



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**“DISEÑO MECÁNICO DE PLANTA PILOTO DE
TRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS ORGÁNICOS”**

Autor:

Guzmán Ferreira, Bienchis Smaylin

Tutor:

Pérez Elvira, Sara Isabel

Departamento de Ingeniería

Química y Tecnología del

Medio Ambiente

Valladolid, Julio 2015.

SARA ISABEL PÉREZ ELVIRA, profesor/a del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid

INFORMA:

Que Bienchis Smaylin Guzmán Ferreira ha realizado bajo su dirección el Trabajo Fin de Máster titulado **Diseño Mecánico de Planta Piloto de Tratamiento Térmico de Residuos Orgánicos**.

Valladolid, 3 de *JULIO* de 2015

Fdo. Sara Isabel Pérez Elvira

Reunido el Tribunal designado por el Comité Académico del Master en Ingeniería Ambiental, para la evaluación de Trabajos Fin de Master, y después de estudiar la memoria y atender a la defensa del trabajo “***DISEÑO MECÁNICO DE PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS ORGÁNICOS***”, presentado por el alumno Bienchis Smaylin Guzmán Ferreira, decidió otorgarle la calificación de _____.

Valladolid, 13 de Julio de 2015

El Presidente

El Secretario

Fdo.:

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	6
2. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRETRATAMIENTO	7
3. OBJETIVOS	8
3.1. Objetivo General:	8
3.2. Objetivos Específicos:.....	8
4. DIAGRAMA INICIAL DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS ORGÁNICOS	9
5. MARCO TEÓRICO.....	10
5.1. Bases de diseño	10
5.2. Normativas de Aplicación.....	11
5.3. Material Seleccionado.....	12
6. METODOLOGÍA DE DISEÑO, CÁLCULOS Y SELECCIÓN DE EQUIPOS	14
6.1. Reactor	14
6.1.1. Carga de condensado generada en el reactor.....	22
6.1.2. Bridas	23
6.2. Tanque flash.....	27
6.3. Depósito	32
6.4. Tolva	33
6.5. Tuberías.....	34
6.6. Espesor de Aislamiento.....	39
6.7. Selección de válvulas	48
7. RESULTADOS.....	51
7.1. Tabla de Resultados Final	51
7.2. Diagrama Final.....	53
8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	56
9. ANEXOS.....	58

I. RESUMEN

El objeto de este trabajo de fin de máster es realizar una propuesta de diseño de una planta prototipo para el pretratamiento de residuos orgánicos, con el fin de que en un futuro, pudiera ser llevada a cabo su construcción y funcionamiento en laboratorios correspondientes. Para dar cumplimiento a este objetivo, se toma como base principal de cálculos y análisis, la normativa de diseño de recipientes a presión (ASME), el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y el Real Decreto 1244/1979 del Ministerio de industria y energía, al igual que la selección del material, y las condiciones de funcionamiento de la planta piloto. Se pretende mostrar de forma esquemática y simple, el dimensionamiento en las diferentes condiciones de operación de cada uno de los componentes del sistema, por lo que en este documento se divide, para finalidad de cálculos de la estructura, en diferentes componentes: tolva de alimentación, reactor, tanque flash, depósito, sistema de tuberías, válvulas y aislamiento. Primeramente, en el trabajo, se describe el proceso de operación del sistema de tratamiento. Posteriormente, se muestran las bases de diseño, material seleccionado para su diseño, la normativa empleada y el procedimiento de cálculos. Todos los cálculos que se realizan en el trabajo están apoyados por el uso modelos de diseños mecánicos aplicados por diferentes autores, y los cuales son utilizados en la actualidad. Por último, se presentan los resultados obtenidos esquematizados para el fácil entendimiento del constructor. El enfoque del diseño es esencialmente mecánico, de igual manera, tiene en cuenta en todo momento, tanto las características generales de los residuos a tratar como los agentes involucrados en su operación.

2. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRETRATAMIENTO

La planta piloto que se pretende diseñar describe un conjunto de elementos que interconectados conforman un sistema de hidrólisis térmica en discontinuo utilizado para tratar residuos orgánicos. El sistema se alimenta con estos residuos que, al introducir vapor a una temperatura de aproximadamente 200-250 °C durante un tiempo determinado, se desintegran y se solubilizan para hacer un producto de fácil digestión.

El código ASME define como recipiente a presión, cualquier contenedor cerrado capaz de almacenar un fluido a presión manométrica, sea esta interna o externa, y los clasifica por su utilización (almacenamiento u operación) y forma (Cilíndricos o esféricos).

En el diseño se procura tener en cuenta los siguientes elementos: temperatura, presión, densidad de los residuos y del material, resistencia y propiedades del material seleccionado, espesor de equipos según normativa, espesor de aislamiento, selección de válvulas y tuberías.

El inicio del proceso se da en el reactor. A través de una tolva de alimentación se introduce la materia orgánica hasta llegar al reactor y mediante una tubería se inyecta vapor a una elevada temperatura para calentar los residuos y a su vez aumentar la presión del mismo. Siguiendo a esto, el segundo componente al que pasarán los residuos será al tanque flash donde la temperatura descenderá y por ende, también la presión, y donde los residuos ya tienen una menor densidad por desintegración. El tanque flash, el cual posee una abertura por la que escapa el vapor, en este caso, funciona como un sistema separador y distribuidor, es decir, separa el vapor del condensado restante. El vapor flash generado es el que se forma a partir del condensado caliente al reducirse la presión en el cambio de paso del fluido. Por último, pasará a un depósito abierto de recogida. En todo momento el paso del flujo a través de las tuberías será controlado manualmente a través de las válvulas.

En síntesis, el sistema se calienta a una alta temperatura y presión para romper las cadenas moleculares complejas, provocando así una mayor velocidad de reacción en la digestión posterior y dando como resultado beneficioso una mayor producción de biogás y una menor cantidad de residuos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General:

- Diseñar una planta prototipo para el tratamiento térmico de residuos orgánicos.

3.2. Objetivos Específicos:

- Calcular los parámetros de diseño y dimensionamiento de cada componente de la planta piloto de tratamiento térmico de residuos orgánicos.
- Aplicar la normativa al diseño de la planta piloto de tratamiento térmico de residuos para garantizar su posible construcción futura.
- Describir el proceso de cálculo para cada uno de los elementos del sistema de tratamiento.

4. DIAGRAMA INICIAL DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Antes de comenzar con los cálculos de la planta de tratamiento, se plantea como inicio un esquema básico representativo de lo que se pretende diseñar. A continuación se muestra el diagrama principal del sistema, teniendo en cuenta que, su diseño total será en acero inoxidable:

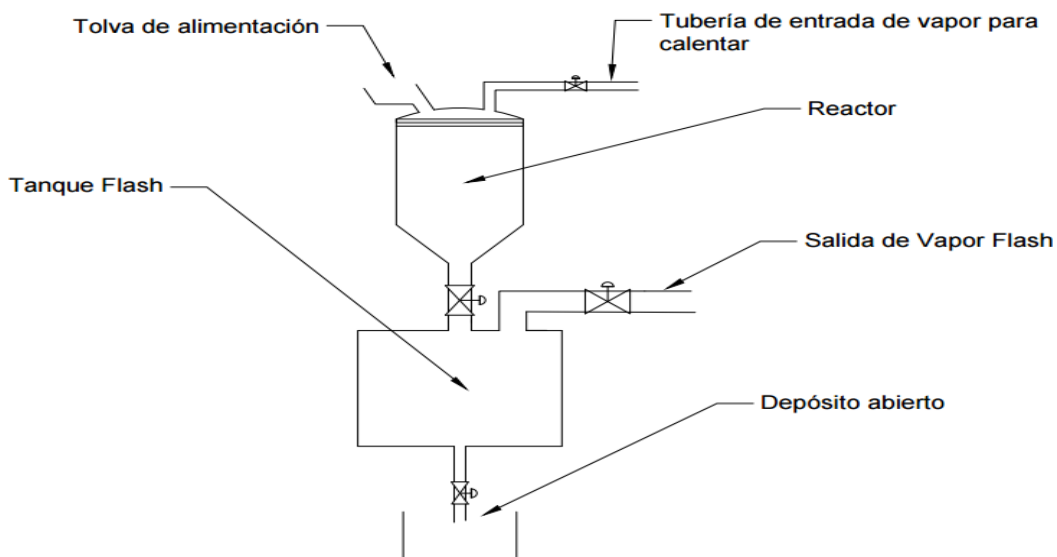


Ilustración 1. Esquemización para el diseño de planta de tratamiento de residuos orgánicos. Elaboración propia.

Cada componente requiere un análisis de cada uno de los elementos por individual. Como se observa en el diagrama, los componentes que conforman este sistema son: La tolva de alimentación, las tuberías de entrada de vapor de calentamiento, la tubería de salida del vapor flash, un reactor, un tanque flash, un depósito abierto de recogida, las tuberías que interconectan los elementos, y las válvulas. En resumen,

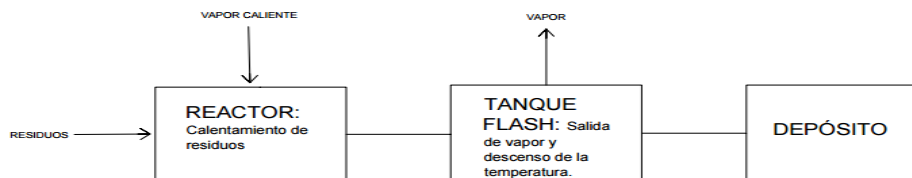


Ilustración 2. Resumen para diagrama de planta de tratamiento de residuos. Elaboración Propia.

El objetivo de esta representación gráfica inicial es plantear una idea general para poder observar con mayor claridad cada uno de los aspectos de forma jerárquica con los que se trabajará en todo el proceso del diseño.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Bases de diseño

La finalidad del trabajo es proyectar el diseño mecánico de una planta piloto de tratamiento de residuos. Para llegar a ese fin, se han tomado distintos parámetros y limitaciones para llevar a cabo cada uno de los cálculos que se requiere para la realización de un diseño óptimo y que pueda llegar a funcionar de manera eficiente.

Se ha considerado que el sistema trabaja en discontinuo, que su funcionamiento es exclusivamente manual, y que se diseñará para un material de acero inoxidable clasificado en la normativa ASME para recipientes a presión. En el cálculo del sistema tampoco se tendrá en cuenta temas de integración energética, y se considerará la inyección de vapor caliente al equipo.

Tabla 1. Bases para el inicio del diseño

<i>Temperatura de Operación</i>	200- 250	°C
<i>Presión de Operación</i>	20	bares
<i>Volumen de Residuos</i>	10	Litros
<i>Volumen de Reactor (Fondo cónico y Cilindro)</i>	20	Litros
<i>Densidad Máxima de los Residuos</i>	1150	Kg/m ³
<i>Densidad del acero inoxidable</i>	7900	kg/m ³

En esta tabla se muestra claramente los factores determinantes del diseño inicial de los equipos de sistema de tratamiento. La selección de la presión de diseño estará ligada a la presión de operación, a la presión hidrostática que ejerce el peso del fluido en estado de reposo y a un 15% de seguridad añadido por los modelos de cálculos. Por otra parte, se consideró la cantidad de residuos que queremos tratar para la planta piloto, y una densidad máxima de los mismos, para las que se construirá el sistema.

Los espesores mínimos de cada equipo están sujetos a la normativa de recipientes a presión, los cuales están establecidos para cálculos definidos por el material, la tensión máxima admisible del material, la presión de diseño, el diámetro, y la eficiencia de unión longitudinal de las partes.

Para el diseño del reactor, se consideró el fondo cónico para cálculo de espesores. La selección del fondo cónico se hizo porque se requiere una descarga total del fluido por la boquilla inferior optando a que quede la menor cantidad de residuos en el interior.

El uso de la planta piloto se consideró para trabajos de laboratorio, por lo tanto no se consideró en ninguna circunstancias presión externa ni fuerzas externas actuantes en los recipientes.

Los cálculos que se llevarán a cabo en este trabajo son:

- Diseño de reactor, bridas, empaque (juntas), tapa, carga de condensado generada.
- Diseño de Tanque flash, vapor flash de salida.
- Diseño de las tuberías.
- Dimensionamiento de la tolva de alimentación
- Determinación de espesores de aislamiento para las tuberías, reactor, y tanque flash.
- Selección de las válvulas de las tuberías
- Determinación del peso del sistema en operación
- Dimensionamiento del depósito abierto
- Parrilla de distribución de vapores

5.2. Normativas de Aplicación

El código ASME (American Society of Mechanical Engineers) para recipientes a presión es válido mundialmente para el diseño y construcción de recipientes a presión. De esta normativa, la sección VIII (Boiler and Pressure Vessels Code, División I), por sus características de operación, fue utilizada como base genérica para el cálculo de los componentes cilíndricos del sistema. El código abarca los requisitos mínimos para el diseño, las restricciones específicas y guías de construcción, las cuales no son obligatorias.

En todo caso, el diseño de la planta piloto está bajo las especificaciones técnicas de diseño del código ASME acoplado a patrones matemáticos empleados para el dimensionamiento de estos equipos.

Algunas de las limitaciones de la normativa ASME en el ámbito de todas sus secciones, más representativas o las que más interesaban para este trabajo, son las mencionadas a continuación:

- ✓ La presión a la que es sometido el recipiente deberá ser menor a 3000 PSI

- ✓ La presión mínima a que deberán diseñarse los recipientes será de 15 PSI
- ✓ Capacidad máxima deberá ser de 454.3 Lt (120 galones)
- ✓ Sistema de Tuberías y sus componentes
- ✓ Diámetro interior mínimo será de 6"
- ✓ Deberán ser estacionarios

La normativa ASME toma como referencia inicial de diseño, el límite elástico, y la resistencia a la tracción del material seleccionado. A partir de estas bases se producen los resultados más importantes del diseño, donde se puede ver claramente que la teoría general aplicada por el código es la teoría de la tensión máxima, la cual expresa que el fallo en el recipiente se produce cuando uno de los tres esfuerzos principales alcanza el límite de fluencia.

5.3. Material Seleccionado

El acero inoxidable 304 18 Cr-8 Ni (SA-240) implicado dentro de la ASTM (American Society for Testing and Materials), fue el material que se seleccionó para el diseño de la planta piloto de tratamiento térmico de residuos orgánicos. Este material presenta propiedades de resistencia a la corrosión a elevadas temperaturas, lo cual para el diseño es beneficioso.

El acero inoxidable es un acero de bajo carbono y con mínimo contenido de 10% en Cromo. Los aceros 304 entran en el grupo III de los Aceros Austeníticos, según la clasificación de la serie 200 y 300 de AISI (American Iron and Steel Institute), lo que corresponden a la familia de los que contienen el mayor número de aleaciones.

Las características más predominantes de los aceros inoxidables 304, son las siguientes:

- Alta resistencia a la corrosión
- Excelente soldabilidad
- Alto factor de higiene y limpieza
- Formato de fácil transformación
- Elevada capacidad funcional de trabajo a temperaturas extremas (Muy altas y muy bajas)
- Contenido en cromo de 16-26%
- Rango en Carbono bajo (0.03-0.08%)

Algunas de las ventajas o beneficios que aporta el cromo en este tipo de material aleado, es que a mayor contenido del elemento, mayor resistencia a la corrosión presenta a temperaturas de hasta 600 °C, a diferencia de los aceros de baja aleación o no aleados.

Cabe mencionar, que al nombrar solo los elementos Cromo y Níquel, no quiere decir que solo posea estos elementos, sino que son los más significativos y los que efectúan una acción más prioritaria al material seleccionado.

El papel que juega el material en el diseño, es uno de los más importantes, ya que cada todos los cálculos estarán basados en el tipo del material, su resistencia a los esfuerzos y a la corrosión, a su durabilidad en el tiempo, y sus buenas prestaciones mecánicas.

6. METODOLOGÍA DE DISEÑO, CÁLCULOS Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

6.1. Reactor

Para comenzar con el diseño del reactor se tomó como datos de partida, los mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 2. Datos para el diseño mecánico del reactor

Temperatura de Operación	250	°C	523	kelvin	482	°F
Presión de Operación (Po)	20	bar	2000	kPascal	290.07	PSI
Volumen del Reactor (Vr)	20	L	0,008	m ³		
Diámetro interior (Di)	28	cm	0,28	m	17,33	pulg
Densidad del Acero inoxidable	7900	kg/m ³				
E2	1					
E1	0,85					
S	11000	PSI	89631.8	kPascal		

Donde,

E2 es la eficiencia de unión longitudinal a compresión determinada por el código ASME.

E1 es la eficiencia de unión del fondo cónico determinada por el código ASME.

S es la tensión de tracción máxima admisible determinada por el código ASME.

En el diseño del reactor se contempló un volumen de residuos orgánicos 10 L, y una densidad no mayor de 1150 kg/m³.

Primeramente, se procedió al cálculo de la Presión de diseño (Pd), ya que no es suficiente con calcular en base a la presión de operación. Se debe de tomar en cuenta, tanto la presión de operación, como la presión hidrostática, y añadirle el factor de seguridad propuesta por la normativa.

D) Cálculos para la Presión de diseño (Pd)

Para determinar la presión hidrostática se utilizó la siguiente expresión:

$$P_h = \frac{D_s \cdot V \cdot g}{A}$$

Donde,

D_s es la densidad máxima de los residuos en el reactor

V es el volumen de residuos dentro del reactor

g es la gravedad (9.8 m/s^2)

A es el área interior del reactor cilíndrico

Obteniendo, a través de esta fórmula la presión hidrostática dentro del reactor:

$$P_h = 1830,28 \text{ Pascal} = 0.02 \text{ bares}$$

Con el resultado de la presión hidrostática, se obtuvo la presión de Diseño:

$$P_d = P_h + P_o + (15\% \cdot P_o)$$

Por lo tanto, la presión de diseño del reactor será:

$$P_d = 23,02392 \text{ bares} = 24 \text{ bares}$$

Siempre escogiendo la presión a mayor si nos diese como resultado un decimal, como en el caso anterior, ya que se diseña siempre para las condiciones más desfavorables. A partir de este punto, todos los cálculos realizados se harán a partir de esta presión calculada.

II) Dimensiones del reactor

Las dimensiones del reactor están condicionadas al volumen del reactor seleccionado como base de diseño, y al diámetro seleccionado.

Para este caso, tenemos el reactor dividido en dos secciones: El cilindro superior y el cono inferior del fondo, como se observa en la ilustración 3.

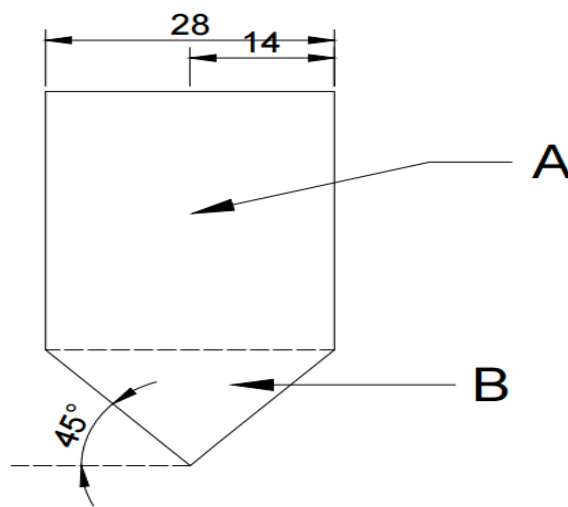


Ilustración 3. Esquema del reactor para determinación de dimensiones (cm). Elaboración propia.

Si sabemos que el área del cilindro es $A_c = \pi \cdot r^2 = 615,7536 \text{ cm}^2 = 0.06157536 \text{ m}^2$ podemos determinar perfectamente la altura que deberá tener el cilindro para contener los residuos, conociendo el volumen de este cilindro.

Si se conoce por relaciones trigonométricas la altura del cono para un ángulo de 45°, $h = 13.89 \text{ cm}$, se conoce también el volumen del cono inferior

$$V_{co} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$V_{co} = 2844,781632 \text{ cm}^3 = 2,845 \text{ L}$$

El volumen del cilindro será la diferencia del volumen total del reactor para el que estamos diseñando, menos el volumen del cono.

$$V_c = 10000 \text{ cm}^3 - 2844,781632 \text{ cm}^3 = 10 \text{ L} - 2.845 \text{ L} = 7.155 \text{ L} = 0.007155 \text{ m}^3$$

Conociendo el Área del cilindro, y su volumen, se obtuvo la altura del mismo:

$$H_c = \frac{V_c}{A_c} = 27.86 \text{ cm} = 0.2786 \text{ m}$$

En el siguiente diagrama se pueden apreciar las dimensiones generales del reactor,

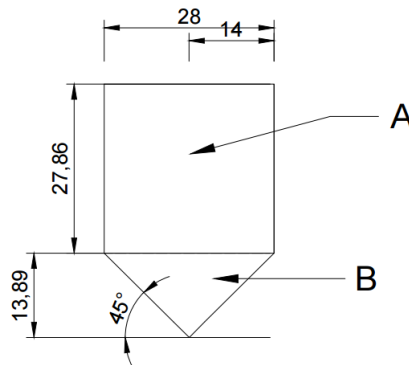


Ilustración 4. Dimensiones básicas del reactor expresado en cm. Elaboración propia.

Para otros casos, también se pudo haber determinado la Presión externa de trabajo máxima admisible (Pa), es decir, la presión externa que aguantaría el reactor, pero en el caso de esta planta prototipo no se considerarán posibles fuerzas externas como sismos, viento, nieve, etc.

III) Determinación de los espesores del reactor

Empleando los conceptos del código ASME sabemos que para virolas cilíndricas si nuestra presión de diseño $P_d \leq 0.385SE$, el espesor mínimo de diseño requerido para el reactor viene dado en función a la fórmula:

$$t = \frac{P_d \cdot r}{SE - 0.6P_d}$$

Donde,

Pd es la presión de diseño

r es el radio interior del reactor

S es la Tensión máxima admisible Según UG-23 Y UG-24 del código ASME

E es la eficiencia de la unión según UW-12 del código ASME

La determinación de los valores de la tensión máxima admisible (S) según el material se hace a través de la siguiente forma (Indicada en la sub-parte 1 de la sección II, Parte D, del código ASME):

- 1- Se determina la tensión de tracción máxima admisible indicada en la siguiente imagen para un material de acero inoxidable 304 (SA-240).

2007 SECTION II, PART D (CUSTOMARY)

TABLE 1A (CONT'D)
SECTION I; SECTION III, CLASSES 2 AND 3; * SECTION VIII, DIVISION 1; AND SECTION XII
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS
(* See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding													
	-20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
1	20.0	...	20.0	...	18.9	18.3	17.5	16.6	16.2	15.8	15.5
2	20.0	...	16.7	...	15.0	13.8	12.9	12.3	12.0	11.7	11.5
3	20.0	...	16.7	...	15.0	13.8	12.9	12.3	12.0	11.7	11.5	11.2	11.0	10.8
4	20.0	...	20.0	...	18.9	18.3	17.5	16.6	16.2	15.8	15.5	15.2	14.9	14.6

Ilustración 5. Selección de la tensión de tracción máxima admisible del código ASME

Este valor es: 15 a 16.7 ksi o 15000 a 16700 psi.

- 2- Se determina la tensión máxima admisible de compresión longitudinal. Para el valor de esta tensión se toma la menor entre la encontrada en el punto 1, y la que se calculará a continuación.

Se obtiene el valor de “A” en la siguiente expresión, con un valor de t y el R elegido, para este caso seleccionamos el espesor mínimo (2.5 mm) para calcular la situación más desfavorable:

$$A = \frac{0.125}{\frac{R}{t}} = \frac{0.125}{\frac{280mm}{\frac{2}{2.5mm}}} = 0.002232$$

La siguiente gráfica (Sección II, Parte D, sub-parte 3 del código ASME) muestra como determinar el factor B.

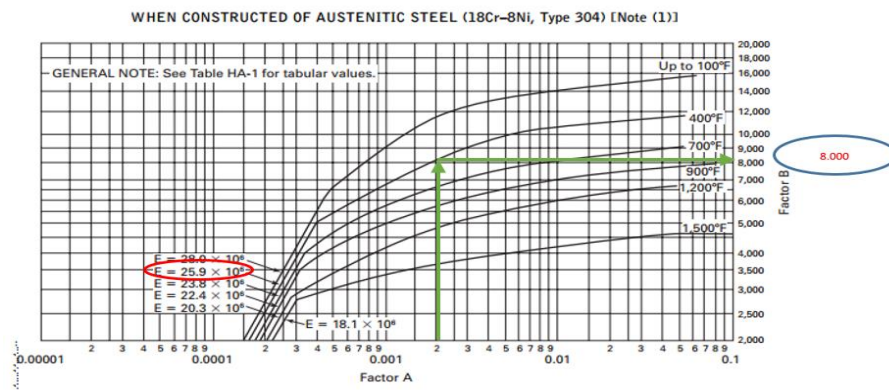


Ilustración 6. Gráfica para la determinación de la tensión máxima admisible de compresión longitudinal

Con el valor de A, se obtuvo el factor B= 8000. Se escoge el valor menor entre factor B, y la tensión de tracción máxima admisible.

Con todos los datos obtenidos, se obtuvo el espesor mínimo requerido para el espesor de pared de la virola cilíndrica:

$$t_{\min.pared} = 3.3 \text{ mm}$$

A este espesor se le agregó un sobre-espesor de corrosión (C1) de 1-a 6mm empleado en la práctica, y una tolerancia de fabricación (C2) de un 10%.

$$C1= 5.2 \text{ mm}; C2= 0.52 \text{ mm}$$

$$t_{pared} = 3.3 \text{ mm} + 5.2\text{mm} + 0.52\text{mm} = 9\text{mm}$$

Del mismo modo, siguiendo los pasos de la normativa, se procedió al cálculo del espesor del fondo cónico, sabiendo que el ángulo que se forma es de 45° como se muestra en el esquema anterior.

$$t_{\text{mín.fondo}} = \frac{Pd \cdot Di}{2 \cdot \text{Cos}\theta \cdot (SE - 0.6Pd)}$$

Por tanto,

$$t_{\text{mín.fondo}} = 5.55 \text{ mm}$$

Al igual que para el espesor de fondo, se le adhiere el sobre-espesor por corrosión y la tolerancia de fabricación, quedando un espesor de diseño de:

$$t_{\text{fondo}} = 5.55 \text{ mm} + 5.2 \text{ mm} + 0.52 \text{ mm} = 11.3 \text{ mm}$$

Por último, se calculó el espesor de diseño del cabezal del reactor, considerando que el cabezal es elíptico en todo momento. Se considera que un cabezal es elíptico cuando su radio es aproximadamente 0.17Di, por lo tanto se aplicaría la siguiente expresión:

$$\square \quad t_{\text{mín.cabezal}} = \frac{Pd \cdot Din}{2SE - 0.2Pd}$$

$$t_{\text{mín.cabezal}} = 3.6 \text{ mm}$$

$$t_{\text{cabezal}} = 9 \text{ mm}$$

$$h = 0.17 * D = 4.7 \text{ cm}$$

Los espesores obtenidos se muestran a continuación:

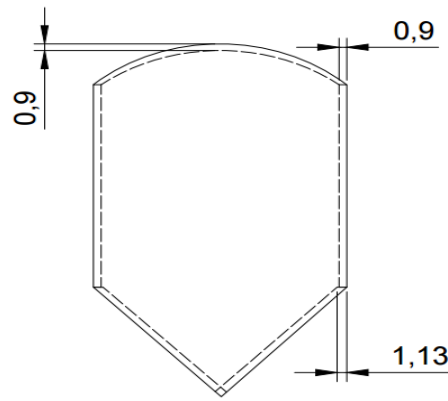


Ilustración 7. Esquema representativo de espesores obtenidos en cm. Elaboración propia.

IV) Peso del reactor en operación

Para fines de cálculo del equipo en operación, se dividió el elemento reactor en dos componentes: Peso del equipo vacío (Peso del cuerpo y peso del fondo) y Peso del equipo en operación, donde los factores más influyentes serán la densidad de los residuos dentro del equipo, la densidad del acero inoxidable, y las dimensiones dadas al reactor.

- 1- Peso del cuerpo. Donde se consideró un cuerpo cilíndrico, sin incluir el fondo cónico, se calculó con la siguiente fórmula de diseño:

$$PESO_{cuerpo} = H_c \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{ex}^2}{2} - \frac{D_{in}^2}{2} \right) \cdot Densidad_{Acero}$$

$$PESO_{cuerpo} = 0.0872806 \text{ kg}$$

- 2- Peso del fondo. Se consideró un cuerpo cónico para el cálculo siguiente:

$$PESO_{fondo} = \frac{1}{3} \cdot H_{co} \cdot \pi \cdot t^2 \cdot Densidad_{Acero}$$

$$PESO_{fondo} = 0.1457 \text{ kg}$$

- 3- Peso en operación. Se calculó el peso del equipo en operación, sumando el total de los pesos obtenidos anteriormente más el volumen de residuos contenido en el reactor por su densidad:

$$PESO_{operación} = 11.73 \text{ kg}$$

6.1.1. Carga de condensado generada en el reactor

Cuando los residuos permanecen en el reactor por un cierto tiempo calentándose a una alta temperatura y presión, genera una carga de condensado que pasaría al tanque flash al abrir la válvula, por lo que el volumen inicial de residuos aumentaría y por tanto afectaría directamente el diseño del tanque flash. Este condensado (agua saturada) se produce después de un tiempo de calentamiento por encima de su punto de ebullición al llegar a su estado de saturación, de esta forma el vapor generado pasa a un estado líquido.

Para determinar qué cantidad de condensado se genera en este proceso de calentamiento, se tomaron los siguientes datos iniciales de cálculos:

Tabla 3. Datos para el cálculo de la carga de condensado

<i>SG</i>	1			
<i>Ce</i>	4,19	KJ/kg.K		
<i>T1</i>	25	°C	298	Kelvin
<i>T2</i>	250	°C	523	Kelvin
<i>Vr</i>	0,010	m ³	10	L
<i>Dh</i>	1839,93	KJ/kg		
<i>TempV</i>	223,985	°C	497,14	Kelvin

Donde,

SG es la gravedad específica del agua

Ce es el calor específico del fluido

T1 es la temperatura de entrada del fluido al reactor

T2 es la temperatura de salida del fluido del reactor

Vr es el volumen del fluido dentro del reactor

Dh es el calor latente

TempV es la temperatura del vapor para una presión de 24 bares

El criterio empleado para el cálculo de la carga de condensado que se utilizó es el modelo de BATCH, donde:

$$M_c = \frac{1000 \cdot ce \cdot SG \cdot Vr \cdot (T_2 - T_1)}{D_h \cdot t_h}$$

Se consideró el desarrollo de la carga de condensado para dos tiempos de duración en el reactor calentándose, es decir, para 30 min y 60 min de calentamiento, y obtuvimos como resultado lo siguiente:

Tabla 4. Carga de condensado en el reactor

th		Mc (kg)	mc (m3)
Min	horas		
30	0,5	10,70312458	0,009307
60	1	5,351562288	0,004654

Para el cálculo del volumen del tanque flash se consideró la condición menos favorable, en este caso la carga de condensado mayor. Sabemos a partir de esto, que nuestro volumen inicial de residuos orgánicos, pasará de 0.01 m3 a 0.01930 m3 por la carga de condensado generada.

6.1.2. Bridas

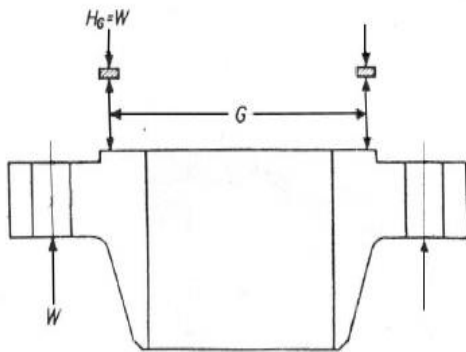
Los elementos que se tomaron en cuenta para fines de diseño de las bridas, fueron: el empaque, área apernada, fuerza de apriete de la brida, número de pernos, y el área del círculo de los pernos. Mencionamos nuevamente que el sistema completo se diseñó para material de acero inoxidable, por lo que las bridas también cuentan con esta especificación.

Las bridas son partes esenciales en los recipientes a presión, ya que permiten el fácil desarme del equipo sin causar daños al equipo, o simplemente para su higienización. Los elementos que componen las bridas son: brida, junta y pernos.

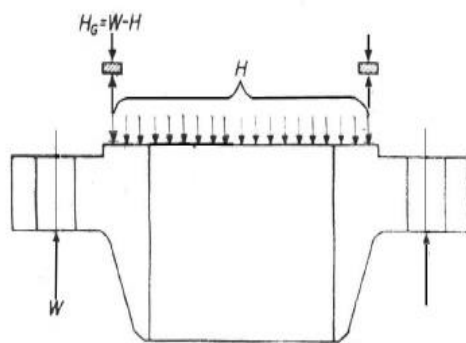
Las bridas, en este caso, actúan como unificadores mediante pernos entre el cabezal del reactor y el cuerpo cilíndrico del reactor. Para el diseño se seleccionó bridas tipo suelto o bridas locas (slip on); son bridas que no tienen conexión directa con el recipiente.

Se seleccionó un material de fibra de asbestos para el empaque con el fin de evitar posibles fugas dentro del reactor a través de las bridas. Las juntas de fibra de asbestos son capaces de soportar temperaturas de hasta 400 °C.

Comportamiento de la carga de los pernos y la junta:



Cuando no se encuentra en operación



Cuando se encuentra en operación

Para ambas condiciones, se calculó la carga requerida del perno (W_m), diseñando para la de mayor valor de fuerza.

El empaque, dependiendo del material, tendrá dos valores asignados mediante tablas, $y=1600$ PSI (definida por la tensión de asentamiento) y $m=2$ (Factor para fibra de asbesto).

Tabla 5. Datos para el cálculo inicial de bridas

G=	28	cm	11,0236	in
Dex=	40.29	cm	13,023596	in
Din=	29	cm	11,0236	in
b=	0,50	in		
b0=	1	in		
Pd=	24	in	348,09	PSI
m=	2			
y=	1600	psi		
N=	5,29	cm	2	pulg

Donde,

G es el ancho de la brida entre el empaque

Dex es el diámetro interior de la brida

Din es el diámetro interior de la brida

b es el ancho de asentamiento efectivo

b0 es un factor que depende del material y viene determinado por las tablas. Depende de N.

N es el ancho medible del empaque

1- Determinación de la fuerza de apriete de la brida

Las expresiones utilizadas para el cálculo de las cargas actuantes fueron las expresadas en el código ASME para bridas tipo suelto.

$$H = \frac{\pi}{4} \cdot G^2 \cdot P_d \rightarrow \text{Fuerza debido a la presión}$$

$$H_p = 2 \cdot b \cdot \pi \cdot m \cdot G \cdot P_d \rightarrow \text{Fuerza para apretar el empaque}$$

$$Wm1 = H + H_p$$

Carga mínima requerida en el perno para condiciones de operación

$$Wm2 = b \cdot \pi \cdot G \cdot y$$

Carga mínima requerida del perno para el asentamiento de la junta de sellado

Obteniendo los siguientes resultados:

H=	33222,3	lb
HP=	24109,9	lb
Wm1=	57332,2	lb
Wm2=	70371,8	lb
Wm=	70371,8	lb

Wm es la carga mayor entre Wm1 y Wm2, la cual dio como resultado la carga mínima requerida para el perno.

2- Área Apernada

El material de los pernos es SA-240 (304). Para este material se obtuvieron valores de $S_a = 20000$ psi, donde S_a es el Esfuerzo admisible en el perno a temperatura ambiente ($25^\circ\text{C} / 77^\circ\text{F}$) según el material y la temperatura de operación.

Y $S_b = 12900$ psi, donde es el esfuerzo admisible en el perno a la temperatura de operación ($250^\circ\text{C} / 482^\circ\text{F}$).

En la siguiente tabla se expresan los valores necesarios para el cálculo de número de pernos:

B=	28	cm	11,0236	in
t=	5,08	cm	1,999996	in
m=	2			

Y se obtuvo el Área raíz de la sección transversal total real de los pernos o la sección del diámetro menor bajo tensión (A_{b1} y A_{b2}), escogiendo a la mayor de las dos:

$$A_{b1} = \frac{W_{m1}}{S_b} = 4.44 \text{ in}^2$$

$$A_{b2} = \frac{W_{m2}}{S_a} = 3.52 \text{ in}^2$$

3- Número de pernos

Los pernos seleccionados para la brida son de $7/8$ in y su área raíz es de 0.419 in^2 .

Con esto se deduce que el número de pernos necesario es:

$$\text{Número de pernos} = \frac{A_i}{A_{b1}} = 7.29 = 8 \text{ pernos}$$

A través de tablas podemos obtener el $B_{mín}$ de los pernos, es decir la distancia mínima entre pernos. Para este caso, $B_{mín}=2.06$ in, y Distancia radial mínima=1 ¼ in.

Tabla 6. Datos de Apertado

Tamaño del perno d_B [pulg]	Hilos		Dimensiones de la tuerca		Espacio mínimo entre pernos $B_{mín}$ [pulg]	Distancia radial mínima R [pulg]	Distancia de borde E [pulg]	Diámetro de la llave a [pulg]	Tamaño del perno d_B [pulg]
	Nº de hilos	Área de raíz [pulg ²]	Sobre planos [pulg]	Sobre esquinas [pulg]					
1/2	13	0.126	7/8	0.969	1 1/4	13/16	5/8	1 1/2	1/2
5/8	11	0.202	1 1/16	1.175	1 1/2	15/16	3/4	1 3/4	5/8
3/4	10	0.302	1 1/4	1.383	1 3/4	1 1/8	13/16	2 1/16	3/4
7/8	9	0.419	1 7/16	1.589	2 1/16	1 1/4	15/16	2 3/8	7/8
1	8	0.551	1 5/8	1.796	2 1/4	1 3/8	1 1/16	2 5/8	1

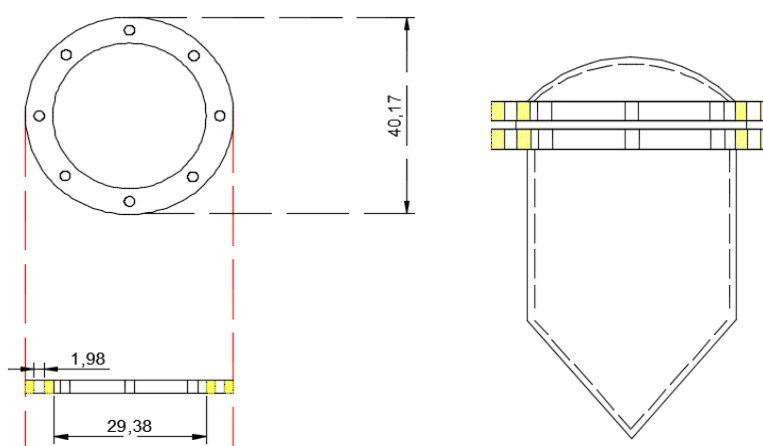


Ilustración 8. Vista Frontal y en planta de Brida en cm. Elaboración propia.

6.2. Tanque flash

El fluido pasa del reactor al tanque flash a través de una tubería que los conecta. El volumen para el que se diseña el tanque, es una parte esencial del sistema y su volumen de dimensionado será del fluido, más el fluido del vapor que genera el condensado al bajar la temperatura de golpe. Aunque se supone una salida de vapor, el volumen del tanque debe ser lo suficientemente grande para darle espacio y tiempo al flujo de salida de vapor para que escape. El tanque flash es el punto medio del sistema, y por tanto uno de los más importantes en el diseño.

Los parámetros principales a determinar en los cálculos del equipo son los siguientes: 1) Volumen y flujo de vapor flash, 2) dimensiones físicas del tanque y 3) espesor de diseño.

A continuación se muestran los datos iniciales:

Tabla 7. Datos iniciales para el diseño del tanque flash

Temperatura	100	°C	373	kelvin	212	°F
Presión Atmosférica (Pat)	1,01325	Bar	101325	Pascal	14,7	PSI
Diámetro interior (Di)	45	Cm	0,45	m	17.72	pulg
Densidad del Acero inoxidable	7900	kg/ m3				
E	0,85					
S	12000	PSI	82737	kPascal		

Donde,

E es la eficiencia de unión longitudinal a compresión determinada por el código ASME.

S es la tensión máxima admisible determinada por el código ASME.

D) Vapor Flash Generado

Para saber el volumen para el que se diseñó el tanque flash, primero fue necesario conocer el volumen de vapor flash generado dentro del equipo. En los cálculos del reactor dimos a conocer la carga de condensado que iba al tanque, recordando esta carga se mencionó que el volumen del fluido aumentaría a 0.01930 m3.

El modelo matemático utilizado para el cálculo del vapor flash, se resume en la siguiente expresión:

$$\% \text{ de VaporFlash} = \frac{h_{f1} - h_{f2}}{h_{fg2}}$$

Donde,

hf1 es la entalpía Específica del Agua Saturada a la Entrada (Presión de diseño)

hf2 es entalpía Específica del Agua Saturada a la Salida (Presión atmosférica)

hfg2 es el Calor Especifico del Vapor a la Salida (Presión atmosférica)

Cuyos valores podemos determinar a través de tablas de vapor saturado:

hf1= 962,114 KJ/kg

hf2= 506,455 KJ/kg

hfg2= 2200,39 KJ/kg

Y obtener como resultado lo siguiente:

% de VaporFlash = 20.71 %

El 20.71 % del volumen de condensado, es lo que da lugar al vapor flash generado.

A partir de esto se determinó el volumen de vapor por cada kilogramo de condensado, el volumen de vapor para hacer la relación de vapor-condensado, y el volumen real del vapor que se acumularía en el tanque:

Tenemos como datos obtenidos a través de las tablas:

Volumen específico de vapor a presión atmosférica (Vev) = 1,67 m³/kg

Volumen específico del condensado a 100 Celsius (Ve) = 0,00104 m³/kg

Y se obtuvieron los siguientes valores:

$$\text{VolumendeVapor} = \% \text{Vaporflash} \cdot \text{Vev} = 0.346 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\frac{\text{Relación de Vapor flash}}{\text{condensado}} = 0. \frac{346}{0} . 0008246 = 419:1$$

$$\text{Volumen de Vapor real total} = \frac{Mc * 0.0008246}{419} = 0.033 \text{ m}^3$$

Esto dio como resultado el volumen para que el que se diseñó el tanque:

$$V_{\text{tanqueflash}} = 0.052 \text{ m}^3 = 52 \text{ Lt}$$

El volumen es más que doble del reactor, y es debido al gran volumen que ocupa el vapor antes de escapar por la tubería.

II) Dimensiones del Tanque Flash

Sabiendo que el Volumen calculado del tanque flash es 52 Lt, aumentamos el volumen un poco más como factor de seguridad, y obteniendo un volumen de 52.8 Lt.

El área se determinó para un cilindro por la expresión:

$$A_c = \pi r^2 = 1590,43 \text{ cm}^2$$

y

$$h = 32,77 \text{ cm} = 0.3277 \text{ m} = 12.9 \text{ in}$$

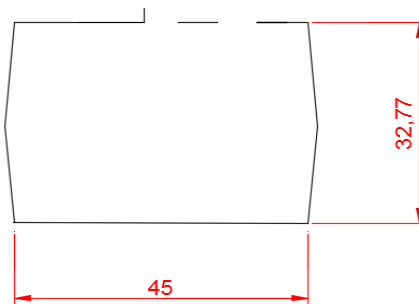


Ilustración 9. Dimensiones del tanque flash en cm. Elaboración propia.

III) Determinación de espesor del tanque

Para la determinación de los espesores se sigue el mismo proceso que para el reactor indicado por la normativa de diseño de tanques a presión de ASME.

$$t_{min} = \frac{Pd \cdot r}{SE - 0.6Pd} = 6.6 \text{ mm}$$

$$t_{diseño} = 6.6 \text{ mm} + 3\text{mm} + 0.3\text{mm} = 10 \text{ mm}$$

Para este caso específico se consideró C1=3mm y C2=0.3mm, en ambos casos, valores menores que los utilizados en el reactor. Sabemos que el rango que podemos dar a C1 es entre 1mm a 6mm, pero como en el caso del tanque flash no estamos considerando una inyección de calor y no hay aumento de temperatura podemos suponer valores más bajos que los reflejados en el cálculo del reactor.

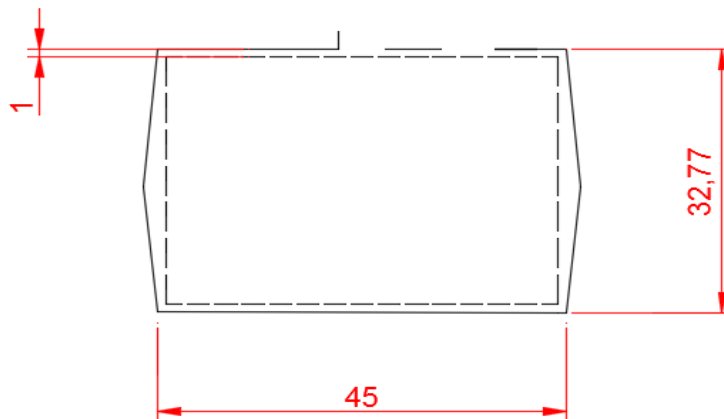


Ilustración 10. Espesores para el tanque flash en cm. Elaboración propia.

IV) Peso del equipo

De igual forma que se hizo para el reactor, se dividió el peso en: Peso del equipo vacío y Peso del equipo en operación, Peso del cuerpo.

Se consideró un cuerpo cilíndrico, por lo que se calculó de manera:

$$PESO_{cuerpo} = H_c \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{ex}^2}{2} - \frac{D_{in}^2}{2} \right) \cdot Densidad_{Acero}$$

$$Peso_{cuerpo} = 18.58 \text{ kg}$$

4- Peso del fondo. Se consideró un cuerpo cilíndrico para el cálculo:

$$Peso_{fondo} = \text{DensidadAcero} \cdot (0.0809 \cdot \text{Dex}^3 - 0.0809 \cdot \text{Din}^3) = 3.9866 \text{ kg}$$

5- Peso en operación. Se calculó el peso del equipo en operación, sumando el total de los pesos obtenidos anteriormente más el volumen de residuos contenido en el reactor por su densidad:

$$Peso_{operación} = 34.06 \text{ kg}$$

6.3. Depósito

Se necesita un depósito de recogida para la salida del fluido del tanque flash. Será suficiente con dimensionar el componente con las medidas justas que se apliquen al volumen sin factor de seguridad, ya que la recogida se puede controlar visualmente y regular los volúmenes de salidas que se requieran a través de la válvula de la tubería.

El volumen de entrada al depósito será: El volumen inicial + Volumen de la carga de condensado – 20.7% del vapor generado, debido a que este por ciento fue calculado en base a la carga de condensado. De esta manera obtuvimos un volumen para el dimensionamiento del depósito de:

$$V_{depósito} = 17.45\text{L} = 18 \text{ Lt} = 0.018 \text{ m}^3$$

Tabla 8. Datos para el dimensionamiento de un depósito abierto.

<i>Diámetro interior</i>	25	cm	0,25	m
<i>Volumen de salida del tanque flash o flujo de entrada al depósito</i>	0.018	m ³	18	Lt

Por lo que se obtiene un Área de 490 cm² y una altura de 14.3 cm, y un espesor mínimo de diseño entre 5 y 7mm, como se detalla en el siguiente esquema:

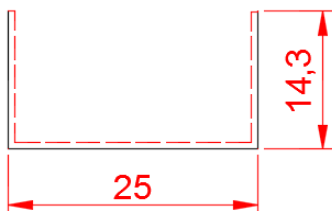


Ilustración 11. Esquema representativo de las dimensiones del depósito (cm). Elaboración propia.

6.4. Tolva

Se emplea la tolva de alimentación a la entrada del sistema para facilitar la entrada de los residuos, siendo su funcionamiento puente de canalización en el reactor.

Las dimensiones de la tolva fueron consideradas al parecer del diseño, lo que no quiere decir, que no puedan ser modificadas para el uso requerido. Se tomó en cuenta que la entrada adherida al cabezal del reactor sea lo suficientemente amplia para que residuos de esta densidad puedan penetrar a través de él.

A continuación se muestra una tabla de referencia:

Tabla 9. Datos para el dimensionamiento de la tolva

Parte superior				
h	5.33	cm	0,05	m
b	11.5	cm	0,115	m
Parte inferior				
Diámetro interno	32.6	mm	1.28	pulg

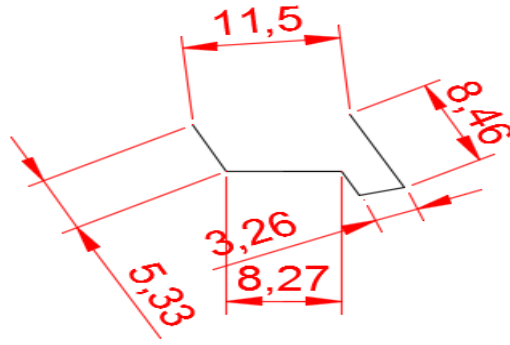


Ilustración 12. Dimensiones de tolva en cm. Elaboración propia.

6.5. Tuberías

Las tuberías son los elementos de conexión entre los equipos, a través de las cuales pasa el fluido, se inyecta el vapor caliente, y sale el vapor flash. El sistema, como se muestra en el esquema de la ilustración 13, está conformado por cuatro tubos en total. Existen muchos métodos matemáticos para el cálculo de pérdidas en tuberías, pero el modelo principal que se siguió en el diseño ha sido la ecuación de Darcy-Weisbach y el diagrama de Moody, así mismo, la ecuación de Bernoulli. Se consideraron diámetros nominales por los que pudieran pasar los residuos en todo el proceso, y una longitud considerablemente reducida, de manera que si pudiera contener la válvula, y no sobrepasara la altura del sistema en grandes extremos. Sabiendo que la rugosidad de una tubería de acero $\epsilon=0.046$ mm, y que el caudal supuesto es de $Q_v=0.0193$ m³/s, se procedió a hacer los cálculos correspondientes para cada tubería por individual.

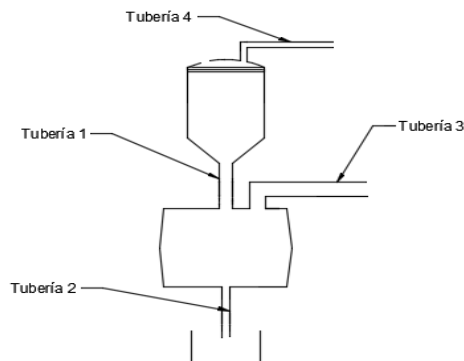


Ilustración 13. Identificación de las tuberías. Elaboración propia.

D) Tubería 1 (Reactor-Tanque Flash)

A partir de los siguientes datos se procedió al cálculo de la velocidad y de las pérdidas de la tubería:

Tabla 10. Datos de inicio para el cálculo de tubería 1

L	200	mm	0,2	m
ε	0,046	mm		
D_{nominal}	50.8	mm	2	in
D_{in}	60.3	mm	1,53	in
D_{ex}	64.21	mm	1,63	in
e	3.91	mm	0.1	in
Q_v	0,01	m ³ /s		
μ	0,001	kg/m.s		
ρ	1150	kg/m ³		

Donde,

L es la longitud que se seleccionó para la tubería

ε es la rugosidad de una tubería de acero inoxidable

e es el espesor de la tubería para el diámetro nominal seleccionado

Q_v es el caudal que circula por la tubería

μ es el factor de viscosidad del fluido

ρ es la densidad de los residuos

Para cada caso se suponen valores, y se verifica que cumpla con la normativa.

- 1) Se procedió a calcular la velocidad del fluido a través de la tubería con los datos anteriores. Sabiendo que la velocidad de un fluido es igual al caudal entre el área por el cual atraviesa, se determinó que:

$$V = 3.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \leq 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Siguiendo el reglamento del ministerio de industria y energía de aparatos a presión para fluido calentado o sobrecalentado, el diámetro de la tubería deberá ser, tal que, la velocidad máxima sea de 5 m/s. Probando con un diámetro menor los resultados varían sobrepasando la velocidad establecida por reglamento. Por lo tanto, para un diámetro nominal de 2" la velocidad cumple con este reglamento.

- 2) El siguiente paso fue la utilización de la gráfica de Moody para la obtención del coeficiente de fricción aproximado, para lo que fue necesario calcular el número de Reynolds (R_e).

$$R_e = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} \qquad R_e = 2.4 \times 10^5$$

$$\frac{\epsilon}{D} = 0. \frac{046\text{mm}}{67} \cdot 84\text{mm} = 7.6 \times 10^{-4}$$

Con los valores R_e y ϵ/D , obtenemos el valor de f como se muestra en la gráfica siguiente:

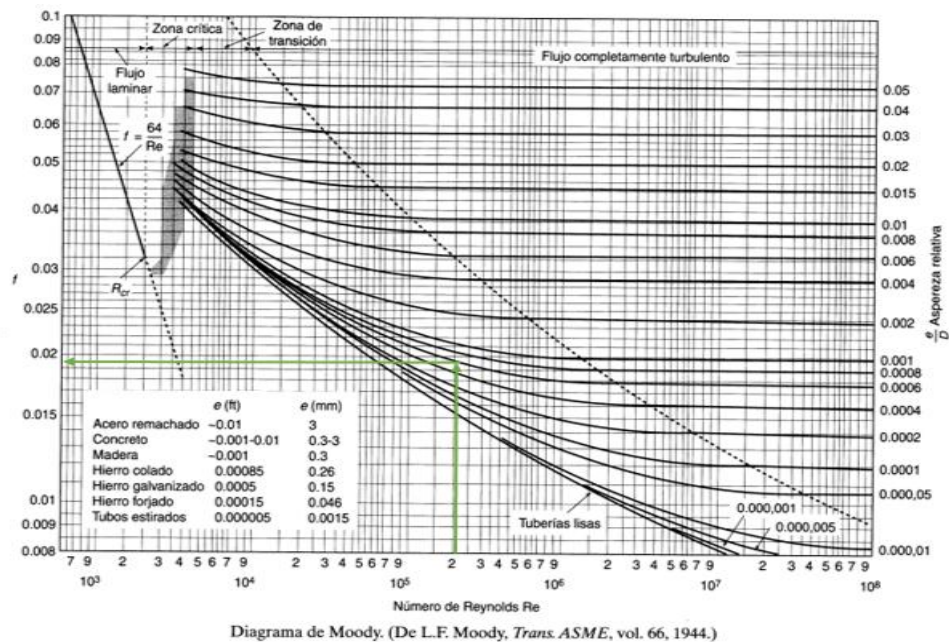


Ilustración 14. Gráfica de Moody para obtener la fricción

Por lo tanto, $f = 0.02$ aproximadamente. Con todos los datos obtenidos, se llevó a cabo la obtención del valor de las pérdidas.

La ecuación de Darcy-Weisbach, plantea lo siguiente:

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

De lo cual obtuvimos la siguiente pérdida, sin considerar las pérdidas por las válvulas:

$$hf = 0.041 \text{ mcf}$$

II) Tubería 2 (Tanque Flash-Depósito)

Para determinar el diámetro mínimo económico para esta tubería se empleó la ecuación matemática de Bresse, quien deduce a través de la siguiente fórmula el requerimiento mínimo de diámetro en función al caudal:

$$D = 1.5 \cdot \sqrt[3]{Q}$$

Con esta expresión, podemos tener una referencia mínima de diámetro, y a partir de esto, suponemos un diámetro que no necesariamente su velocidad debe cumplir con normativas de regulación, ya que es un depósito abierto y no entra dentro de aparatos de requerimiento de cumplimiento de normativas.

Tabla 11. Datos para Cálculos iniciales para tubería 2

L	220	mm	0,22	m
\mathcal{E}	0,046	mm		
D_{nominal}	25,4	mm	1	in
D_{in}	30,02	mm	1,18	in
D_{ex}	33,4	mm	1,31	in
E	3,38	mm	0,13	in
Q_v	0,01	m ³ /s		
M	0,001	kg/m.s		
g	1150	kg/m ³		

- 1) El cálculo de la velocidad se obtuvo de la misma forma en que se hizo para la tubería 1. $Velocidad=Q/A_{tubo}$. Teniendo como resultado una velocidad de 14.1 m/s para un diámetro nominal de 1". Se supuso un diámetro suficiente para la salida del caudal.
- 2) A través de la gráfica de Moody mostrada en el cálculo de la tubería 1, se obtuvo el valor de f.

$$R_e = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} \qquad R_e = 4.8 \times 10^5$$

$$\frac{\epsilon}{D} = 0. \frac{046mm}{30} \cdot 0.02mm = 1.5 \times 10^{-3}$$

Al introducir los datos de Reynolds y ϵ/D , la fricción dio como resultado:

$$f=0.02$$

Y sin considerar la válvula en la tubería, se consiguió una pérdida por tubería de:

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = 1.49 \text{ mcf}$$

III) Tubería 3 (Salida de Vapor Flash)

Para establecer el diámetro de la tubería de vapor, se dio seguimiento, al igual que para la tubería 1, a los reglamentos del ministerio de industria y energía, donde para vapor saturado, vapor calentado o sobre calentado, la velocidad deberá ser menor a 60 m/s.

Para esto, establecimos las siguientes condiciones para el inicio de los cálculos.

Tabla 12. Datos de inicio para cálculo de tubería 3

W	2,2	kg/h	4,1	lb/h
L	33	cm	0,33	m
D nominal	3	in		
Din	83,41	mm	2,11861824	
Dex	88,9	mm	2,25806452	
E	5,16	mm	0,13106426	
P	14,7	PSI		

Donde,

W es Flujo Masa del vapor (20% de la carga del condensado obtenida anteriormente)

P es la presión absoluta del vapor

Para este caso, no será efectivo el empleo de los modelos utilizados anteriormente, por lo que se utilizó una ecuación para el cálculo de velocidad de vapores a través de una tubería:

$$V_{\text{vapor}} = 1020 \cdot \left(\frac{W}{D^2} \right) \cdot P^{0.938}$$

Esta fórmula solo es aplicable para presiones de hasta 600 psi. Con esto, se obtuvo:

$$V_{\text{vapor}} = 11593,70 \frac{\text{pie}}{\text{min}} = 58.89 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para lo cual 3" es el diámetro que cumple con los reglamentos del ministerio.

IV) Tubería 4 (Inyección de Vapor)

El diseño de esta tubería variará en función al flujo de entrada de vapor caliente, flujo que se desconoce para bases de cálculos, por lo que solo se supuso un diámetro de 1" y una longitud que dependerá de la ubicación del equipo en operación, y que además, contendrá una válvula de control para la inyección del vapor en el sistema.

6.6. Espesor de Aislamiento

Siempre que exista la incorporación o el incremento de la temperatura en el cuerpo del sistema, habrá pérdidas de calor, y por lo tanto deberá existir un material de aislamiento para conservar el calor dentro del equipo y para facilitar la manipulación de los aparatos siendo una temperatura a la que el usuario se puede adaptar sin sufrir consecuencias.

En el caso del diseño del sistema de tratamiento en la transferencia de calor, en el interior del tubo o tanque se da la transferencia de flujo de calor por convección por tratarse de un fluido caliente el que pasa a través de ellos. El intercambio de calor que ocurre a través de las paredes del tubo o tanque (en el espesor) se llama conducción, y en la parte externa se presenta la

radiación (es el proceso en el que más se pierde calor) y convección. De igual manera, cuando ocurre la fase de líquido a vapor en el tanque, también hay un intercambio de energía liberada. Debido a esto, se calculó un espesor mínimo de aislamiento para cada componente del sistema, tomando en cuenta que el material seleccionado para el cálculo de espesores, fue la lana de vidrio con un factor.

La función del el aislante térmico (Lana de vidrio) es oponerse al paso del calor por conducción. La lana de vidrio posee un coeficiente de conductividad térmica de 0,032 W/(m·°K) a 0,044 W/(m·°K) aproximadamente, en comparación al acero inoxidable que presente un coeficiente de conductividad térmica de 15 W/(m·°K), sabiendo que a menor conductividad térmica, un menor paso del calor a través del material, y por tanto una mayor retención de la temperatura.

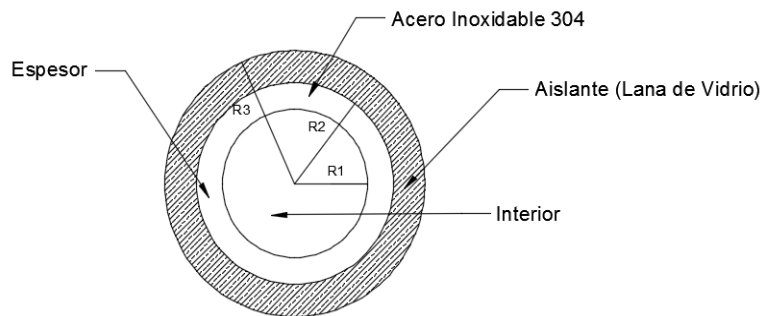


Ilustración 15. Esquema básico para espesor de aislamiento. Elaboración propia.

Para el diseño que se muestra a continuación se tomó como base la guía técnica de diseño y cálculo de aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos, redactado por la Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR).

D) Tubería 1

Siguiendo las instrucciones de método de diseño de espesor del aislante, y teniendo los datos de inicio, procedimos a calcular para tubería verticales interiores:

Tabla 13. Datos iniciales para el cálculo de aislamiento para tubería 1

Posición	Vertical			
L	195	mm		
Dnominal	50,80	mm	2	in
Din	60,3	mm	0,0603	

Dex	64,21	mm	0,06421	
E	3,91	mm		
K_{lanavidrio}	0,04	W/(m·°K)		
K_{acero}	15	W/(m·°K)		
Temperatura interior (Tk_{sup})	250	°C	523,15	
Temperatura exterior (Tk_{aire})	25	°C	298,15	°K
DT	225	°C	225	°K
ε	0,9			
O	5,67E-08			

Se determinaron los Coeficientes de convección exterior y radiación exterior

$$D^3 DT = (0.06421^3 \times (225)) = 0.059 < 10m^3 \cdot ^\circ C$$

A partir de esta expresión se determinó que pertenece al régimen laminar, por lo tanto se procede con las fórmulas correspondientes.

Para Régimen Laminar:

$$h_{convección} = 1.25 \cdot \sqrt[4]{\frac{DT}{D}} = 9.62 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$h_{radiación} = \epsilon O \cdot (Tk_{sup} + Tk_{aire}) \cdot (Tk_{sup}^2 + Tk_{aire}^2) = 15.2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$h_{conv} + h_{rad} = 24.81 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Con el valor obtenido de los coeficientes de convección y radiación exterior, se realizó el siguiente cálculo de la resistencia térmica:

$$R_{térmica} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r \cdot h_{rad,conv} = 0.1998 \frac{mK}{W}$$

Y a partir, de la resistencia térmica, obtenemos el flujo de calor que desprende esta tubería:

$$\frac{q}{H} = \frac{DT}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_{\text{conv,rad}}}} = 1126.21 \frac{W}{m}$$

Pero, lo que nos interesa es conocer un espesor de aislamiento, que solo permita pasar del 5%-10% de flujo de calor al exterior de la tubería, por lo que debemos calcular el espesor para el flujo deseado, que en este caso consideraremos un 5%:

$$5\% \cdot \left(\frac{q}{H}\right) = 56.31 \frac{W}{m}$$

Sabiendo que,

$$r_2 = D_{\text{ex}}/2$$

$$r_1 = D_{\text{in}}/2$$

$$r_3 = r_1 \cdot e^{\left(\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot DT}{q/H} \right) - \left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{K_{\text{aceroinoxidable}}} \right) \right) \cdot K_{\text{lanavidrio}}}$$

$$r_3 = 82.34 \text{ mm}$$

Si restamos, los radios, obtendremos el espesor deseado de la tubería:

$$r_3 - r_2 = \text{espesor} = 0.5 \text{ cm} = 50.2 \text{ mm}$$

El espesor mínimo de aislamiento para tuberías que transportan fluidos calientes de diámetros $35 < D \leq 60$ mm y temperaturas mayores de 180 °C, deberá ser 40 mm según RITE. Por lo tanto, el espesor cumple los requerimientos asignados por RITE.

II) Tubería 2

La tubería 2 corresponde a la unión entre el tanque flash y el depósito, y por lo tanto, se procede de igual forma al paso anterior para cálculo del flujo de calor para tuberías verticales:

Tabla 14. Datos iniciales para el cálculo de aislamiento para tubería 2.

Posición	Vertical			
L	203,6	mm		
Dnominal	25,40	mm	1	in
Din	30,02	mm	0,03002	m
Dex	33,4	mm	0,0334	m
E	3,38	mm		
Klanavidrio	0,04	W/(m·°K)		
Kacero	15	W/(m·°K)		
Temperatura interior(Tk_{sup})	250	°C	523,15	
Temperatura exterior(Tk_{aire})	25	°C	298,15	°K
DT	225	°C	225	°K
ε	0,9			
O	5,67E-08			

$$D^3 DT = (0.0334^3 \times (225)) = 0.003 < 10m^3 \cdot ^\circ C$$

Esto nos lleva a deducir que pertenece al régimen laminar, y se procede con las fórmulas correspondientes, como en la tubería anterior.

Para Régimen Laminar:

$$h_{convección} = 1.25 \cdot \sqrt[4]{\frac{DT}{D}} = 11.32 \frac{W}{m^2} \cdot K$$

$$h_{radiación} = \epsilon_0 \cdot (Tk_{sup} + Tk_{aire}) \cdot (Tk_{sup}^2 + Tk_{aire}^2) = 15.2 \frac{W}{m^2} \cdot K$$

$$h_{conv} + h_{rad} = 26.52 \frac{W}{m^2} \cdot K$$

Siguiente a esto, se realizó el siguiente cálculo de la resistencia térmica:

$$R_{t\acute{e}rmica} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r \cdot h_{\text{rad,conv}} = 0.36 \frac{\text{mK}}{\text{W}}$$

Se obtuvo el flujo de calor que desprende esta tubería:

$$\frac{q}{H} = \frac{DT}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_{\text{conv,rad}}}} = 626.12 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Para esta tubería, interesó que pasara el 10% del flujo de calor:

$$10\% \cdot \left(\frac{q}{H}\right) = 62.61 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

$$r_3 = r_1 \cdot e^{\left(\left(\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot DT}{\frac{q}{H}} \right) - \left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{K_{\text{aceroinoxidable}}} \right) \right) \cdot K_{\text{lanadevidrio}} \right)}$$

$$r_3 = 37.04 \text{ mm}$$

Si restamos, los radios, obtendremos el espesor deseado de la tubería:

$$r_3 - r_2 = \text{espesor} = 0.2034 \text{ cm} = 2.034 \text{ mm}$$

El espesor mínimo de aislamiento para tuberías que transportan fluidos calientes de diámetros $D \leq 35 \text{ mm}$ y temperaturas mayores de $180 \text{ }^\circ\text{C}$, deberá ser 30 mm según RITE. Por lo tanto, el espesor no cumple los requerimientos asignados por RITE, y se sube su valor al mínimo requerido: Espesor= 30 mm para tubería 2.

III) Tubería 3

Esta tubería corresponde a la salida del vapor flash, para cual tenemos las siguientes condiciones:

Tabla 15. Condiciones iniciales para cálculo de aislamiento en tubería 3.

Posición	Vertical			
L	354,2	mm		
Dnominal	76,20	mm	3	in
Din	84,41	mm	0,08441	m
Dex	88,9	mm	0,0889	m
e	4,49	mm		
K_{lanavidrio}	0,04	W/(m·°K)		
K_{acero}	15	W/(m·°K)		
Temperatura interior (Tk_{sup})	250	°C	523,15	
Temperatura exterior (Tk_{aire})	25	°C	298,15	°K
DT	225	°C	225	°K
ε	0,9			
o	5,67E-08			

$$D^3 DT = (0.0889^3 \times (225)) = 0.158 < 10m^3 \cdot ^\circ C$$

Pertenece a la base de cálculos de régimen laminar:

$$h_{convección} = 1.25 \cdot \sqrt[4]{\frac{DT}{D}} = 8.866 \frac{W}{m^2} \cdot K$$

$$h_{radiación} = \epsilon \cdot 0. (Tk_{sup} + Tk_{aire}) \cdot (Tk_{sup}^2 + Tk_{aire}^2) = 15.2 \frac{W}{m^2} \cdot K$$

$$h_{conv} + h_{rad} = 24.06 \frac{W}{m^2} \cdot K$$

Para el cálculo de la resistencia térmica:

$$R_{térmica} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r \cdot h_{rad_{conv}} = 0.1488 \frac{mK}{W}$$

Se obtuvo un intercambio de calor de:

$$\frac{q}{H} = \frac{DT}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_{\text{conv rad}}}} = 1512.05 \frac{W}{m}$$

Para esta tubería, nos conviene que solo pase el 5% del flujo de calor, como en la tubería 1:

$$5\% \cdot \left(\frac{q}{H}\right) = 75.6 \frac{W}{m}$$

$$r_3 = r_1 \cdot e^{\left(\left(\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot DT}{q/H} \right) - \left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{K_{\text{acero inoxidable}}} \right) \right) \cdot K_{\text{lanadevidrio}} \right)}$$

$$r_3 = 89.19 \text{ mm}$$

Si restamos, los radios, obtendremos el espesor deseado de la tubería:

$$r_3 - r_2 = \text{espesor} = 0.4474 \text{ cm} = 44.74 \text{ mm}$$

El espesor mínimo de aislamiento para tuberías que transportan fluidos calientes de diámetros $60 < D \leq 90$ mm y temperaturas mayores de 180 °C, deberá ser 40 mm según RITE. Por lo tanto, el espesor si cumple los requerimientos asignados por RITE.

IV) Reactor

Para el reactor se supuso directamente, que el flujo de calor que se quiere que sea permitido es de $q/H = 50 \text{ W/m}$ como máximo.

Sabiendo que,

$$r_1 = 0,225 \text{ m}$$

$$r_2 = 0,229032914 \text{ m}$$

Se obtuvo el radio del espesor:

$$r_3 = r_1 \cdot e^{\left(\left(\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot DT}{q/H} \right) - \left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{K_{\text{aceroinoxidable}}} \right) \right) \cdot K_{\text{lanadevidrio}} \right)}$$

$$r_3 = 704.72 \text{ mm}$$

Y el espesor resultante:

$$r_3 - r_2 = \text{espesor} = 0.4756 \text{ cm} = 47.56 \text{ mm}$$

El espesor mínimo de aislamiento para tuberías que transportan fluidos calientes de diámetros mayores $140 < D$ mm y temperaturas mayores de 180°C , deberá ser 50 mm según RITE. Por lo tanto, el espesor no cumple los requerimientos asignados por RITE y se incrementa su valor a al mínimo. Espesor=50 mm.

V) Tanque Flash

Para el tanque flash se presenta un flujo de calor requerido de $q/H = 50 \text{ W/m}$ como máximo, al igual que en el reactor.

Sabiendo que,

$$r_1 = 0,14 \text{ m}$$

$$r_2 = 0,140049265 \text{ m}$$

Se obtuvo el radio para determinar del espesor:

$$r_3 = r_1 \cdot e^{\left(\left(\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot DT}{q/H} \right) - \left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{K_{\text{aceroinoxidable}}} \right) \right) \cdot K_{\text{lanadevidrio}} \right)}$$

$$r_3 = 438.51 \text{ mm}$$

Y el espesor resultante:

$$r_3 - r_2 = \text{espesor} = 0.4756 \text{ cm} = 29.84 \text{ mm}$$

El espesor mínimo de aislamiento para tuberías que transportan fluidos calientes de diámetros mayores $140 < D$ mm y temperaturas mayores de 180 °C, deberá ser 50 mm según RITE. Por lo tanto, el espesor no cumple los requerimientos asignados por RITE y se incrementa su valor a al mínimo. Espesor=50 mm.

6.7. Selección de válvulas

Las válvulas se seleccionaron para cada tubería en función a la presión y temperatura tope a la que estaría sometida, en función a los objetivos de la tubería y a las características del fluido que pasa a través de ellas.

La función general de una válvula es regular el flujo que pasa de un cuerpo a otro, o de un equipo a otro, de distintas maneras. Para este caso en particular, el objetivo general de las válvulas en las tuberías 1 y 2 es la de controlar el paso del fluido de los residuos orgánicos, mientras que en las tuberías 3 y 4 es manejar el paso de la corriente de vapor tanto de entrada como de salida.

D) Tubería 1 y Tubería 2

Se seleccionó una válvula esférica para alta presión y temperatura.

Modelo: Serie Bv-2-6666-R

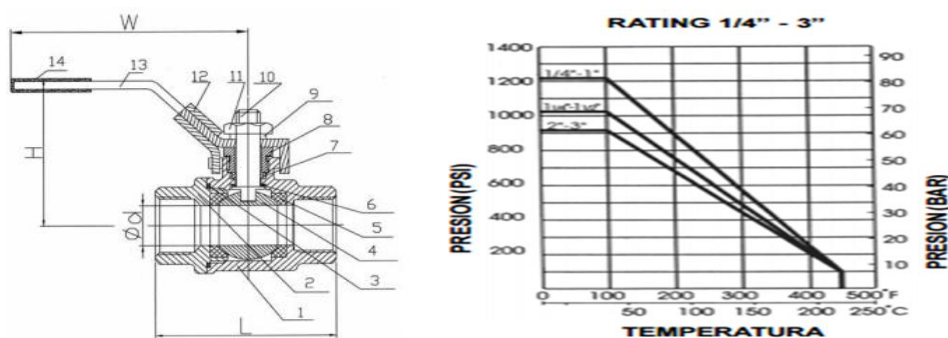


Ilustración 16. Esquema de válvula para tubería 1 y 2. Y Presiones admisibles.

Tabla 16. Dimensiones aproximadas de la válvula para tubería 1 y 2

DN (Pulg.)	d	L	H	W	PESO
1/4"	11,6	52	54	99	0,285
3/8"	12,7	52	54	99	0,230
1/2"	15	58	65	121	0,340
3/4"	20	67	68	121	0,480
1"	25,4	78	79	121	0,700
1 1/4"	32	90	83	121	1.120
1 1/2"	38	104	93	180	1.840
2"	50,8	126	100	180	2.900
2 1/2"	65	158	138	245	6.050
3"	80	186	149	245	9.920

En resumen,

Presión máxima de vapor saturado: 68 bares

Temperatura máxima del vapor que soporta: 250 Celsius

II) Tubería 3 y 4

Teniendo en cuenta que la tubería tres es para la salida de vapor desde el tanque, y la tubería 4 para la inyección del mismo, se hizo la selección de la siguiente válvula:

Válvula esférica para vapor de alta presión y temperatura.

Algunos modelos seleccionados: M10H ISO, M20H Y M31H ISO

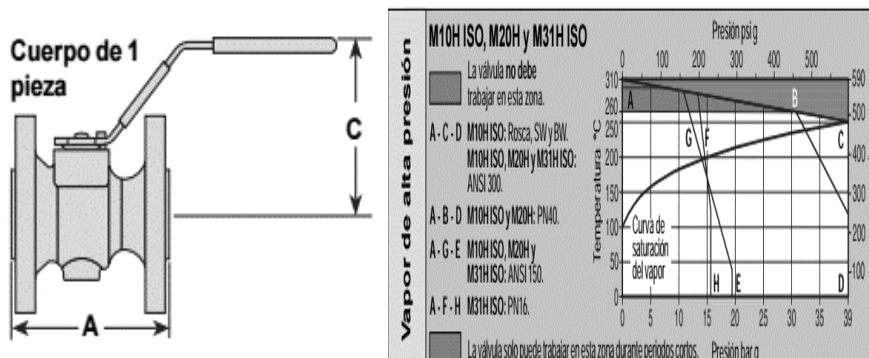


Ilustración 17. Cuerpo y Valores de trabajo de la válvula para tubería 3

Tabla 17 Datos de válvula.

**M20S / M20H / ABV20 / KBV20
(Cuerpo de 1 pieza)**

Tam. DN	A		C
	ANSI 150	ANSI 300 y PN40	Todos
25	127	165	108
32	140	178	111
40	165	190	126
50	178	216	134
65	191	241	146
80	203	283	168
100	229	305	180
150	267	403	246

En resumen,

Presión máxima de vapor saturado: 68 bares

Temperatura máxima del vapor que soporta: 250 Celsius

7. RESULTADOS

7.1. Tabla de Resultados Final

I) Dimensiones

	DIMENSIONES GENERALES DE EQUIPOS					
	REACTOR	TANQUE FLASH	DEPÓSITO	TOLVA	CABEZAL	BRIDA
DIÁMETRO INTERIOR (m)	0,28	0,45	0,25	0,0326	0,28	0,4029
DIÁMETRO EXTERIOR (m)	0,28009	0,46004	0,257		0,28009	0,2968
ALTURA (m)	0,42	0,3277	0,143	0,05	0,047	2,54
BASE (m)				0,115		
ÁREA (m²)	0,0615	0,159	0,049			
VOLUMEN (m³)	0,02	0,052	0,018			
ESPESOR PARED (mm)	9	10	7		9	52,9
ESPESOR FONDO (mm)	11,3	10	7			
PESO EN OPERACIÓN (Kg)	11,73	34,06				

II) Reactor

Tabla 18. Resultados Finales de cálculos realizados para el reactor

DIÁMETRO INTERIOR (m)	0,28
DIÁMETRO EXTERIOR (m)	0,28009
ALTURA FONDO CÓNICO (m)	0,1389
ALTURA CILINDRO (m)	0,2786
ALTURA TOTAL (m)	0,42
ÁREA TOTAL (m²)	0,0615
VOLUMEN FONDO CÓNICO (m³)	0,002845
VOLUMEN CILINDRO (m³)	0,01716
VOLUMEN TOTAL (m³)	0,02
ESPESOR PARED (mm)	9
ESPESOR FONDO (mm)	11,3
PESO EN OPERACIÓN (Kg)	11,73
PRESIÓN HIDROSTÁTICA (bares)	0,02
PRESIÓN DE OPERACIÓN (bares)	20
PRESIÓN DE DISEÑO (bares)	24
CARGA DE CONDENSADO (Kg)	10,7
TEMPERATURA DE DISEÑO (°C)	250
Fuerza de Apriete de la brida (lb)	70371,8
Número de Pernos	8
Espesor de Aislamiento (mm)	50

III) Tanque Flash

Tabla 19. Resultados Finales de cálculos para el Tanque Flash

DIÁMETRO INTERIOR (m)	0,45
DIÁMETRO EXTERIOR (m)	0,46004
ALTURA TOTAL (m)	0,3277
ÁREA TOTAL (m²)	0,159
VOLUMEN TOTAL (m³)	0,052
ESPESOR PARED (mm)	10
ESPESOR FONDO (mm)	10
PESO EN OPERACIÓN (Kg)	34,06
PRESIÓN ATMOSFÉRICA (bares)	1,013
PRESIÓN DE DISEÑO (bares)	24
CARGA DE CONDENSADO (Kg)	10,7
% Vapor Flash	20,71
Rango flujo de vapor (Kg/h)	2,13
Volumen de Vapor (m³)	0,032
Espesor de Aislamiento (mm)	50

IV) Tuberías

Tabla 20. Resultados Finales para cálculos de las tuberías 1,2 y 3.

	TUBERÍA 1	TUBERÍA 2	TUBERÍA 3
Fluido transportado	Residuos	Residuos	Vapor
Longitud (mm)	195	203,6	354,2
Dnominal (in)	2	1	3
Din (mm)	60,3	30,02	83,41
Dex (mm)	64,21	33,4	88,9
e (mm)	3,91	3,38	5,16
Caudal (m³/s)	0,01	0,01	
Velocidad de fluido (m/s)	3,5	14	58,89
Pérdidas (mcf)	0,041	1,49	
Flujo de Vapor (Kg/h)			2,13
Espesor de Aislamiento (mm)	50,2	30	44,74

7.2. Diagrama Final

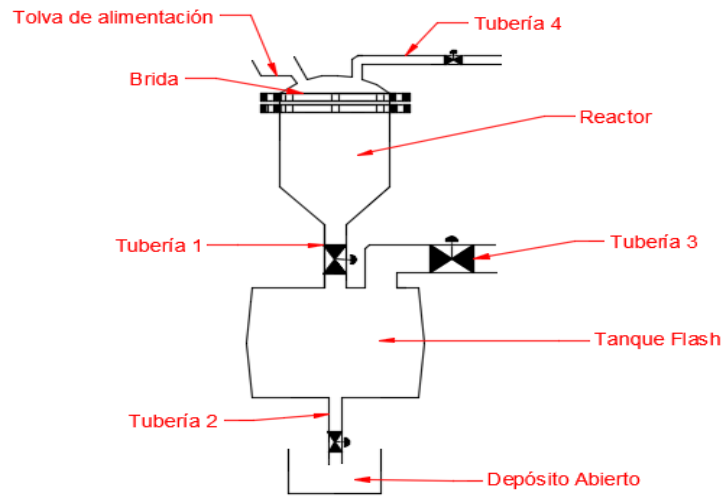


Ilustración 18. Diagrama Final del sistema de tratamiento térmico. Elaboración Propia.

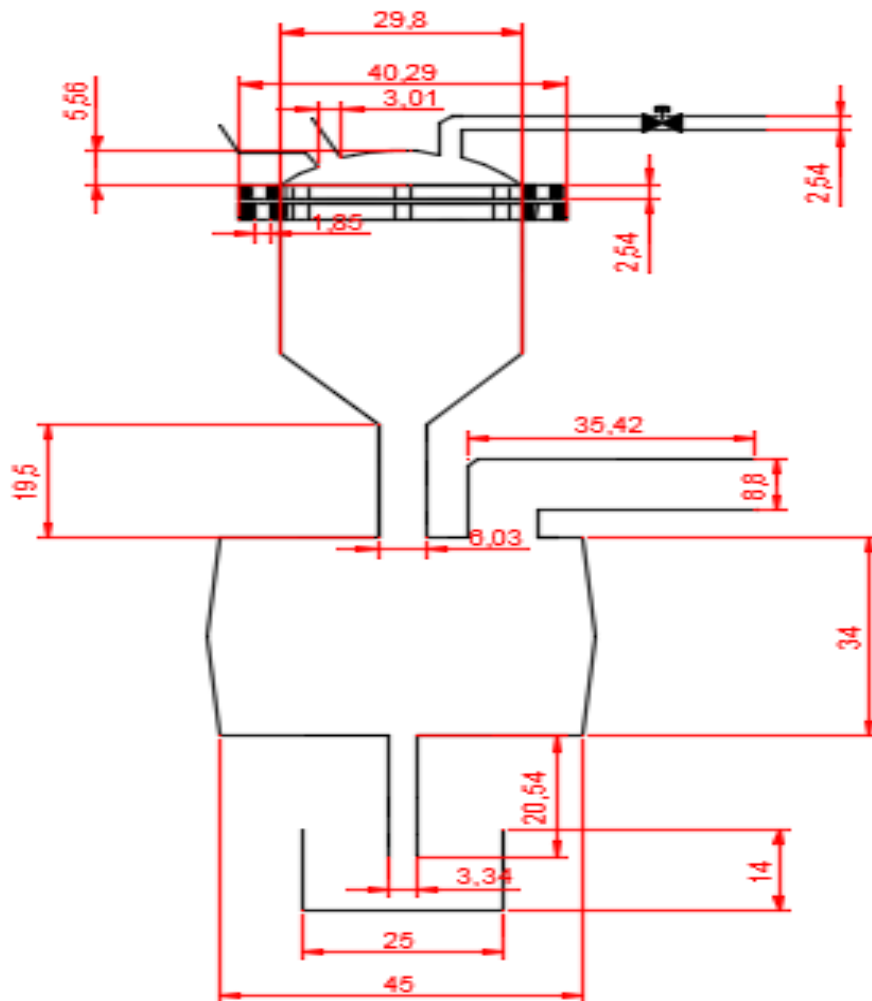


Ilustración 19. Medidas finales del sistema de tratamiento expresado en centímetros. Elaboración propia.

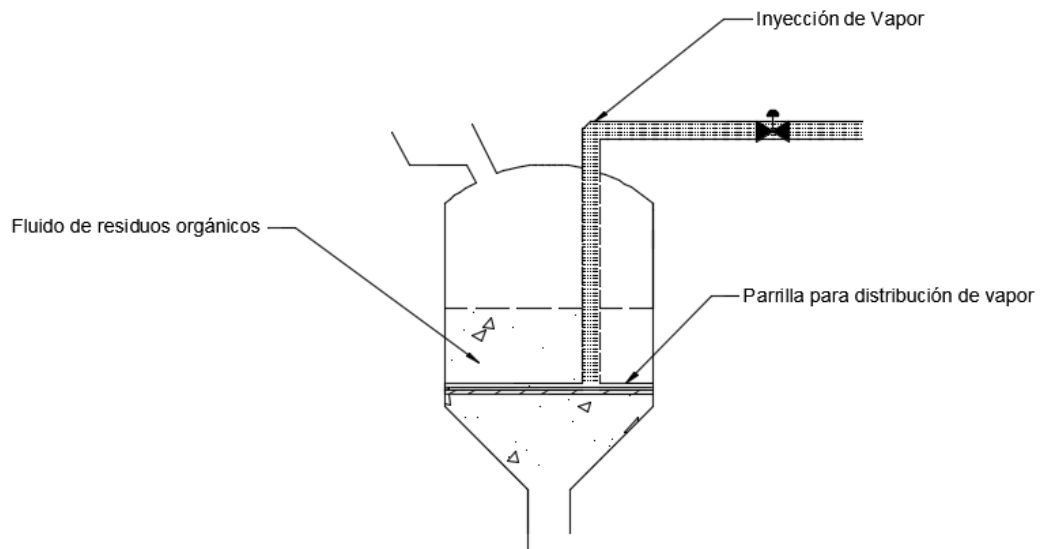


Ilustración 20. Corte para el interior del reactor. Elaboración Propia.

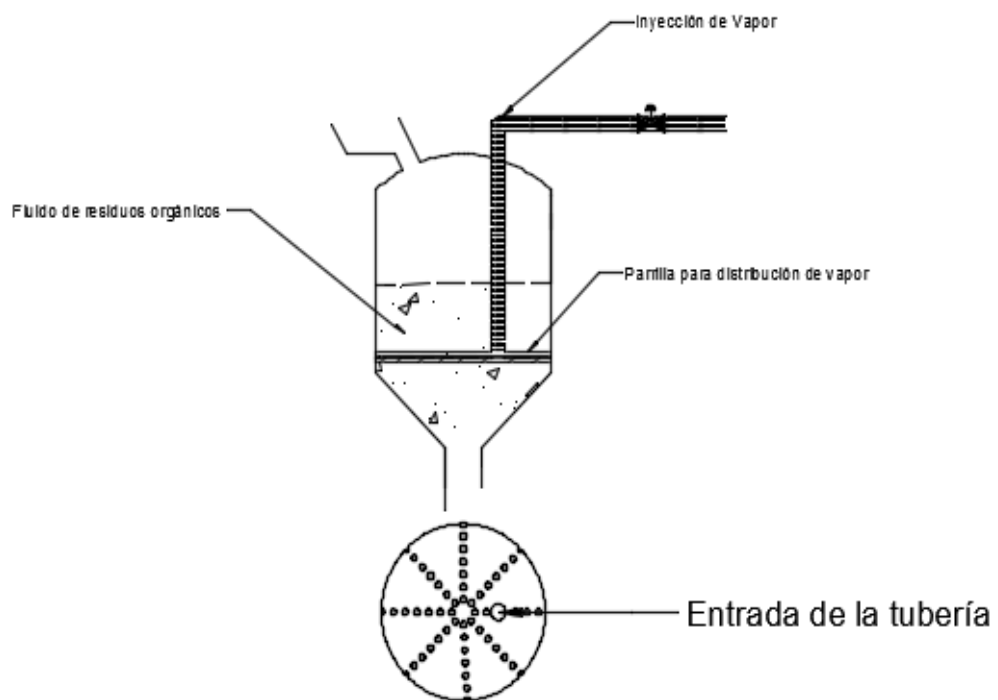


Ilustración 21. Interior del reactor y esquema de parrilla de distribución de vapores. Elaboración Propia.

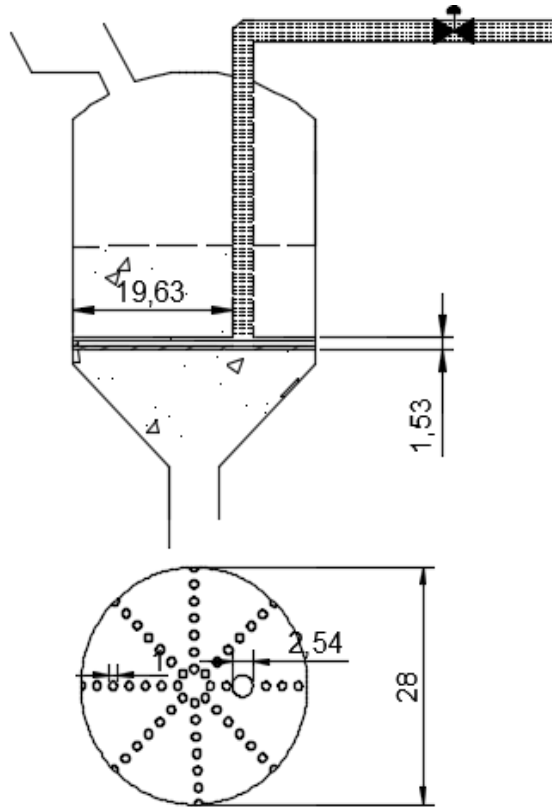


Ilustración 22. Dimensiones Para parrilla de distribución de vapor (cm). Elaboración Propia.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- American Society of Mechanical Engineers. (1 de Julio de 2007). ASME Boiler and Pressure Vessel Code. *Properties (Customary) Materials, II(D)*. New York, Estados Unidos de América.
- ASETUB. (2013). Cálculo del espesor (según RITE). En *Aislamiento térmico de redes de tuberías plásticas* (págs. 1-6).
- ATECYR. (2007). *Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos*. Madrid.
- Benito, O. (2010). *Proyecto Final de Carrera de Ingeniería Química*. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Cálculo hidráulico de Redes de Vapor. (s.f.).
- Cau2012. (2013). *Bridas. Los Problemas Bridas. Los Problemas, Selección y Consideraciones de Diseño*. INTERGRAPH.
- Centro Nacional para el Desarrollo del Acero Inoxidable (CENDI). (s.f.). Hidráulica en tuberías a presión. En *Técnico especializado en Acero Inoxidable* (págs. 1-17).
- Colegio Oficial de Ingenieros Industriales COIIM . (2008). *Diseño de Recipientes a Presión*. Ciudad Real.
- Conducción Estacionaria Unidimensional . (2000). En *Transferencia de Calor* (págs. 1-20).
- El aislamiento en la industria. (s.f.). En *Manual de aislamiento de la industria* (págs. 1-182).
- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. (s.f.). Fórmulas empíricas para el cálculo de pérdidas de carga continuas en tuberías. En *Cátedra de Ingeniería Rural* (págs. 1-9). España.
- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. (s.f.). Funcionamiento de las tuberías por gravedad y en impulsión . En *Cátedra de Ingeniería Rural* (págs. 1-8). Ciudad Real.
- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. (s.f.). Pérdida de Carga localizadas o accidentales. En *Cátedra de Ingeniería Rural* (págs. 1-8). España.
- Especialización en Combustión, SA. (s.f.). *Procedimiento para calcular tuberías de Vapor*, 1-5.

- European Sealing Association e.V., Fluid Sealign Association. (2000). Guía para la utilización segura de elementos Sellado. Juntas y Bridas. 11-54.
- Grupo ALMESA. (s.f.). División Inoxidable. Tubo y Accesorio Acero Inoxidable. En *Catálogo técnico* (págs. 138-142). Barcelona, España.
- Ingeniería León. (2001). Diseño y cálculo de recipientes a presión. En J. M. León Estrada, *Diseño y cálculo de recipientes sujetos a presión* (págs. 1-118). México.
- Instituto Politécnico Nacional. (2008). Memoria Cálculo Selección y Análisis Numérico de un recipiente a presión de 600 FT3 de Capacidad. En A. G. Mejía, & C. A. Reyes, *Tesis* (págs. 1-82). México.
- Martínez Massoni, J. M. (2008). *Normas de construcción de recipientes a presión*. Madrid: Bellisco Ediciones.
- Mecánica de Fluidos para Sistemas de Agua por Gravedad y Bombeo*. (2003).
- Progressive Energy Services. (s.f.). Diseño Eficiente de Sistemas de Vapor. *Tecnologías innovadoras para maximizar el uso de la energía residual*, 1-6.
- Real Decreto. (31 de Julio de 1755). *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y sus Instrucciones Complementarias (ITE)*, 583-646.
- Rodríguez Lezama, F. (s.f.). *Guía del Código ASME Sección VIII División 1 Tomo 1*. México: Esime Azcapotzalco.
- Rodríguez, F. (s.f.). *Diseño y cálculo de recipientes a presión bajo especificaciones del código ASME sección VIII división 1*. Instituto Politécnico Nacional Esime Azcapotzalco.
- SUMITEC Suministros Técnicos. (s.f.). Acero Inoxidable- AISI 304. En *AISI 304* (págs. 1-3).
- The American Society of Mechanical Engineers. (1 de Julio de 2004). Rules for Construction of pressure vessels. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, VIII(1)*. New York, Estados Unidos de América.
- The Flexitallic Group. (s.f.). Cálculos de Integridad de la Junta de los Cálculos del Código de Calderas y Recipientes de Presión. En *Criterios de Diseño para las Juntas de Sellado / Empacaduras* (págs. 40-62).
- Universidad Politécnica de Cataluña. (s.f.). Bases de cálculos de tuberías. Barcelona.
- Universidad Tecnológica de Pereira. (2007). Cálculo del Flujo Másico y Caudal de Aire para un Ventilador. *Scientia et Technica Año XIII*, 207-212.

9. ANEXOS