

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TANQUE DIDÁCTICO CON AGITADOR DE DOBLE CAMISA Y SERPENTÍN PARA EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

TANQUE DE DOBLE CAMISA

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

JEREMIAS FEDERICO CALO LAGUAQUIZA

jeremias.calo@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA, PhD.

jose.palacios@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Jeremias Federico Calo Laguaquiza declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Jeremias Federico Calo Laguaquiza

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Jeremias Federico Calo Laguaquiza, bajo mi supervisión.



Ing. José Luis Palacios Encalada, PhD.

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.



Jeremias Federico Calo Laguaquiza



Ing. José Luis Palacios Encalada, PhD.

DIRECTOR

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, Federico Calo, Marisol Laguaquiza y Valeria Calo, quienes me han ayudado a lo largo de toda mi educación superior, siendo un soporte y dándome ánimos en los momentos inciertos.

Jeremias Calo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi maravillosa familia, por permitir que cumpla todos mis sueños y metas, gracias por el buen ejemplo de sacrificio y perseverancia inculcado, quizá no pueda terminar de agradecerles en esta vida, pero a partir de este acontecimiento dedicaré mi vida en compensarlo.

A toda la comunidad científica, que desde tiempos remotos han sido una luz de conocimiento para toda la humanidad y que han logrado que me apasione la ingeniería.

A la Escuela Politécnica Nacional, por todos los conocimientos adquiridos durante mi educación y por permitirme conocer personas geniales con quienes compartí experiencias maravillosas.

A todos los maestros de esta gran universidad, especialmente a mi tutor, Dr. José Luis Palacios, por su guía durante el desarrollo de este proyecto y por permitirme aportar con una herramienta de aprendizaje a mi querida facultad.

Jeremias Calo

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
Estado del arte	3
El vapor en la industria ecuatoriana	4
Tanque de doble camisa	4
Tipos de tanques con doble camisa	5
Instrumentación y sistema de control	7
2 METODOLOGÍA	9
2.1 Diagrama de flujo para el diseño.....	10
2.2 Modelos matemáticos	11
Volumen de calentamiento.....	11
Diferencia de temperatura media logarítmica.....	13
Efecto de agitación.....	15
Coeficiente global de transferencia de calor	19

Espesores del tanque.....	22
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	28
3.1 Resultados	28
Datos para el diseño	28
Dimensionamiento inicial.....	28
Diseño en función del coeficiente global de transferencia de calor	31
Cálculo de espesores.....	35
Modelo 3D y elaboración de planos	40
Construcción y pruebas de funcionamiento	40
3.2 Conclusiones.....	42
3.3 Recomendaciones.....	44
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
5 ANEXOS.....	47
ANEXO I.....	48
ANEXO II.....	49
ANEXO III.....	50
ANEXO IV	53

RESUMEN

El vapor es utilizado a nivel industrial como materia prima o como medio de intercambio térmico en varios procesos industriales. Es por este motivo que el estudio de los sistemas de vapor es primordial para conocer el funcionamiento y oportunidades de ahorro de energía. En el presente proyecto se realizó el diseño y construcción de un tanque agitador de doble camisa el cual será utilizado como equipo didáctico en el laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela Politécnica Nacional. El diseño del tanque se realizó en función de la disponibilidad de vapor, el tanque estará conectado a un calderín con una capacidad de 3 BHP (50 kg/h de vapor saturado) a una presión de 4 bar, definidas las condiciones de operación se realizó un dimensionamiento volumétrico del tanque mediante un análisis de transferencia de calor entre el interior de la doble camisa donde circula el vapor y el interior del tanque donde está contenido un volumen fijo de agua, definida la capacidad volumétrica del tanque se calculó las dimensiones extremas así como los espesores de las paredes y del cabezal inferior de acuerdo al Código ASME BPVC Sección VII-División 1, terminados los cálculos se elaboró un modelo 3D de todos los elementos que constituyen el tanque así como sus respectivos planos de conjunto y de taller, finalmente se realizó la construcción del tanque de acuerdo a las dimensiones obtenidas, además se seleccionó los distintos componentes y accesorios normalizados que el tanque requiere para su funcionamiento.

PALABRAS CLAVE: tanque agitador, doble camisa, ASME BPVC.

ABSTRACT

Steam is used in the industry as a raw material and as a heat exchange medium for a lot of industrial processes. It is for this reason that the study of steam system is essential to know its operation and energy saving opportunities. In the present project, the design and construction of a double jacket agitator tank was carried out, which will be used as didactic equipment in the Heat Transfer Laboratory at the National Polytechnic School. The design of the tank was made according to the availability of the steam; the tank will be connected to a boiler with a capacity of 3 BHP (50 kg/h of saturated steam) at a pressure of 4 bar. Once the operating conditions were defined, a volumetric dimensioning of the tank was made by means of the heat transfer analysis between the inside of the double jacket where the steam circulates and the inside of the tank where a fixed volume of water is contained, once the volumetric capacity of the tank was defined, the extreme dimensions were calculated as well as the thickness of the walls and the lower head according to the ASME BPVC Code Section VII-Division 1, once the calculations were finished, a 3D model of all the components that constitute the tank was elaborated as well as their respective assembly and workshop drawings, finally the construction of the tank was carried out according to the obtained dimensions, also the different components and standard accessories that the tank requires for its operation were selected.

KEYWORDS: agitator tank, double jacket, ASME BPVC.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Un tanque de doble camisa es un recipiente enchaquetado, el cual utiliza un primer fluido para el calentamiento o enfriamiento de un segundo fluido contenido en el tanque, generándose de esta forma un intercambio de calor entre ambos fluidos a través de la pared del recipiente que los separan. Este método de intercambio de calor es utilizado en varios sectores de la industria, desde la industria alimentaria hasta la industria química.

Los tanques de doble camisa o enchaquetados se fabrican mediante la unión de dos recipientes concéntricos, estos generan un compartimiento entre la cara externa del primer recipiente y la cara interna del segundo recipiente, dentro de esta separación se hace circular un fluido de trabajo que tendrá el objetivo de incrementar o reducir la temperatura de otro fluido contenido en el interior del tanque. La unión de estos recipientes que forman la chaqueta se realiza por medio de técnicas de soldadura en el caso de trabajar con elevadas presiones dentro de la chaqueta, sin embargo, en nuestro caso las presiones de trabajo no serán tan elevadas por lo que la unión de estos recipientes se realizó utilizando juntas empernadas y empaques para evitar las fugas de vapor. Los tanques de doble camisa por lo general son diseñados de acuerdo a la función que estos vayan a cumplir, por ejemplo, la cocción de alimentos utilizando marmitas, la remoción o adición de calor en procesos químicos utilizando reactores, el enfriamiento de la leche circulando refrigerantes a través de la doble camisa. La doble camisa de este proyecto está diseñada específicamente para estudiar el uso de vapor como fluido de calentamiento en este tipo de equipos.

El suministro de vapor para la doble camisa puede ser autónomo o por una red de alimentación, en el caso de que este sea autónomo el equipo tendrá un compartimiento adicional en donde se generará el vapor por medio de la quema de combustible o por el efecto joule al utilizar resistencias eléctricas, mientras que si el suministro se da por medio de una red de alimentación de vapor simplemente se debe conectar el tanque a esta red, en nuestro caso el suministro será por medio de una red de alimentación. Otro aspecto importante en este tipo de equipos es la seguridad, ya que al trabajar con equipos a presión siempre se corre el riesgo de tener explosiones, por lo que el monitoreo y control de estos equipos es indispensable para evitar accidentes, este monitoreo y control se realiza por medio de una serie de instrumentos industriales como: manómetros, termómetros, trampas de vapor, válvulas de seguridad, entre otros, los cuales aseguran que las condiciones de operación se desarrollen de acuerdo a lo establecido en el diseño.

1.1 Objetivo general

Diseñar y construir un tanque didáctico de doble camisa para el laboratorio de Transferencia de Calor de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar un estudio de estado del arte de los tanques agitadores de doble camisa.
2. Diseñar un taque de doble camisa de acuerdo a la disponibilidad de vapor.
3. Analizar los costos, disponibilidad de materiales y accesorios en el mercado.
4. Elaborar modelos 3D, planos de conjunto y de taller del tanque de doble camisa.
5. Construir el tanque de doble camisa de acuerdo a los planos obtenidos.
6. Ensamblar los componentes del proyecto y verificar el funcionamiento del equipo.

1.3 Alcance

El desarrollo del tanque de doble camisa inicia con una recopilación y análisis bibliográfico acerca de estos equipos, terminado este paso se define el método de diseño del tanque que, junto con las especificaciones técnicas obtenidas de la disponibilidad de vapor permiten realizar un dimensionamiento inicial del componente. Para el dimensionamiento final se realiza el cálculo de espesores y geometrías del componente de acuerdo a la norma ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Sección VIII – División 1. Para el análisis de costos se realiza un estudio de mercado de los distintos precios de materiales, mano de obra y accesorios. Establecidas las dimensiones y materiales se elabora una representación 3D de los componentes y su respectivo ensamblaje empleando el software Autodesk INVENTOR, para la elaboración de los planos de conjunto y de taller se emplea el programa Autodesk AUTOCAD. Para la construcción del tanque se fabrica individualmente los distintos componentes del tanque detallados en los planos y empleando métodos de conformado mecánico y soldadura se realiza el ensamblaje del tanque. Para verificar el correcto funcionamiento del tanque se selecciona los distintitos accesorios e instrumentación como termocuplas, manómetros, válvulas, trampa de vapor, entre otros, que permitan su operación y de esta forma poder comprobar el correcto funcionamiento del tanque.

1.4 Marco teórico

Estado del arte

La inmensa cantidad de consumo energético de las industrias del mundo ha permitido el desarrollo de varias tecnologías de suministro de energía predominado por el uso de combustibles fósiles, una forma de cubrir esta elevada demanda energética es el uso del vapor como medio de transferencia de calor, una gran cantidad de industrias utilizan el vapor para sus acciones de producción, algunas aplicaciones comunes del vapor en la industria son: calentamiento, esterilización, Impulso y/o movimiento de turbinas, Hidratación, Humidificación y limpieza, lo que ha permitido el desarrollo de varios equipos industriales que empleen vapor como fluido de trabajo (TVL CO., 2022).

Probablemente el uso de vapor para calentamiento por medio de intercambiadores de calor sea la aplicación más común en la industria, el equipo a desarrollar en este proyecto es un intercambiador de calor de tipo encamisado, el cual es un equipo que consta de dos recipientes separados de forma concéntrica generando un espaciado por el cual circula un flujo de vapor que calentará el fluido deseado.

El diseño de los recipientes de doble camisa se elabora a partir de un análisis de transferencia de calor por convección a través de la pared interna de la camisa, iniciando con un dimensionamiento inicial del tanque y repitiendo el análisis hasta que este sea estable, por lo general la geometría de estos recipientes es cilíndrica con una base esférica y elíptica.

El diseño de las juntas, soldaduras, así como el cálculo de espesores para los recipientes encamisados al ser recipientes sometidos a presión interna y externa se puede realizar mediante la aplicación de normas como: la norma ASME Boiler and Pressure Vessel Code que son muy utilizadas en países como EEUU y Canadá, AD-Merkblatt Technical Rules for Pressure Vessels que está vigente en Alemania o la norma EN 13445 Unfired Pressure Vessels la cual es de alcance europeo (Massa & Giudici, 2015).

Los materiales utilizados en la fabricación de este tipo de recipientes deben tener algunas propiedades que garanticen un adecuado funcionamiento y larga duración, en su mayoría el material por excelencia es el acero inoxidable el cual posee una buena resistencia a la corrosión generada por las impurezas y sales transportadas en el vapor, además el material escogido debe poseer buenas propiedades para el conformado y soldado.

Las grandes marcas de equipos industriales ofrecen una gran variedad de alternativas de recipientes encamisados los cuales son diseñados específicamente para ciertas aplicaciones, el diseño de estos equipos se realiza por lo general mediante el uso de software de modelado de fluidos como CFD, ANSYS y software desarrollado específicamente para el modelado de reactores e intercambiadores encamisados.

El vapor en la industria ecuatoriana

El vapor de agua es utilizado en varios procesos de producción de la industria ecuatoriana, en el país el uso del vapor se divide en dos sectores principales como son: procesos de transferencia de calor en fábricas y generación de energía por medio de turbinas de vapor en plantas de generación eléctrica.

De acuerdo al informe de estadística anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano (ARCONEL, 2021), la producción de energía eléctrica por Turbogas representa un 5,29% de la potencia total la cuales dominada por las energías renovables como la hidroeléctrica, mientras que el vapor en la industria es utilizado en la mayoría de procesos del país como la producción de alimentos, medicamentos, papel, textiles, entre otros, por lo que varias empresas han optado por optimizar sus sistemas de generación de vapor, un ejemplo es “LA FABRIL” que recientemente puso en funcionamiento una caldera que utiliza biomasa como combustible para la generación de vapor, porque claramente se espera que en el futuro se pueda reemplazar en un gran porcentaje el uso de combustibles fósiles para la generación de vapor (LA FABRIL, 2019).

Tanque de doble camisa

Los tanques de doble camisa son recipientes que poseen una doble capa que está separada a una determinada distancia, esta doble capa genera un espacio por cual puede circular un fluido cuya función será la de intercambiar calor con las paredes del recipiente, todo esto con el fin de calentar o enfriar un producto o reacción que se lleva a cabo en el tanque más interno (MACPACK, 2016).

La industria del vapor utiliza varios intercambiadores de calor para elaborar sus productos, entre estos están los recipientes que poseen una doble camisa como marmitas, reactores y tanques agitadores, el vapor utilizado para el calentamiento de un producto se condensa cuando circula por las paredes del recipiente, esta condensación genera una alta cantidad de energía que será transferida a través de las paredes del tanque.

Existen varios tipos de tanques con doble camisa, para el caso de los tanques agitadores se suelen tener una configuración similar a la de la figura 1.1, en donde la doble camisa envuelve a gran parte de la superficie del tanque, dependiendo de la aplicación se puede tener menor o mayor instrumentación para control del proceso.

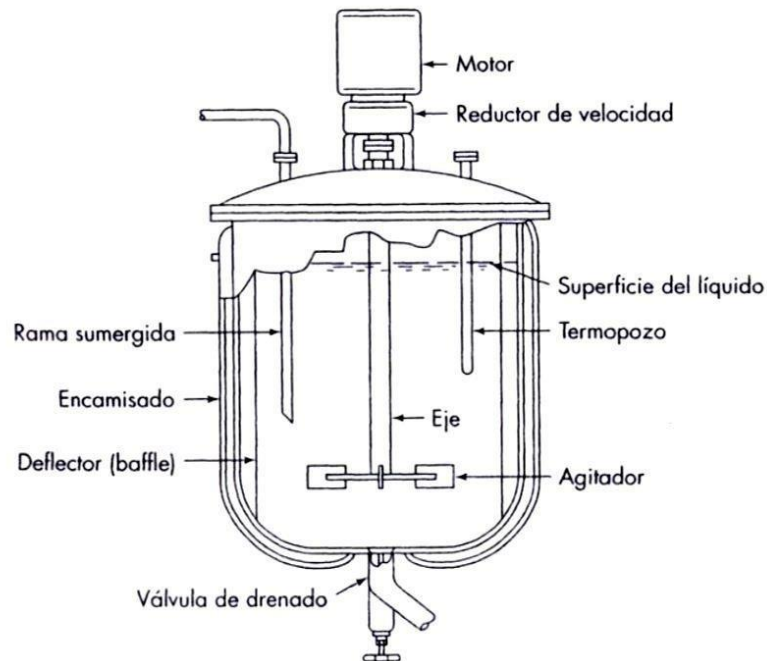


Figura 1.1. Tanque de doble camisa con sistema de agitación.
Fuente: (Rolón & Acevedo, 2019)

Existen tres tipos principales de configuraciones para la doble camisa, dependiendo de la aplicación del equipo se selecciona la que más se adapte al proceso, estas configuraciones se detallan a continuación.

Tipos de tanques con doble camisa

Camisa lisa: Es el tipo de camisa más simple ya que consiste en una capa concéntrica alrededor del tanque, por lo general este tipo de camisa se utiliza para recipientes pequeños sometidos a bajas presiones (ANDERSONDAHLEN, 2022), es muy utilizado cuando se realiza el calentamiento utilizando vapor, por lo general la altura de la camisa es igual a la altura del líquido contenido en el tanque, se puede utilizar deflectores en espiral colocados dentro de la camisa para inducir turbulencia al vapor y de este modo incrementar el coeficiente de transferencia de calor, en la figura 1.2 se muestra una representación de la camisa lisa.



Figura 1.2. Modelo de una chaqueta lisa común.
Fuente: (Watcotanks, 2022)

Camisa embobinada de medio tubo: Este tipo de encamisado es ideal cuando se trabaja con recipientes de gran capacidad y para procesos en donde se manejan altas temperaturas de operación, la tubería seccionada de forma longitudinal es enrollada y soldada obteniendo una espiral que recubre las paredes del tanque, a través de este conducto circulara el fluido de calentamiento o enfriamiento como vapor, aceite, entre otros. La configuración de medio tubo tiene como principal ventaja el evitar la circulación corta del fluido de trabajo, ya que este se ve obligado a recorrer toda la superficie embobinada, aprovechando al máximo las propiedades del fluido (MDLIQ, 2020), además la forma de espiral sirve como refuerzo cuando el recipiente interno trabaja bajo presión, un ejemplo de este tipo de camisa se muestra en la figura 1.3.



Figura 1.3. Modelo de una chaqueta embobinada de medio tubo.
Fuente: (indiamart, 2019)

Camisa con hoyuelos: Este tipo de camisa posee varios hoyuelos alrededor de la camisa, la función principal de los hoyos es el generar turbulencia incluso a bajas velocidades de flujo, esta camisa es utilizada cuando se trabaja a altas presiones y cuando no se requiere cambios bruscos de temperatura (MDLIQ, 2020), la construcción de esta camisa resulta muy simple en comparación con la camisa embobinada, además de reducir el peso y costo del equipo, esta chaqueta se muestra en la figura 1.4.



Figura 1.4. Modelo de una chaqueta con hoyuelos.
Fuente: (ROYAL WELDING & FABRICATING, 2022)

Instrumentación y sistema de control

La instrumentación juega un papel muy importante en cuanto al funcionamiento de este tipo de equipos ya que se encarga de verificar que se cumplan las condiciones para las cuales fue diseñado, dependiendo del tipo de fluido a utilizar se puede tener menor o mayor instrumentación, en el caso del vapor en la figura 1.5 se muestra un ejemplo de instrumentación básica para tanques de doble camisa.

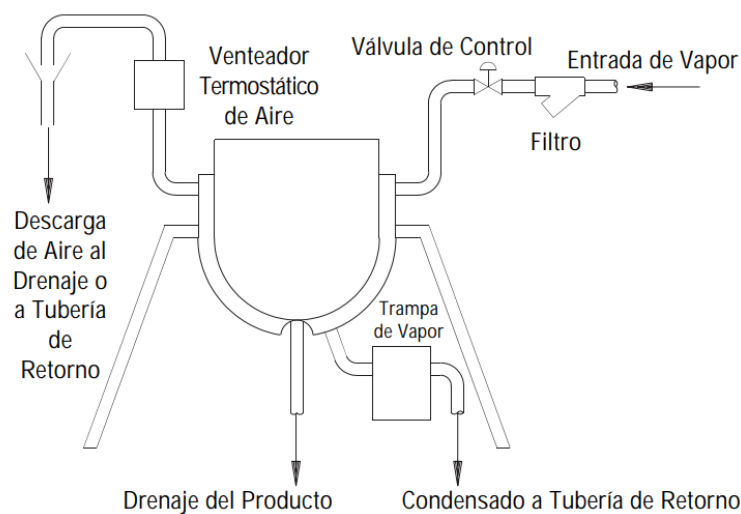


Figura 1.5. Instrumentación básica para tanques de doble camisa.
Fuente: (Armstrong, 2015)

Los instrumentos utilizados para el control del equipo dependen de la función y proceso que se lleve a cabo en el tanque, para este caso como el equipo es didáctico se requiere poder controlar la temperatura en el interior del recipiente, este control se lleva a cabo mediante el uso de una válvula proporcional reguladora de presión o simplemente una válvula solenoide en el caso de tener una presión de vapor adecuada, un ejemplo de esta configuración se muestra en la figura 1.6 (JORDANVALVE, 2022).

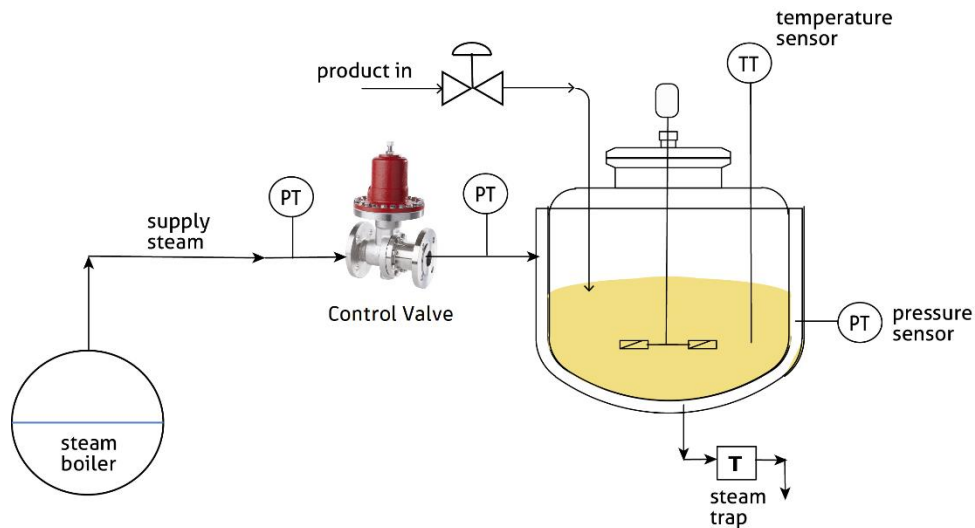


Figura 1.6. Sistema de control de un recipiente encamisado.
Fuente: Modificado de (JORDANVALVE, 2022)

Adicional a la instrumentación de control de temperatura, en los recipientes encamisados que utilizan vapor como fluido de trabajo se suele tener instrumentos que permitan obtener un vapor en óptimas condiciones, instrumentos como los filtros se utilizan para evitar el paso de vapor con residuos contaminantes presentes en el agua no tratada, los cuales pueden provocar una corrosión grave en el encamisado, una válvula adicional (válvula de aguja) se suele utilizar para proteger el equipo en el caso de fugas a través de los conductos, finalmente las trampas de vapor son esenciales para tener un buen aprovechamiento de la energía almacenada en el vapor, ya que estos evitan que el vapor circule una sola vez a través de la camisa.

2 METODOLOGÍA

El método utilizado para el desarrollo del componente es de tipo cuantitativo con una investigación aplicada, ya que se desea alcanzar un objetivo en específico como es el diseño y construcción de un tanque de doble camisa partiendo de una serie de condiciones definidas y medibles, al ser un método cuantitativo todas las variables serán cuantificables por lo que se podrá correlacionar las mismas mediante leyes físicas y normas técnicas, con el fin de obtener un producto adecuado que satisfaga las necesidades académicas del laboratorio.

2.1 Diagrama de flujo para el diseño

Con el objetivo de cumplir los objetivos del proyecto se llevó a cabo una serie de actividades que se detallan en el siguiente diagrama de flujo de la figura 2.1.

De acuerdo al diagrama, el proceso de diseño inicia con una recopilación de las condiciones y características de diseño como: la disponibilidad de vapor, presión de trabajo, capacidades del equipo, etc. Definidas estas características el siguiente paso es investigar el estado del arte de los tanques de doble camisa en donde se estudia los distintos métodos y normas aplicadas al diseño y construcción de este tipo de equipos, a continuación, se define uno o más método de diseño de acuerdo a las necesidades del proyecto, realizando de esta forma un cálculo y dimensionamiento inicial de las geometrías principales del tanque, definidas estas características generales se procede a calcular los espesores de las distintas paredes de la marmita de acuerdo al código ASME BPVC sección VII división 1, el cual permite diseñar recipientes de presión cilíndricos con una serie de reglas básicas de acuerdo a la geometría inicial, presión de trabajo y propiedades mecánicas del material a utilizar en la construcción del tanque.

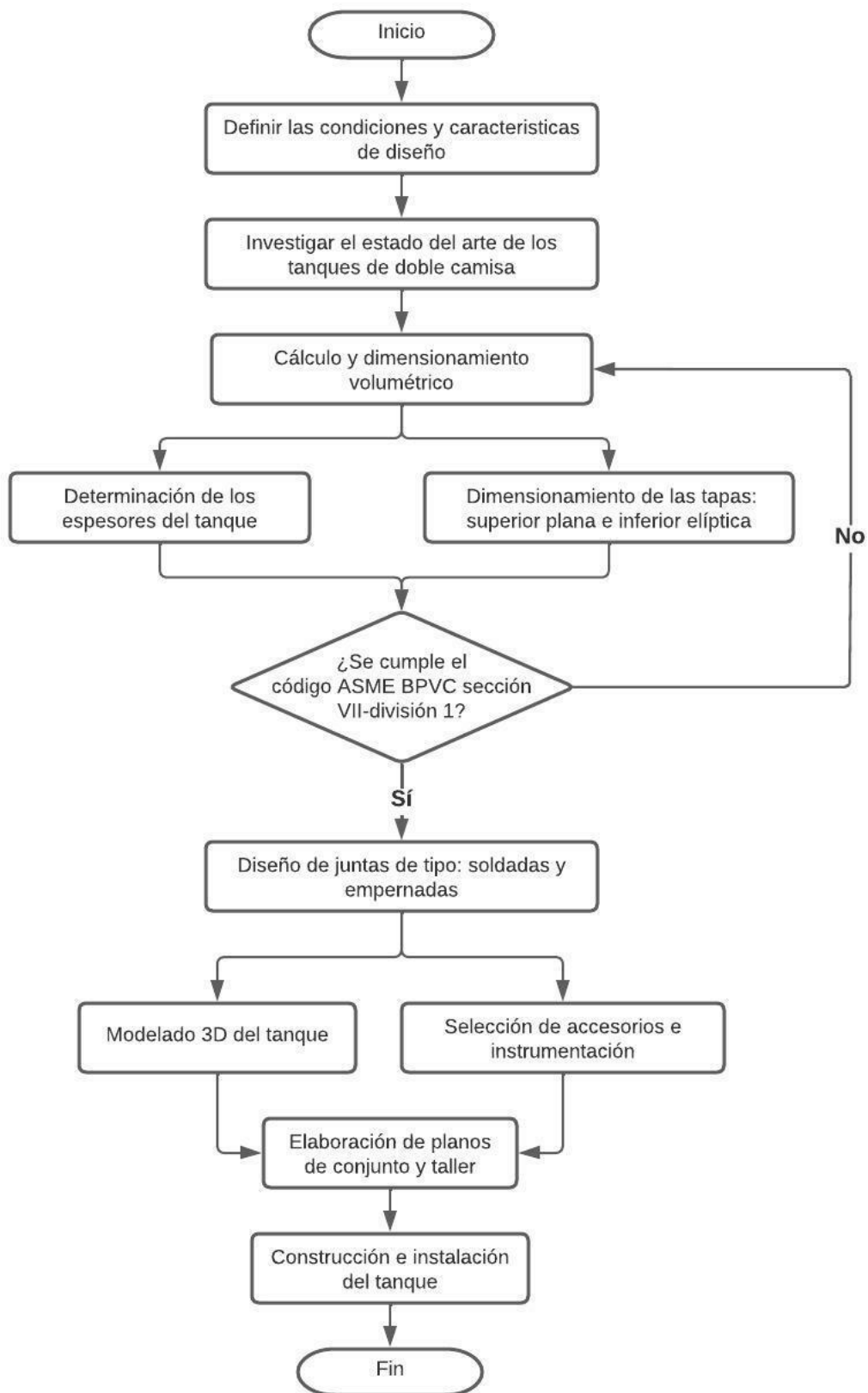


Figura 2.1. Diagrama de flujo del diseño y construcción del tanque.
Fuente: (Propia)

Al establecer los espesores y geometrías es necesario verificar que se cumplan las reglas dictadas en el código ASME, en el caso de que no se cumplan se debe corregir el dimensionamiento volumétrico y de espesores de tal forma que este se adapte al código. Una vez que las geometrías principales cumplen la norma se puede realizar el cálculo de los distintos tipos de juntas, tanto soldadas como empernadas que permitirán obtener un equipo rígido y estable. Definidas todas las características geométricas del equipo ya se puede realizar un modelo 3D de las distintas piezas y ensambles del tanque, así como una selección de accesorios e instrumentación necesarios para el funcionamiento del equipo, terminado el modelo 3D se debe realizar sus respectivos planos, un plano de conjunto del equipo ensamblado y una serie de planos de taller de los componentes no normalizados del equipo que requieren ser fabricados.

Como última fase se realiza la construcción del equipo de acuerdo a los planos desarrollados, así como su instalación en donde se verifica que su funcionamiento sea el adecuado.

2.2 Modelos Matemáticos

El diseño del equipo requiere que se utilice una serie de ecuaciones, las cuales permiten analizar los distintos fenómenos físicos que se desarrollan en el tanque como: un análisis de transferencia de calor del proceso, efecto del uso de agitadores en la transferencia de calor, cálculo de esfuerzos mecánicos en el equipo debidos cargas como presión y peso.

Volumen de calentamiento

Al iniciar el diseño es necesario definir un volumen de calentamiento para el tanque, el cual será determinado analizando la transferencia en el interior de la doble camisa en donde se genera la transferencia a través de la pared del tanque, para este primer dimensionamiento no se consideran las pérdidas al ambiente, por lo que se puede asumir que todo el calor entregado por el vapor será absorbido por el agua en el tanque interno, como se muestra en la ecuación 2.1.

$$Q_{gen} = Q_{abs}$$

Ecuación 2.1. Balance de calor en la camisa

Donde:

Q_{gen} Calor entregado por condensación del vapor, kJ/h

Q_{abs} Calor absorbido por el agua, kJ/h

El cálculo del calor entregado por el vapor se determina mediante la ecuación 2.2, la cual describe el calor generado por el cambio de fase del vapor a una presión determinada, mientras que el calor absorbido se calcula utilizando el calor específico del agua con la ecuación 2.3 y 2.4 (Incropera & Bergman, 2011).

$$Q_{gen} = \dot{m}_v \cdot (h_g - h_f)$$

Ecuación 2.2. Calor por condensación de vapor

$$Q_{abs} = \frac{m_a}{\Delta t_c} \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)$$

Ecuación 2.3. Calor absorbido por el agua del tanque

$$m_a = V_0 \cdot \rho_a$$

Ecuación 2.4. Masa de agua contenida en el tanque

Donde:

\dot{m}_v Flujo másico de vapor, kg/h

h_g Entalpía específica del vapor saturado, kJ/kg

h_f Entalpía específica del agua saturada, kJ/kg

m_a Masa de agua contenida en el tanque, kg

Δt_c Tiempo de calentamiento del agua contenida en el tanque, h

C_p Calor específico del agua, kJ/kg-K

T_i Temperatura inicial del agua contenida en el tanque, K

T_f Temperatura final del agua contenida en el tanque, K

V_0 Volumen de calentamiento inicial, m³

ρ_a Densidad del agua, kg/m³

De este modo se puede calcular el flujo másico de vapor requerido, para poder incrementar la temperatura del agua al interior del tanque en un tiempo estimado y llevar a cabo los distintos experimentos del equipo.

Diferencia de temperatura media logarítmica

Como el equipo a desarrollar es un intercambiador de calor, una forma de dimensionar el equipo es justamente utilizando este concepto, el agua del tanque tendrá dos diferencias de temperaturas con respecto a la temperatura del vapor saturado tanto al inicio como al final del calentamiento de acuerdo a la figura 2.2, por lo que la diferencia de temperatura media logarítmica puede ser calculada con la ecuación 2.5 (Cengel, 2007).

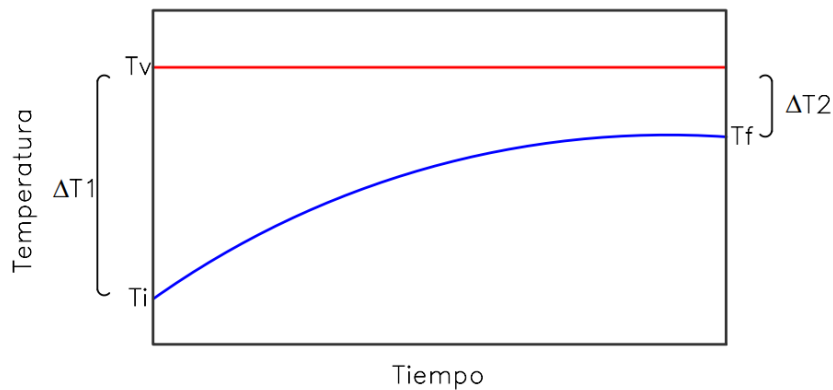


Figura 2.2. Cambio de temperatura durante la transferencia de calor.

Fuente: (Propia)

$$\Delta T_1 = T_v - T_i, \quad \Delta T_2 = T_v - T_f$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Ecuación 2.5. Diferencia de temperatura media logarítmica

Donde:

ΔT_{ml} Diferencia de temperatura media logarítmica, K

ΔT_1 Diferencia de temperatura al inicio del calentamiento, K

ΔT_2 Diferencia de temperatura al final del calentamiento, K

T_v Temperatura de saturación del vapor, K

Utilizando el concepto de diferencia media logarítmica de temperatura y calculado el calor entregado por parte del vapor, se puede determinar el área requerida para la transferencia de calor a través de las paredes del tanque interno, la ecuación 2.6 (Cengel, 2007) permite calcular esta área mediante el concepto de coeficiente global de transferencia de calor.

$$Q = U_o \cdot A_o \cdot \Delta T_{ml}$$

Ecuación 2.6. Flujo de calor a través del área del tanque

Donde:

U_o Coeficiente global de transferencia de calor

A_o Área inicial de transferencia de calor

Al determinar el área de transferencia de calor se puede además realizar un primer dimensionamiento del diámetro que tendrá el tanque interno, para poder representar y calcular de forma más exacta las variables de diseño, para ello se define una geometría inicial del tanque, la cual está representada en la figura 2.3.

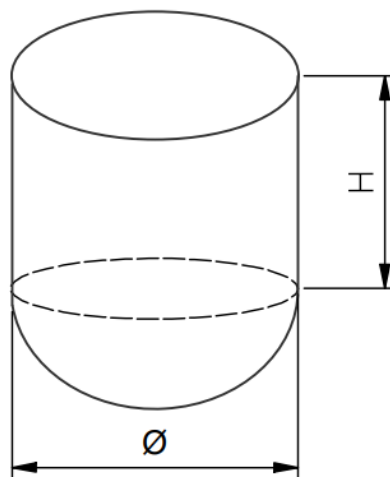


Figura 2.3. Geometría inicial del tanque interno.

Fuente: (Propia)

De acuerdo a figura 2.3 el área de transferencia de calor estará compuesta por dos partes, la pared lateral cilíndrica y la base esférica, por lo que su valor se determina mediante la ecuación 2.7, para realizar un primer dimensionamiento se asume que el diámetro del tanque será igual a la altura del cilindro, por lo tanto, el diámetro se calcula mediante la ecuación 2.8.

$$A = [\pi \cdot \phi_0 \cdot H] + \left[\frac{\pi}{2} \cdot (\phi_0)^2 \right], H = \phi_0$$

$$A = \frac{3\pi}{2} \cdot (\phi_0)^2$$

Ecuación 2.7. Superficie de transferencia de calor del modelo inicial

$$\phi_0 = \sqrt{\frac{2A}{3\pi}}$$

Ecuación 2.8. Diámetro del modelo preliminar

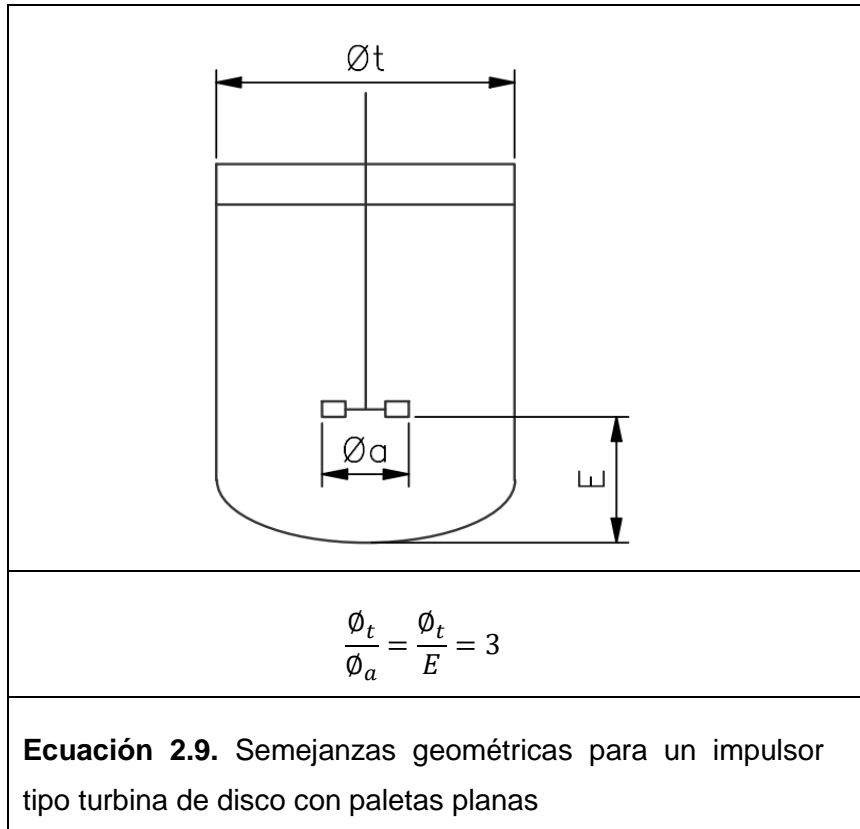
Donde:

ϕ_0 Diámetro inicial del tanque interno, m

H Altura del tanque interno, m

Efecto de agitación

La transferencia de calor se verá notablemente influenciada por el efecto de agitación en el interior del tanque, debido a que la convección de calor se define en base al comportamiento del fluido cerca de superficie, es por esto que con base en las medidas iniciales del tanque se debe dimensionar un tipo de agitador para modelar el efecto de agitación en la transferencia de calor por convección, de este modo, el modelo de agitador seleccionado fue de tipo turbina, el cual puede ser dimensionado a partir de las dimensiones externas del tanque, de acuerdo a las semejanzas geométricas de la ecuación 2.9.



Donde:

ϕ_t Diámetro de tanque interno, m

ϕ_a Diámetro del agitador, m

E Profundidad del agitador, m

En el cálculo del coeficiente de transferencia de calor se debe definir la temperatura media de calentamiento del agua, así como la temperatura aproximada de la pared interna del tanque mediante las ecuaciones 2.10 y 2.11, ya que las propiedades del agua y vapor serán evaluadas a estas temperaturas.

$$T_m = \frac{T_i + T_f}{2}$$

Ecuación 2.10. Temperatura media de calentamiento

$$T_s = \frac{h_{va} \cdot T_v + h_{in} \cdot T_m}{h_{va} + h_{in}}$$

Ecuación 2.11. Temperatura superficial del tanque interno

Donde:

T_m Temperatura media del agua contenida en el tanque, K

T_s Temperatura de la superficie del tanque, K

h_{va} Coeficiente de convección al interior de la camisa, kJ/h-m²-K

h_{in} Coeficiente de convección al interior del tanque agitador, kJ/h-m²-K

Conocidas las temperaturas aproximadas de operación del tanque, se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección en la pared interna del tanque de acuerdo a la ecuación 2.12 (Uhl & Gray, 2005), la cual se utiliza para recipientes agitados.

$$\frac{h_{in} \cdot \Phi_t}{k} = k_2 \cdot \left(\frac{(\Phi_a)^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu \cdot 60} \right)^a \cdot \left(\frac{C_p \cdot \mu \cdot 3600}{k} \right)^b \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^c$$

Ecuación 2.12. Coeficiente de transferencia de calor por convección al interior del tanque

Donde:

k Conductividad térmica del agua a la temperatura media de calentamiento, kJ/h-m-K

N Velocidad angular del agitador, rev/min

ρ Densidad del agua de calentamiento, kg/m³

μ Viscosidad del agua a la temperatura media de calentamiento, kg/m-s

μ_w Viscosidad del agua a la temperatura superficial del tanque, kg/m-s

Los valores de las constantes k_2 , a , b , c dependen del tipo de agitador utilizado, así como de la velocidad angular a la que gira el mismo, esto se detalla en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Constantes para el cálculo del coeficiente de convección de acuerdo al tipo de agitador.

Fuente: (Uhl & Gray, 2005)

Tipo de agitador	Constantes en la ecuación 2.11				Rango de velocidad [rpm]	Comentarios
	k2	a	b	c		
Paletas	0.40	2/3	1/3	0.14	300 – 6x10 ⁵	k2 varia de 0.36 a 0.4 para tanques con deflectores y sin deflectores respectivamente
	0.415	2/3	1/3	0.24	20 – 4000	
Turbina de curvas planas	0.60	2/3	1/3	0.14	2000 – 8x10 ⁵	
turbina de paletas inclinadas	0.44	2/3	1/3	0.24	80 – 200	Posición baja intermedia C=4 in
	0.53	2/3	1/3	0.24	20 – 120	Posición baja intermedia C=11 in
Turbina de disco con paletas planas	0.54	2/3	1/3	0.14	40 – 3x10 ⁵	Sin deflectores
	0.74	2/3	1/3	0.14	300 – 3x10 ⁵	1, 2, o 4 deflectores

Para hallar el coeficiente de transferencia de calor por convección en la superficie interior de la camisa es necesario aplicar la ecuación 2.13 (Uhl & Gray, 2005), la cual describe el coeficiente de convección de manera empírica.

$$h_{va} = \frac{49852.36}{L^{\frac{1}{4}} \cdot \Delta T^{\frac{1}{3}}}$$

Ecuación 2.13. Coeficiente de transferencia de calor al interior de la camisa

El valor de la diferencia de temperatura en la camisa se determina mediante la ecuación 2.14.

$$\Delta T = \frac{T_v - T_s}{2}$$

Ecuación 2.14. Diferencia de temperatura en la camisa

Donde:

L Longitud de paso del vapor en la doble camisa, m

ΔT Diferencia de temperatura en la camisa, K

Una vez que se han calculado los coeficientes de convección tanto para la zona agitada como para la condensación del vapor, se debe recalculer la temperatura de la pared del tanque mediante la ecuación 2.11, para poder obtener un resultado más cercano a la realidad hay que recalculer a su vez los coeficientes de convección cambiando los valores de las propiedades a la nueva temperatura de superficie, este proceso se repite hasta alcanzar un valor de temperatura estable en la pared del tanque.

Coefficiente global de transferencia de calor

Este coeficiente permitirá dimensionar el volumen final de la marmita de acuerdo a las características de diseño iniciales, para ello hay que tomar en cuenta el concepto de resistencia térmica el cual permite definir la facilidad de transferencia de calor por distintas formas como conducción, convección, radiación o combinadas. Para este caso de estudio se considera dos tipos de resistencias térmicas, la primera por convección que se produce en el interior y exterior del tanque interno debido al contacto con el agua agitada y el vapor en condensación, como segunda resistencia esta la producida por el material de las paredes del tanque, esta configuración de resistencias térmicas se muestra en la figura 2.4 para la superficie cilíndrica y en la figura 2.5 para la superficie esférica.

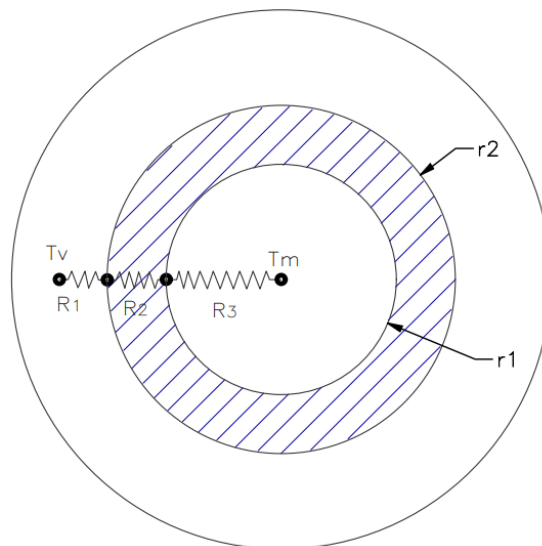


Figura 2.4. Resistencias térmicas para la superficie cilíndrica.

Fuente: (Propia)

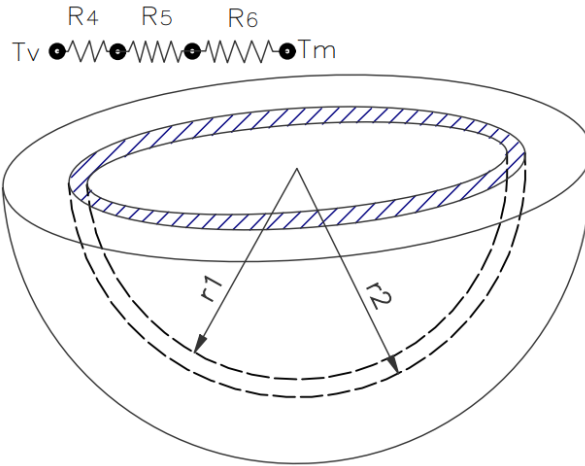


Figura 2.5. Resistencias térmicas para la superficie esférica.
Fuente: (Propia)

Haciendo uso de las figuras anteriores se puede calcular un coeficiente global de transferencia de calor a través de la superficie cilíndrica y esférica de acuerdo a las ecuaciones 2.15 y 2.16 respectivamente (Cengel, 2007), el radio de la pared externa del tanque (r_2) se determina mediante la ecuación 2.17 (Incropera & Bergman, 2011).

$$U_{sc} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_{eac} + R_{evc}}$$

$$U_{sc} = \frac{1}{\frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot L)h_v} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_a} + \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L)h_{in}} + R_{eac} + R_{evc}}$$

Ecuación 2.15. Coeficiente global de transferencia de calor de la superficie cilíndrica del tanque

$$U_{se} = \frac{1}{R_4 + R_5 + R_6 + R_{eae} + R_{eve}}$$

$$U_{se} = \frac{1}{\frac{1}{(4 \cdot \pi \cdot r_2^2)h_v} + \frac{r_2 - r_1}{4 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot k_a} + \frac{1}{(4 \cdot \pi \cdot r_1^2)h_{in}} + R_{eae} + R_{eve}}$$

Ecuación 2.16. Coeficiente global de transferencia de calor de la superficie esférica del tanque

$$r_2 = r_1 + t$$

Ecuación 2.17. Radio de la pared externa del tanque
interno

Donde:

U_{sc} Coeficiente global de transferencia de calor de la superficie cilíndrica, kJ/h-K

U_{se} Coeficiente global de transferencia de calor de la superficie esférica, kJ/h-K

R_1 Resistencia térmica de convección en la doble camisa de la superficie cilíndrica, h-K/kJ

R_2 Resistencia térmica de conducción en la pared cilíndrica del tanque interno, h-K/kJ

R_3 Resistencia térmica de convección al interior del tanque de la superficie cilíndrica, h-K/kJ

R_{eac} Resistencia de ensuciamiento por contacto con el agua en la pared cilíndrica, h-K/kJ

R_{evc} Resistencia de ensuciamiento por contacto con el vapor en la pared cilíndrica, h-K/kJ

R_4 Resistencia térmica de convección en la doble camisa de la superficie esférica, h-K/kJ

R_5 Resistencia térmica de conducción en la pared esférica del tanque interno, h-K/kJ

R_6 Resistencia térmica de convección al interior del tanque de la superficie esférica, h-K/kJ

R_{eae} Resistencia de ensuciamiento por contacto con el agua en la pared esférica, h-K/kJ

R_{eve} Resistencia de ensuciamiento por contacto con el vapor en la pared esférica, h-K/kJ

r_1 Radio de la pared interna del tanque, m

r_2 Radio de la pared externa del tanque, m

k_a Conductividad térmica del material del tanque, kJ/h-m-K

t Espesor de la pared interna del tanque, m

La transferencia de calor a través del tanque se produce por las dos superficies, tanto cilíndrica y esférica, por lo que este calor se puede definir mediante la ecuación 2.18 que agrupa los dos coeficientes globales de transferencia de calor.

$$Q_{trans} = \Delta T_{ml}(U_{sc} + U_{se})$$

Ecuación 2.18. Coeficiente de transferencia de calor al interior del tanque

Donde:

Q_{trans} Calor transmitido a través de la doble camisa, kJ/h

Espesores del tanque

El cálculo de los espesores del tanque es uno de los puntos más importantes del diseño, ya que en estos se compromete la seguridad operacional del equipo, es por esta razón que es necesario utilizar el código ASME BPVC sección VII división 1 para dimensionar estos espesores, al ser un tanque de doble camisa, el tanque interno estará sometido a una presión externa debido al vapor, mientras que el tanque externo estará sometido a una presión interna.

En el cálculo del espesor de la pared cilíndrica del tanque externo, se utiliza la ecuación 2.19 (ASME, 2013), la cual define el espesor requerido de acuerdo la presión interna de la camisa y el esfuerzo admisible del material.

$$t_r = \frac{P \cdot R}{(S \cdot E) - (0.6 \cdot P)}$$

$$Si: t_r \leq \frac{R}{2} \text{ o } P \leq 0.385 \cdot S \cdot E$$

Ecuación 2.19. Espesor de la pared cilíndrica del tanque externo

Donde:

t_r Espesor mínimo requerido de la pared cilíndrica del tanque interno, m

P Presión de diseño del tanque, Pa

R Radio de la superficie interna de la camisa, m

S Esfuerzo máximo admisible, Pa

E Eficiencia de la junta soldada

Existen varias alternativas para la selección de la base del tanque de doble camisa, estos cabezales que están definidos en el código ASME como se muestra en la figura 2.6, de acuerdo al tipo de cabezal seleccionado, se debe dimensionar su espesor.

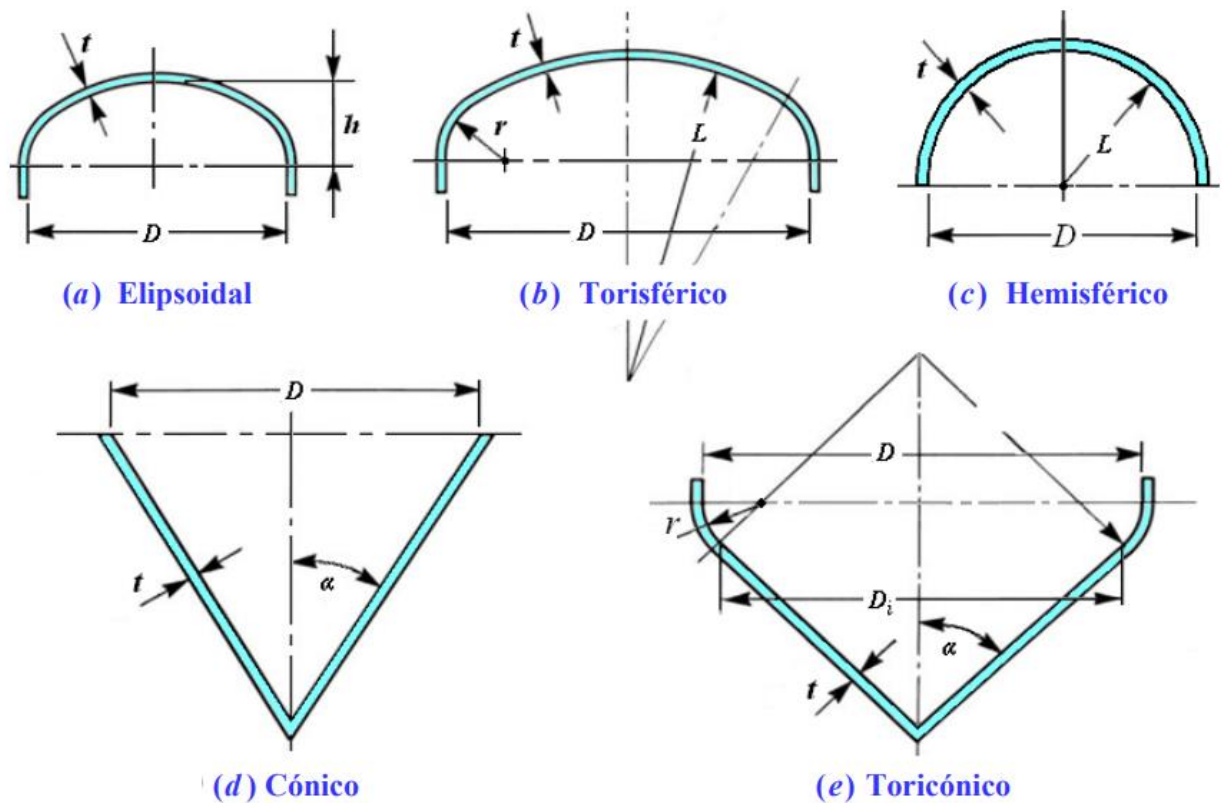


Figura 2.6. Tipos de cabezales para recipientes a presión de acuerdo al código ASME.

Fuente: (Massa & Giudici, 2015)

De acuerdo al tipo de cabezal se tiene una ecuación distinta para el cálculo del espesor, con base en las variables representadas en la figura 2.6 se calcula los espesores, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.2. Ecuaciones para el cálculo de espesores de acuerdo al tipo de cabezal en recipientes sometidos a presión interna.

Fuente: (Massa & Giudici, 2015)

Tipo de cabezal	Cálculo del espesor
Elíptico 2:1	$t_r = \frac{P \cdot D}{(2 \cdot S \cdot E) - (0.2 \cdot P)}$; Si: $\frac{t}{L} \geq 0.002$ y $\frac{D}{h} = 4$
Toriférico tipo ASME	$t_r = \frac{0.885 \cdot P \cdot L}{(S \cdot E) - (0.1 \cdot P)}$; Si: $\frac{t}{L} \geq 0.002$; $r = 6\%L$ y $L = D$
Hemisférico	$t_r = \frac{P \cdot L}{(2 \cdot S \cdot E) - (0.2 \cdot P)}$; Si: $t \leq 0.356 \cdot L$ o $P \leq 0.665 \cdot S \cdot E$
Cuerpo cónico	$t_r = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \cos(\alpha) (S \cdot E - 0.6 \cdot P)}$; Si: $\alpha \leq 30^\circ$

Del mismo modo se debe realizar el dimensionamiento de los espesores y cabezal del tanque más interno de acuerdo al código ASME, contrario al tanque externo el tanque interno debe diseñarse bajo presión externa producida por el vapor, para poder calcular este espesor se debe definir un espesor inicial y calcular la presión máxima admisible mediante la ecuación 2.20 (ASME, 2013), la cual se utiliza para determinar el espesor en recipientes cilíndricos.

$$P_{ac} = \frac{4 \cdot B}{3 \left(\frac{D_0}{t_c} \right)}$$

Ecuación 2.20. Presión máxima admisible en un recipiente sometido a presión externa

Donde:

P_{ac} Presión máxima admisible en un recipiente cilíndrico sometido a presión externa, Psi

B Esfuerzo de tensión de acuerdo al material y temperatura del recipiente, Psi

D_0 Diámetro de la superficie externa del tanque cilíndrico sometido a presión externa, mm

t_c Espesor del tanque cilíndrico sometido a presión externa, mm

En nuestro tipo de recipiente de doble camisa se debe definir una longitud entre soportes la cual es indispensable para el cálculo de la presión, esta longitud de soportes se muestra en la figura 2.7.

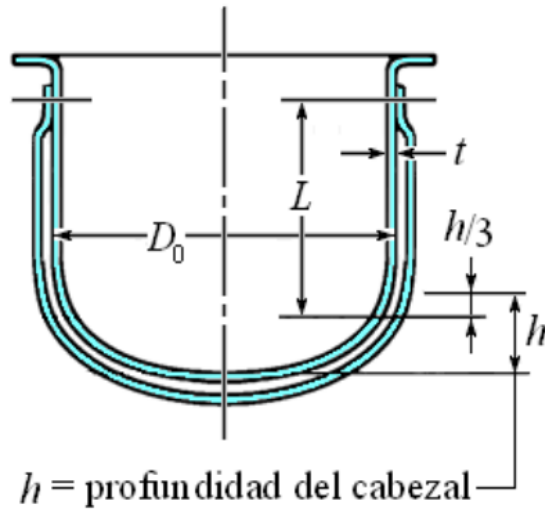


Figura 2.7. Longitud de soporte para tanques con doble camisa.
 Fuente: (Massa & Giudici, 2015)

De esta forma iniciamos definiendo un valor para el espesor del tanque "t", luego se define la longitud del soporte del tanque "L" para a continuación definir las relaciones geométricas L/D_0 y D_0/t de acuerdo al código ASME, una vez definidas estas relaciones se puede definir la relación geométrica "A" utilizando la figura 2.8 de la subparte 3 del código ASME sección II, parte D.

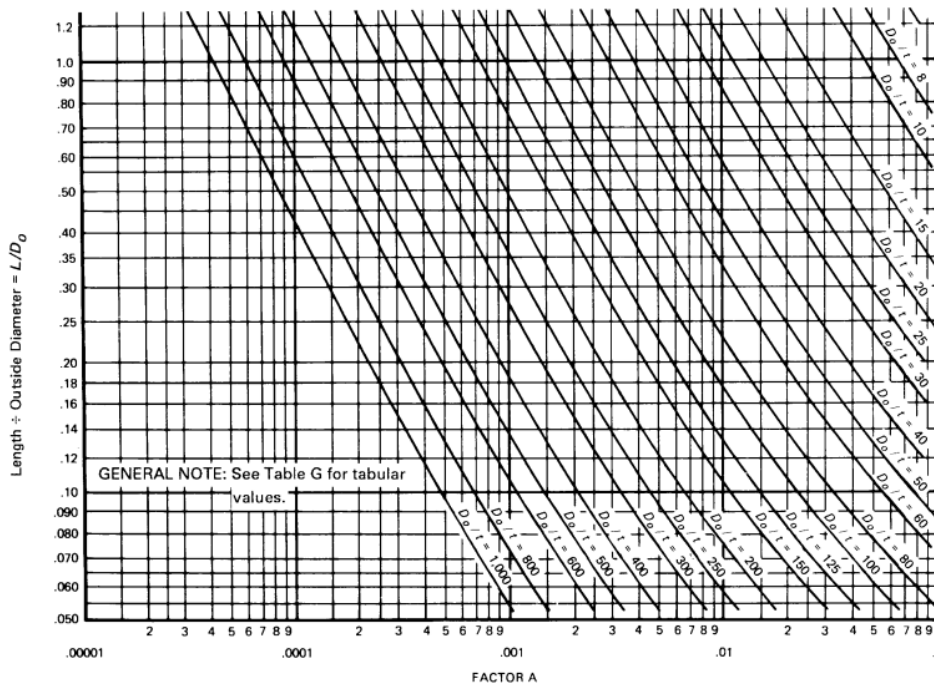


Figura 2.8. Relación geométrica A para el cálculo de espesores en recipientes sometidos a presión externa.
 Fuente: (ASME, 2013)

Una vez hallado el coeficiente A se puede determinar el valor de la tensión B con el cual se determinará si el espesor definido puede soportar la presión requerida, el valor B depende del tipo de material del recipiente, así como de la temperatura de trabajo del tanque, el material seleccionado para este equipo es el acero inoxidable AISI 304 por lo cual se utiliza la figura 2.9 para hallar esta tensión.

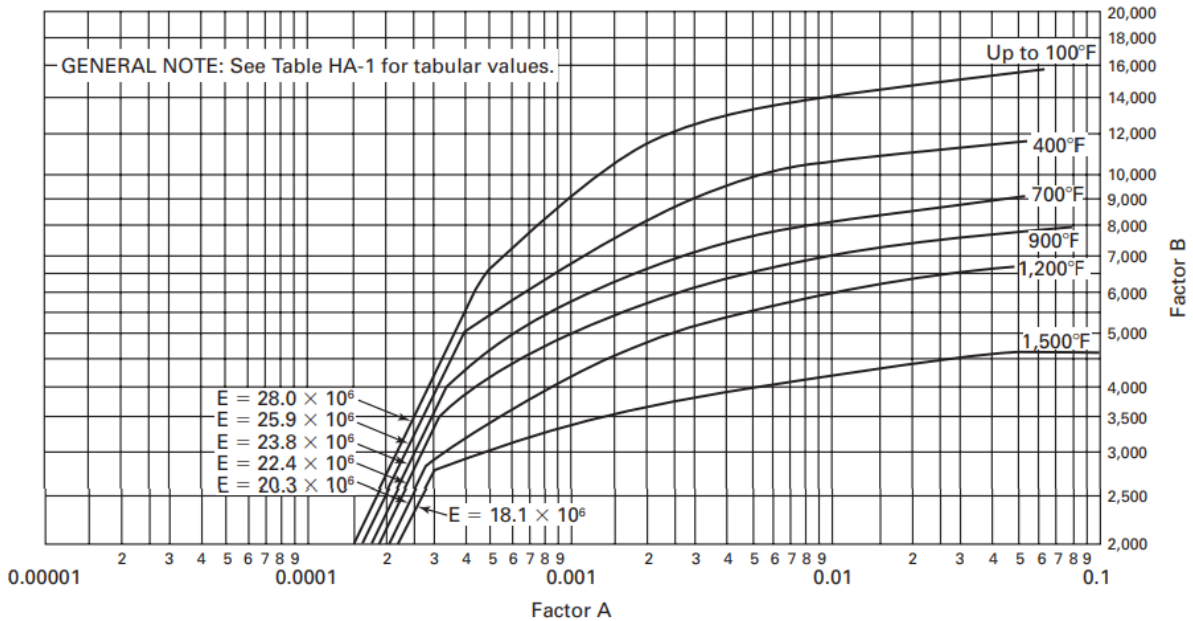


Figura 2.9. Tensión B de acuerdo al material y temperatura de trabajo para recipientes sometidos a presión externa.

Fuente: (ASME, 2013)

Finalmente, conocida la tensión B, el diámetro y el espesor preseleccionado se puede verificar si el espesor utilizado puede soportar la presión a la que operará el tanque sometido a presión externa mediante la ecuación 2.20.

Del mismo modo para el cálculo del espesor para el cabezal del tanque interno, se debe definir el tipo de cabezal, para este equipo el tipo de cabezal del tanque interno será similar al del tanque externo por lo que su geometría seleccionada será elíptica. En el cálculo del espesor para un cabezal elíptico de acuerdo al código ASME, se debe seleccionar el mayor de las siguientes opciones:

- a) El espesor obtenido mediante el uso de las fórmulas para presión interna de la tabla 2.2 de acuerdo al tipo de cabezal, definiendo como presión interna 1,67 veces la presión externa y considerando un valor de $E=1$.
- b) El espesor obtenido mediante las ecuaciones 2.21 y 2.22 (Giudici & Julio, 2015), para ello el coeficiente A se determina mediante la ecuación 2.23, mientras que para hallar el esfuerzo B se utiliza la figura 2.9.

$$P_{ae} = \frac{B}{\frac{R_0}{t_e}}$$

Ecuación 2.21. Presión admisible para un cabezal elíptico sometido a presión externa.

$$R_0 = 0.9(D + 2 \cdot t_e)$$

Ecuación 2.22. Valor del radio exterior para una cabezal elíptico 2:1.

$$A = \frac{0.125}{\frac{R_0}{t_e}}$$

Ecuación 2.23. Valor del coeficiente A para cabezales elípticos sometidos a presión externa.

Donde:

P_{ae} Presión máxima admisible para un cabezal elíptico sometido a presión externa, Psi

R_0 Radio exterior del cabezal sometido a presión externa, mm

t_e Espesor del cabezal elíptico sometido a presión externa, mm

D Diámetro interno del cabezal elíptico, mm

A Relación geométrica para el cálculo de espesores en recipientes sometidos a presión externa

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Datos para el diseño

El diseño del equipo inicia tomando como punto de partida datos como: la cantidad de vapor disponible, propiedades físicas y químicas del agua y vapor, propiedades mecánicas térmicas de los materiales a utilizar y condiciones de operación del equipo, todas estas se detallan a continuación.

- Volumen inicial de calentamiento: 0.035 m³
- Densidad del agua: 998 kg/m³
- Calor específico del agua: 4.19 kJ/kg-K
- Tiempo de calentamiento del agua: 0.167 h
- Presión de vapor al interior de la camisa: 2.5 bar
- Entalpía específica del agua saturada a 2.5 bar: 504.68 kJ/kg
- Entalpía específica del vapor saturado a 2.5 bar: 2706.24 kJ/kg
- Temperatura de saturación del agua a una presión de 2.5 bar: 393.36 K
- Temperatura inicial del agua de calentamiento: 293.15 K
- Temperatura final del agua de calentamiento: 353.15 K
- Coeficiente global de transferencia de calor inicial: 1200 kJ/h-m²-K

Dimensionamiento inicial

Con base en estos datos se realiza el diseño del equipo, el primer cálculo consiste en determinar el flujo de vapor requerido para el calentamiento del agua en el tanque, para este primer aproximamiento se asume que todo el calor generado por la condensación del vapor se transmite al agua de calentamiento, el flujo de vapor variará en función del tiempo de calentamiento como se muestra en la figura 3.1.

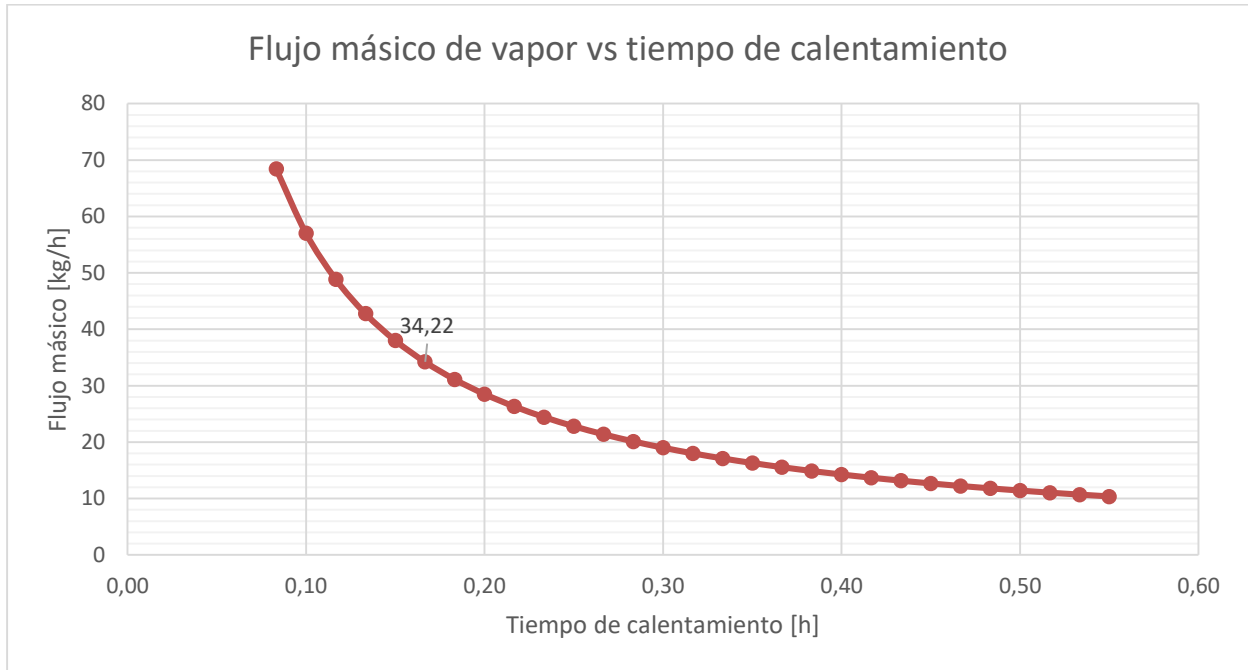


Figura 3.1. Flujo másico de vapor en función del tiempo de calentamiento del agua en el tanque interno.
Fuente: (Propia)

De acuerdo a la figura 3.1 el flujo másico requerido para el calentamiento del agua en el tanque interior se reduce conforme se tiene un tiempo de calentamiento mayor, para el experimento se estima un tiempo ideal de calentamiento en 10 minutos, por lo que según la figura 3.1 se requiere un flujo másico de vapor de 34.22 [kg/h] de vapor saturado a 2.5 [psi].

El dimensionamiento inicial se obtiene utilizando un coeficiente global de transferencia de calor, el cual es inicialmente asumido, así como del calor generado y la diferencia de temperatura media logarítmica tomando como temperaturas de entrada y salida las temperaturas inicial y final del agua a calentar, esto se muestra en la figura 3.2.

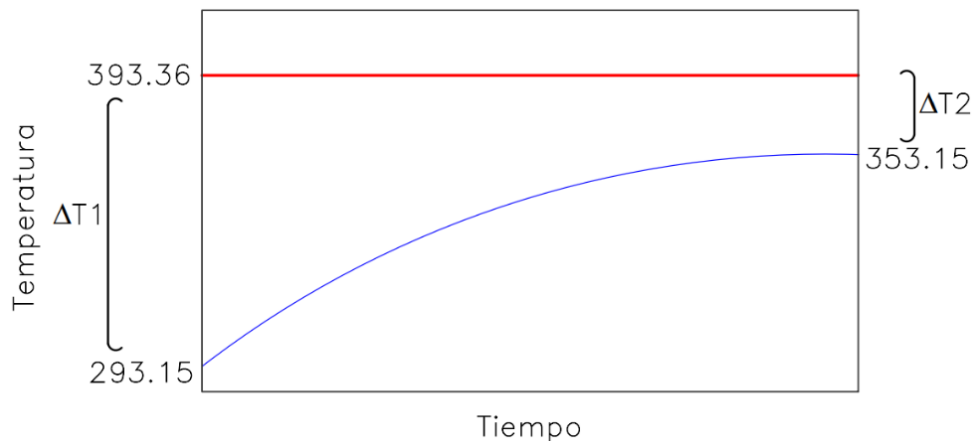


Figura 3.2. Variación de temperaturas en función del tiempo.
Fuente: (Propia)

Con base a estas temperaturas de la figura anterior se realiza los cálculos necesarios para obtener un área de transferencia de calor, con la cual a su vez se determina un diámetro inicial del tanque, estos resultados se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Variables para el cálculo del diámetro inicial del tanque.
Fuente: (Propia)

Variable	Valor	Unidades
Flujo de calor transmitido	75348	kJ/h
Diferencia de temperatura media logarítmica	65.71	K
Área de transferencia de calor	0.76	m ²
Diámetro inicial del tanque	0.38	m

Con base al diámetro inicial del tanque se realiza un dimensionamiento general, siguiendo las semejanzas recomendadas para un tipo de agitador a utilizar, en este caso se realiza el dimensionamiento para un impulsor de tipo turbina con paletas planas, estas dimensiones se detallan en la figura 3.3.

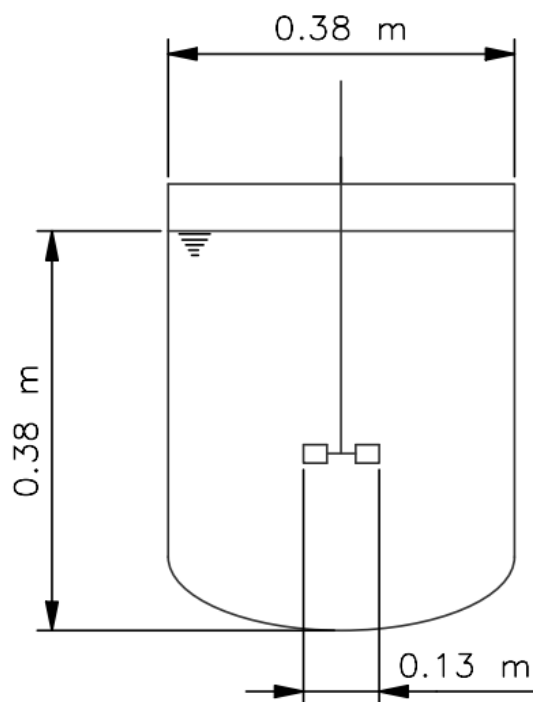


Figura 3.3. Dimensionamiento inicial del tanque interno para un agitador de palas planas.
Fuente: (Propia)

El dimensionamiento inicial del tanque permite realizar un análisis más preciso de la transferencia de calor, ya que se puede determinar los coeficientes de convección tanto al interior de la camisa como al interior del tanque donde se produce la agitación, esto se realiza para poder hallar un valor mucho más exacto de la temperatura superficial del tanque interno, ya que a esta temperatura superficial se obtienen las propiedades del agua para hallar el coeficiente global de transferencia de calor, esta temperatura superficial inicial se la toma como un promedio entre la temperatura de saturación del vapor y de la temperatura media del agua contenida en el tanque durante su calentamiento, estos valores se detallan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Temperaturas media y superficial del tanque interno.

Fuente: (Propia)

Variable	Valor	Unidades
Temperatura media del agua	50	°C
Primera temperatura superficial del tanque interno	85.11	°C

Diseño en función del coeficiente global de transferencia de calor

Una vez realizado el dimensionamiento inicial es necesario determinar un coeficiente global de transferencia de calor que describa el fenómeno completo de transferencia de calor y poder realizar un mejor dimensionamiento del tanque, para ello se determina los coeficientes de convección, así como de conducción, por lo que es necesario definir algunas propiedades de los fluidos de trabajo como el agua y el vapor a las distintas temperaturas y condiciones de operación, estos datos se detallan a continuación:

- Diámetro del agitador: 0.13 m
- Conductividad térmica del fluido a 50 °C: 2.32 kJ/h-m-K
- Velocidad angular del agitador: 120 rpm
- Densidad del agua a 50 °C: 987.89 kg/m³
- Viscosidad del agua a 50 °C: 5.46 x 10⁻⁴ kg/m-s
- Calor específico del agua a 50 °C: 4.18 kJ/kg-K
- Viscosidad del agua a la temperatura de pared (85.11 °C): 3,3 x 10⁻⁴ kg/m-s

Con los datos anteriores se calcula el coeficiente de convección en las paredes interiores del tanque considerando el efecto del agitador de paletas planas, para ello mediante el uso de la tabla 2.1 se determina los valores de los coeficientes k_2 , a, b, c a utilizar, estos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 3.3. Constantes para el cálculo del coeficiente de convección al interior del tanque de acuerdo al tipo de agitador.

Fuente: (Propia)

Variable	Valor	Unidades
Coeficiente k_2	0.415	--
Coeficiente a	2/3	--
Coeficiente b	1/3	--
Coeficiente c	0.24	--
Coeficiente de convección h_{in}	6504.1	kJ/h-m ² -K

En el cálculo del coeficiente de convección al interior de la camisa hay que seguir el mismo proceso y definir algunos datos, estos datos se detallan a continuación:

- Longitud de paso del vapor en la camisa: 0.38 m
- Temperatura de saturación del vapor: 120.21 °C

Con los datos anteriores se puede calcular la diferencia de temperatura en la camisa y el coeficiente de convección por condensación del vapor, estos valores se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.4. Coeficiente de convección en el interior de la camisa.

Fuente: (Propia)

Variable	Valor	Unidades
Primera diferencia de temperatura en la camisa	17.55	K
Coeficiente de convección h_{va}	24484.35	kJ/h-m ² -K

Definidos los primeros valores del coeficiente de convección, hay que recalculer la temperatura superficial del tanque interno mediante la ecuación 2.10 y a su vez recalculer los coeficientes de convección hasta obtener una temperatura superficial estable, estos cálculos se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Coeficientes de convección conforme se estabiliza la temperatura superficial.

Fuente: (Propia)

No. Cálculo	T_s [°C]	μ_w $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$	h_{in} $\left[\frac{kJ}{h \cdot m^2 \cdot K}\right]$	h_{va} $\left[\frac{kJ}{h \cdot m^2 \cdot K}\right]$
1	85,11	0,0003306	6504,10	24484,35
2	105,47	0,000264	6865,82	32700,14
3	108,03	0,000257	6908,30	34840,83
4	108,59	0,000256	6917,00	35397,34
5	108,73	0,000255	6919,18	35541,47
6	108,77	0,000255	6919,80	35578,64
7	108,78	0,000255	6919,96	35588,12
8	108,78	0,000255	6919,96	35590,55

Conforme se repite el cálculo de la temperatura de superficie del tanque, los coeficientes de convección para el vapor y el agua agitada se estabilizan, esta tendencia se observa en la siguiente figura.

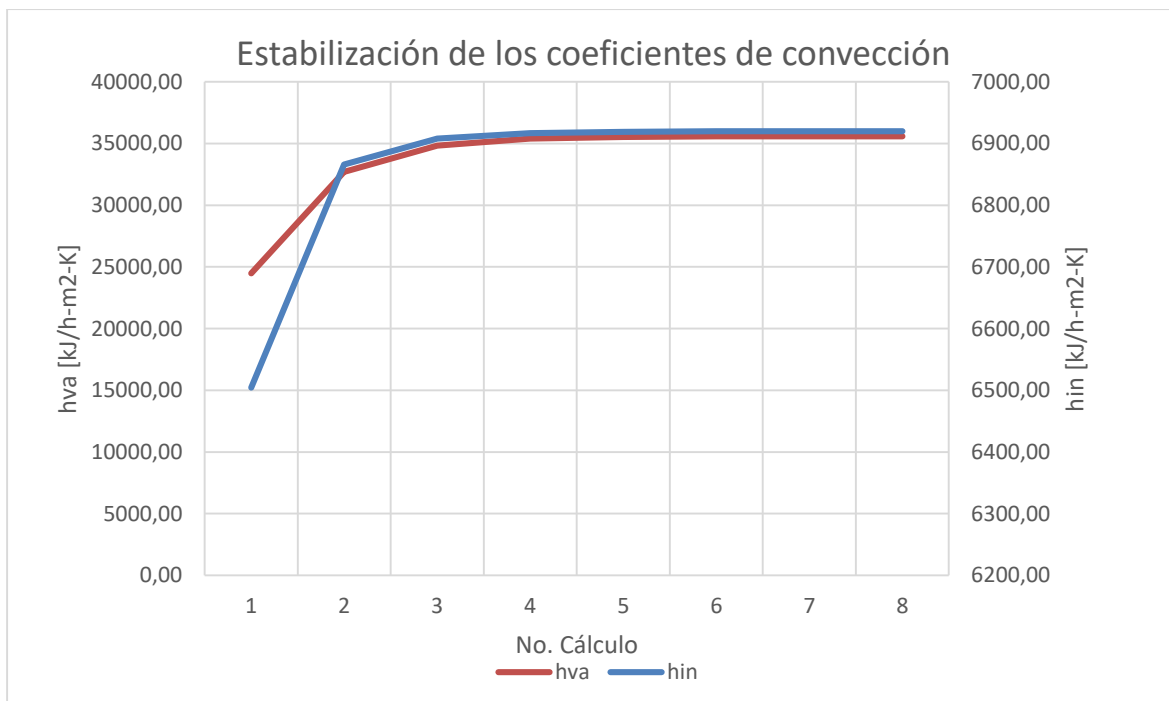


Figura 3.4. Estabilización de los coeficientes de convección al recalculer la temperatura superficial.

Fuente: (Propia)

Una vez determinados los coeficientes de convección, se puede determinar los coeficientes globales de transferencia de calor del equipo, para ello se calculan las resistencias térmicas de las dos superficies, además de considera las resistencias de ensuciamiento tanto en la doble camisa como en el tanque interno, estas resistencias se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resistencias de ensuciamiento del tanque.
Fuente: (Propia)

Variable	Valor	Unidades
R_{eac}	0.0010042	h-K/kJ
R_{evc}	0.0005138	h-K/kJ
R_{eae}	0.0020083	h-K/kJ
R_{eve}	0.0010276	h-K/kJ

De esta forma se determina el radio final del tanque interno, el cual se determina por la intersección de calores transmitido y ganado como se observa en la figura 3.5.

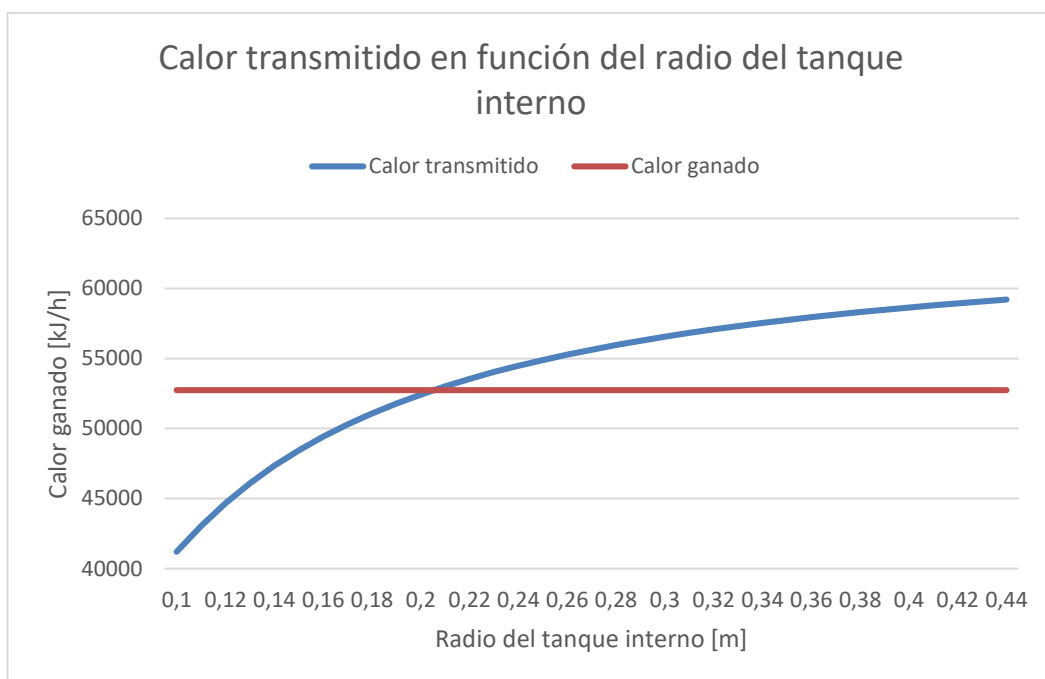


Figura 3.5. Intersección de calores ganado y transmitido para el cálculo del radio del tanque interno.
Fuente: (Propia)

En la figura 3.5 se muestra en como el calor transmitido al agua del tanque interna se incrementa conforme aumentamos su radio, para definir el radio más adecuado debemos intersecar esta curva de calor transmitido con el valor del calor ganado, el cual se determina de acuerdo a las condiciones de calentamiento requeridas, de este modo el radio determinado en la intersección es de 0.2 m.

El ancho de la camisa del tanque se suele dimensionar como un 10% del diámetro interno del tanque, por lo que para este equipo se tendrá las dimensiones detalladas en la siguiente tabla.

Tabla 3.7. Dimensiones finales del tanque de doble camisa.

Fuente: (Propia)

Variable	Valor	Unidades
Diámetro del tanque interno	0.40	m
Ancho de la doble camisa	0.04	m
Diámetro del tanque externo	0.48	m

Con base en las dimensiones de la tabla 3.6, se realizará el cálculo de los espesores de los tanques interno y externo, haciendo uso de código ASME para recipientes a presión.

Cálculo de espesores

Utilizado las ecuaciones propuestas en el código ASME para recipientes a presión, se obtuvo los espesores requeridos para la doble camisa sometida a presión interna y para el tanque interno sometido a presión externa, tanto para la superficie cilíndrica como de los cabezales elípticos. Para el cálculo de los espesores de la camisa sometida a presión externa se utiliza los siguientes datos:

- Presión interna de la camisa: 400 kPa
- Radio de la superficie interna de la camisa: 0.24 m
- Límite de fluencia del acero AISI 304: 175822.5 kPa
- Factor de seguridad: 2.17

Con los datos anteriores se determina el espesor requerido para la superficie cilíndrica, como se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Espesor de la superficie cilíndrica de la doble camisa.

Fuente: (Propia)

Variable	Valor	Unidades
Esfuerzo admisible	81024.19	kPa
Espesor mínimo de la doble camisa	1.59	mm

Del mismo modo para determinar el cabezal de más adecuado se realiza una comparación del espesor obtenido para tres tipos de cabezales sometidos a presión interna, estos valores se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Espesores de acuerdo al tipo de cabezal bajo presión interna.

Fuente: (Propia)

Tipo de Cabezal	Espesor [mm]
Elíptico	1.58
Toriférico	2.80
Hemisférico	0.79

De acuerdo a la tabla 3.9 el cabezal con el menor espesor resulta ser el cabezal Hemisférico mientras que el Toriférico tienen el mayor espesor, por lo general las tapas toriféricas y hemisféricas soportan elevadas presiones por lo que su costo de fabricación será superior, cuando se tienen altos espesores en las tapas toriféricas se suele emplear las tapas elípticas, ya que pueden soportar la misma presión con un espesor mucho menor (UNAM, 2014), es por esta razón que se seleccionó el cabezal de tipo elíptico.

Definidos los espesores de la camisa, así como el tipo de cabezal, se debe calcular los espesores para el tanque interno el cual estará sometido a una presión externa debido al vapor contenido en la camisa, para ello se debe definir un espesor inicial, así como algunas dimensiones las cuales se muestran en la figura 3.6.

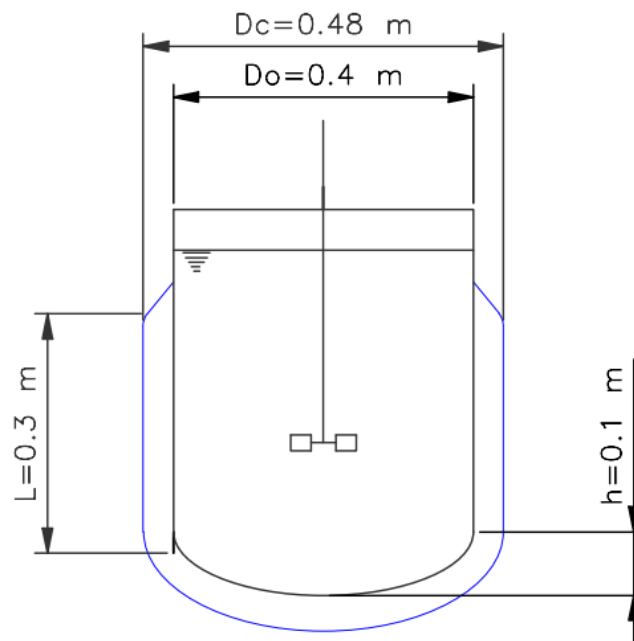


Figura 3.6. Dimensiones extremas del tanque de doble camisa.

Fuente: (Propia)

De acuerdo a la figura 3.6 se definen las semejanzas geométricas para poder determinar si el espesor seleccionado es el adecuado para soportar la presión de trabajo, estas semejanzas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.10. Semejanzas geométricas para hallar la presión externa máxima admisible de un espesor definido.

Fuente: (Propia)

Semejanza	Valor	Unidades
t_c	3	mm
$\frac{L}{D_0}$	0.74	--
$\frac{D_0}{t_c}$	135.33	--

Definidas las semejanzas de la tabla 3.10, se determina el valor del coeficiente A mediante la figura 3.7.

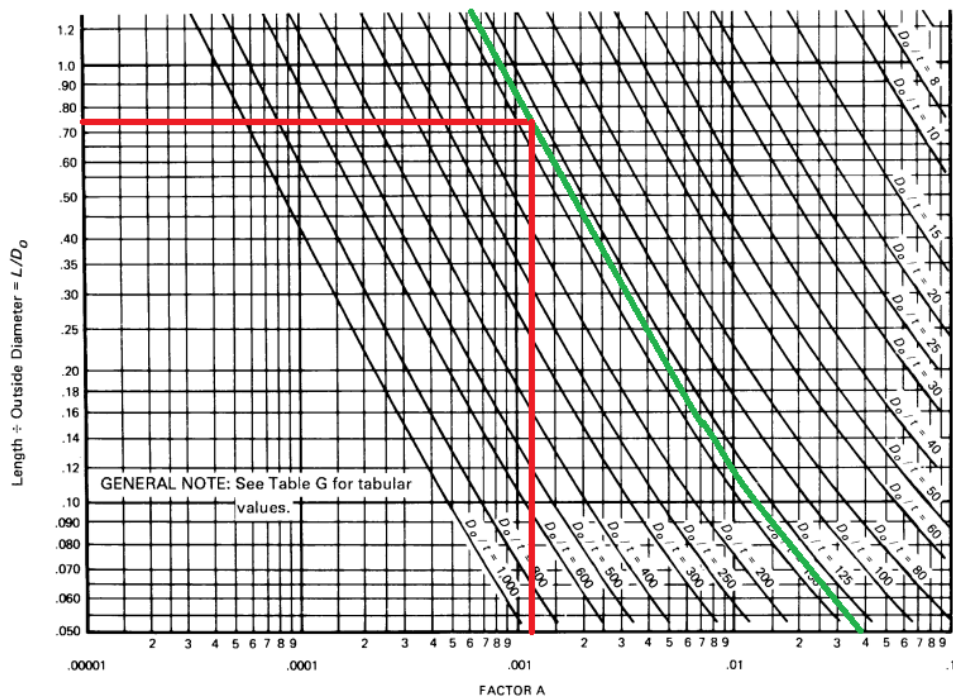


Figura 3.7. Coeficiente A de acuerdo a las semejanzas geométricas del tanque interno.

Fuente: modificado de (ASME, 2013)

Hallado el coeficiente A se determina el esfuerzo de tensión B, utilizando la figura 3.8 para el acero inoxidable AISI 304.

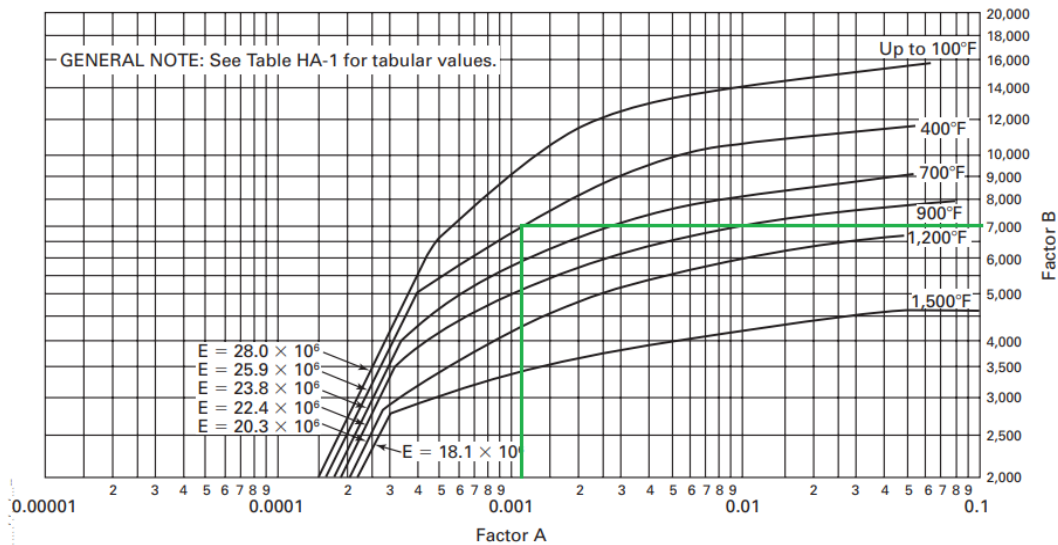


Figura 3.8. Esfuerzo de tensión B de acuerdo al valor del coeficiente A para el tanque cilíndrico.

Fuente: modificado de (ASME, 2013)

Definido el esfuerzo de tensión B, se verifica si el espesor de 3 mm soporta la presión de operación del tanque, este valor se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.11. Presión externa máxima admisible para el espesor definido de 3 mm.

Fuente: (Propia)

Variable	Valor	Unidades
A	0.0012	--
B	7000	Psi
P_{ac}	68.97	Psi

De acuerdo a la tabla 3.11 la presión máxima admisible para un espesor de 3 mm es de 68.97 Psi lo que equivale a 4.75 bar, de este modo el espesor si cumple las condiciones de diseño de 4 bar.

En el cálculo del espesor del cabezal del tanque interno se define del mismo modo un espesor inicial para hallar una presión externa admisible, para el método de la opción a) en donde se utiliza las fórmulas de presión interna para un cabezal elíptico, se tiene las siguientes variables.

Tabla 3.12. Espesor de cabezal por el método de presión interna para un cabezal elíptico.

Fuente: (Propia)

Variable	Valor	Unidades
Presión de diseño	668000	Pa
Eficiencia de las juntas soldadas	1	--
t_e	2.23	mm

En el método de la opción b) se calcula el coeficiente A definiendo un espesor inicial, para de este modo poder determinar el esfuerzo de tensión B como se muestra en la figura 3.9 y verificar si el espesor definido soporta la presión externa, esto se muestra en la tabla 3.13.

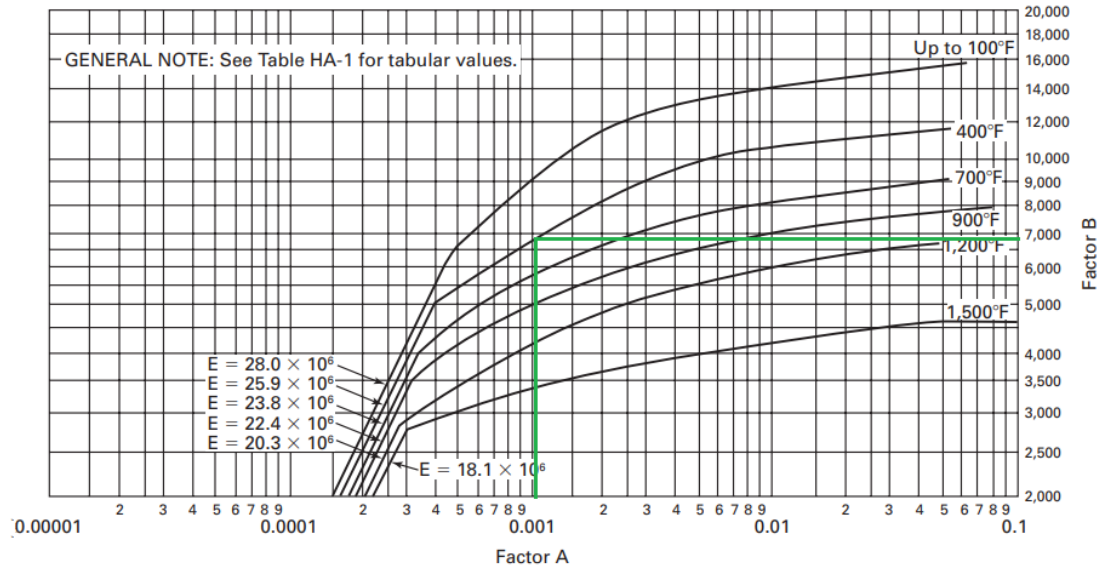


Figura 3.9. Esfuerzo de tensión B de acuerdo al valor del coeficiente A para el cabezal elíptico.
Fuente: modificado de (ASME, 2013)

Tabla 3.13. Espesor de cabezal por el método de presión externa para un cabezal elíptico.

Fuente: (Propia)

Variable	Valor	Unidades
t_e	3	mm
R_0	365.4	mm
$\frac{R_0}{t_e}$	121.8	--
A	0.00103	--
B	6800	Psi
P_{ae}	55.83	Psi

Al comparar ambos espesores claramente el espesor hallado por el método de presión externa es mayor que el hallado por presión interna, por lo que el espesor a utilizar para el cabezal elíptico será de 3 mm.

Modelo 3D y elaboración de planos

Definidas las dimensiones del tanque, el siguiente punto fue la elaboración de un modelo 3D del mismo, para lo cual se definió algunas características en cuanto al ensamble de los distintos componentes del equipo, se optó por utilizar soldadura en la mayoría de uniones ya que estas estarán fijas, el modelo final se muestra en la figura 3.10 en donde se visualiza la mayoría de componentes del equipo incluido el sistema de agitación.

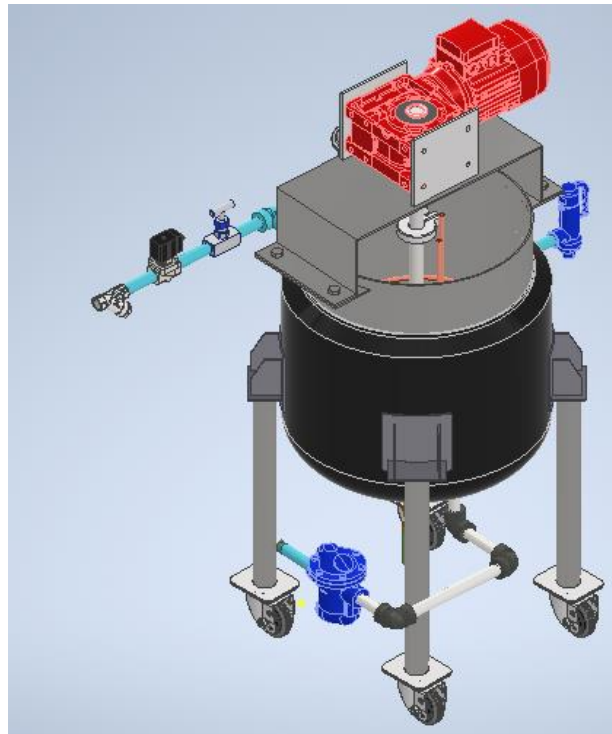


Figura 3.10. Modelo 3D del equipo.
Fuente: (propia)

Tras evaluar distintas alternativas y realizar una serie de cambios en el modelo 3D se llegó al ensamble definitivo, por lo que se elaboró un plano de conjunto y varios planos de taller en donde se muestra las dimensiones y características de las piezas que requieren ser construidas, así como aquellas normalizadas, estos planos se muestran en el ANEXO I.

Construcción y pruebas de funcionamiento

Al terminar la fase de diseño el siguiente paso fue realizar la construcción y puesta en marcha del equipo, los materiales de las piezas y características están descritas en los planos del equipo, en cuanto a la construcción del tanque y su encamisado, esta se realizó en su totalidad en acero inoxidable, ensamblando sus partes mediante soldadura SMAW y TIG, además de adquirir los componentes normalizados requeridos, como el motoreductor, válvulas, tubería, etc., a continuación se muestran una serie de imágenes en donde se puede evidenciar la fase de construcción.



Figura 3.11. Construcción de tanque, soldadura TIG.
Fuente: (propia)



Figura 3.12. Pulido del equipo.
Fuente: (propia)

La instalación y pruebas de funcionamiento del equipo, se realizaron en el laboratorio de transferencia de calor de la Facultad de Ingeniería Mecánica en la Escuela Politécnica Nacional, en donde se llevó a cabo el ensayo del equipo a diferentes condiciones de operación para evaluar la estabilidad del mismo, a continuación, se muestran imágenes de la instalación del equipo, además en el ANEXO II se muestra un enlace de un video en donde se evidencia el funcionamiento del mismo.



Figura 3.13. Ensamblaje del sistema de agitación.
Fuente: (propia)



Figura 3.14. Instalación completa del equipo.
Fuente: (propia)

Finalmente, los detalles del costo del equipo se muestran en el anexo III.

3.2 Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló el diseño, construcción e instalación de un equipo didáctico para el laboratorio de Transferencia de Calor denominado tanque agitador de doble camisa y serpentín, donde se pudo hallar algunas conclusiones interesantes.

En el dimensionamiento volumétrico inicial, se observó cómo conforme el tiempo de calentamiento se incrementa, el flujo másico de vapor se reduce con tendencia logarítmica, por lo que el tiempo de calentamiento es una de las variables más importantes para iniciar el diseño.

El análisis de transferencia de calor en el tanque es dependiente del tipo de agitador a utilizar, ya que dependiendo del mismo se obtienen distintos valores del coeficiente de convección al interior del tanque, el método utilizado consistió en definir una temperatura superficial y hallar los coeficientes de convección con los cuales se determina nuevamente una temperatura superficial, estos cálculos se repiten hasta obtener una estabilidad en la transferencia de calor, la cual se ve reflejada al alcanzar una temperatura superficial estable.

Se observó que para el diseño del equipo es necesario definir algunas resistencias de ensuciamiento tanto para las paredes cilíndricas como para el cabezal esférico, ya que al no tener un tratamiento del agua que ingresa a la caldera el equipo es susceptible a generar incrustaciones a largo plazo, debido a los minerales que transporta el vapor y el agua de calentamiento.

Se definió que el flujo calor transmitido a través de todo el sistema esté en función del radio interno del tanque, obteniendo una gráfica la cual describe como se incrementa el calor transmitido conforme el radio aumenta, al intersecar este calor transmitido con el calor que se requiere para calentar el agua desde la temperatura ambiente hasta los 80 °C se obtiene el radio final del tanque interno.

Se observó que los espesores para las zonas bajo presión externa son mayores que para aquellas sometidas a presión interna, debido a esto el tipo de cabezal seleccionado es el elíptico ya que se presenta como una buena opción al ser utilizado en recipientes a elevadas presiones.

Se definió de acuerdo al estado del arte que la mejor opción para el tipo de camisa es la camisa con hoyuelos, debido a que esta configuración resiste altas presiones, además de su fácil construcción.

El material seleccionado para la camisa fue el acero inoxidable AISI 304 ya que el tanque estará expuesto a condiciones corrosivas durante su operación, además que al considerar un material inoxidable los espesores requeridos se reducirán al no correr el riesgo de tener una corrosión localizada.

El modelado 3D del tanque se llevó a cabo de forma paramétrica, para de este modo poder visualizar los distintos cambios del modelo durante la fase de diseño, del mismo modo al utilizar un software de diseño como Autodesk Inventor permitió que la elaboración de los planos de conjunto y de taller sea más simple.

Durante la instalación y pruebas de funcionamiento se observó un funcionamiento adecuado de todos los sistemas del equipo, además que el control de temperatura es amigable con el usuario debido a su fácil configuración.

3.3 Recomendaciones

El método de diseño se basa en la transferencia de calor desde el vapor que se condensa en la camisa hacia el agua contenida en el tanque, sin embargo, para obtener un modelo más preciso se puede considerar las pérdidas de calor por radiación desde la camisa hacia los exteriores, analizando de esta forma dos frentes de transferencia de calor, adicionalmente se puede mejorar el modelo si se considera el cambio en el flujo de calor conforme la temperatura del agua en el tanque interno se incrementa en lugar de establecer una temperatura de calentamiento media.

Durante el dimensionamiento inicial del tanque, este se realiza en función del tipo de agitador a utilizar, por lo que el modelo está condicionado a ciertas semejanzas, para analizar más opciones se puede considerar varios tipos de agitadores y analizar el efecto que estos generan en transferencia de calor.

El diseño del tanque se limita por el flujo másico de vapor disponible, sin embargo, al ser un equipo experimental se puede analizar el efecto en la transferencia de calor cuando este flujo varía en un determinado rango o incluso analizar los cambios que se tendrían al reducir la presión de saturación del vapor.

En el cálculo de espesores de la camisa y el tanque interno se utiliza el código ASME lo cual da una certeza de los valores obtenidos, sin embargo, se podría simular el comportamiento de la doble camisa y del tanque interno cuando estos son sometidos a las presiones externa e interna respectivamente.

Una vez que se lleven a cabo los experimentos en el tanque se puede realizar las correcciones necesarias en el modelo matemático de este proyecto, con el fin de optimizar los cálculos y poder obtener una referencia para futuros diseños de equipos similares.

El suministro de agua al serpentín puede ser mejorado, utilizando tubería de PVC o acero en lugar de mangueras plásticas, ya que la temperatura de salida del agua puede dañar las mismas.

Se recomienda realizar la experimentación del equipo en un rango de 40 °C a 80 °C, ya que en este rango los valores de temperatura se estabilizan.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSONDAHLEN. (13 de Febrero de 2022). *JACKETED VESSELS FOR ALL APPLICATIONS WITH FLEXIBILITY TO MEET THE MOST DEMANDING DESIGN*.

Obtenido de <https://andersondahlen.com>

ARCONEL. (2021). *ESTADÍSTICA ANUAL Y MULTIANUAL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO 2021*. Ecuador: ARCONEL.

Armstrong. (2015). Guía para la Conservación de Vapor en el Drenado de Condensados. *Armstrong International, Inc.* , 31-33.

ASME. (2013). *Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section II - Materials*. The American Society of Mechanical Engineers.

Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. México: McGraw-Hill.

Giudici, A., & Julio, M. (2015). RECIPIENTES DE PRESIÓN. En *Compendio de Cálculo Estructural II* (págs. 371-397). Buenos Aires: FCEFyN.

Incropera, F., & Bergman, T. (2011). *Introduction to heat transfer*. Jefferson City: John Wiley & Sons, Inc.

indiamart. (12 de Febrero de 2019). *Limpet Coil Mixing Tank*. Obtenido de <https://www.indiamart.com>

JORDANVALVE. (12 de Enero de 2022). *Control de temperatura de vapor de tanques encamisados*. Obtenido de <https://www.jordanvalve.com>

LA FABRIL. (15 de Marzo de 2019). *LA FABRIL PONE EN FUNCIONAMIENTO NUEVO SISTEMA DE ENERGÍA RENOVABLE*. Obtenido de <https://www.lafabril.com.ec/>

MACPACK. (14 de Mayo de 2016). *Tanque de mezcla de doble camisa*. Obtenido de <https://www.macpackmachineries.com>

Massa, J., & Giudici, A. (2015). Recipientes de presión. En J. Massa, *Compendio de Cálculo Estructural II* (págs. 371-381). Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.

MDLIQ. (5 de Marzo de 2020). *Tipos de chaquetas para recipientes de reacción*. Obtenido de <https://chemicalengineeringworld.com>

Patidar, L. (23 de Abril de 2016). *T-v diagram of water*. Obtenido de <https://www.quora.com>

Rolón, H., & Acevedo, C. (2019). Análisis térmico, modelamiento matemático y simulación de un reactor de agitación discontinuo para volumen específico. *UIS Ingenierías*, 39-48.

ROYAL WELDING & FABRICATING. (16 de Enero de 2022). *Dimple Jackets*. Obtenido de <https://www.royalwelding.com>

Texas Education Agency. (13 de Mayo de 2007). *Phase Change and Latent Heat*. Obtenido de <https://www.texasgateway.org>

TVL CO. (8 de Enero de 2022). *Aplicaciones principales para el vapor*. Obtenido de <https://www.tlv.com>

Uhl, V., & Gray, J. (2005). Agitation. En *APPLICATIONS OF TRANSPORT PHENOMENA* (págs. 359-399). New York: Academic Press.

UNAM. (13 de Octubre de 2014). *Tanques y recipientes*. Obtenido de <https://amyd.quimica.unam.mx>

Watcotanks. (5 de Julio de 2022). *Tanques encamisados*. Obtenido de <https://www.watcopumps.com>

5 ANEXOS

ANEXO I. Planos de conjunto y de taller.

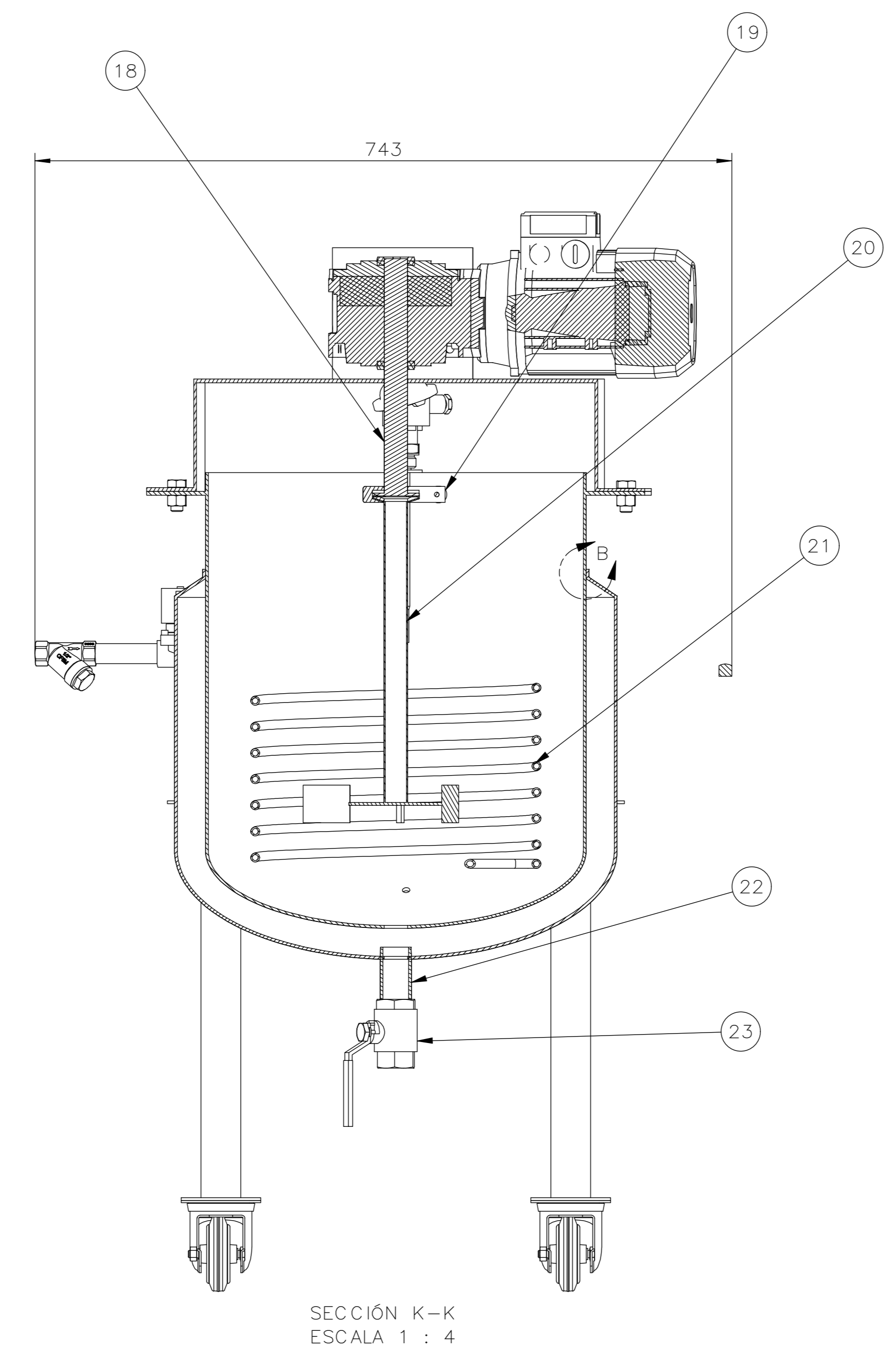
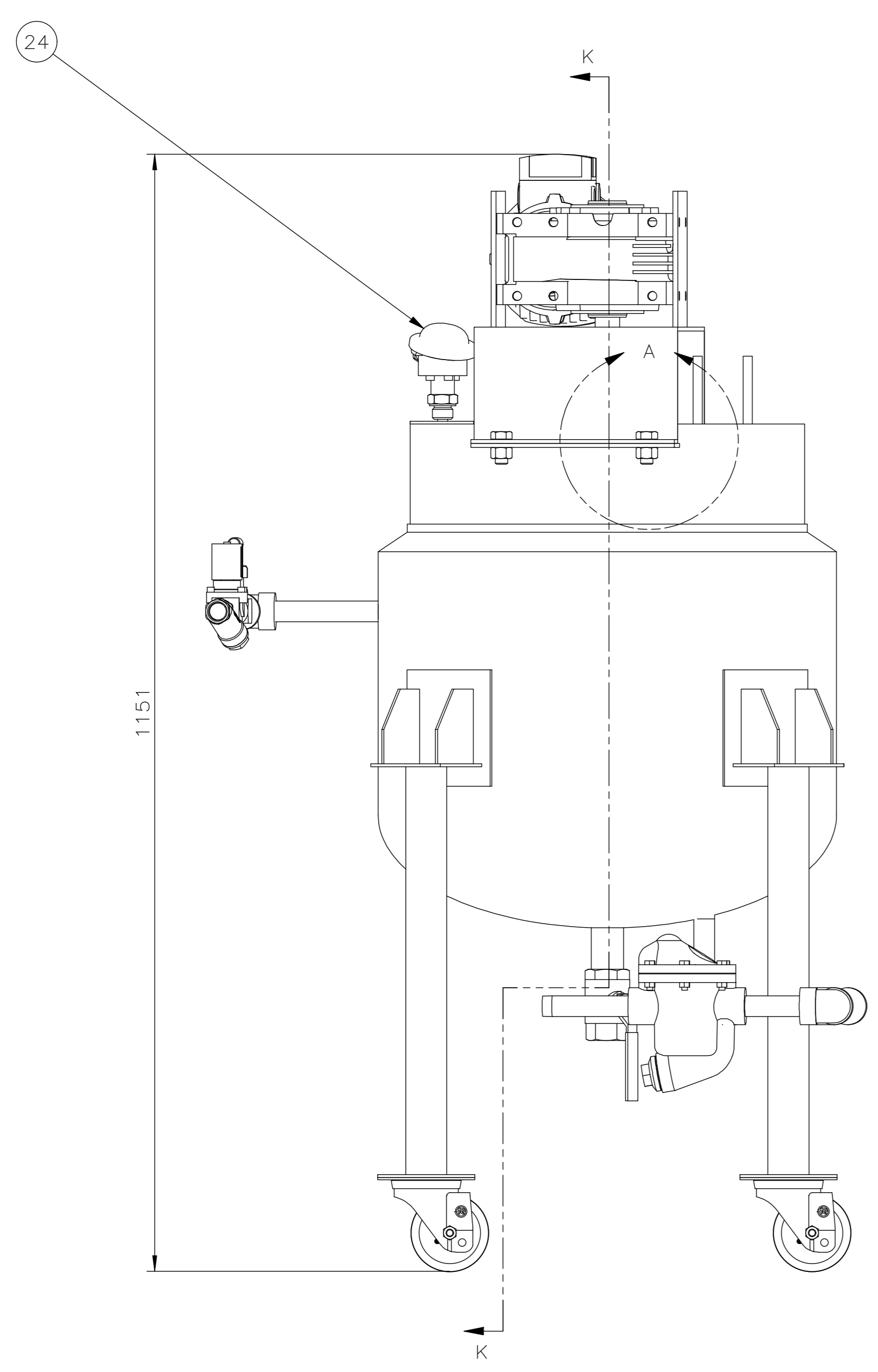
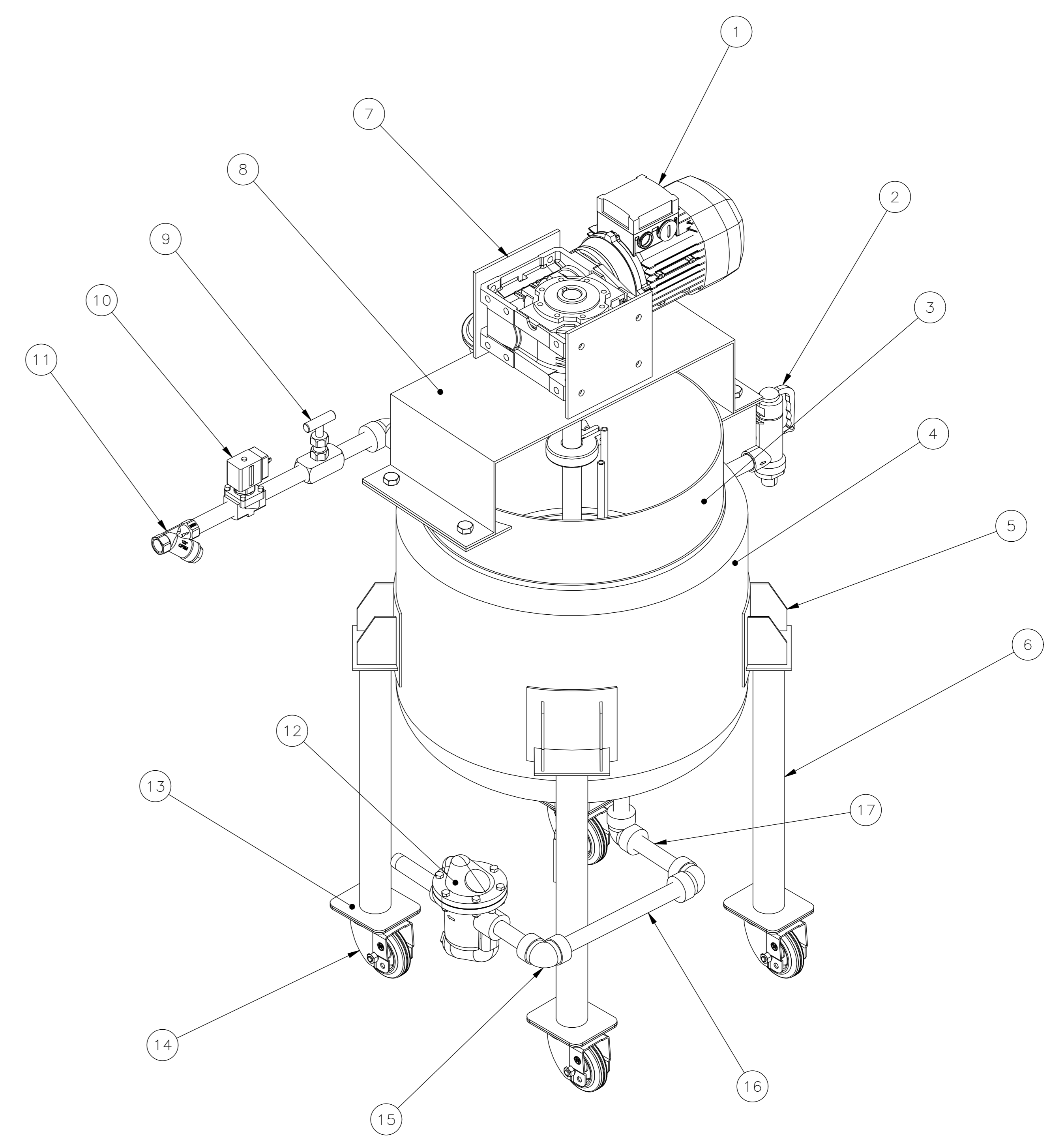
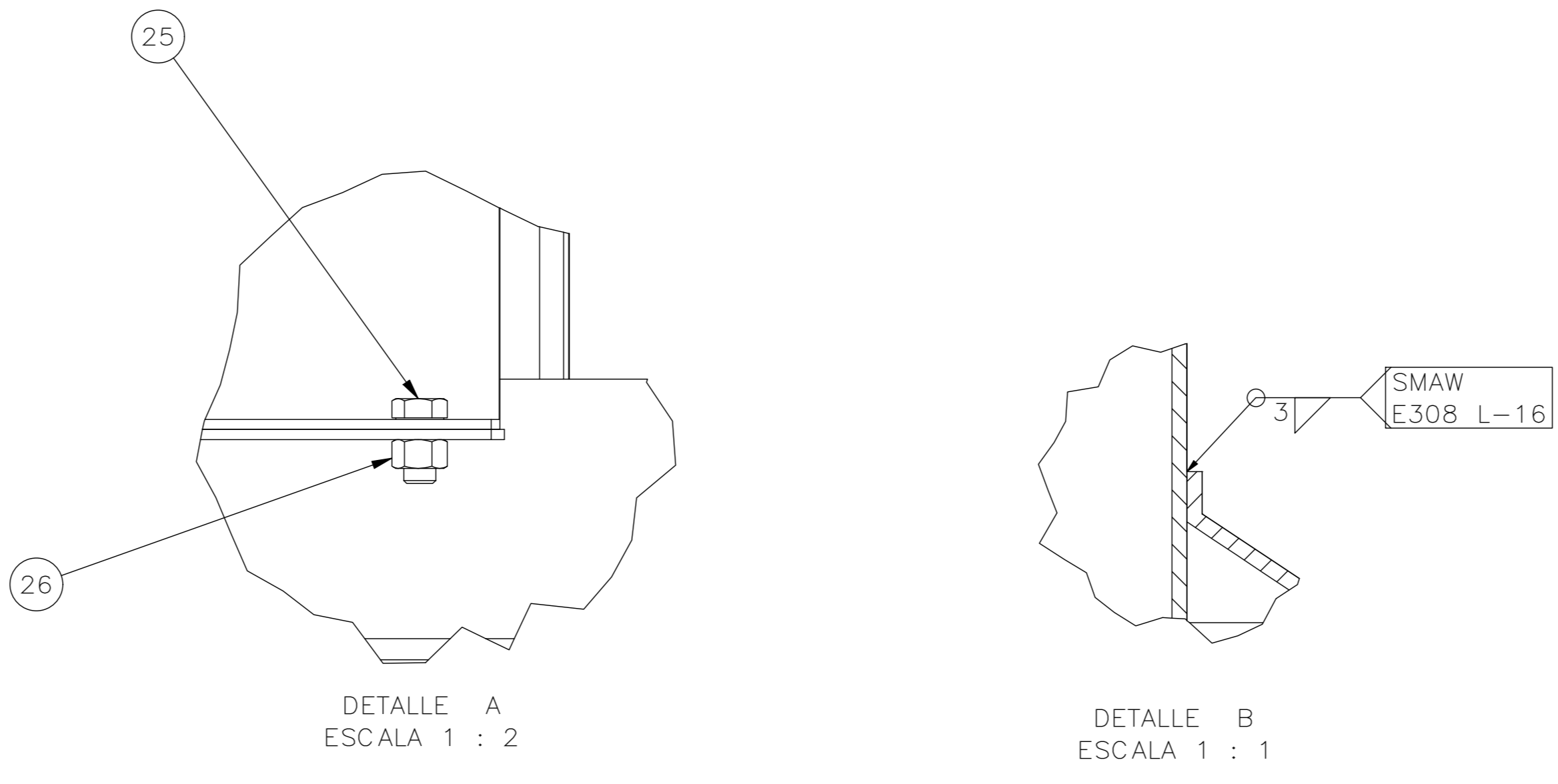
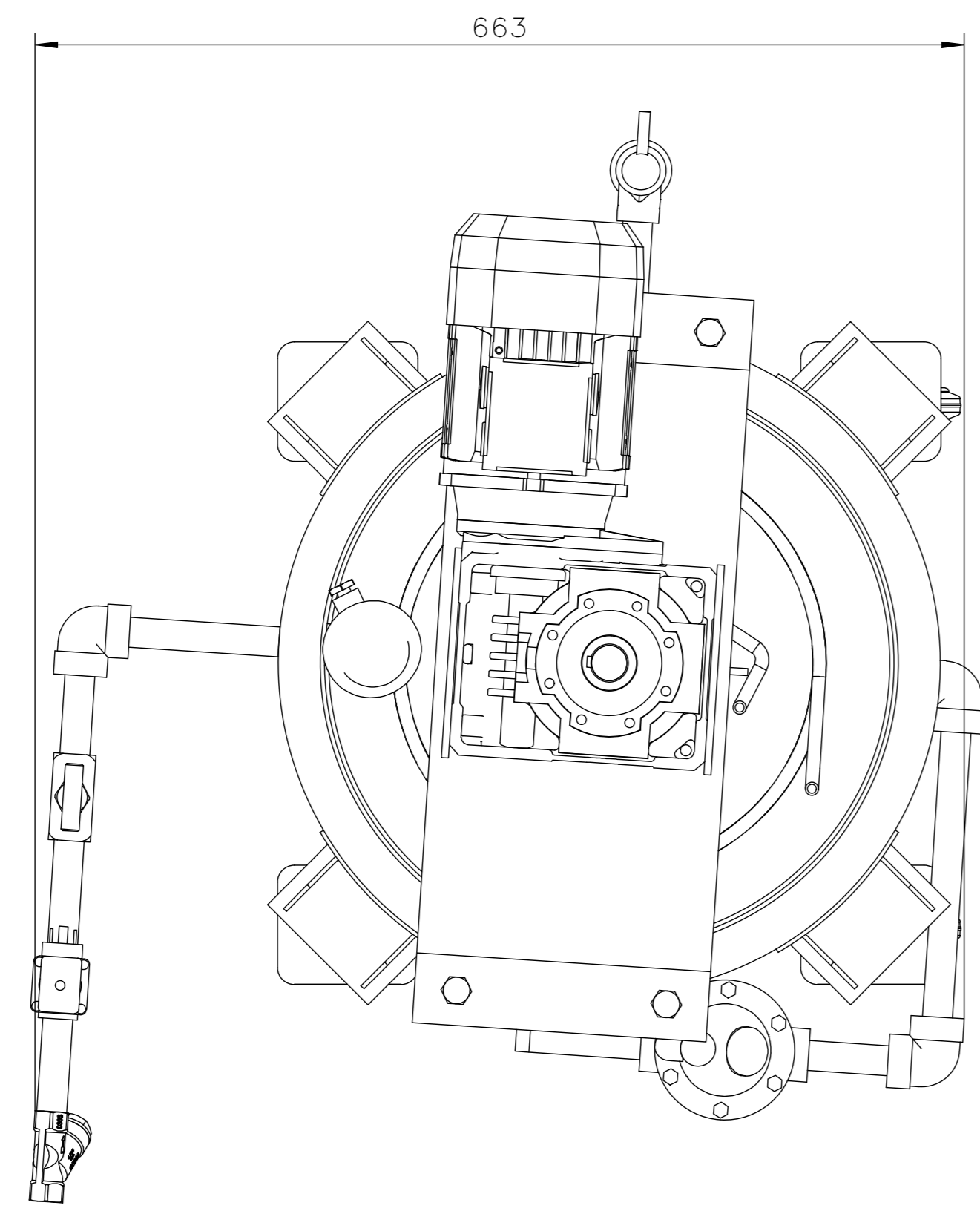
ANEXO II. Enlace al video de funcionamiento del equipo.

ANEXO III. Costos del equipo.

ANEXO IV. Construcción e instalación del equipo.

ANEXO I: Planos de conjunto y de taller

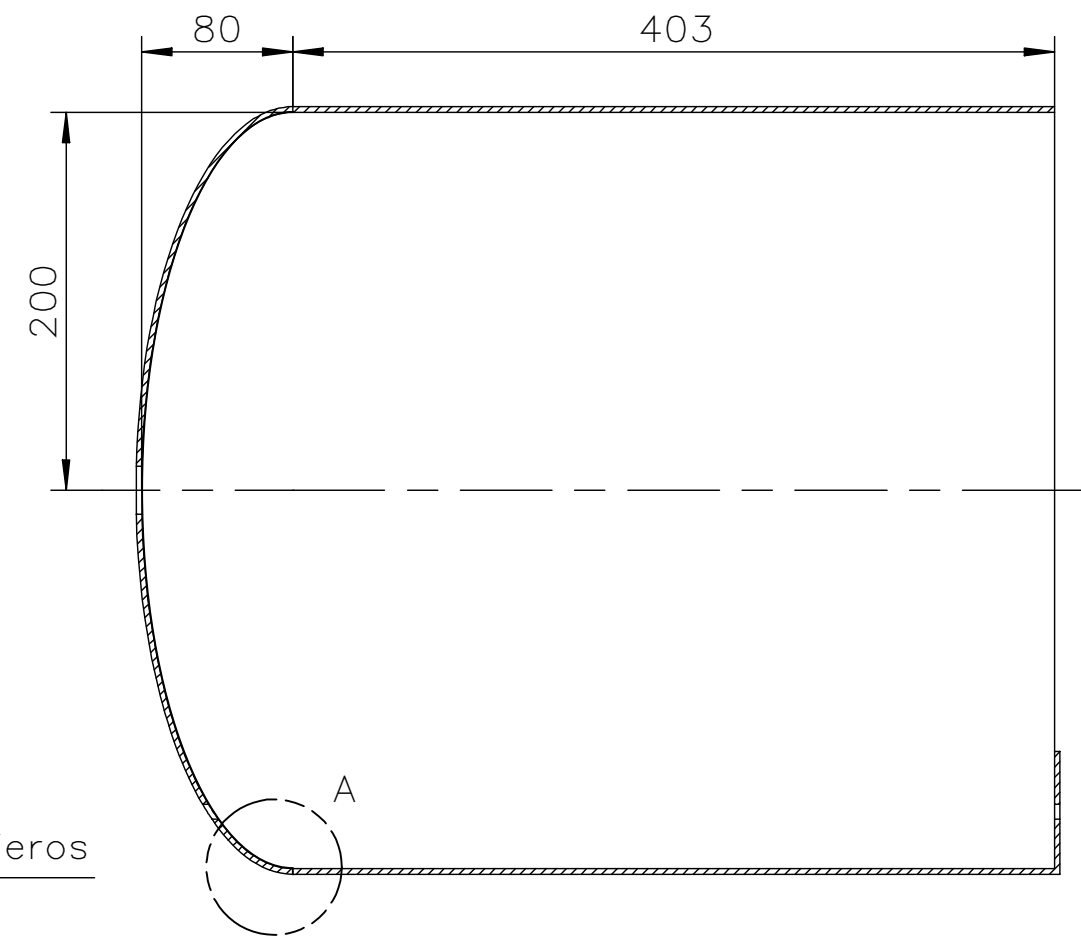
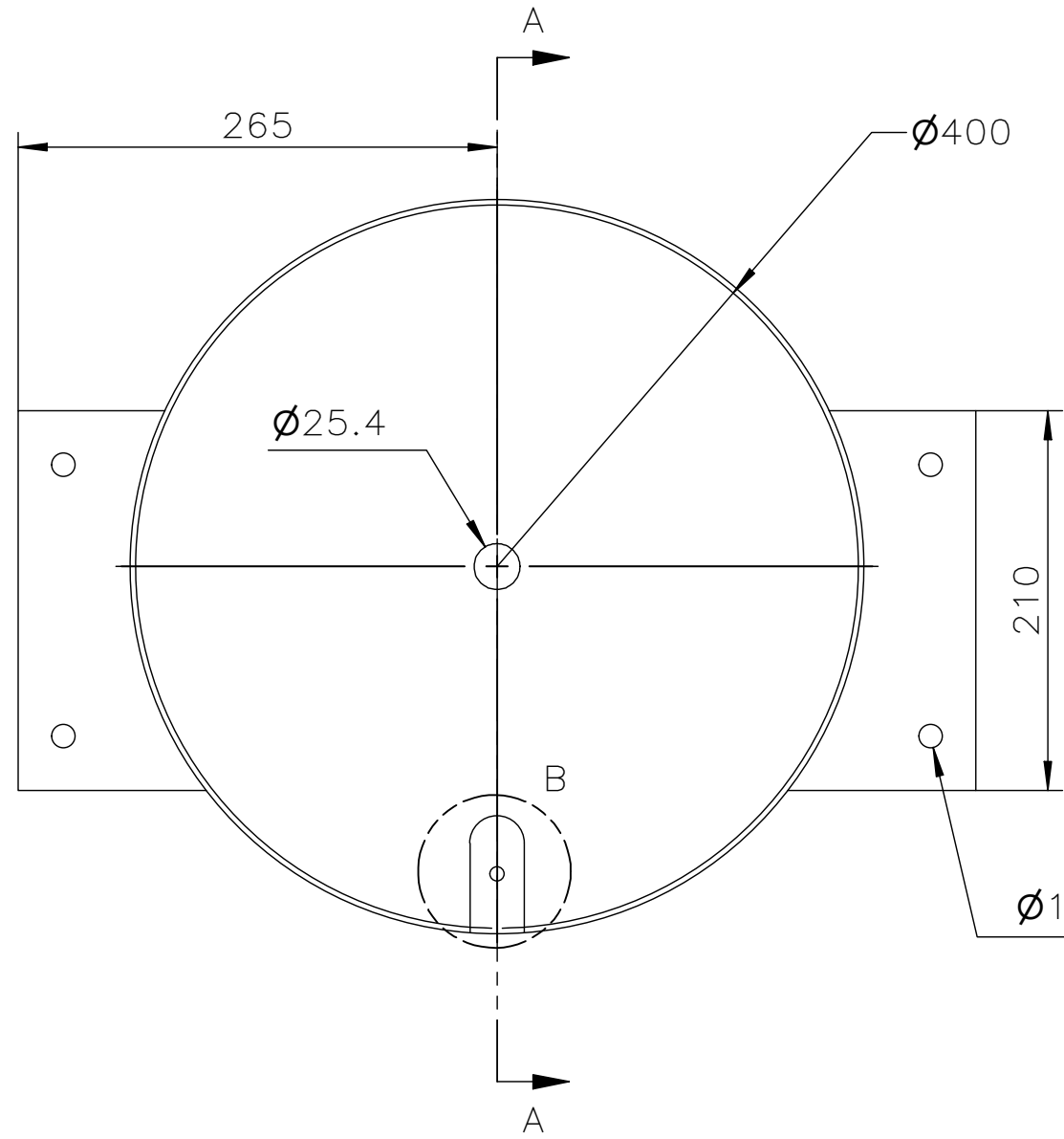
Los planos de conjunto y de taller del componente se muestran a continuación:



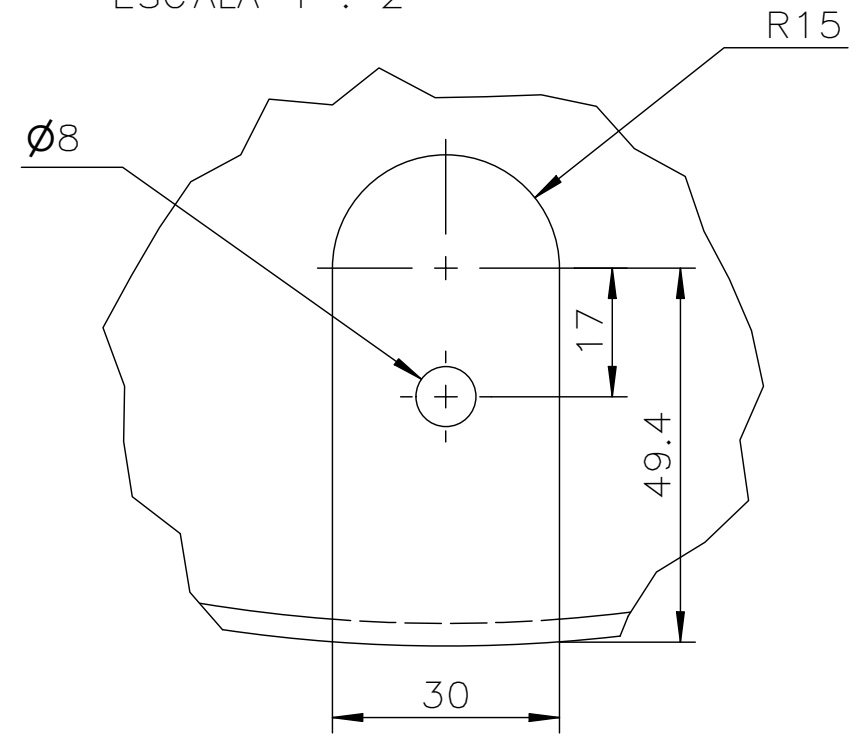
23	J8	VALVULA DE BOLA	ASME B36.10M-ASME B16.11	1	ACERO GALVANIZADO	ø 1 in
26	C7	TUERCA HEXAGONAL	ANSI B18.6.3	4	ASTM A325	AS 2485 - Pulgadas 1/2 UNC:3
25	C7	PERNO DE CABEZA HEXAGONAL	ANSI B18.6.3	4	ASTM A325	AS 2485 - Pulgadas 1/2 x 1 UNC:3
24	H4	SENSOR PT100	IEC 60751	1	VARIOS	
23	J8	VALVULA DE BOLA	ASME B36.10M-ASME B16.11	1	ACERO GALVANIZADO	ø 1 in
22	J8	TUBERIA DE SALIDA DEL PRODUCTO	ASME B36.10M-ASME B16.11	1	ACERO ASTM A106	ø 1/2 in Long.: 15 cm
21	I8	SERPENTIN	TEM:001-110	1	COBRE	
20	I8	AGITADOR DE TIPO TURBINA	TEM:001-109	1	ACERO AISI 304	
19	H8	ACOPLE DE EJES	DIN 6885/1	1	ACERO AISI 304	
18	G8	EJE DEL MOTOREDUCTOR	TEM:001-108	1	ACERO AISI 304	
17	E14	Tuberia 2	ø1/2 in ASME B36.10M-ASME B16.11	8	ACERO ASTM A106	Largo de 15 cm
16	F14	Tuberia 1	ø1/2 in ASME B36.10M-ASME B16.11	1	ACERO ASTM A106	Largo de 27 cm
15	F14	CODO DE 90°	ø1/2 in ASME B16.3	4	ACERO ASTM A106	
14	F13	RUEDA	DIN-934 M-B	4	VARIOS	
13	F13	PLACA DE SOPORTE PARA RUEDAS	TEM:001-107	4	ACERO AISI 304	
12	E14	TRAMPA DE VAPOR DE BALDE INVERTIDO	ASTM A182 F22	1	FUNDICIÓN GRIS	
11	D12	FILTRO DE VAPOR	ASME-ASF-H4 1/2 FW	1	ACERO INOXIDABLE	
10	C13	VALVULA DE CONTROL	ASME (EV220B)	1	LATÓN	Presión Móx.: 24.1 bar
9	C13	VÁLVULA DE AGUJA	NACE MR-0175	1	ACERO INOXIDABLE SS316	
8	C14	SOPORTE DEL MOTOREDUCTOR	TEM:001-106	1	ACERO AISI 304	
7	C14	PLACA LATERAL DEL MOTOREDUCTOR	TEM:001-105	2	ACERO AISI 304	
6	E15	SOPORTE DE TUBO	TEM:001-104	4	ACERO AISI 304	
5	D15	SOPORTE DE OREJETAS	TEM:001-103	4	ACERO AISI 304	
4	D14	TANQUE EXTERNO	TEM:001-102	1	ACERO AISI 304	
3	D14	TANQUE INTERNO	TEM:001-101	1	ACERO AISI 304	
2	C15	VÁLVULA DE SEGURIDAD	S10-L (NPT)	1	BRONCE	
1	B14	MOTOR WEG 1/4 HP	NEMA-IEC-60 Hz	1	VARIOS	

N° ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO Y/O NORMA	CANT.	MATERIAL	OBSERVACIÓN
EPN FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA TANQUE AGITADOR DE DOBLE CAMISA Y SERPENTÍN					Escala: 1:4 Fecha: 07-08-22

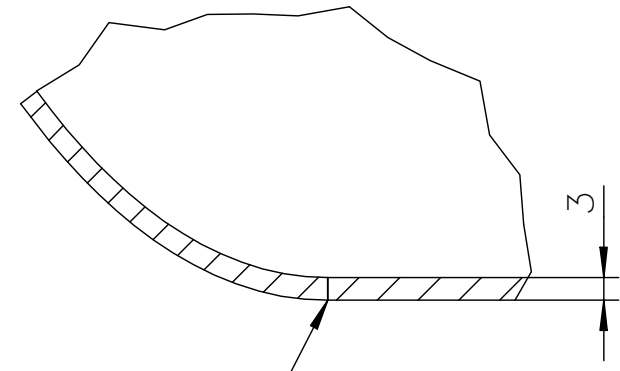
SECCIÓN A-A



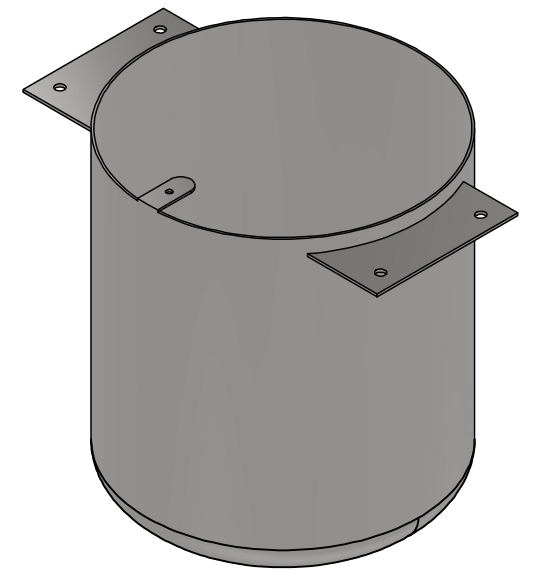
DETALLE B
ESCALA 1 : 2



DETALLE A
ESCALA 1 : 1

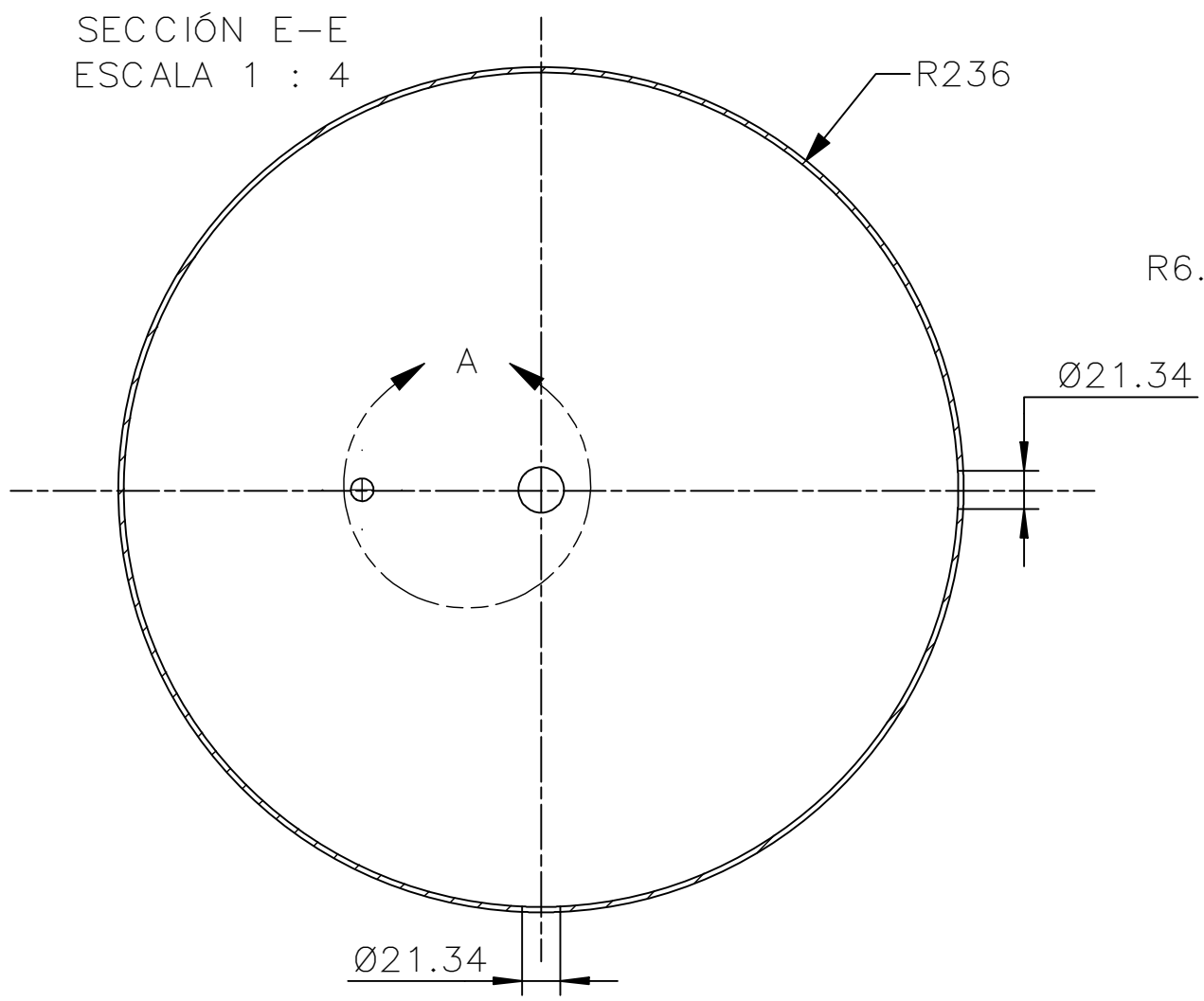


TIG
E308 L-16 (3)

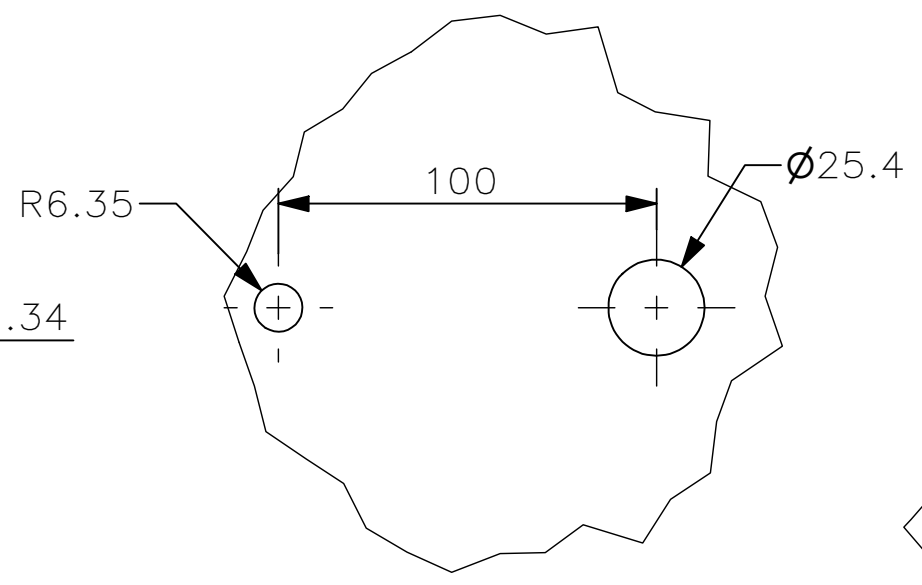


Trat. Térmico:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA				
Recubrimiento:	Ninguno		Dib.	Jeremias Calo			
MATERIAL:	ACERO AISI 304	Tol. Gral.	± 0.1	Escala:	1:4	Dis.	Jeremias Calo
				Rev.	Ing. José Palacios		
TANQUE INTERNO				TEM:001-101	Fecha:	29-05-22	

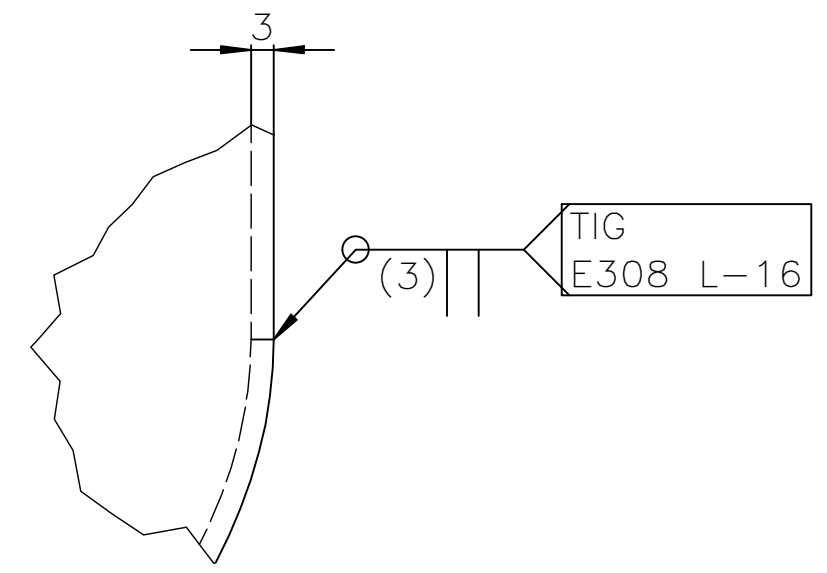
SECCIÓN E-E
ESCALA 1 : 4



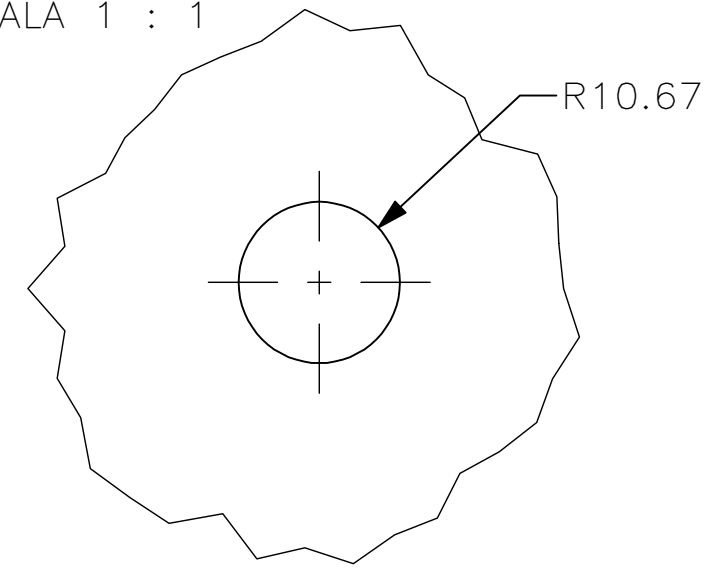
DETALLE A
ESCALA 1 : 2



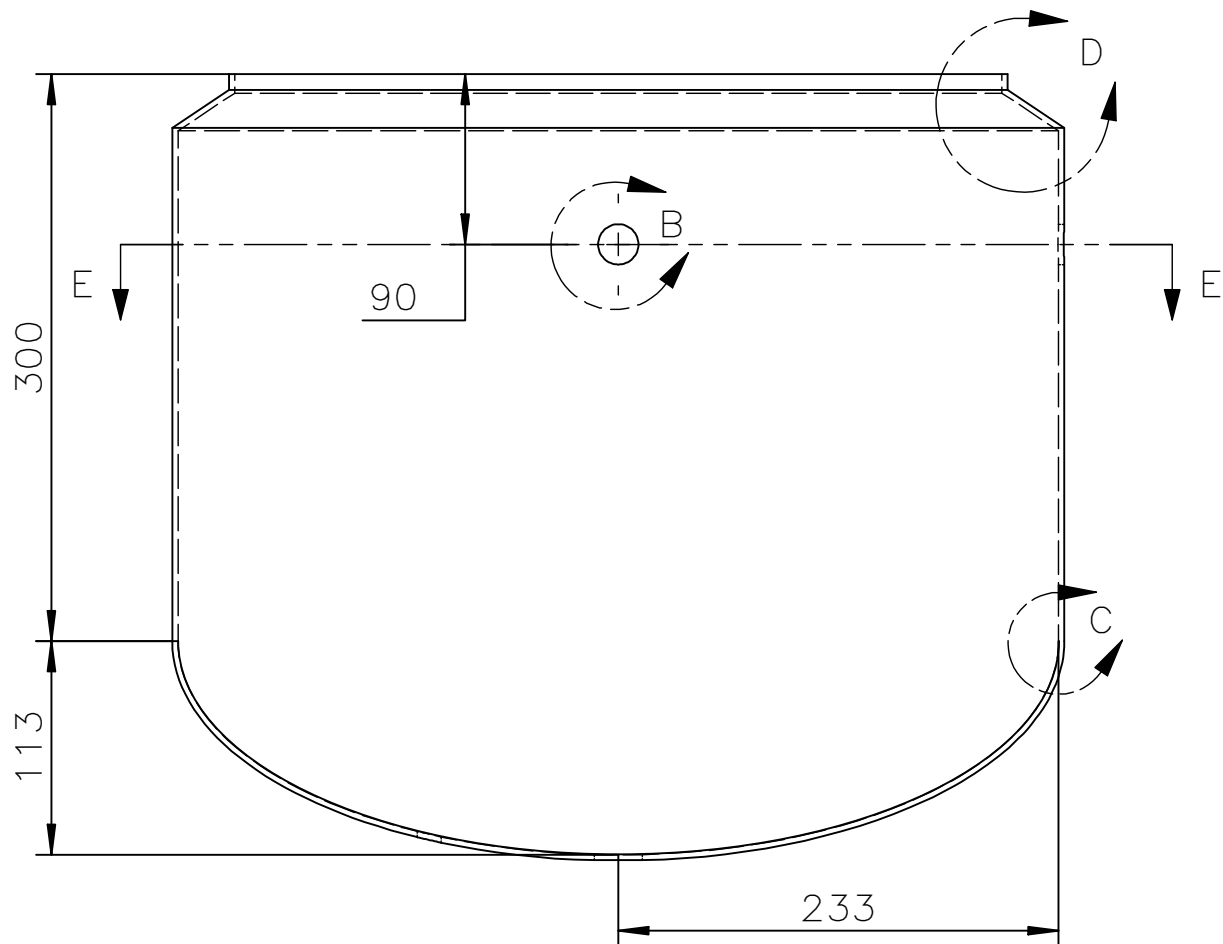
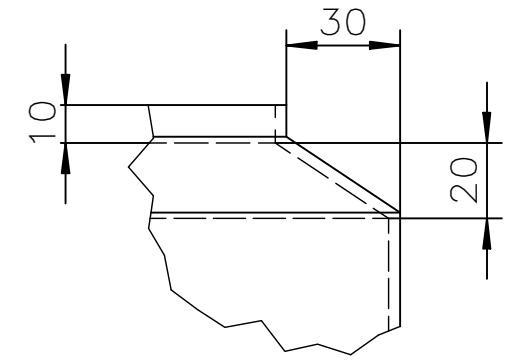
DETALLE C
ESCALA 1 : 1



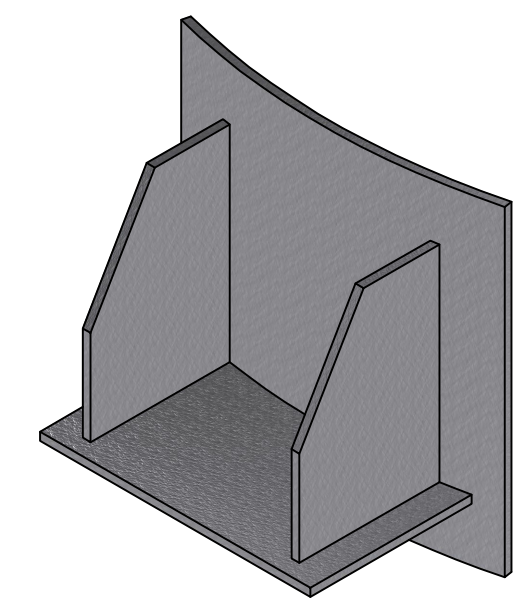
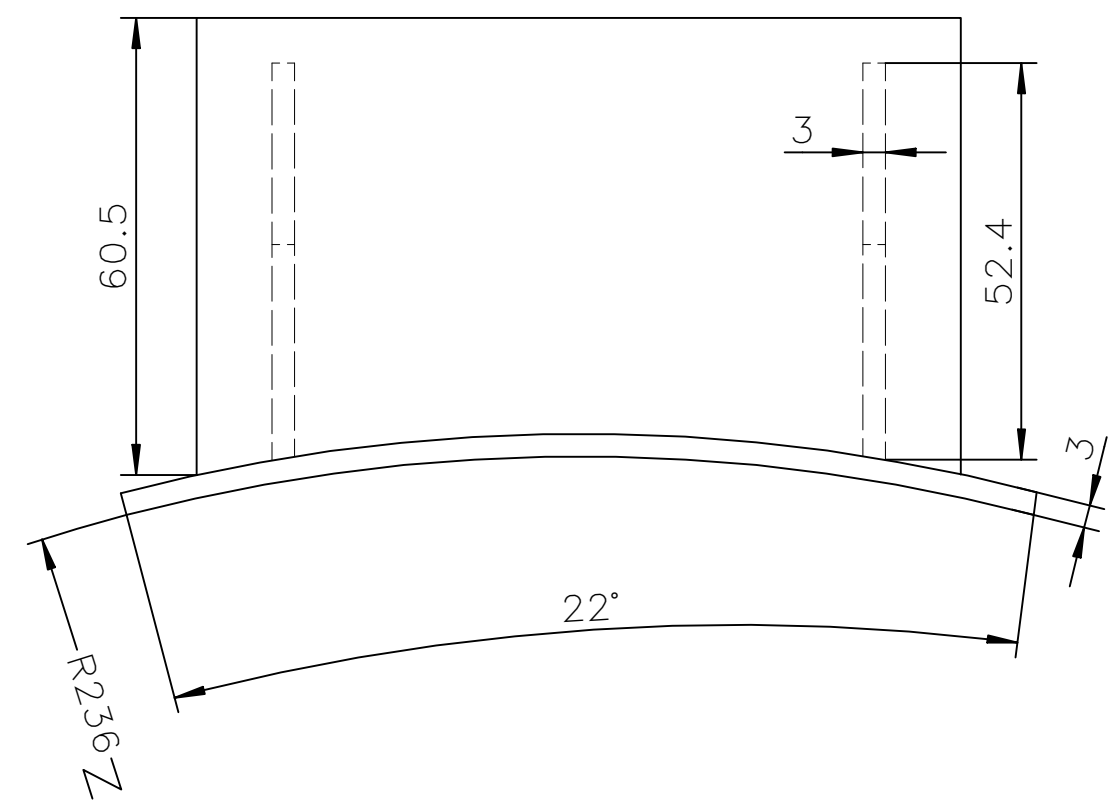
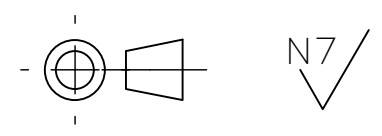
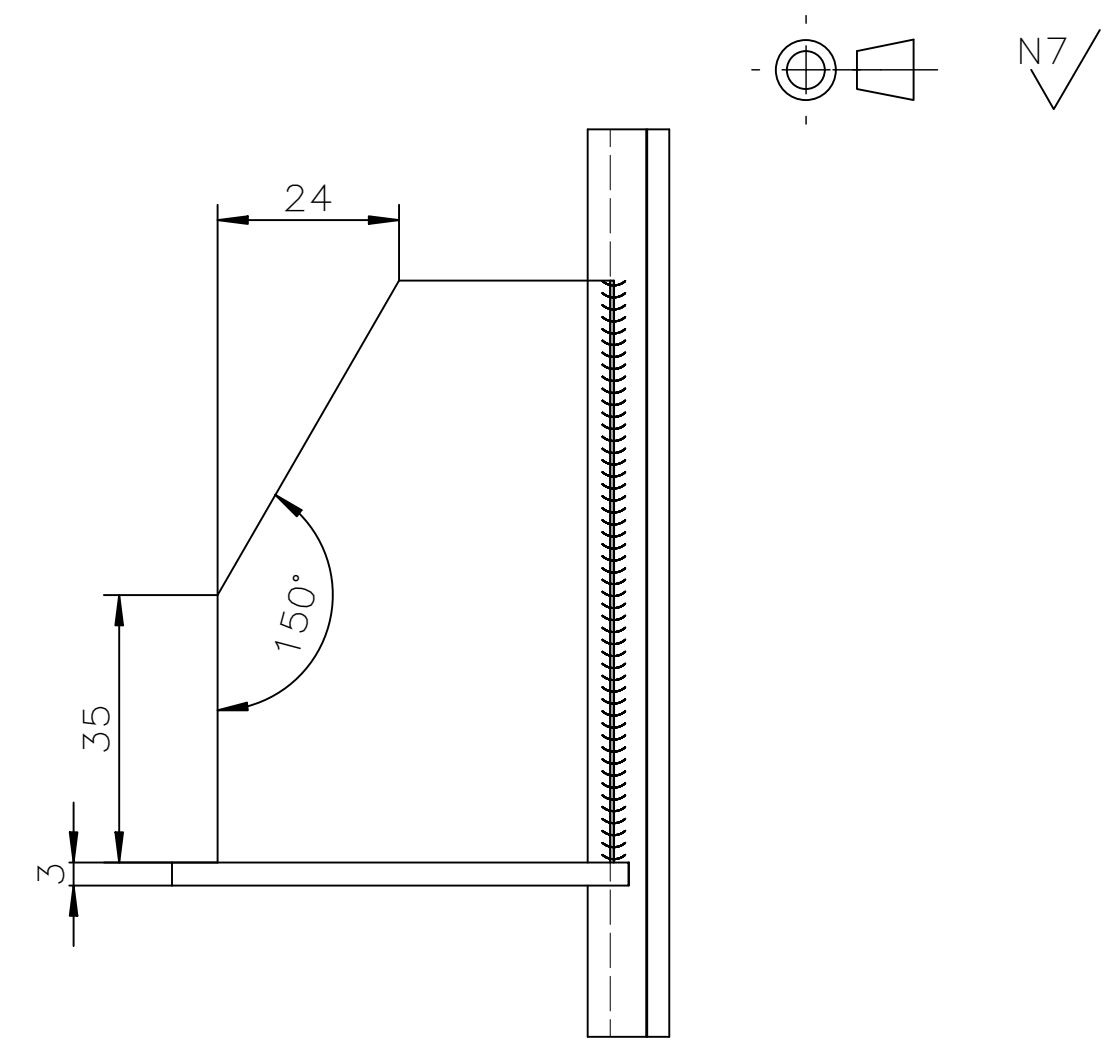
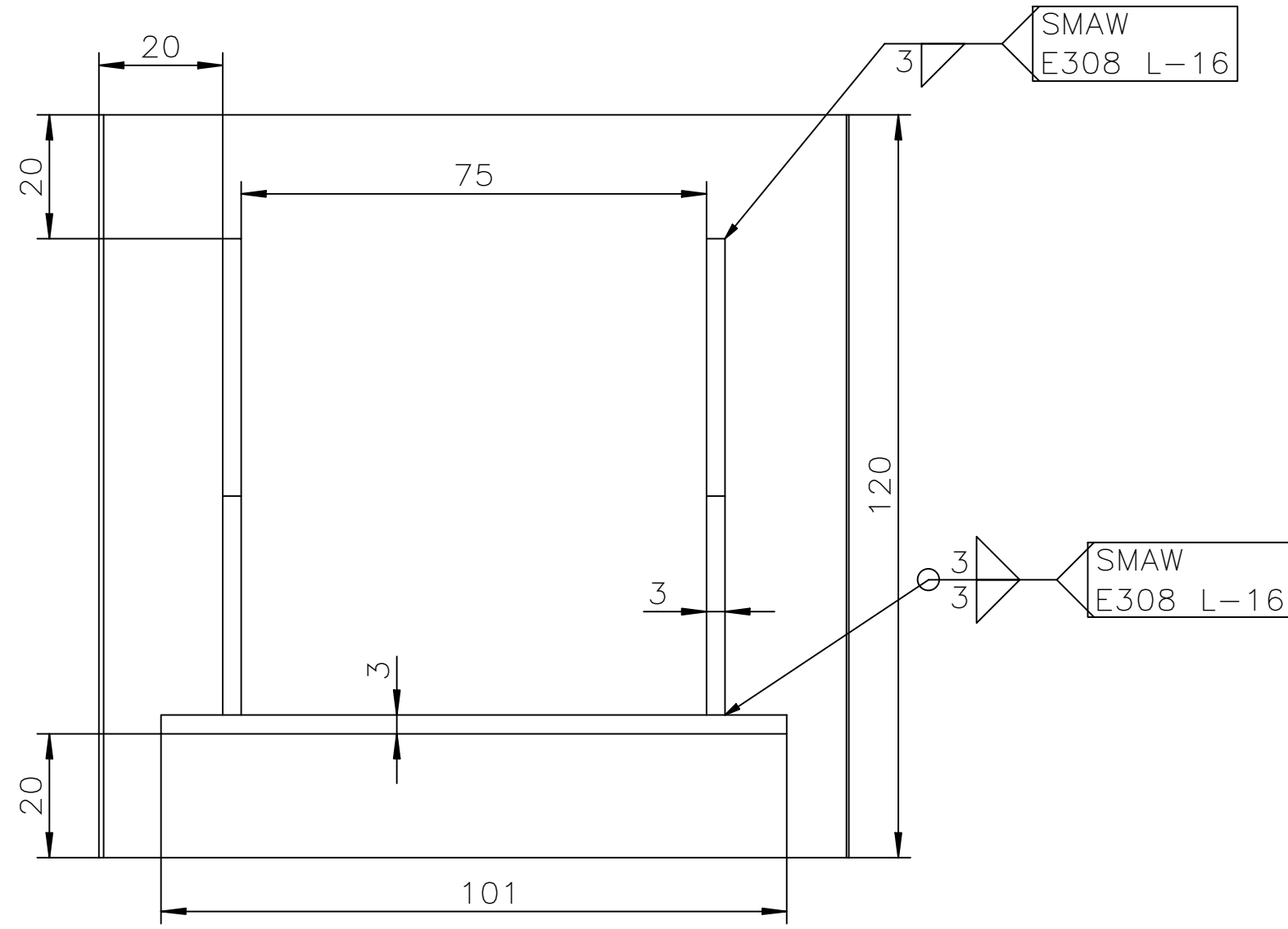
DETALLE B
ESCALA 1 : 1



DETALLE D
ESCALA 1 : 2

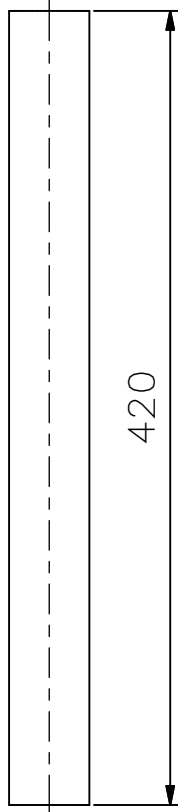
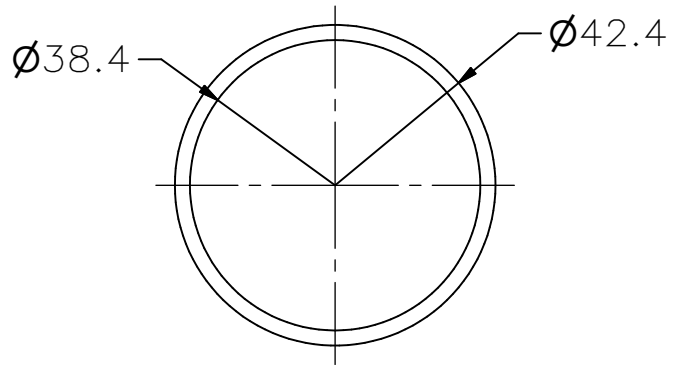
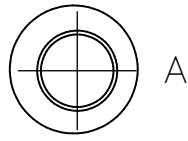


Trat. Térmico:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
Recubrimiento:	Ninguno		Dib.	Jeremias Calo
MATERIAL: ACERO AISI 304	Tol. Gral. ± 0.01	Escala:	Dis.	Jeremias Calo
		1:4	Rev.	Ing. José Palacios
		TANQUE EXTERNO		TEM:001-102

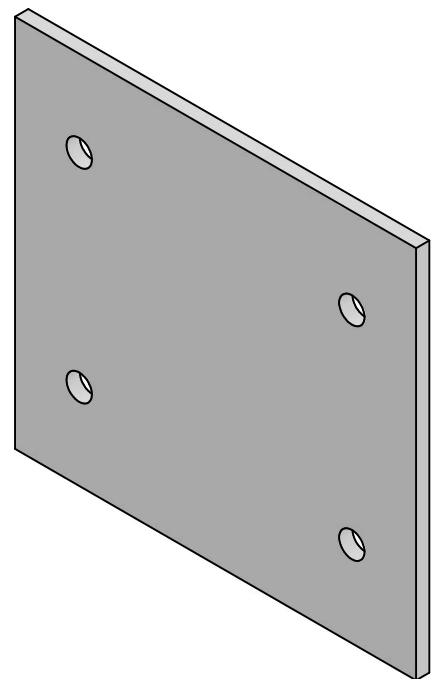
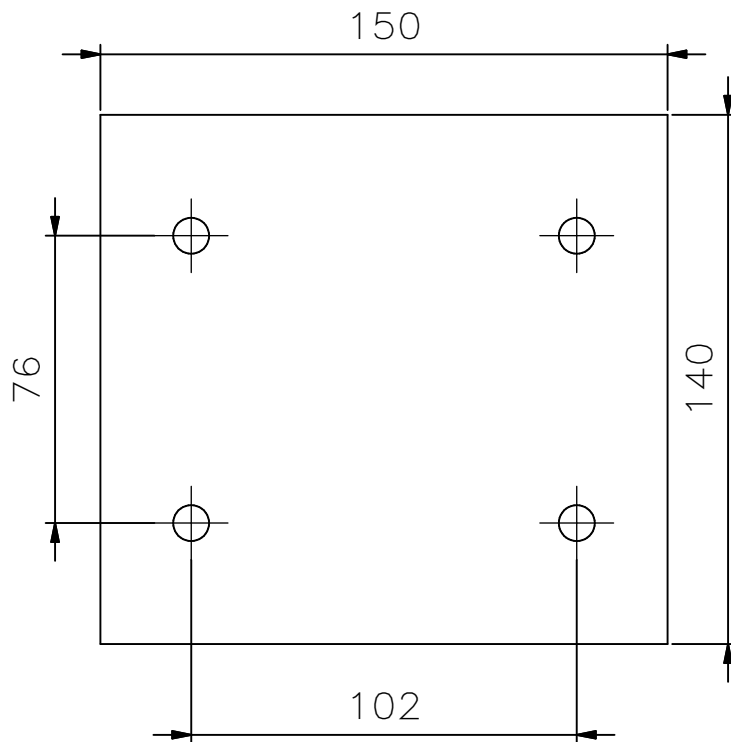
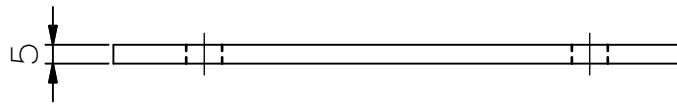


Trat. Térmico:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
Recubrimiento:	Ninguno		Dib.	Jeremias Calo	
MATERIAL:	ACERO AISI 304	Tol. Gral. ± 0.1	Escala:	Dis.	Jeremias Calo
			1:1	Rev.	Ing. José Palacios
SOPORTE DE OREJETAS		TEM:001-103		Fecha: 25-05-22	

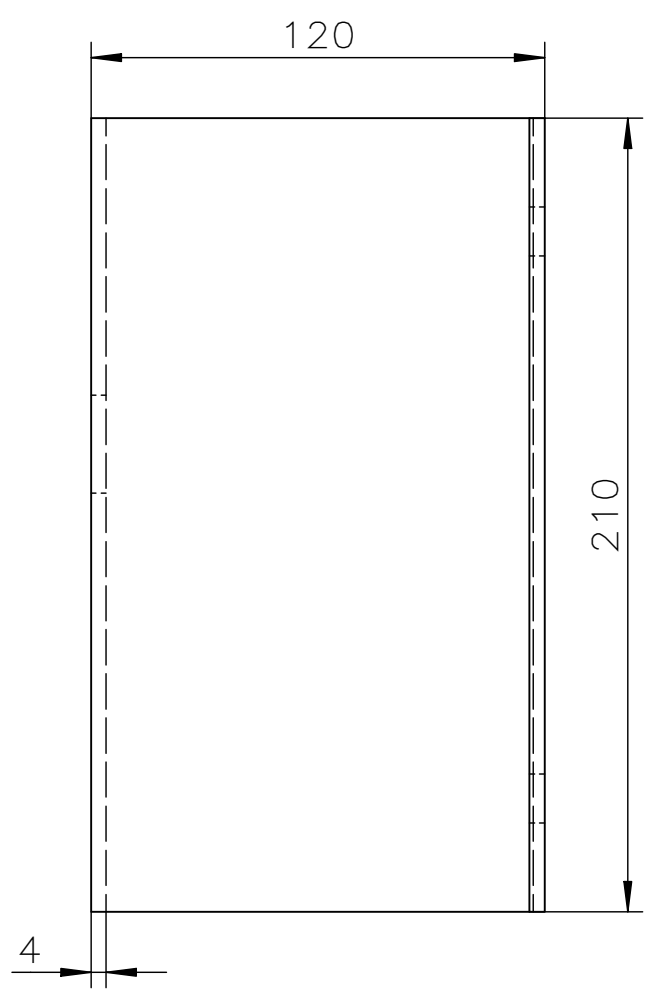
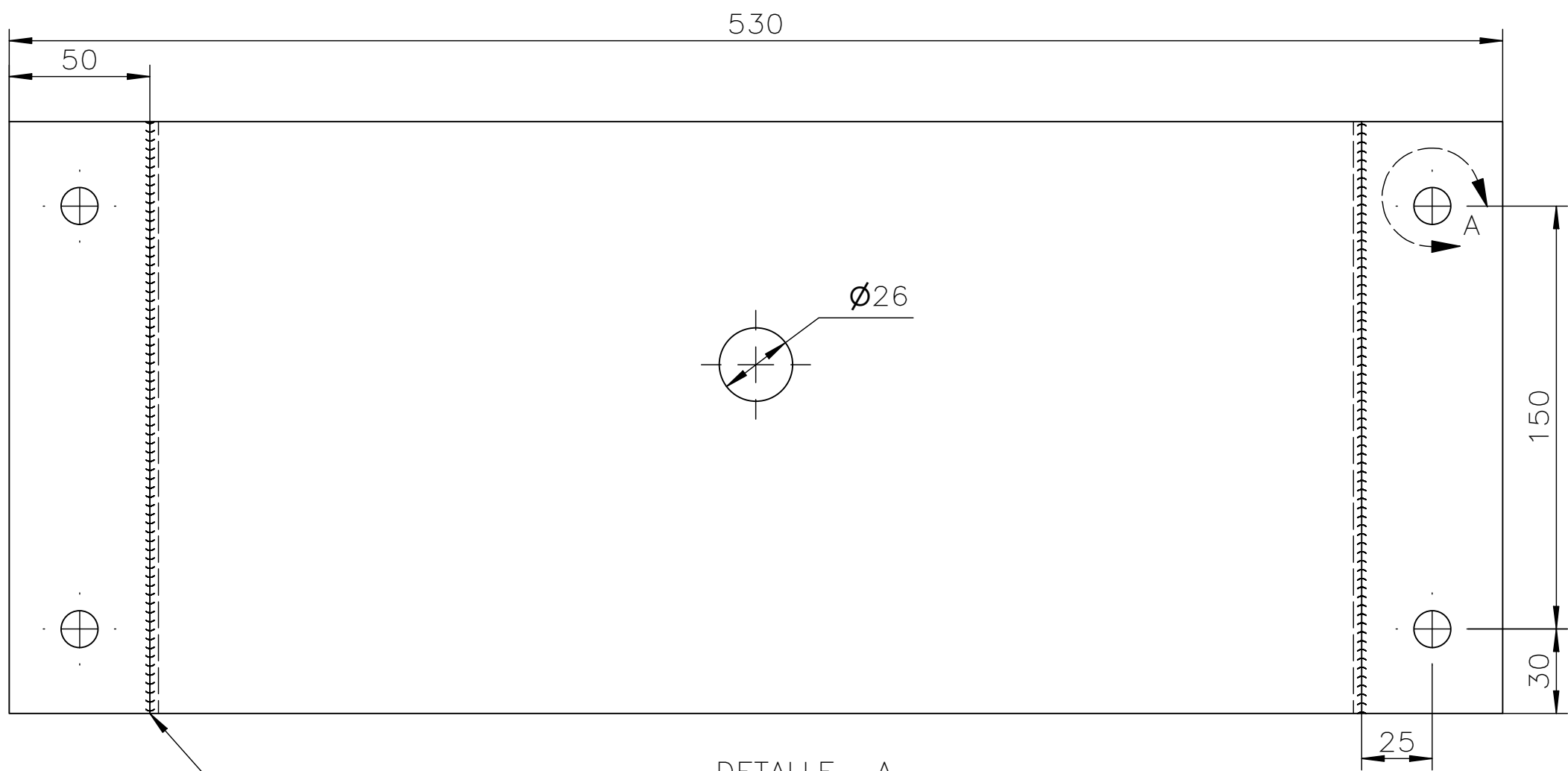
DETALLE A
 ESCALA: 1 : 1



Trat. Térmico:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
Recubrimiento:	Ninguno		Dib.	Jeremias Calo	
MATERIAL:	ACERO AISI 304	Tol. Gral. 0.1	Escala:	Dis.	Jeremias Calo
			1:4	Rev.	Ing. José Palacios
SOPORTE DE TUBO		TEM:001-104		Fecha: 08-08-22	

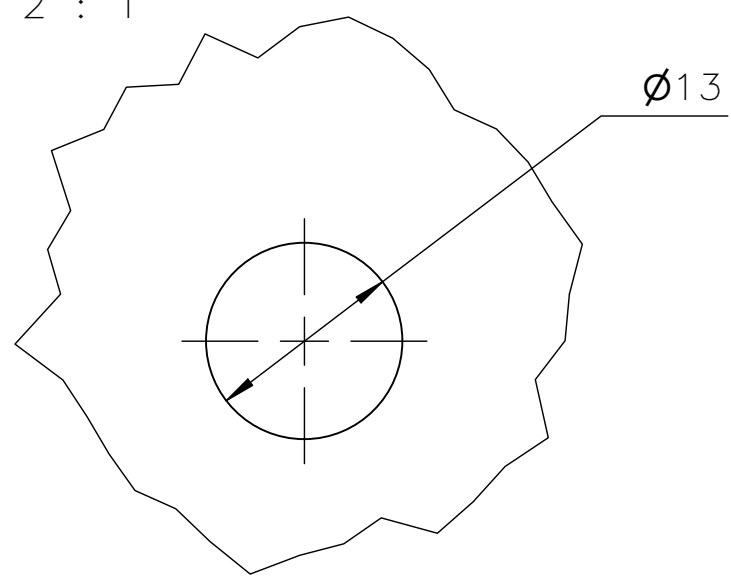
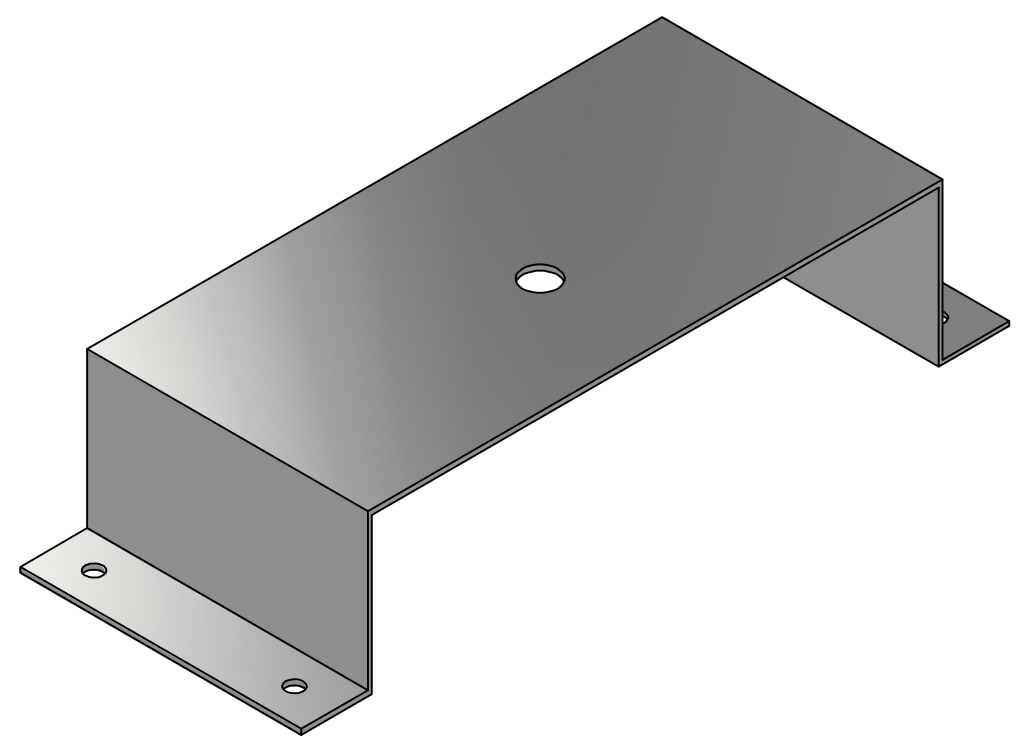


Trat. Térmico:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
Recubrimiento:	Ninguno		Dib.	Jeremias Calo	
MATERIAL:	ACERO AISI 304	Tol. Gral. ±1	Escala:	Dis.	Jeremias Calo
			1:2	Rev.	Ing. José Palacios
PLACA LATERAL DEL MOTOREDUCTOR		TEM:001-105		Fecha: 08-08-22	



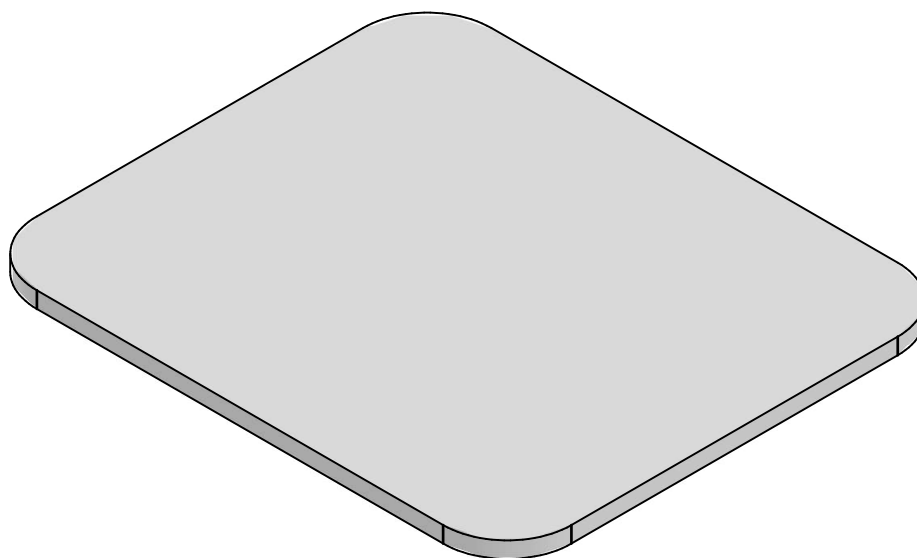
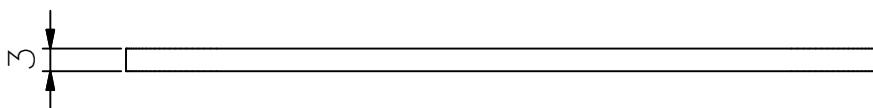
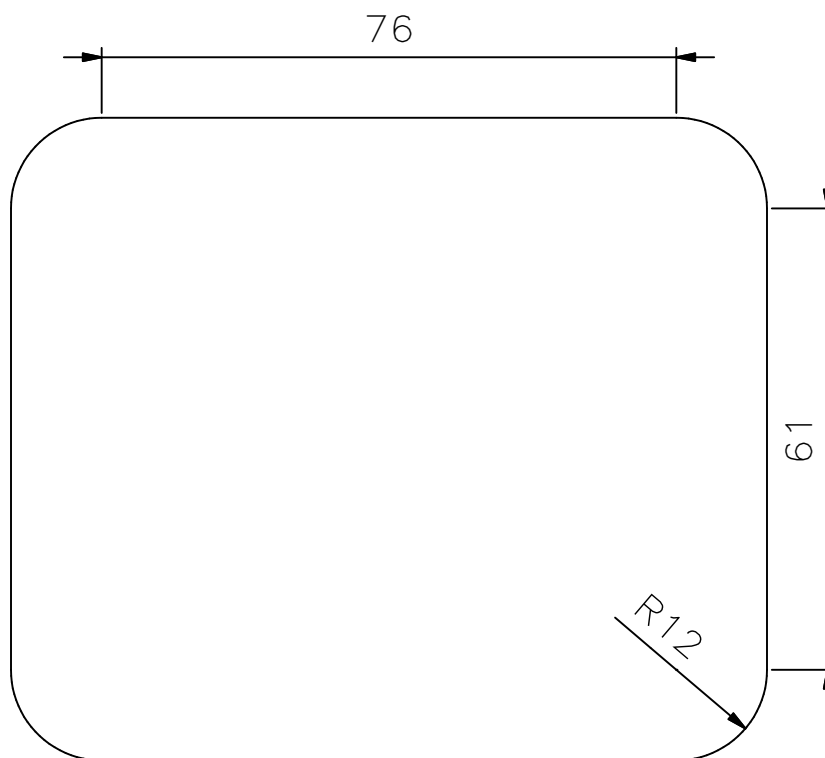
DETALLE A
ESCALA 2 : 1

3
TIG
E308 L-16



Trat. Térmico:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
Recubrimiento:	Ninguno		Dib.	Jeremias Calo	
MATERIAL:	ACERO AISI 304	Tol. Gral. ± 1	Escala:	Dis.	Jeremias Calo
			1:2	Rev.	Ing. José Palacios
				SOPORTE DEL MOTOREDUCTOR	
			TEM:001-106		

N7



Trat. Térmico:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
Recubrimiento:	Ninguno		Dib.	Jeremias Calo	
MATERIAL:	ACERO AISI 304	Tol. Gral. ±1	Escala:	Dis.	Jeremias Calo
			1:1	Rev.	Ing. José Palacios
PLACA DE SOPORTE PARA RUEDAS		TEM:001-107		Fecha: 08-08-22	

ANEXO II: Enlace al video del funcionamiento del equipo

El funcionamiento del equipo se muestra en los videos del siguiente enlace:

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/jeremias_caloe@epn.edu.ec/EjGM0q98R2hIrVy52jE1sglBpDhBlq_c2tOTsDI_CdKTqA?e=Feefkc

ANEXO III: Costos del equipo

Construcción de la marmita:

MARMITA					
Cant.	Detalle	Características	Valor unitario	Valor neto	Valor total
1	Plancha normal	Acero inoxidable AISI 304 3mm	\$ 280,00	\$ 280,00	\$ 313,60
1	Plancha normal	Acero inoxidable AISI 304 2mm	\$ 204,00	\$ 204,00	\$ 228,48
1	Tubo cuadrado	Acero inoxidable AISI 304 2"x1/16"	\$ 66,90	\$ 66,90	\$ 74,93
1	Conformado y barolado	INOX 3mm	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 112,00
1	Pupearo de chaqueta	INOX 2mm	\$ 48,00	\$ 48,00	\$ 53,76
1	Consumibles	- Argón 6m3, aporte electrodo ER308L 3/32". - Material de corte y desbaste. - Material de limpieza y pulido.	\$ 180,00	\$ 180,00	\$ 201,60
3	Garruchas	2" de diámetro	\$ 5,80	\$ 17,40	\$ 19,49
1	Accesorios de tubería	Acero inoxidable AISI 304	\$ 45,00	\$ 45,00	\$ 50,40
1	Mano de obra		\$ 200,00	\$ 200,00	\$ 200,00
				TOTAL	\$ 1.254,26

Motoreductor y serpentín:

MOTOREDUCTOR Y SERPENTÍN					
Cant.	Detalle	Características	Valor unitario	Valor neto	Valor total
1	Motoreductor	1/4 HP, 60 RPM, 110 VAC	\$ 285,00	\$ 285,00	\$ 319,20
8	Metro de cañería	Cobre 3/8"	\$ 6,37	\$ 50,96	\$ 57,08
1	Material para agitadores	Acero inoxidable AISI 304	\$ 97,97	\$ 97,97	\$ 109,73
1	Mano de obra		\$ 80,00	\$ 80,00	\$ 89,60
				TOTAL	\$ 575,60

Señales de temperatura:

SEÑALES DE TEMPERATURA					
Cant.	Detalle	Características	Valor unitario	Valor neto	Valor total
4	Control EMKO	Salida ON/OFF	\$ 45,00	\$ 180,00	\$ 201,60
4	Termocupla	Tipo K con tornillo M8	\$ 10,17	\$ 40,68	\$ 45,56
1	Material adicional	Accesorios para conexión	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 33,60
				TOTAL	\$ 280,76

Material para automatización:

MATERIAL PARA LA AUTOMATIZACIÓN							
Detalle	Tipo	Espesor/ NPS	Cantidad	Precio unitario	Precio total	IVA	Total
Rtd	3 hilos	6x10 mm	1	\$ 51,03	\$ 51,03	\$ 6,12	\$ 57,15
Control	EMKO	Salida ON/OFF	1	\$ 45,00	\$ 45,00	\$ 5,40	\$ 50,40
Electroválvula	Vapor bobina 110 V	1/2"	1	\$ 125,00	\$ 125,00	\$ 15,00	\$ 140,00
Válvula de aguja	Vapor inox	1/2"	1	\$ 90,00	\$ 90,00	\$ 10,80	\$ 100,80
Filtro en Y	Vapor inox	1/2"	1	\$ 10,00	\$ 10,00	\$ 1,20	\$ 11,20
Válvula	Media vuelta vapor inox	1"	1	\$ 13,00	\$ 13,00	\$ 1,56	\$ 14,56
Trampa de vapor	Cubeta invertida	1/2"	1	\$ 140,00	\$ 140,00	\$ 16,80	\$ 156,80
Termopozo	Inox		1	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 3,60	\$ 33,60
Gabinete plástico	40x30x18 cm		1	\$ 80,00	\$ 80,00	\$ 9,60	\$ 89,60
Breaker monofásico	10 Amp		1	\$ 14,00	\$ 14,00	\$ 1,68	\$ 15,68
Selector	2 posiciones on/off		2	\$ 20,00	\$ 40,00	\$ 4,80	\$ 44,80
Relé con base	Bobina 110 V		1	\$ 16,00	\$ 16,00	\$ 1,92	\$ 17,92
Luz piloto	Verde		2	\$ 8,00	\$ 16,00	\$ 1,92	\$ 17,92
Material eléctrico adicional			1	\$ 40,00	\$ 40,00	\$ 4,80	\$ 44,80
Válvula de alivio 1/2"	Cobre		1	\$ 50,00	\$ 50,00	\$ 6,00	\$ 56,00
Contactador para agitador	7 Amp		1	\$ 10,20	\$ 10,20	\$ 1,22	\$ 11,42
Borneras	15 borneras		1	\$ 8,00	\$ 8,00	\$ 0,96	\$ 8,96
Mano de obra			1	\$ 116,07	\$ 116,07	\$ 13,93	\$ 130,00
TOTAL					\$ 894,30	\$ 107,32	\$1.001,62

Costo total:

PRESUPUESTO	
Rubro	Valor
Marmita	\$1.254,26
Motoreductor y serpentín	\$ 575,60
Señales de temperatura	\$ 280,76
Material para la automatización	\$1.001,62
TOTAL	\$3.112,24

ANEXO IV: Construcción e instalación del equipo



Figura 1, anexo IV. Instalación de la tubería en la doble camisa.
Fuente: (propia)



Figura 2, anexo IV. Instalación del Motoreductor.
Fuente: (propia)



Figura 3, anexo IV. Instalación de termopares del equipo.
Fuente: (propia)



Figura 4, anexo IV. Conexión de termopares al sistema de control.
Fuente: (propia)



Figura 5, anexo IV. Prueba del sistema de control.
Fuente: (propia)