio se seleccionó una UPN 220 (Encerrada con verde en la imagen anterior).

Dimensionamiento de Pernos Verticales

La carga a soportar individualmente se calculó dividiendo el peso de la parte activa para el número de pernos como se muestra a continuación;

$$P = \frac{61000[N]}{8} = 7625 N$$

Para el dimensionamiento fue necesario principalmente seleccionar el material del perno, el cuál está ligado a la resistencia del mismo, dado que el sistema utilizado

en este documento es el métrico, se eligió un perno de clase 8.8 ya que es de los más comunes en el mercado y además acapara un gran rango de diámetros posibles, de modo que su resistencia de prueba está dada en la tabla G.2.

Tabla G.2 Resistencia de prueba de los pernos según su clase. [L. Norton, 2011]

Número de clase	Intervalo del tamaño del diám. ext. (mm)	Resistencia de prueba mínima (MPa)	Resistencia a la fluencia mínima (MPa)	Resistencia a la tensión mínima (MPa)	Material
4.6	M5-M36	225	240	400	bajo o medio carbono
4.8	M1.6-M16	310	340	420	bajo o medio carbono
5.8	M5-M24	380	420	520	bajo o medio carbono
8.8	M3-M36	600	660	830	medio carbono, Q&T
9.8	M1.6-M16	650	720	900	medio carbono, Q&T
10.9	M5-M36	830	940	1 040	martensita al bajo carbono, Q&T
12.9	M1.6-M36	970	1 100	1 220	aleación, templada y revenida

Obtenida la fuerza a resistir por cada perno y su resistencia de prueba se combinaron las ecuaciones 2.7 y 2.10 para obtener el área de esfuerzo a la tensión del perno, como se muestra a continuación:

$$C = \frac{K_b}{K_m + K_b} = \frac{K_b}{7K_b + K_b} = \frac{1}{8}$$

$$\eta_c = \frac{0.10S_p A_t}{CP} = \frac{0.10(600 * 10^6 [Pa])(A_t [m^2])}{0.125(7625[N])}$$

Dando un factor de seguridad de 5, se obtuvo:

$$A_t = 79.4 \text{ mm}^2$$

Finalmente, obtenida el área de esfuerzo a la tensión del perno, se utilizó la tabla a continuación para seleccionar el diámetro adecuado del perno que cumpla con un área de esfuerzo a la tensión mayor o igual a la obtenida.

Tabla G.3 Dimensiones de los pernos de acuerdo a su diámetro. [L. Norton, 2011]

Diámetro mayor d (mm)	Cuerdas gruesas		Área de esfuerzo por tensión A_t (mm ²)
	Paso p mm	Diámetro menor d_r (mm)	
3.0	0.50	2.39	5.03
3.5	0.60	2.76	6.78
4.0	0.70	3.14	8.78
5.0	0.80	4.02	14.18
6.0	1.00	4.77	20.12
7.0	1.00	5.77	28.86
8.0	1.25	6.47	36.61
10.0	1.50	8.16	57.99
12.0	1.75	9.85	84.27
14.0	2.00	11.55	115.44
16.0	2.00	13.55	156.67
18.0	2.50	14.93	192.47
20.0	2.50	16.93	244.79
22.0	2.50	18.93	303.40
24.0	3.00	20.32	352.50
27.0	3.00	23.32	459.41
30.0	3.50	25.71	560.59
33.0	3.50	28.71	693.55
36.0	4.00	31.09	816.72
39.0	4.00	34.09	975.75

De modo que el tipo de perno a utilizar es un M12 Clase 8.8.

Dimensionamiento de Pernos Horizontales

En este caso se combinaron las ecuaciones 2.5 y 2.6 para obtener la fuerza a actuar en los pernos horizontales, obteniéndose:

$$N = \frac{mg}{\mu} = \frac{61000 [N]}{0.35} = 174285.7 N$$

Esta fuerza se la dividió para el número de pernos a colocar horizontalmente, obteniendo así una fuerza a soportar por cada perno de:

$$P = \frac{174285.7 [N]}{4} = 43571 N$$

En adelante se siguió el mismo procedimiento realizado para los pernos verticales, tomando en cuenta que la clase del perno es la misma a la anterior, se obtuvo así un área de esfuerzo a la tensión del perno de:

$$A_t = 328 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Finalmente, de la tabla anterior podemos observar que, el perno adecuado para esta aplicación es un M24 de Clase 8.8.

Diseño de Orejas de Izado

Se fijó un espesor de orejas de 15mm y se comprobó que el factor de seguridad de la ecuación 2.14 sea mayor a 2, la fuerza que debe soportar la oreja es el peso de la parte activa dividido entre el número de orejas, en este caso 4.

$$A = t(R_o - R_1) = (0.015 \text{ [mm]})(0.040 - 0.025) \text{ [mm]} = 2.25 * 10^{-4} \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\frac{F_g}{2A}} = \frac{0.577(250 * 10^6) \text{ [Pa]}}{\frac{17500 \text{ [N]}}{2(2.25 * 10^{-4}) \text{ [mm}^2\text{]}}} = 3.7$$

Se obtuvo un factor de seguridad de 3.7, por lo tanto, el espesor de las orejas diseñado es el correcto.

Cuba

Espesor de Cuba y Refuerzos

La tabla a continuación presenta los parámetros principales a tomar en cuenta para los cálculos;

Tabla G.4 Parámetros Iniciales para el cálculo del espesor de cuba y refuerzos.

[Elaboración propia]

Refuerzo: Barra rectangular	
Material	ASTM A36
Esfuerzo de fluencia (Sy) [Mpa]	235
Longitud [mm]	2000
Scarga [Mpa]	117,5
Presión [Pa]	227981,3
Módulo de elasticidad (E) [Gpa]	200

Tabla G.5 Módulos de sección mínimos obtenidos para diferentes separación entre refuerzos. [Elaboración propia]

Distancia entre refuerzos [mm]	p [N/m]	Reacciones [N]	Fuerza cortante máxima [N]	Mmax[Nm]
200,00	45596,26	45596,26	45596,26	15198,75
220,00	50155,89	50155,89	50155,89	16718,63
240,00	54715,51	54715,51	54715,51	18238,50
260,00	59275,14	59275,14	59275,14	19758,38
280,00	63834,76	63834,76	63834,76	21278,25
300,00	68394,39	68394,39	68394,39	22798,13
320,00	72954,02	72954,02	72954,02	24318,01
340,00	77513,64	77513,64	77513,64	25837,88
360,00	82073,27	82073,27	82073,27	27357,76
η	Wmín [cm ³]		Wmín [mm ³]	
2,00	129,35		129351,09	
	142,29		142286,20	
	155,22		155221,31	
	168,16		168156,42	
	181,09		181091,53	
	194,03		194026,64	
	206,96		206961,75	
	219,90		219896,86	
	232,83		232831,97	

Tabla G.6 Espesores obtenidos mediante el código de Matlab. [Elaboración propia]

Espesor [mm]
14,99
15,43
15,84
16,23
16,92
16,96
17,29
17,62
17,93

Para el Fondo del tanque se obtuvo los siguientes valores del análisis estático mencionado en la metodología del capítulo 2.

Tabla G.7 Resultados del análisis estático. [Elaboración propia]

Distancia entre refuerzos. [mm]	400,00
p [N/m]	91192,52
Reacciones [N]	40124,71
Cortante max [N]	40124,71
Momento max [Nm]	5884,96
η	2,00
W_{min} [cm³]	50,08
W_{min} [mm³]	50084,74

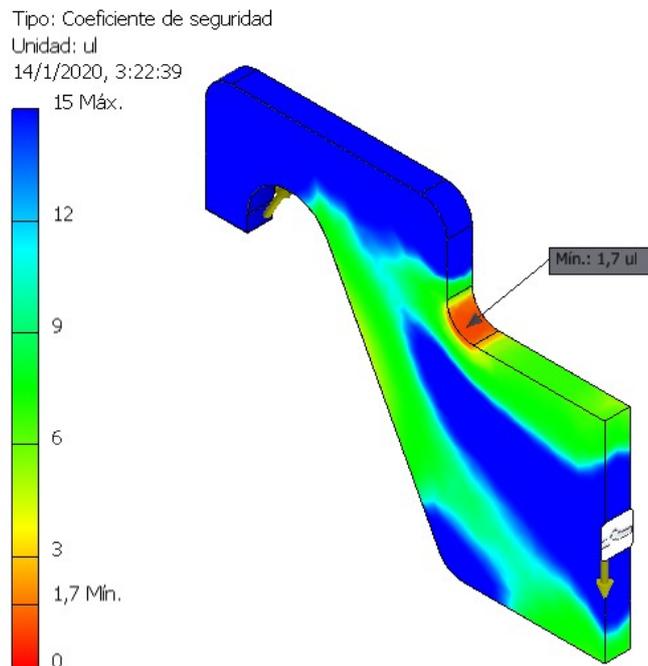


Figura G.3 Resultados del análisis de elementos finitos realizado a la oreja. [Elaboración propia]

Soldadura de Superficie de Gateo

La soldadura de este elemento está sometida tanto a cortante puro como a flexión, por lo que se utilizaron las ecuaciones desde la 2.36 hasta la 2.39 para hallar los principales esfuerzos por longitud a soportar.

$$f_s = \frac{V}{A_w} = \frac{50000[N]}{(0.105 + 2 * 0.11)[m]} = 158730.15 \text{ N/m}$$

$$f_b = \frac{M}{W_w} = \frac{(50000 [N])(0.08 [m])}{\frac{(2 * 0.105 * 0.11 + 0.11^2)[m^2]}{3}} = 363636.36 \text{ N/m}$$

A continuación hallamos la fuerza por longitud resultante con la ecuación 2.40

$$|F_R| = \sqrt{(158730.15 [Pa])^2 + (363636.36 [Pa])^2} = 396770.28 N/m$$

La resistencia de la soldadura fue calculada con la ecuación 2.41

$$\tau_{perm} = 0.30E_{xx} = 0.30(450 * 10^6 [Pa]) = 135 * 10^6 Pa$$

Finalmente, se obtiene el espesor de la garganta de la soldadura de filete con la ecuación 2.42, la cual luego se pasa a espesor de las piernas de la soldadura mediante la ecuación 2.43.

$$t = \frac{|F_R|}{\tau_{perm}} = \frac{396770.28 \left[\frac{N}{m}\right]}{135 * 10^6 [Pa]} = 2.9 * 10^{-3} m = 2.9 mm$$

$$w = \frac{t}{0.707} = \frac{2.9 [mm]}{0.707} = 4.1 mm$$

El espesor de las piernas se compara con la tabla mostrada a continuación para los diferentes espesores del metal base.

Tabla G.8 Tamaños mínimos de soldadura de filetes. [L. Norton, 2011]

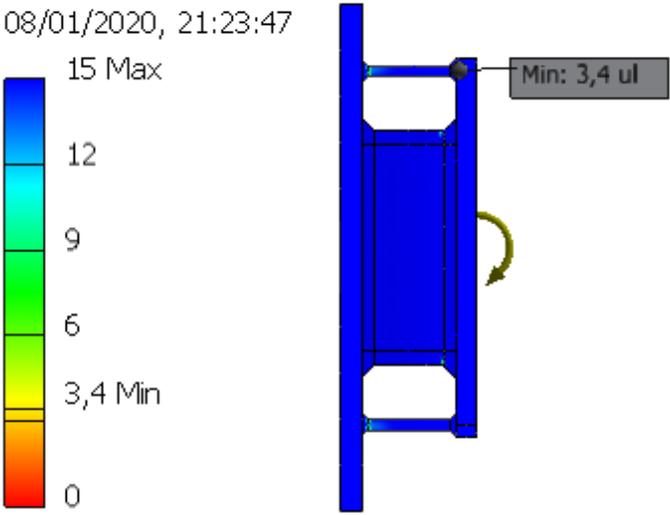
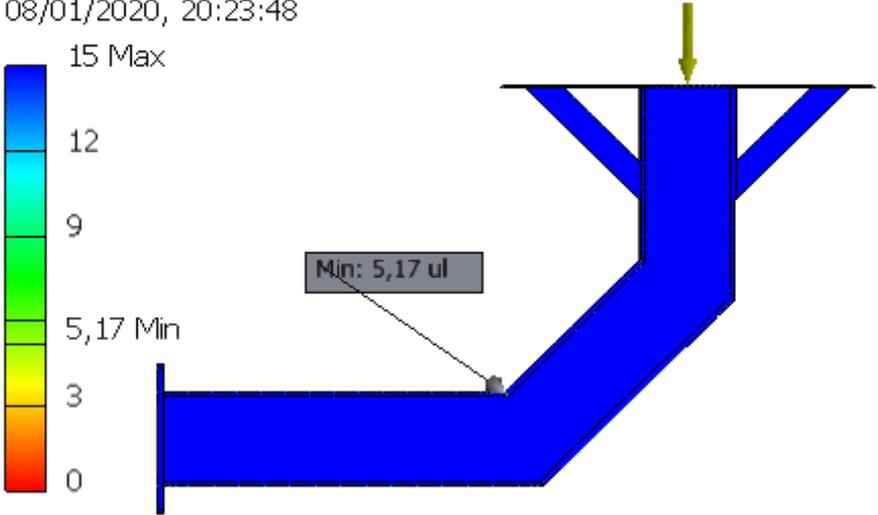
Tamaños mínimos de soldadura en filetes*	
Espesor del metal base (T)	Tamaño mínimo de la soldadura
<u>tamaño en pulgadas</u>	
T ≤ 1/4	1/8
1/4 < T ≤ 1/2	3/16
1/2 < T ≤ 3/4	1/4
3/4 < T	5/16
<u>tamaños en mm</u>	
T ≤ 6	3
6 < T ≤ 12	5
12 < T ≤ 20	6
20 < T	8

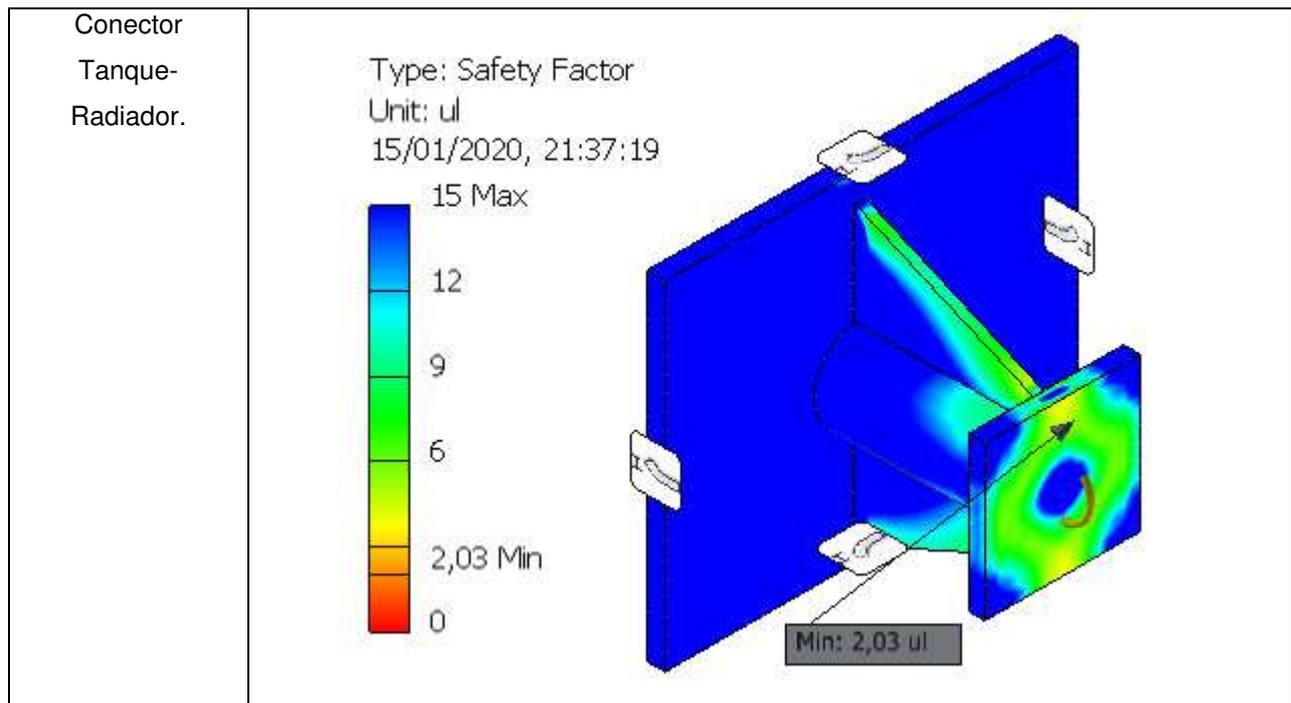
De modo que para un espesor de 15mm de placa la tabla recomienda un espesor de piernas de 6mm, de modo que se utiliza ese cómo el mínimo adecuado.

Reservorio

Para los componentes del reservorio se analizó directamente con un software CAE por elementos finitos, para una congruencia de menos del 1%, se obtuvo factores de seguridad mínimo de 2, por lo que los componentes fueron correctamente diseñados. La tabla a continuación muestra los resultados obtenidos.

Tabla G.9 Resultados análisis de elementos finitos. [Elaboración propia]

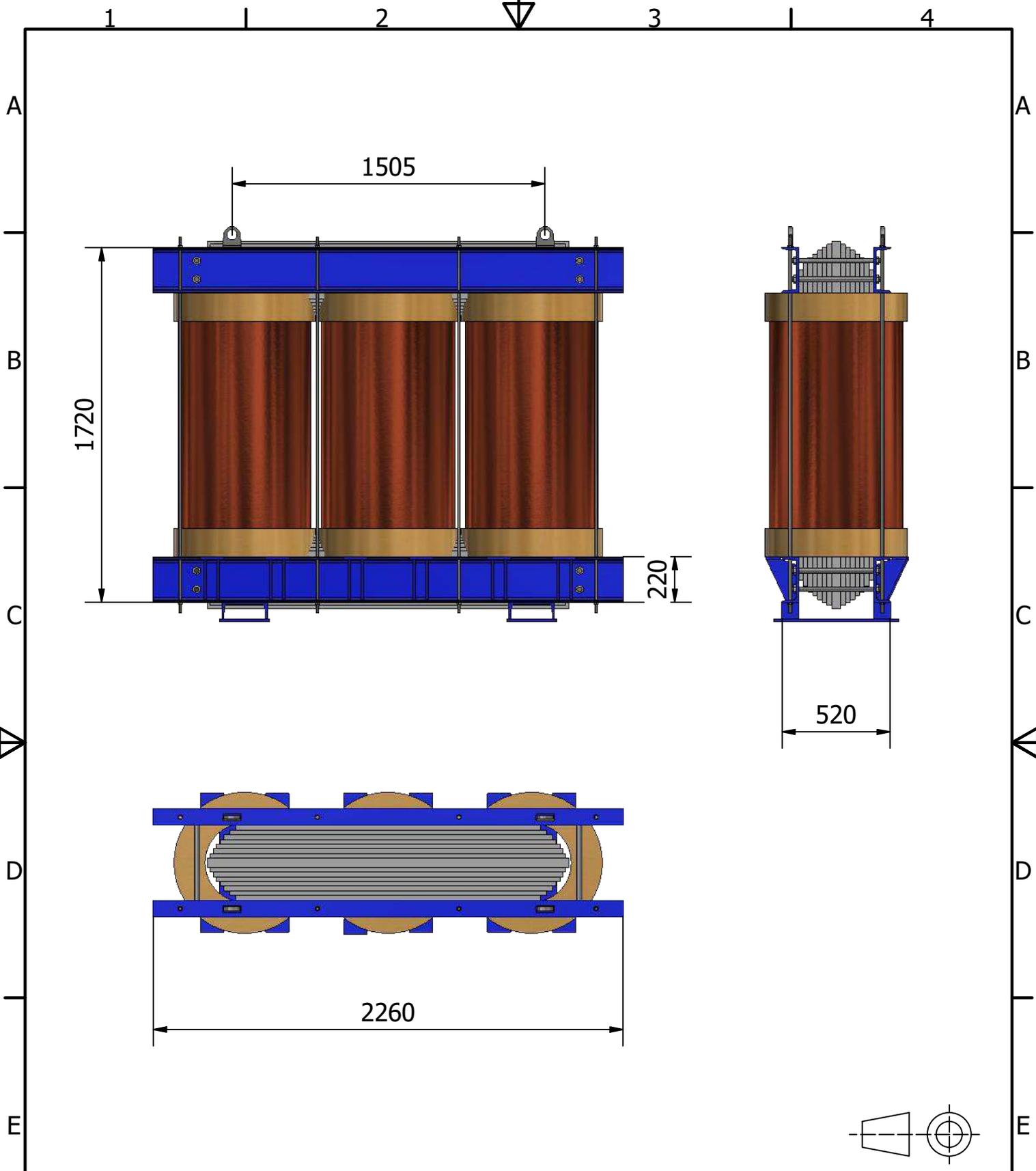
Elemento	Resultado
<p>Conector entre Cuba y Reservorio</p>	<p>Type: Safety Factor Unit: ul 08/01/2020, 21:23:47</p>  <p>15 Max 12 9 6 3,4 Min 0</p> <p>Min: 3,4 ul</p>
<p>Brazo Metálico (Reservorio)</p>	<p>Type: Safety Factor Unit: ul 08/01/2020, 20:23:48</p>  <p>15 Max 12 9 5,17 Min 3 0</p> <p>Min: 5,17 ul</p>



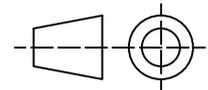
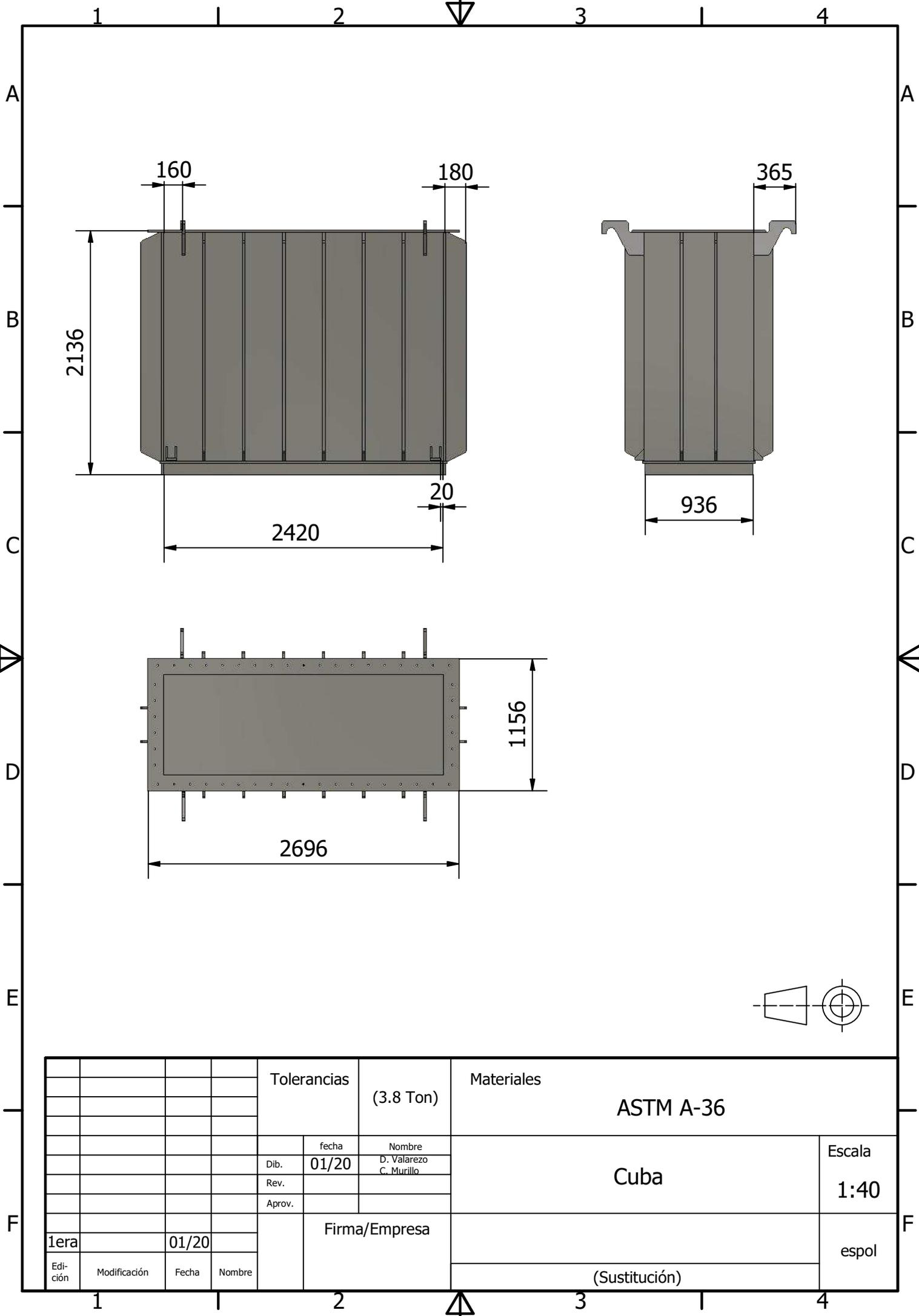
APÉNDICE H

Planos generales del equipo

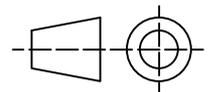
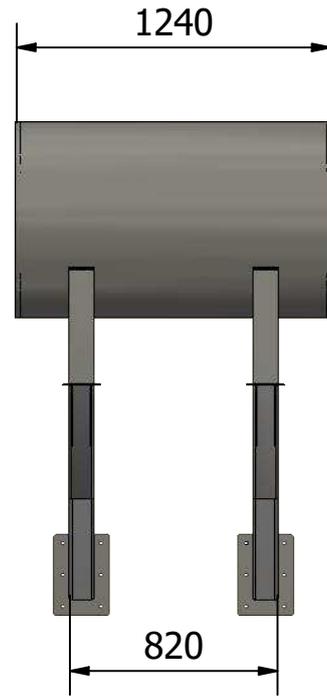
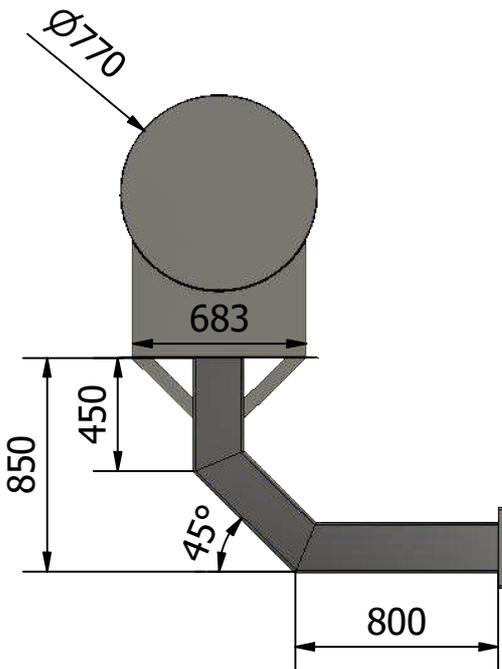
Dentro de este documento no se presentarán planos detallados debido a derechos de autor por parte del cliente. A continuación, se presentan planos con las dimensiones generales de cada uno de los elementos del Transformador.



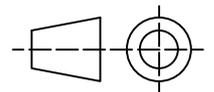
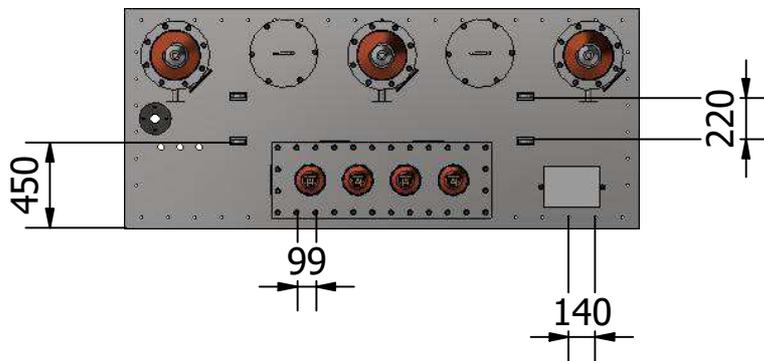
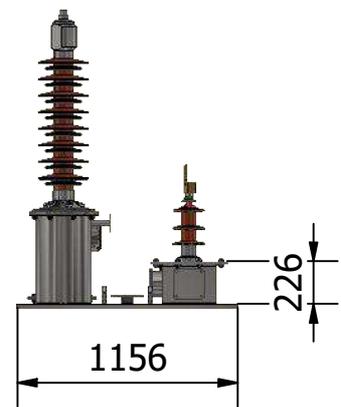
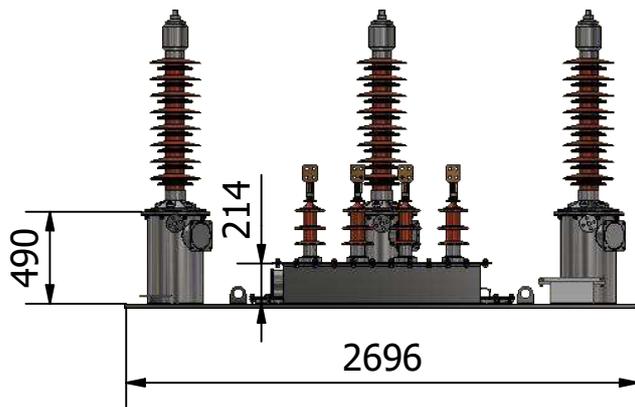
				Tolerancias		(7 Ton)		Materiales		ASTM A-36	
				fecha		Nombre		Bridas de la Parte Activa		Escala	
				01/20		D. Valarezo				1:25	
				Dib.		C. Murillo					
				Rev.							
				Aprov.							
				Firma/Empresa							
1era		01/20								espol	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre								
								(Sustitución)			



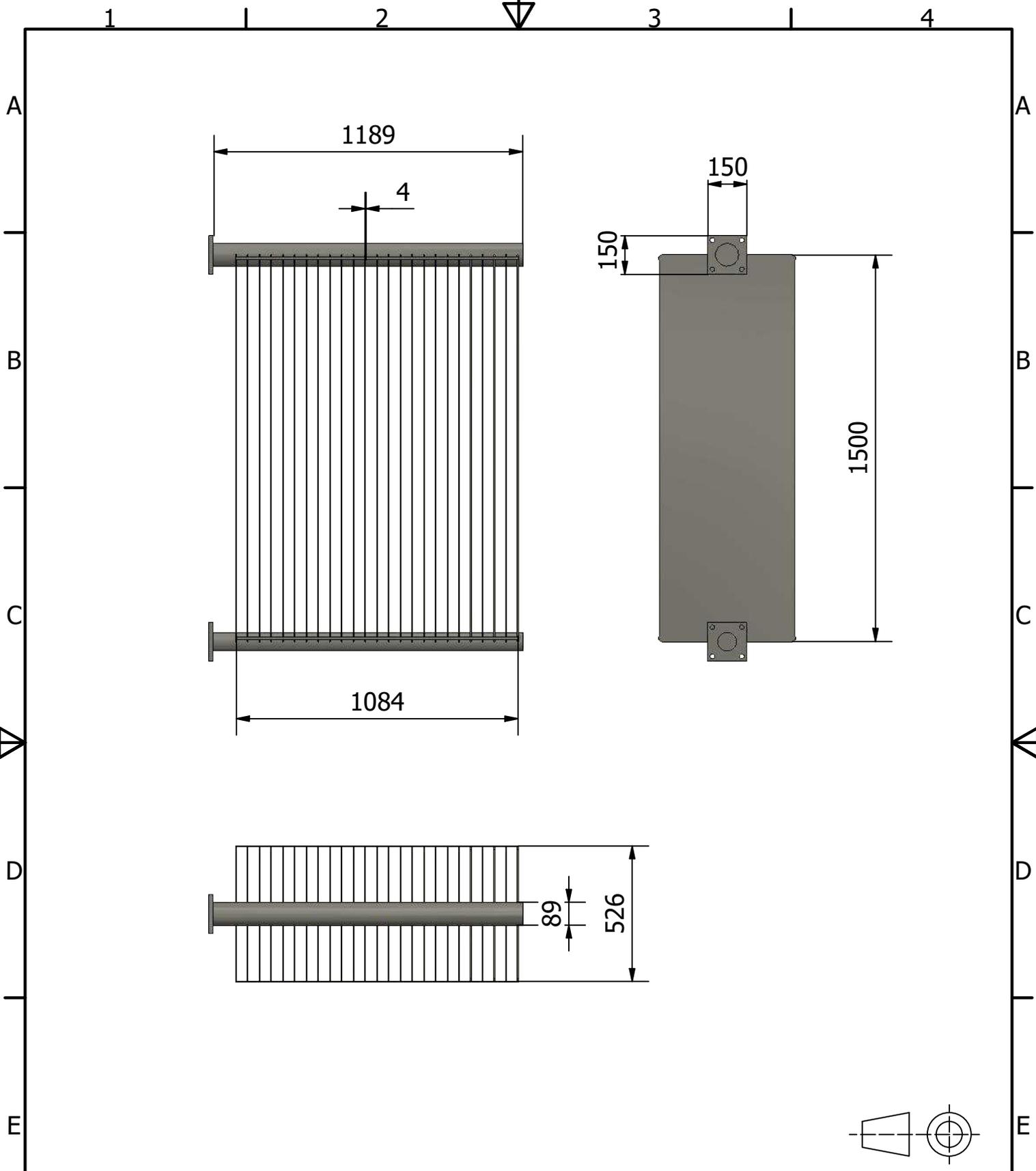
				Tolerancias		(3.8 Ton)		Materiales		ASTM A-36	
				Dib.		fecha		Nombre		Escala	
				Rev.		01/20		D. Valarezo C. Murillo		1:40	
				Aprov.							
1era				01/20		Firma/Empresa				espol	
Edición				Modificación		Fecha		Nombre		(Sustitución)	



				Tolerancias	(330 Kg)	Materiales	ASTM A-36
				Dib.	fecha 01/20	Nombre D. Valarezo C. Murillo	Reservorio de Aceite y Base
				Rev.			
				Aprov.			
1era		01/20		Firma/Empresa			Escala 1:30
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				espol
						(Sustitución)	



				Tolerancias		Materiales	ASTM A-36
					fecha	Nombre	Cobertor
				Dib.	01/20	D. Valarezo C. Murillo	
				Rev.			
				Aprov.			Escala 1:40
1era		01/20			Firma/Empresa		espol
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



				Tolerancias		(1 Ton)		Materiales		AISI 1045	
				Dib.		fecha	Nombre	Radiador		Escala	
				Rev.		01/20	D. Valarezo			1:20	
				Aprov.			C. Murillo				
						Firma/Empresa				espol	
1era		01/20									
Edición	Modificación	Fecha	Nombre								

(Sustitución)