

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la
elaboración de aceites lubricantes"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Luis Eduardo Ricaurte Freire

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2016

AGRADECIMIENTOS

A mi papá, Gonzalo Ricaurte, por apoyarme siempre en todo, a mi familia y amigos por darme ánimo para continuar. Al ing. Santiago Díaz, por darme la oportunidad de trabajar en Swissoil, a mis compañeros de trabajo: Jorge Gómez, Aldo Martínez, Braulio Valdez, Fabricio Ruales, Tanya Martínez y Abel Zambrano, por enseñarme y ayudarme a realizar este trabajo. A los profesores que tuve a lo largo de mi vida estudiantil, por darme los conocimientos. A mi tutor, el ing. Gonzalo Zabala. Al ing. Vicente Adum Gilbert.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Luis Eduardo Ricaurte Freire

Ing. Gonzalo Zabala

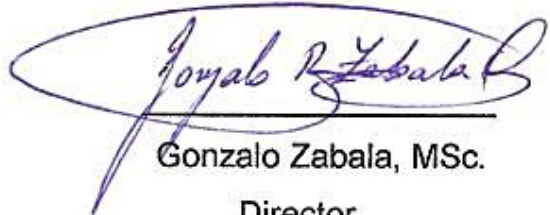
Ing. Freddy Jervis

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



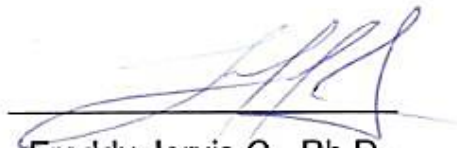
Luis Eduardo Ricaurte F.

Autor



Gonzalo Zabala, MSc.

Director



Freddy Jervis C., Ph.D.

Director

RESUMEN

El presente documento tiene como objetivo comunicar a quienes lo lean, el proceso de diseño que el autor empleó para diseñar un tanque mezclador de diez mil galones, tema que escogió como Proyecto Integrador en el proceso de graduación de la Materia Integradora de la carrera de Ingeniería en Mecánica.

El diseño estructural del tanque fue basado al estándar API 650 debido a que el producto a mezclar es aceite lubricante de base mineral, el cual es un derivado del petróleo.

La mezcla de los productos se logró gracias a un sistema de agitación que emplea un agitador mecánico axial tipo turbina y un moto-reductor de quince caballos de fuerza. El sistema de agitación fue diseñado en base a las configuraciones estándares para tanques agitados.

El calentamiento se realizó por medio de un serpentín helicoidal de vapor, el cual está sumergido en el producto y está formado por sesenta y seis metros de tubería de acero de una pulgada y media de diámetro. El serpentín de calentamiento se diseñó aplicando conocimientos de transferencia de calor para que fuera capaz de calentar diez mil galones de aceite lubricante en una hora.

Se realizó un modelo a computadora en tres dimensiones del tanque y una simulación dinámica del flujo interno en el tanque para confirmar que las velocidades y el patrón de flujo del fluido fueran las requeridas para que exista una buena agitación.

Palabras Clave: Tanque, Mezcla, Agitación, Aceite, Lubricante, Transferencia de Calor.

ABSTRACT

The purpose of this document is to communicate the design process the author used to design a ten thousand gallons mixing tank, subject he chose as Integrating Project in the Integrating Subject graduation process of the Mechanical Engineering career.

The structural design was based on the API 650 standard due to the product to mix is mineral lubricant oil, which is petroleum based.

Product mixing was achieved by an agitation system that uses a turbine as mechanical axial agitator and a fifth teen horse power gear motor. The agitation system was designed based on standards configurations for stirred vessels.

Heating was done through a helical coil, which is submerged in the product and is made up of sixty-six meters of steel pipe of one and a quarter inch diameter. The heating coil was designed applying heat transfers knowledge so it was capable of heating ten thousand gallons of lubricant oil in one hour.

A computer three-dimensional model of the tank and a dynamic simulation of the tank internal flow was conducted to confirm that fluid velocities and flow pattern were the required for a good agitation to exist.

Keywords: Tank, Mixing, Agitation, Oil, Lubricant, Heat Transfer

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE PLANOS	XIII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Marco Teórico	3
1.3.1 Lubricantes	3
1.3.1.1 Definición.....	3
1.3.1.2 Clasificación	3
1.3.1.3 Composición de los lubricantes líquidos	4
1.3.1.4 Proceso de elaboración de los aceites lubricantes	5
1.3.2 Funciones Principales de un Tanque de Mezcla	6
1.3.2.1 Almacenamiento	6
1.3.2.2 Agitación.....	6
1.3.2.3 Calentamiento	6
1.3.3 Mezcla y Agitación	6

1.3.3.1	Conceptos Básicos	6
1.3.3.2	Agitadores mecánicos	7
1.3.3.2.1	Agitadores de Hélice	7
1.3.3.2.2	Agitadores de Paletas	8
1.3.3.2.3	Agitadores de Turbina	9
1.3.3.3	Eductores	9
1.3.3.4	Pulsador de aire	10
1.3.3.5	Deflectores	10
1.3.4	Transferencia de Calor en tanques agitados	11
1.3.4.1	Chaqueta	11
1.3.4.2	Serpentín	12
1.3.4.3	Calentador eléctrico de inmersión.....	13
1.3.5	Dinámica de Fluidos Computacional aplicado a mezcladores	13
CAPÍTULO 2		15
2.	Metodología del Diseño	15
2.1	Investigación Preliminar	16
2.2	Especificaciones de Diseño.....	16
2.3	Generación de Conceptos	16
2.3.1	Descomposición Funcional	16
2.3.2	Carta Morfológica.....	17
2.4	Selección de la Solución	18
2.4.1	Almacenamiento	18
2.4.2	Sistema de agitación.....	19
2.4.3	Sistema de calentamiento	21
2.4.4	Solución Seleccionada.....	22
2.5	Diseño de Realización.....	22

2.5.1	Diseño del Tanque	22
2.5.1.1	Cuerpo del tanque	22
2.5.1.1.1	Selección del material	22
2.5.1.1.2	Diseño de forma	24
2.5.1.1.3	Espesor de la pared	25
2.5.1.2	Fondo del tanque.....	28
2.5.1.2.1	Eficiencia de la junta.....	29
2.5.1.2.2	Dimensiones finales	30
2.5.1.3	Techo del tanque.....	30
2.5.1.3.1	Junta en el ángulo superior	30
2.5.1.3.2	Área requerida de compresión en la junta techo-pared	31
2.5.1.4	Entrada de Hombre	33
2.5.1.5	Pintado	33
2.5.2	Diseño del Sistema de Agitación.....	34
2.5.2.1	Selección del tipo de agitador mecánico adecuado	34
2.5.2.2	Configuración del sistema de agitación.....	35
2.5.2.3	Potencia requerida por el motor.....	37
2.5.2.3.1	Cálculo del Número de Reynolds del agitador	38
2.5.2.3.2	Determinación del Número de Potencia	39
2.5.2.3.3	Cálculo de la Potencia requerida por el agitador	39
2.5.2.3.4	Cálculo de la Potencia del motor eléctrico requerida	40
2.5.2.4	Cálculo del diámetro del eje de transmisión.....	40
2.5.2.5	Cálculo de la tasa de circulación interna.....	41
2.5.2.6	Tiempo de mezcla	42
2.5.2.7	Calidad del mezclado	43
2.5.3	Diseño del Sistema de Calentamiento.....	45

2.5.3.1	Metodología del Diseño Térmico	45
2.5.3.1.1	Datos iniciales	46
2.5.3.1.2	Análisis Termodinámico: Balance de Energía.....	48
2.5.3.1.3	Pre-diseño	52
2.5.3.1.4	Diseño de Forma.....	53
2.5.3.1.5	Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor del lado del fluido de servicio.....	54
2.5.3.1.6	Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor del lado del fluido de proceso	56
2.5.3.2	Desarrollo	57
2.5.3.1	Diseño de la geometría del serpentín helicoidal.....	58
CAPÍTULO 3	61
3.	Resultados	61
3.1	Almacenamiento.....	61
3.2	Sistema de agitación	62
3.2.1	Simulación Dinámica.....	63
3.3	Sistema de calentamiento	65
3.4	Análisis de Costos.....	66
CAPÍTULO 4	67
4.	Discusión y Conclusiones	67
4.1	Conclusiones.....	67
4.2	Recomendaciones.....	69
BIBLIOGRAFÍA	70
APÉNDICES	73

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
ISO	International Standards Organization
ASTM	American Society for Testing and Materials
ANSI	American National Standards Institute
API	American Petroleum Institute
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
NACE	National Association of Corrosion Engineers
NFPA	National Fire Protection Association
AWS	American Welding Society
SAE	Society of Automotive Engineers
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ARCH	Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero
APEL	Asociación de Productores Ecuatorianos de Lubricantes
PDS	Product Data Sheet
CE	Carbono Equivalente
Re	Reynolds
Nu	Nusselt
Pr	Prandtl

SIMBOLOGÍA

mm	Milímetro
pulg.	Pulgada
gal	Galón
l	Litro
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
g	Gramo
T	Temperatura
°C	Grados Celsius
K	Grados Kelvin
Ø	Diámetro
N	Newton
h	Hora
s	Segundo
min	Minuto
k	Conductividad térmica
Cp	Calor específico a presión constante
Q̇	Flujo de calor
q''	Tasa de transferencia de calor
cSt	Centistoke
cP	Centipoise
HP	Caballo de fuerza
W	Vatio
rpm	Revoluciones por minuto
U	Coeficiente global de transferencia de calor
x	Calidad del vapor

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Venta de aceites lubricantes en el Ecuador.	1
Figura 1.2. Composición del Mercado Nacional de lubricantes.	2
Figura 1.3. Composición de los Lubricantes	5
Figura 1.4. Patrones de flujo en tanques agitados	7
Figura 1.5. Agitador tipo hélice	8
Figura 1.6. Agitador tipo paleta.....	8
Figura 1.7. Agitador tipo turbina.....	9
Figura 1.8. Esquema de un eductor.....	9
Figura 1.9. Esquema del pulsador de aire	10
Figura 1.10. Disposición de los deflectores	11
Figura 1.11. Recipiente enchaquetado	12
Figura 1.12. Serpéntin helicoidal	12
Figura 1.13. Calentador eléctrico de inmersión.....	13
Figura 1.14. a) Tanque de mezcla con una turbina de Rushton sobre un eje central y deflectores. b) Ejemplo de una rejilla de cálculo para este tanque.....	14
Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología de diseño	15
Figura 2.2. Volúmenes y niveles de tanques	25
Figura 2.3. Cabeza ASME bridada y alabeada (Domo Toriesférico).....	28
Figura 2.4. Dimensiones de un domo Toriesférico.....	29
Figura 2.5. Techo cónico auto soportado.....	30
Figura 2.6. Detalles permisibles de la junta al ángulo superior	32
Figura 2.7. Selección del tipo de agitador	34
Figura 2.8. Configuración estándar de un Tanque de mezcla	35
Figura 2.9. Variables dimensionales	36
Figura 2.10. Número de potencia contra el Número de Reynolds para diferentes agitadores tipo turbina	39
Figura 2.11. Número de flujo contra número de Reynolds para turbinas de aspas inclinadas	42
Figura 2.12. Proceso que atraviesa el vapor.....	46

Figura 2.13. Configuración estándar de un serpentín helicoidal en un tanque agitado	47
Figura 2.14. Masa y Volumen de Control.....	48
Figura 2.15. Ψ vs Z.....	55
Figura 2.16. Dimensiones de un serpentín helicoidal.....	58
Figura 2.17. Dimensiones recomendadas del serpentín	59
Figura 3.1. Contornos de la magnitud de la velocidad del fluido	63
Figura 3.2. Campo vectorial de velocidades del fluido, componente vertical	64
Figura 4.1. Variación de la temperatura del lubricante	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los lubricantes	4
Tabla 2. Clasificación de los Aditivos.....	5
Tabla 3. Carta Morfológica	17
Tabla 4. Comparación de criterios del cuerpo.....	18
Tabla 5. Matriz de selección para el cuerpo del tanque	19
Tabla 6. Comparación de criterios del agitador.....	20
Tabla 7. Matriz de selección para el sistema de agitación	20
Tabla 8. Comparación de criterios para el sistema de calentamiento	21
Tabla 9. Matriz de selección para el sistema de calentamiento	22
Tabla 10. Comparación de la composición química.....	23
Tabla 11. Comparación de las propiedades mecánicas.....	24
Tabla 12. Esfuerzos Permisibles	26
Tabla 13. Velocidad de corrosión atmosférica según la clase de corrosión	27
Tabla 14. Dimensiones finales del fondo	30
Tabla 15. Dimensiones mínimas del ángulo superior.....	31
Tabla 16. Volumen de pintura requerido.....	34
Tabla 17. Proporciones geométricas de un sistema de agitación estándar.....	36
Tabla 18. Número de agitadores requeridos.....	37
Tabla 19. Número de rotaciones para alcanzar 95% de homogeneidad	43
Tabla 20. Desempeño del mezclado según la velocidad lineal superficial	¡Error!
Marcador no definido.	
Tabla 21. Propiedades termo-físicas promedio de los aceites lubricantes	47
Tabla 22. Valores típicos del Coeficiente Global de Transferencia de Calor	52
Tabla 23. Longitud aproximada de tubería	53
Tabla 24. Correlaciones conocidas para flujo bifásico	54
Tabla 25. Valores de la constante “a”	57
Tabla 26. Tiempos de calentamiento.....	57
Tabla 27. Dimensiones finales del Serpentín helicoidal	60
Tabla 28. Especificaciones del tanque.....	61
Tabla 29. Especificaciones del sistema de agitación	62

Tabla 30. Especificaciones del sistema de calentamiento	65
Tabla 31. Costos de materiales	66

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO #1 Tanque de mezcla de 10,000 gal
- PLANO #2 Dimensiones generales
- PLANO #3 Partes del tanque de mezcla
- PLANO #4 Agitador tipo turbina
- PLANO #5 Deflectores
- PLANO #6 Domo Toriesférico - Fondo
- PLANO #7 Techo cónico
- PLANO #8 Serpentín de calentamiento
- PLANO #9 Escalera helicoidal y plataforma
- PLANO #10 Junta cuerpo-base
- PLANO #11 Entrada de hombre

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la lubricación es una actividad fundamental en cualquier industria. Todas las máquinas y equipos con elementos en contacto donde uno debe moverse con respecto al otro, necesitan ser lubricados para reducir la fricción y así lograr disminuir la temperatura y el desgaste.

Además, la venta de aceites lubricantes es un negocio que crece año a año. La Figura 1.1 muestra que la tendencia del volumen total de litros vendidos de aceites lubricantes para uso en motores ciclo Otto y ciclo Diesel es creciente y que el año 2015 es el año en el cual se registraron más ventas en los últimos 4 años, con un incremento del 7% con respecto al año 2014. (APEL, 2016)

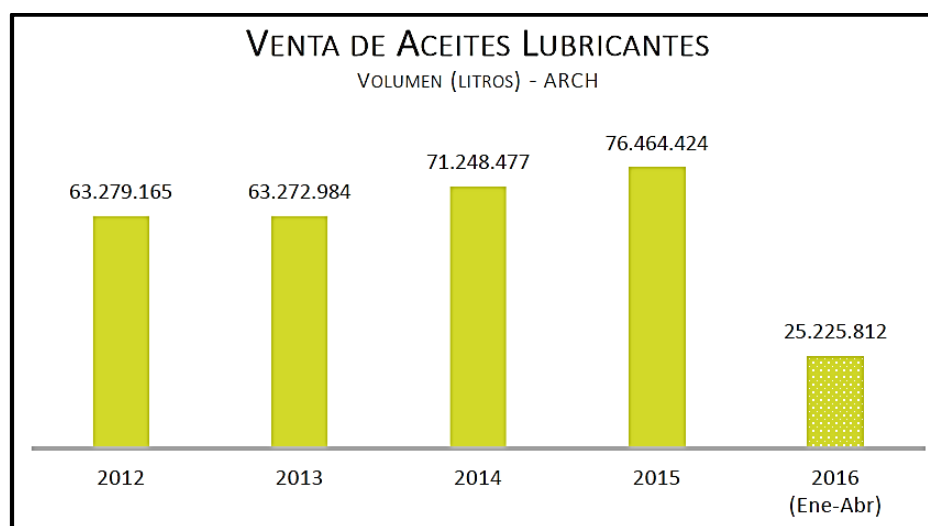


Figura 1.1. Venta de aceites lubricantes en el Ecuador.

Fuente: ARCH

El mercado nacional de lubricantes lo componen los miembros de la Asociación de Productores Ecuatorianos de Lubricantes (APEL), otros productores nacionales (OPN) y las marcas importadas (IMP). La Figura 1.2 muestra que los miembros de APEL colocaron el 66,13% del total del producto en el mercado nacional en el 2015, incrementando así su participación de mercado con respecto al año anterior -en el 2014 la participación de mercado fue de 65,0%. La Figura 1.2 también muestra que en el 2015, la participación de las marcas importadas fue del 32% y las marcas producidas nacionalmente fue del 68%. Por lo tanto, hay posibilidad de producir esas marcas importadas aquí y así generar empleo y desarrollo para el Ecuador.

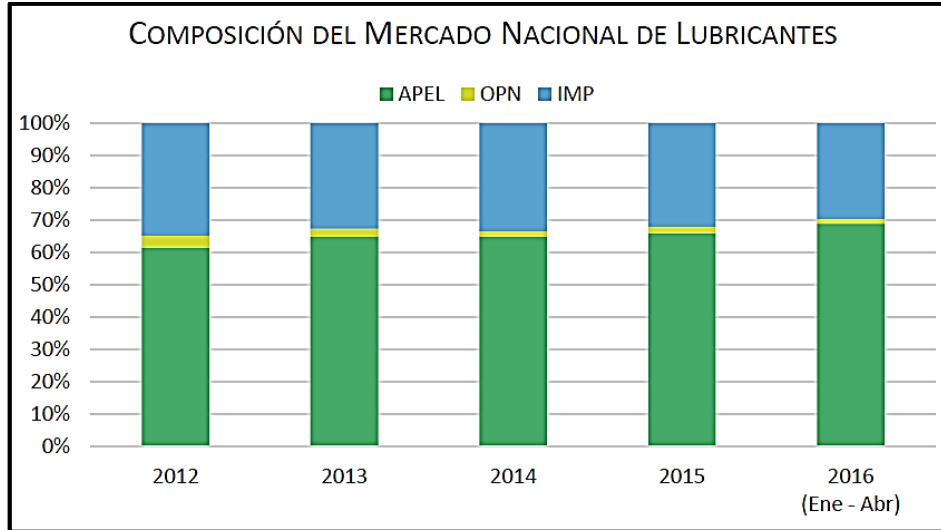


Figura 1.2. Composición del Mercado Nacional de lubricantes.

Fuente: (APEL, 2016)

1.1 Descripción del problema

Una empresa que se dedica, entre otras actividades, a la elaboración de aceites lubricantes para las varias marcas, tiene 6 tanques mezcladores que dan un total de 15,700 gal de capacidad. Esta capacidad proporciona una producción de mezclado promedio de 420,000 gal/mes.

La empresa lanzó recientemente su marca propia de aceite lubricante y desean aumentar el volumen de venta de la misma. Pero para no afectar la producción de las demás marcas, deben aumentar su capacidad de mezclado actual a 690,000 gal/mes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar un tanque mezclador para aceites lubricantes de 10,000 gal de capacidad nominal que cumpla el estándar API 650.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar los materiales
- Diseñar los elementos estructurales del tanque
- Diseñar el sistema de calentamiento
- Diseñar el sistema de agitación
- Diseñar los cordones de soldadura
- Diseñar la escalera
- Hacer un modelo 3D a computadora
- Realizar una simulación dinámica
- Obtener los planos mecánicos del tanque y sus elementos
- Calcular el costo total de los materiales

1.3 Marco Teórico

1.3.1 Lubricantes

1.3.1.1 Definición

Un lubricante es toda sustancia sólida, semisólida o líquida de origen animal, vegetal, mineral o sintético que pueda utilizarse para producir lubricación, es decir, eliminar en lo posible el frotamiento y el desgaste impidiendo que las superficies en movimiento entren en contacto. (Booser, 1983)

1.3.1.2 Clasificación

Los lubricantes se pueden clasificar según su estado y según su composición. También se pueden clasificar según su uso y el grado SAE, API o ISO.

Los lubricantes que actualmente se emplean son en su gran mayoría de origen mineral y se extraen del petróleo crudo. Antes de conocerse el petróleo se empleaban aceites de origen animal (de ballena, cerdo, vacuno, ovino, etc.) Y de origen vegetal (de oliva, maravilla, colza, ricino, etc.) (Sanchez, 2013). La Tabla 1 muestra la clasificación según su estado y composición.

Tabla 1. Clasificación de los lubricantes

S/estado	Sólidos	Grafito y sulfuro de molibdeno
	Semisólidos	Grasas
	Líquidos	Aceites
S/Composición	Base Mineral	Parafínicos
		Nafténicos
		Aromáticos
		Hydrocracked
	Base sintética	Poly Alpha Olefines (PAOs)
		Ésteres orgánicos
		Ésteres fosfóricos
Base Semi-sintética	Combinación entre Base Mineral y Sintética	

Fuente: Adaptado de (Booser, 1983)

1.3.1.3 Composición de los lubricantes líquidos

Los aceites lubricantes en general están conformados por una base y aditivos. Las bases lubricantes determinan la mayor parte de las características del aceite, tales como: Viscosidad, Resistencia a la oxidación, Punto de fluidez. Las bases lubricantes pueden ser:

- Minerales: Derivados del petróleo.
- Sintéticas: Químicas.
- Semi-sintéticas: Mezcla entre las dos bases anteriores.

Los aditivos son aquellos compuestos químicos destinados a mejorar las propiedades naturales de un lubricante, y conferirle otras que no posee y que son necesarias para cumplir con su cometido.

La Tabla 2 detalla los tipos de aditivos que se emplean y las propiedades sobre las que actúan.

Tabla 2. Clasificación de los Aditivos

Propiedades sobre las que actúa		Tipos de aditivos
Propiedades física	Viscosidad	Mejoradores del I.V.
	Congelación	Depresor del p. de congelación
Propiedades químicas	Oxidación a bajas y altas temperaturas	Anti oxidantes
	Corrosiones	Anti corrosivos
	Herrumbre	Anti herrumbre
Propiedades Físico-químicas	Detergentes-dispersantes y antioxidantes	Detergentes y antioxidantes o multifuncionales (HD)
	Aditivos de extrema presión para engranajes	De untuosidad, anticorrosivos y de E.P.
	Antiespumante	Contra formación de espuma
	Emulgentes	Emulsionantes

Fuente: Adaptado de Booser, 1983.

La Figura 1.3 muestra el porcentaje de base y aditivos que poseen los diferentes tipos de lubricantes.

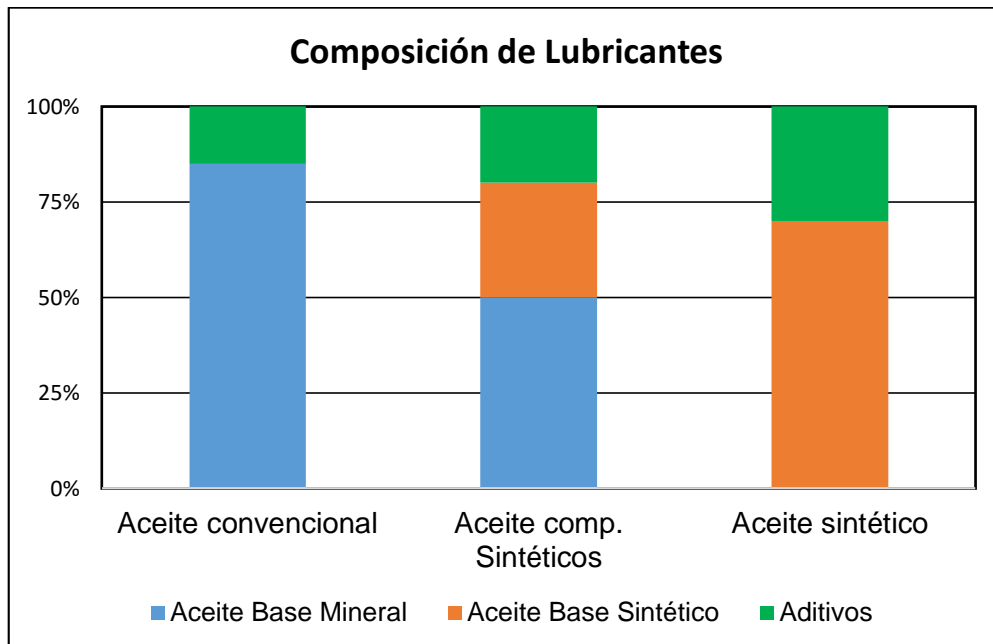


Figura 1.3. Composición de los Lubricantes

Fuente: Creación propia.

1.3.1.4 Proceso de elaboración de los aceites lubricantes

Los pasos a seguir para la obtención de las distintas gamas de aceites lubricantes, tanto los tipos destinados a la industria como los de automoción, son los siguientes:

- 1) Ingreso de bases: La o las bases con los distintos tratamientos de refino pasan a la planta de mezcla (blending).
- 2) Ingreso de aditivos: Se añaden los distintos tipos de aditivos de acuerdo con su aplicación y posterior servicio.
- 3) Mezcla: Se efectúan las mezclas de estas sustancias para obtener las viscosidades y calidades requeridas.
- 4) Salida: El producto terminado pasa a la planta de llenado.

1.3.2 Funciones Principales de un Tanque de Mezcla

1.3.2.1 Almacenamiento

Contener producto es la función básica de todo tanque.

1.3.2.2 Agitación

Se requiere para mezclar los componentes de los lubricantes a elaborar y aumentar la transferencia de calor.

1.3.2.3 Calentamiento

Se requiere para disminuir la viscosidad del producto y así mejorar su fluidez y facilitar la mezcla.

1.3.3 Mezcla y Agitación

1.3.3.1 Conceptos Básicos

Mezclar no es lo mismo que agitar. Agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera in movimiento generalmente circulatorio en el interior de un recipiente. Mezcla es la distribución al azar, de dos fases inicialmente separadas. Eso implica partir de dos fases individuales, y lograr que ambas fases se distribuyan al azar entre sí. (Ruiz, 2009)

Los objetivos de la agitación pueden ser:

- Mezcla de dos líquidos miscibles (ej.: alcohol y agua)
- Disolución de sólidos en líquido (ej.: azúcar y agua)
- Mejorar la transferencia de calor (en calentamiento o enfriamiento)
- Dispersión de un gas en un líquido (oxígeno en caldo de fermentación)
- Dispersión de partículas finas en un líquido
- Dispersión de dos fases no miscibles (grasa en la leche)

1.3.3.2 Agitadores mecánicos

Los agitadores mecánicos consisten en un rodete montado en un eje y accionado por un motor eléctrico. Se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del agitador y los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros se llaman agitadores de flujo axial y los segundos agitadores de flujo radial.

Los tres tipos principales de agitadores son: de hélice, de paletas, y de turbina. La Figura 1.4 muestra los patrones de flujo que se generan en tanques agitados mediante: (a) Agitador concéntrico al tanque sin deflectores, se forma un vórtice en la superficie del fluido. (b) Una ubicación desfasada del eje reduce el vórtice. (c) Agitador axial con deflectores. (d) Agitador radial con deflectores.

Los deflectores evitan la formación de el vórtice.

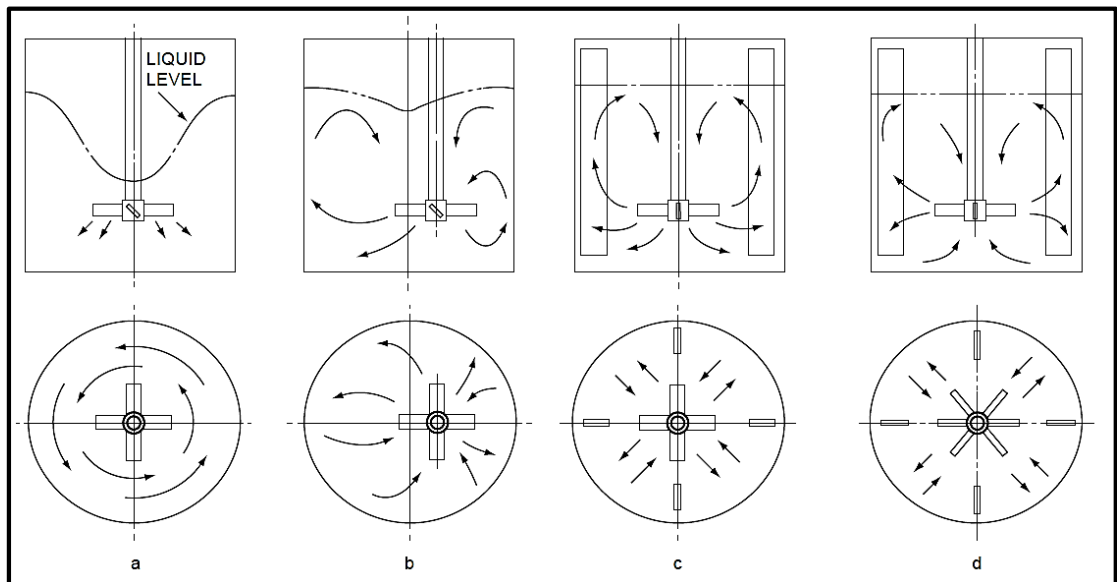


Figura 1.4. Patrones de flujo en tanques agitados

Fuente: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

1.3.3.2.1 Agitadores de Hélice

Un agitador de hélice, es un agitador de flujo axial, que opera con velocidad elevada y se emplea para líquidos pocos viscosos. Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces para tanques de gran tamaño. La Figura 1.5 muestra un agitador tipo hélice de 3 aspas.

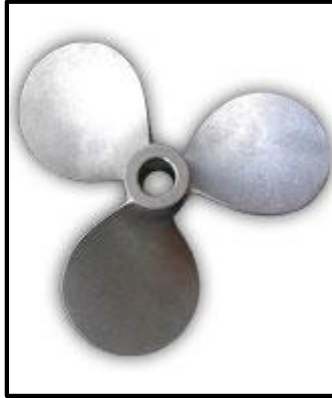


Figura 1.5. Agitador tipo hélice

Fuente: Promix Mixing Equipment & Engg. Ltd.

1.3.3.2.2 Agitadores de Paletas

Para problemas sencillos, un agitador eficaz está formado por una paleta plana, que gira sobre un eje vertical. Las paletas giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque, impulsando al líquido radial y tangencialmente, sin que exista movimiento vertical respecto del agitador, a menos que las paletas estén inclinadas. Las corrientes de líquido que se originan se dirigen hacia la pared del tanque y después siguen hacia arriba o hacia abajo. La Figura 1.6 muestra un agitador de paletas.



Figura 1.6. Agitador tipo paleta

Fuente: Instrumentación Científica Técnica, S.L.

1.3.3.2.3 Agitadores de Turbina

La mayor parte de ellos se asemejan a agitadores de múltiples y cortas paletas, que giran a velocidades elevadas sobre un eje que va montado centralmente dentro del tanque. Las aspas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El patrón de flujo es radial con aspas verticales o axial con aspas inclinadas. El rodete puede ser abierto, semi-cerrado o cerrado. (Carmi, 2009). La Figura 1.7 muestra dos agitadores de turbina.

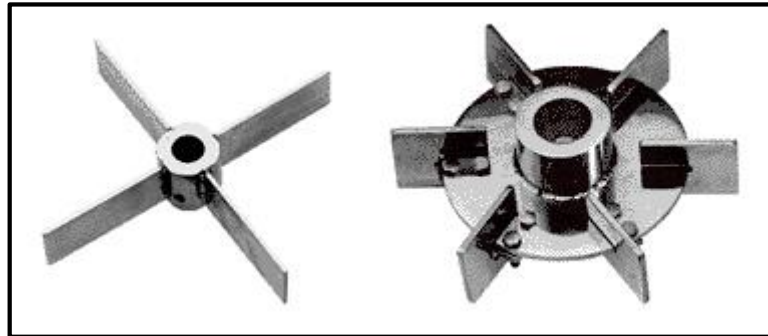


Figura 1.7. Agitador tipo turbina

Fuente: Portal laboratorios virtuales de procesos químicos

1.3.3.3 Eductores

Un eductor es un dispositivo que induce el efecto Venturi de los fluidos. Éste se instala sumergido dentro del tanque y se alimenta del mismo contenido del tanque mediante una bomba. Consta de una tobera que aumenta la velocidad del fluido motriz y ocasiona un diferencial negativo de presión (vacío) en la sección de aspiración. Esto provoca una succión del líquido alrededor de esta zona, hacia adentro de la cámara de mezcla. El flujo motriz y el flujo succionado se combinan en la cámara de mezcla. Luego el fluido mezclado pasa por un difusor y es descargado al tanque, donde ocurre un mezclado adicional. La Figura 1.8 muestra el esquema de un eductor.

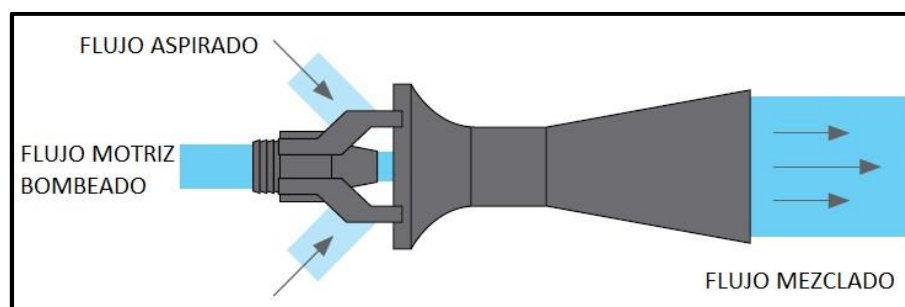


Figura 1.8. Esquema de un eductor

Fuente: DIYfishkeepers

1.3.3.4 Pulsador de aire

Consiste en liberar una burbuja de aire desde fondo del tanque, mediante la inyección de aire comprimido por debajo de un disco plano llamado plato acumulador. A medida que la burbuja se eleva a la superficie, crea un vacío que arrastra los líquidos más pesados del fondo junto con ella y empuja el líquido por encima de ella hacia el perímetro del tanque. El líquido se desplaza hacia los lados del tanque y desciende por la pared del tanque hasta el fondo. Este proceso de liberación de burbujas secuencialmente a intervalos de tiempo crea una circulación vertical inmediata. La Figura 1.9 muestra un esquema del funcionamiento del pulsador de aire.

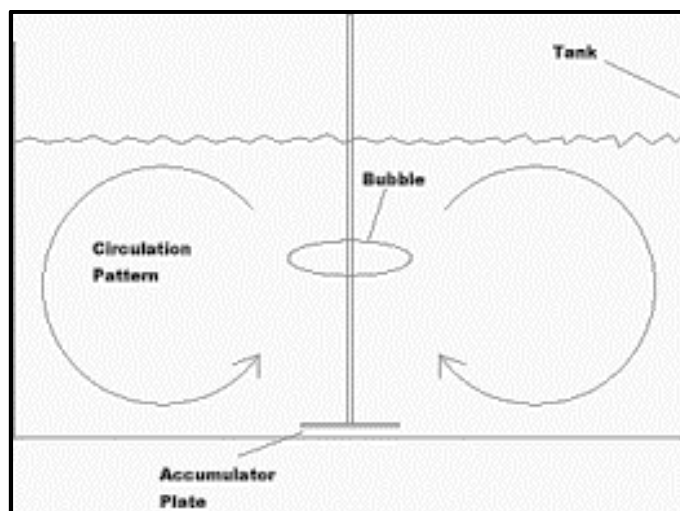


Figura 1.9. Esquema del pulsador de aire

Fuente: CiteSeerX

1.3.3.5 Deflectores

También llamados baffles, son elementos soldados dentro del tanque por medio de unos corches, y reducen los vórtices en el fluido. La anchura de los deflectores depende del diseño del rodete y la viscosidad del fluido. También estos suelen estar adheridos o separados de la pared del tanque e incluso tener un ángulo de inclinación con respecto al eje del tanque. Se usan cuando existe un agitador mecánico (Carmi, 2009). La Figura 1.10 muestra la disposición de los deflectores en el tanque de mezcla.

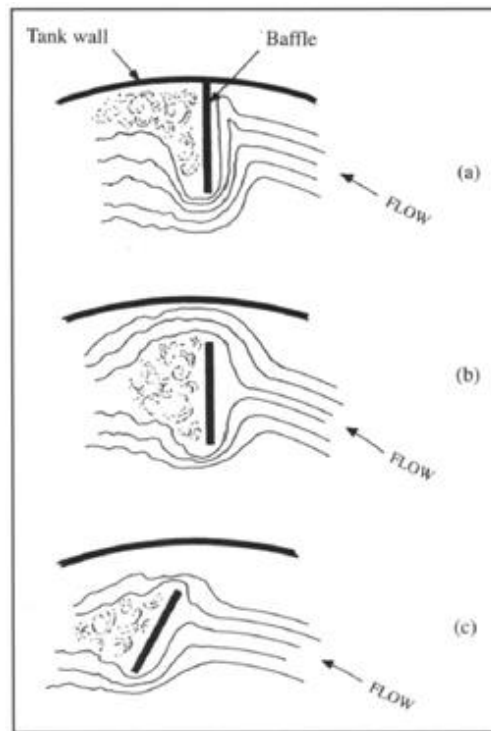


Figura 1.10. Disposición de los deflectores

Fuente: (Doran, 1995)

1.3.4 Transferencia de Calor en tanques agitados

En la actualidad se utilizan tres tipos de sistemas de intercambio de calor:

- Chaquetas de enfriamiento o calentamiento.
- Serpentes de tubería.
- Calentadores eléctricos de inmersión

1.3.4.1 Chaqueta

Se denomina chaqueta al doble fondo o encamisado de un recipiente. El propósito de este equipo generalmente es calentar el contenido del recipiente. Son bastante menos eficientes que los serpentines, tienen mayor costo y resultan bastante difíciles de limpiar mecánicamente porque el acceso al interior de la camisa es complicado. Un serpentín de la misma superficie tiene un intercambio de calor bastante mayor, alrededor de un 125% calculado en base a la camisa (Rodríguez, 2009). La Figura 1.11 muestra un esquema de un recipiente enchaquetado.

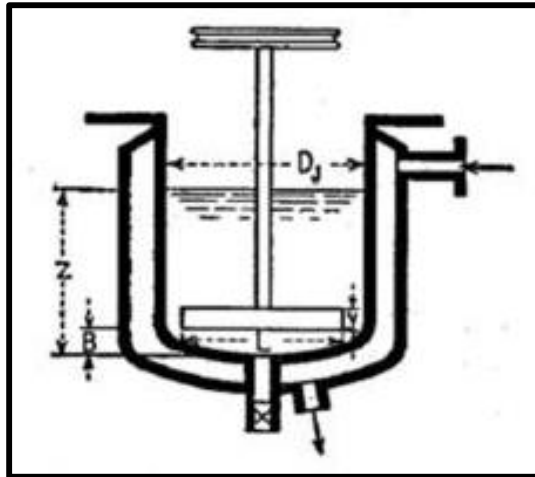


Figura 1.11. Recipiente enchaquetado

Fuente: (Kern, 1999)

1.3.4.2 Serpentín

Un intercambiador de serpentín es un simple tubo que se dobla en forma helicoidal y se sumerge en el líquido. Se usa normalmente para tanques y puede operar por convección natural o forzada. Debido a su bajo costo y rápida construcción se improvisa fácilmente con materiales abundantes en cualquier taller de mantenimiento. Usualmente se emplea tubería lisa de 3/4 a 2 pulgadas (Rodríguez, 2009). La Figura 1.12 muestra el esquema de un serpentín helicoidal sumergido.

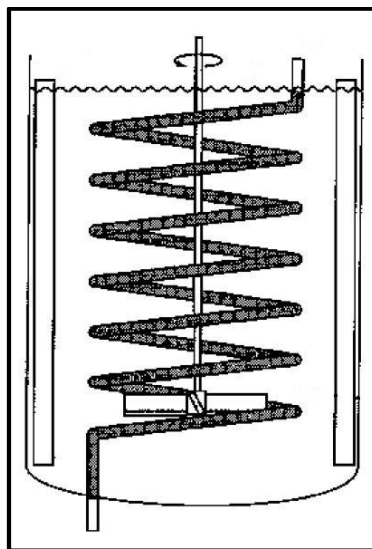


Figura 1.12. Serpentín helicoidal

Fuente: Adaptado de (Coker, 2001)

1.3.4.3 Calentador eléctrico de inmersión

Es un dispositivo que se instala mediante pernos a una brida coincidente soldada a la pared del tanque. Consiste de un haz de resistencias eléctricas tubulares en forma de U, soldadas a la brida. Los elementos de calentamiento pueden estar hechos de cobre, acero, acero inoxidable, o aleaciones de níquel-cromo. Además posee una caja eléctrica de conexión, con las entradas de cable de tamaño según el número y la potencia de los elementos de calentamiento; un sistema de control de temperatura se puede montar en la caja de conexiones. La Figura 1.13 muestra un calentador eléctrico de inmersión y sus partes.

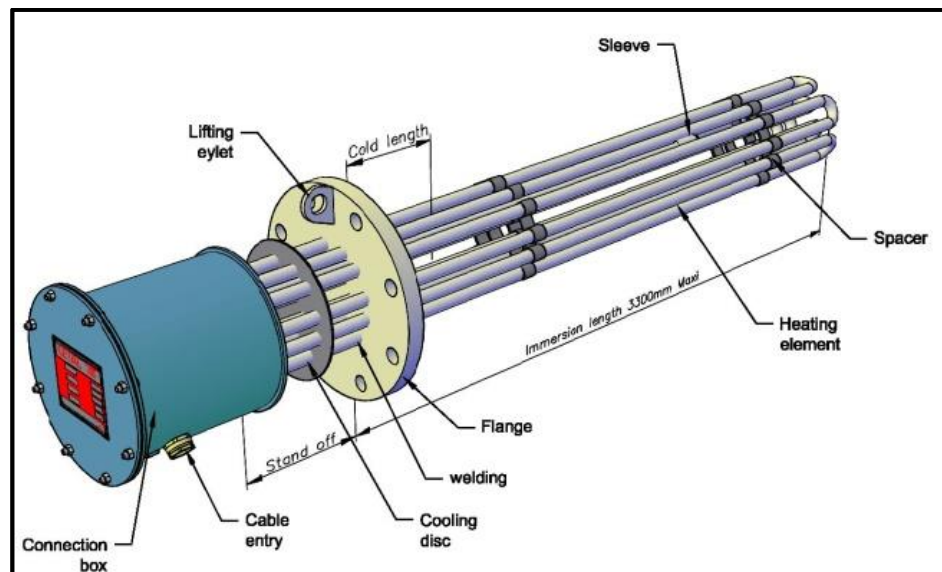


Figura 1.13. Calentador eléctrico de inmersión

Fuente: CRN TECNOPART, S.A.

1.3.5 Dinámica de Fluidos Computacional aplicado a mezcladores

Los procesos de mezcla se pueden basar en una serie de mecanismos, desde la agitación al burbujeo y la manipulación de flujo estático. La agitación en un tanque agitado es una de las operaciones más comunes, sin embargo, presenta uno de los mayores desafíos en el ámbito de la simulación por ordenador. El modelado de un tanque agitado mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) requiere la consideración de muchos aspectos del proceso. Las simulaciones numéricas de tanques agitados normalmente se hacen en dos o tres dimensiones. En simulaciones de tres dimensiones (3D), los

impulsores, pantallas y otros dispositivos interiores se pueden modelar mediante su geometría exacta.

La Figura 1.14 a) muestra el contorno de un tanque agitado con deflectores simples que contiene una turbina Rushton sobre un eje montado en el centro. Un ejemplo de una rejilla de cálculo para el recipiente de la Figura 1.14 a) se muestra en la Figura 1.14 b). (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

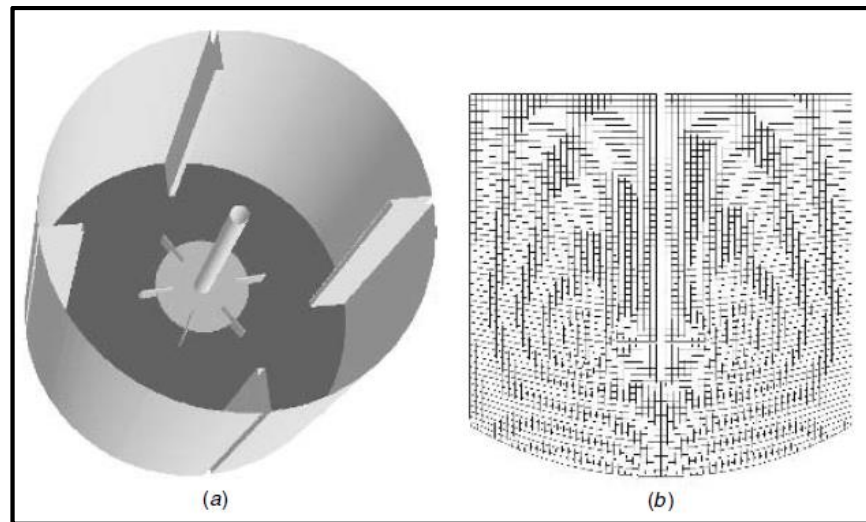


Figura 1.14. a) Tanque de mezcla con una turbina de Rushton sobre un eje central y deflectores. b) Ejemplo de una rejilla de cálculo para este tanque.

Fuente: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

La Figura 2.1 muestra la metodología de diseño utilizada en el presente trabajo, la cual es una adaptación a la metodología propuesta por Norton (2013).

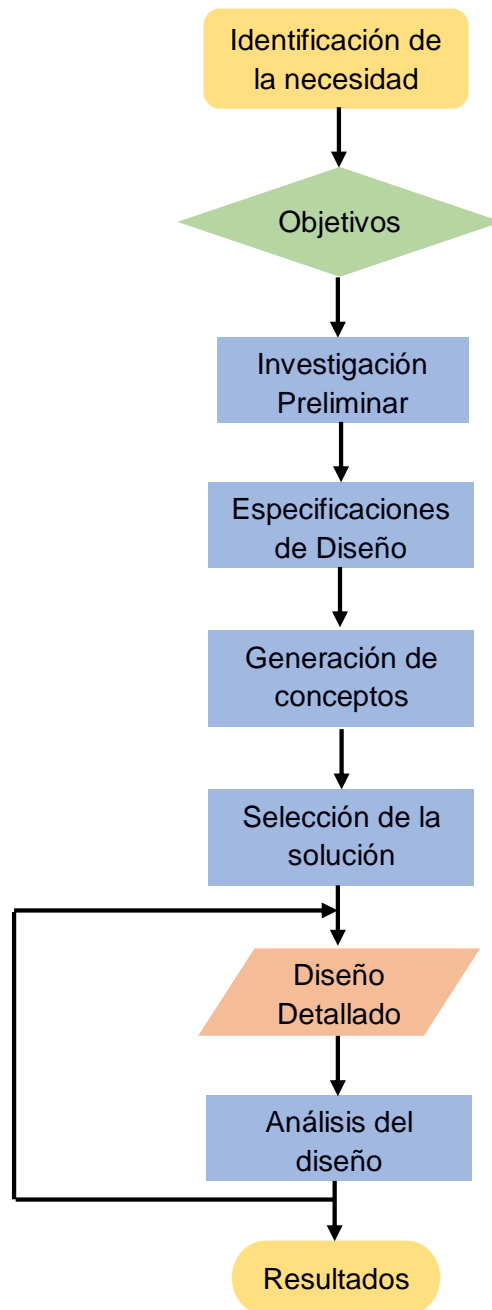


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología de diseño

Fuente: Creación propia

2.1 Investigación Preliminar

Se realizó una búsqueda de libros, normas y textos que podrían servir para el diseño del tanque y sus elementos. También se acudió a los catálogos de proveedores de materiales metálicos, perfiles metálicos, y equipos para agitación. De las fichas técnicas de los lubricantes de la compañía, se encontró que la viscosidad dinámica del lubricante menos viscoso que elaboran es 30.55 cP y la del lubricante más viscoso, 844.5 cP. En el Apéndice A se encuentra la ficha técnica de ambos productos.

2.2 Especificaciones de Diseño

El diseño final deberá cumplir las siguientes especificaciones:

- Capacidad nominal de almacenamiento: 10,000 gal
- Capacidad de producción: 270,000 gal/mes
- Temperatura máxima de almacenamiento de productos: 150 °C
- Vida útil: 25 años
- Capaz de mezclar productos con viscosidades desde 30 cP hasta 850 cP.
- Cumplimiento del estándar API 650
- Dimensiones de espacio en el suelo menores a 6.5x5 m.
- Salida de producto por su parte inferior
- Protección a la corrosión
- Materiales existentes en el mercado local

2.3 Generación de Conceptos

2.3.1 Descomposición Funcional






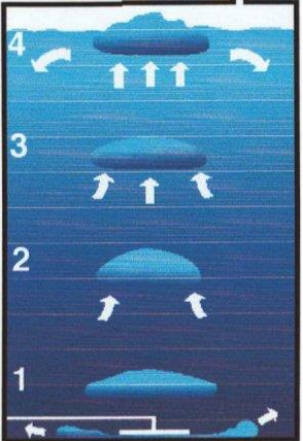
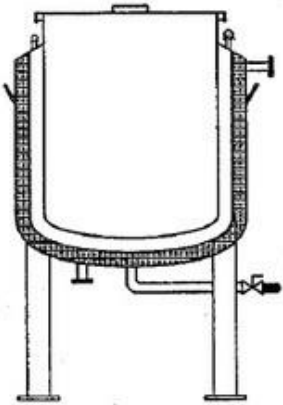
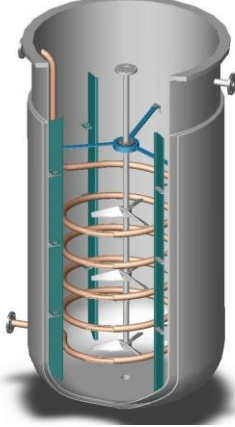

El tanque de mezcla de aceites debe cumplir las siguientes funciones:

- Almacenamiento
- Agitación
- Calentamiento

2.3.2 Carta Morfológica

La Tabla 3 presenta todas las alternativas encontradas para cada función.

Tabla 3. Carta Morfológica

Función	Alternativa #1	Alternativa #2	Alternativa #3
Almacenamiento	 <p data-bbox="432 969 671 1003">Tanque rectangular</p>	 <p data-bbox="804 969 1002 1003">Tanque esférico</p>	 <p data-bbox="1078 969 1286 1003">Tanque cilíndrico</p>
Agitación	 <p data-bbox="440 1487 663 1520">Agitador mecánico</p>	 <p data-bbox="842 1487 963 1520">Eductores</p>	 <p data-bbox="1134 1487 1334 1520">Pulsador de aire</p>
Calentamiento	 <p data-bbox="464 1980 639 2013">Enchaquetado</p>	 <p data-bbox="783 1980 1018 2013">Serpentín helicoidal</p>	 <p data-bbox="1114 1980 1353 2013">Calentador eléctrico</p>

Fuente: Elaboración propia

2.4 Selección de la Solución

2.4.1 Almacenamiento

Los criterios que se han tomado en cuenta para la selección de la forma del cuerpo del tanque son:

- Facilidad de construcción
- Facilidad para mezclar
- Facilidad de mantenimiento
- Facilidad de diseño
- Estética

Se compararon los criterios entre sí, según su importancia para asignarles un peso a cada uno:

- 1: Igual de importancia
- 2: Doble de importancia
- 3: Triple de importancia

En la Tabla 4 se observa como resultado de la comparación entre los criterios, el peso de cada criterio.

Tabla 4. Comparación de criterios del cuerpo

Criterios a evaluar	Facilidad de construcción	Facilidad de mezcla	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de diseño	Estética	TOTAL (FILA)	PESO
Facilidad de construcción	1.00	1.50	2.00	3.00	3.00	10.5	0.35
Facilidad de mezcla	0.67	1.00	1.33	2.00	2.00	7.00	0.24
Facilidad de mantenimiento	0.50	0.75	1.00	1.50	1.50	5.25	0.18
Facilidad de diseño	0.33	0.50	0.67	1.00	1.00	3.50	0.12
Estética	0.33	0.50	0.67	1.00	1.00	3.50	0.12
TOTAL						29.75	1.00

Fuente: Creación propia

Cada alternativa fue evaluada de acuerdo al desempeño con respecto a los criterios, según la apreciación del diseñador y se les dio una puntuación de:

- 1: Malo
- 2: Regular
- 3: Bueno
- 4: Muy Bueno

Luego se ponderaron los valores con respecto al peso y se obtuvo el total; la alternativa con mayor valor será la escogida. Se obtuvo como resultado la siguiente matriz mostrada en la Tabla 5.

Tabla 5. Matriz de selección para el cuerpo del tanque

Criterios	Peso	Alternativas					
		Rectangular		Esférico		Cilíndrico	
Facilidad de construcción	0.35	4	1.4	1	0.35	3	1.05
Facilidad de mezcla	0.24	1	0.24	4	0.96	3	0.72
Facilidad de mantenimiento	0.18	3	0.54	2	0.36	4	0.72
Facilidad de diseño	0.12	3	0.36	1	0.12	4	0.48
Estética	0.12	1	0.12	3	0.36	3	0.36
TOTAL	1.01	2.66		2.15		3.33	

Fuente: Creación propia

Debido a que obtuvo el mayor peso, la mejor alternativa para la función de almacenamiento es la forma cilíndrica vertical. Por lo tanto, esta geometría fue seleccionada.

2.4.2 Sistema de agitación

Se han evaluado los tres sistemas mencionados en la Tabla 3, según los siguientes criterios:

- Costo inicial
- Vida útil
- Costo de operación
- Costo de mantenimiento
- Tiempo de mezcla
- Eficiencia de la operación

Se empleó el mismo método de comparación utilizado para la selección del cuerpo del tanque, para la selección del sistema de agitación, y su resultado se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación de criterios del agitador

Criterios a evaluar	Costo Inicial	Vida Útil	Costo de operación	Costo de mantenimiento	Tiempo de mezcla	Eficiencia	TOTAL (FILA)	PESO
Costo Inicial	1.00	1.00	0.33	2.00	0.67	0.33	5.33	0.10
Vida Útil	1.00	1.00	0.33	2.00	0.67	0.33	5.33	0.10
Costo de operación	3.00	3.00	1.00	6.00	2.00	1.00	16	0.30
Costo de mantenimiento	0.50	0.50	0.17	1.00	0.33	0.17	2.67	0.05
Tiempo de mezcla	1.50	1.50	0.50	3.00	1.00	0.50	8.00	0.15
Eficiencia	3.00	3.00	1.00	6.00	2.00	1.00	16	0.30
TOTAL							53.33	1.00

Fuente: Creación propia

La Tabla 7 muestra el resultado de la evaluación de las tres alternativas.

Tabla 7. Matriz de selección para el sistema de agitación

Atributos	Peso	Alternativas					
		Agitador Mecánico		Eductores		Pulsador de Aire	
Costo de operación	0.30	3	0.90	2	0.60	2	0.60
Eficiencia	0.30	3	0.90	2	0.60	1	0.30
Tiempo de mezcla	0.15	3	0.45	4	0.60	3	0.45
Costo inicial	0.10	1	0.10	1	0.10	4	0.40
Vida útil	0.10	3	0.30	4	0.40	4	0.40
Costo de mantenimiento	0.05	2	0.10	2	0.10	4	0.20
TOTAL	1.00	2.75		2.40		2.35	

Fuente: Creación propia

La evaluación dio como resultado que la mejor alternativa es el agitador mecánico. Esta alternativa fue seleccionada para cumplir la función de agitación.

2.4.3 Sistema de calentamiento

Se han evaluado los tres sistemas mencionados en la Tabla 3, según los siguientes criterios:

- Interferencia con el proceso de mezcla
- Eficiencia
- Costo
- Facilidad de mantenimiento
- Facilidad de construcción

La Tabla 8 muestra el resultado de la comparación entre los criterios.

Tabla 8. Comparación de criterios para el sistema de calentamiento

Criterios a evaluar	Interferencia con el mezclado	Eficiencia	Costo inicial	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de construcción	TOTAL (FILA)	PESO
Interferencia con el mezclado	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	9.00	0.30
Eficiencia	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	9.00	0.30
Costo inicial	0.50	0.50	1.00	1.00	1.50	4.50	0.15
Facilidad de mantenimiento	0.50	0.50	1.00	1.00	1.50	4.50	0.15
Facilidad de construcción	0.33	0.33	0.67	0.67	1.00	3.00	0.10
TOTAL						30.00	1.00

Fuente: Creación propia

La Tabla 9 muestra la evaluación de las alternativas.

Tabla 9. Matriz de selección para el sistema de calentamiento

Atributos	Peso	Alternativas					
		Chaqueta		Serpentín		Eléctrico	
Interferencia con la mezcla	0.3	4	1.20	1	0.30	2	0.60
Eficiencia	0.3	2	0.6	4	1.2	3	0.9
Costo inicial	0.15	2	0.30	4	0.60	1	0.15
Facilidad de mantenimiento	0.15	1	0.15	2	0.3	4	0.6
Facilidad de construcción	0.1	2	0.2	3	0.3	4	0.4
TOTAL	1.00	2.45		2.7		2.65	

Fuente: Creación propia

Debido al puntaje total obtenido, la mejor alternativa para el calentamiento es el serpentín de tubería helicoidal y fue seleccionado como solución.

2.4.4 Solución Seleccionada

En base a las matrices de selección, la solución para cada función más apropiada para que este sistema cumpla con los objetivos, es:

- Almacenamiento: Tanque cilíndrico vertical
- Sistema de agitación: Agitador mecánico
- Sistema de calentamiento: Serpentín helicoidal de vapor

2.5 Diseño de Realización

2.5.1 Diseño del Tanque

2.5.1.1 Cuerpo del tanque

2.5.1.1.1 Selección del material

El estándar API 650, Sección 4.2.2, indica: Las planchas que se ajusten a las siguientes especificaciones ASTM son aceptables siempre y cuando se encuentran dentro de las limitaciones indicadas (American Petroleum Institute, 2013):

- a) ASTM A 36M/A 36 para planchas con un espesor máximo de 40 mm (1.5 pulg.).

- b) ASTM A 131M/ A131, Grado A, para planchas con un espesor máximo de 13 mm (0.5 pulg.); Grado B para planchas con un espesor máximo de 25 mm (1 in.).
- c) ASTM A 283M/ A283, grado C, para planchas con un espesor máximo de 25 mm (1 pulg.).

Se realizó una comparación entre las normas ASTM 36M/A 36 y la ASTM A 283M/ A283, grado C ya que los catálogos de planchas de acero de los proveedores locales se ajustan a estas normas de calidad. Esta comparación se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparación de la composición química

Material	Composición química (%)					
	C	Mn	P	S	Si	Cu
A 36	0,25	-	0,04	0,05	0,4	0,2
A283 Gr C	0,24	0,9	0,035	0,04	0,4	0,2

Fuente: ASTM A 36 & ASTM A 283 Gr C Vol. 01.04, Edition. 1998

El efecto del manganeso y otros elementos a la capacidad de soldadura puede ser conocido por el valor del carbono equivalente (CE), el cual es calculado mediante la ecuación (2.1).

$$CE = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/4 \quad (2.1)$$

➤ ASTM A36:

$$CE = 0.25 + 0.4/24 = 0.266\%$$

➤ ASTM A283, grado C:

$$CE = 0.24 + 0.4/24 + 0.9/6 = 0.406\%$$

El CE del A 283 Gr C es más alto que del ASTM A 36. Basado en esto, el A283 Gr C es un poco más difícil de soldar que el A 36.

Luego se realizó una comparación de las propiedades mecánicas de cada material, la cual se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Comparación de las propiedades mecánicas

Material	Yield Strength ksi (Mpa)	Tensile Strength ksi (Mpa)	Elongation 8 inch	Elongation 2 inch
A 36	36 (250)	58-80 (400-550)	20	23
A 283 Gr C	30 (205)	55-75 (380-515)	22	25

Fuente: ASTM A 36 & ASTM A 283 Gr C Vol. 01.04. 1998

Ambos materiales son aceros al carbono con composiciones químicas muy similares, por lo tanto, desde el punto de vista de resistencia a la corrosión, ambos se desempeñan de la misma manera.

Sin embargo, la plancha A36 tiene tensiones admisibles entre 10 y 16 por ciento más altas que la A 283 Gr C y esto conduce a un espesor más delgado y, por tanto, menos costo.

Por lo expuesto anteriormente, se decidió emplear el acero ASTM A 36 como material para las planchas que conforman el cuerpo del tanque.

2.5.1.1.2 Diseño de forma

La relación óptima de diámetro/altura de líquido es 1:1, lo cual, para un volumen de 10,000 gal (37.85 m³) resulta en un diámetro de 3.64 m.

Este diámetro resulta en un perímetro de 11.44 m, pero las planchas de acero para tanques revisadas tienen dimensiones 2440x6000 mm o 2440x12000 mm. Ya que dos planchas roladas de 2440x6000 mm proveen un perímetro de 12 m, se decide usar esta medida para no cortar y desperdiciar material.

Con un perímetro de 12 m, se calculó el diámetro, el cual resultó 3.82 m.

Luego se calculó el nivel normal de llenado (n.n.l.), que dio 3.3 m. Con estas dimensiones, tenemos una relación de diámetro/altura de líquido de 1.15, lo cual es aceptable. El estándar API 650 indica que se debe dejar una distancia sobre el n.n.l., a la cual se encuentra el nivel de líquido de diseño (n.l.d.). A esta diferencia se le llama protección de sobrellenado, tal como se muestra en la Figura 2.2.

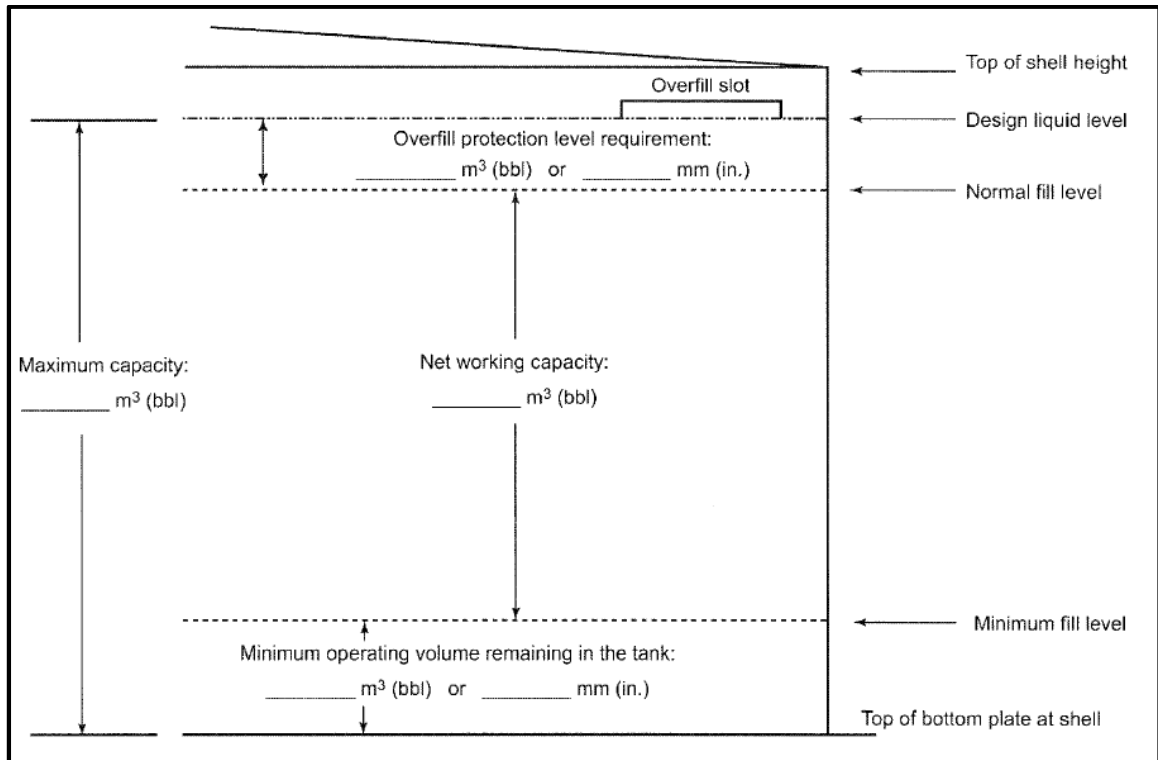


Figura 2.2. Volúmenes y niveles de tanques

(American Petroleum Institute, 2013)

Para evitar derrames, se dejará el 25% del volumen nominal del tanque (3.785 m³) como protección de sobrellenado. Con el diámetro previamente definido, se debe dejar una distancia de 0.83 m por sobre el n.n.l. Además, se debe dejar mínimo 0.5 m de distancia entre el techo y el n.l.d. En total, esto da una altura de 4.63 m. La altura de cada plancha de acero es de 2.44 m, por lo que se deberán usar 1.9 planchas, las cuales se redondean a su inmediato superior para evitar desperdiciar material, esto es, 2 planchas.

Las dimensiones finales del cuerpo del tanque resultaron:

- Diámetro (D) = 3.82 m
- Altura (H) = 4.88 m
- Número de planchas de 2440x6000 mm a usar = 4

2.5.1.1.3 Espesor de la pared

El estándar API 650 sección 5.6.1.1 indica: El espesor requerido de la pared será el mayor entre el espesor de diseño (t_d), incluyendo la tolerancia por corrosión, o el espesor de la prueba hidrostática (t_i), pero el espesor de la pared no deberá ser inferior a lo siguiente:

- Para diámetros de menos de 15 m (50 ft), pero superior a 3.2 m (10.5 ft), el espesor nominal de la pared más delgada no deberá ser inferior a 6 mm (1/4 pulg). (American Petroleum Institute, 2013)

El estándar API 650 provee el método llamado “1-Pie” para el cálculo del espesor de diseño y el espesor de la prueba hidrostática. Este método calcula los espesores requeridos en puntos de diseño a 0.3 m (1 pie) por encima de la parte inferior de cada plancha.

Bajo este método, los valores del espesor de diseño y espesor de la prueba hidrostática son calculados mediante las ecuaciones (2.2) y (2.3) respectivamente.

$$t_d = \frac{4.9D(H - 0.3)G}{S_d} + CA \quad (2.2)$$

$$t_t = \frac{4.9D(H - 0.3)}{S_t} \quad (2.3)$$

Dónde,

t_d : espesor de diseño

t_t : espesor de la prueba hidrostática

D: diámetro nominal del tanque, en m

H: nivel de líquido de diseño, en m

G: gravedad específica del líquido

CA: tolerancia de corrosión, en mm

S_d : esfuerzo permisible de diseño, en MPa

S_t : esfuerzo permisible para la prueba hidrostática, en MPa

La Tabla 12 muestra los valores de esfuerzo permisibles de diseño y de la prueba hidrostática para el acero ASTM A-36.

Tabla 12. Esfuerzos Permisibles

Material	Límite elástico mínimo MPa	Resistencia a la tracción MPa	Esfuerzo de diseño (Sd) MPa	Esfuerzo de la prueba hidrostática (St) MPa
A 36M	250	400	160	171

Fuente: (American Petroleum Institute, 2013)

La Tabla 13 muestra la velocidad de corrosión atmosférica en micras por año, según la clase de corrosión del sitio.

Tabla 13. Velocidad de corrosión atmosférica según la clase de corrosión

Corrosion Class	Steel	
	ST	LT
1	<0.5	<0.1
2	0.5–2	0.1–1.5
3	2–10	1.5–6
4	10–35	6–20
5	>35	>20

ST: Velocidad de corrosión promedio durante los primeros 10 años de exposición

LT: velocidad de corrosión de estado estable para exposiciones a largo plazo

Fuente: (NACE, 2002)

No se tienen datos exactos de la clase de corrosión ambiental del sitio, pero se conoce que el ambiente de Guayaquil es corrosivo, y debido a que la planta se encuentra junto al río Guayas, se asumió la clase 5 para el cálculo. La tabla 13 indica que durante los primeros 10 años de vida del tanque, la velocidad de corrosión es mayor a 35 $\mu\text{m}/\text{año}$, ya que el mismo tendrá un recubrimiento anticorrosivo, se asumió una velocidad de 40 $\mu\text{m}/\text{año}$. Se multiplicó esta velocidad de corrosión por los 10 años en los que se da esa velocidad y se obtuvo como resultado 400 μm .

A partir del décimo año de vida del tanque, se asume una velocidad de corrosión de 25 $\mu\text{m}/\text{año}$. Se multiplicó esta velocidad por los 15 años de vida restantes del tanque y se obtuvo 375 μm . La suma de estos valores es la tolerancia a la corrosión, por lo tanto:

$$CA = 775 \mu\text{m}.$$

Se reemplazaron los valores en las fórmulas y se obtuvieron los siguientes resultados:

$$t_d = 1.2 \text{ mm}$$

$$t_t = 0.4 \text{ mm}$$

Ya que el estándar no permite usar espesores menores a 6 mm, se usarán planchas de 6 mm de espesor.

2.5.1.2 Fondo del tanque

Dado que es un requerimiento que el tanque tenga salida por su parte inferior, el tanque deberá ser elevado. Debido a su gran resistencia, se empleó una cabeza ASME bridada y alabeada (Domo Toriesférico) para el fondo del tanque. La Figura 2.3 muestra en corte, las dimensiones características del Domo Toriesférico en una vista girada 180°.

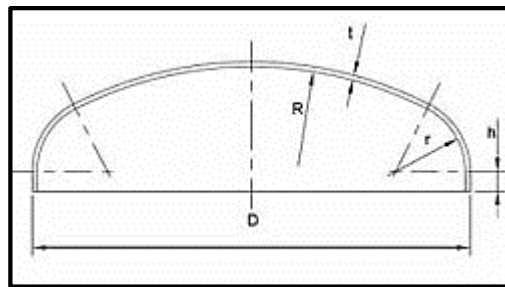


Figura 2.3. Cabeza ASME bridada y alabeada (Domo Toriesférico)

Fuente: (ASME, 2013)

El espesor de la cabeza debe coincidir con el espesor que la pared del tanque, pero se debe verificar que una cabeza de dicho espesor sea capaz de resistir la presión interna.

Se comenzó por especificar el radio de la esquina interior (r) y el radio del domo (L), como se muestra en la Figura 2.4. Estos radios vienen dados por las herramientas de fabricación de domos toriesféricos disponibles. Para este tanque, se fijó el radio de esquina interior en 100 mm y el radio del domo en 4 m, los cuales son comunes en los talleres. La presión máxima de trabajo permitida de un domo toriesférico viene dada por la ecuación (2.4).

$$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t} \quad (2.4)$$

Dónde,

P: presión máxima de trabajo permitida, en psi

S: Esfuerzo permisible del material, en psi

E: Eficiencia de la junta

t: Espesor de pared, en pulg

L: Radio interior del domo, en pulg

Además, se calculó el diámetro del disco plano, a partir del cual se obtiene esta geometría mediante la ecuación (2.5):

$$\phi = 2 \left(\frac{\beta}{180} \right) \pi r + 2 \left(\frac{\alpha}{180} \right) \pi L + 2f \quad (2.5)$$

Dónde,

$$a = \frac{D - 2r}{2} \quad (2.6)$$

$$\sin(\alpha) = \left(\frac{a}{L - r} \right) \quad (2.7)$$

f: Longitud de la pestaña del domo

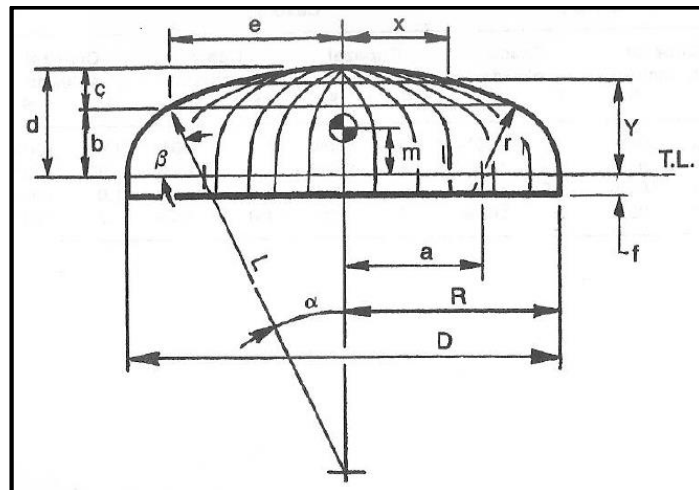


Figura 2.4. Dimensiones de un domo Toriesférico

Fuente: (ASME, 2013)

2.5.1.2.1 Eficiencia de la junta

La eficiencia de la junta se la obtuvo de acuerdo al tipo de soldadura, como se indica en (Megyesy, 1992). Ver el Apéndice C.

2.5.1.2.2 Dimensiones finales

Con los valores anteriormente fijados, y el diámetro interior D (3.82 m), se resolvieron las ecuaciones y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14. Dimensiones finales del fondo

t = 6 mm	f = 0.05 m
P = 41.67 psi	Ø = 4.18 m
a = 1.81 m	r = 100 mm
$\alpha = 27.65^\circ$	L = 4 m

Fuente: Elaboración propia

2.5.1.3 Techo del tanque

El estándar API650 indica que se puede emplear un techo cónico auto soportado, el cual es formado para aproximar la superficie de un cono recto que se apoya solamente en su periferia. La ventaja de este techo es que no necesita columnas para apoyarlo y si se requieren, sus vigas radiales son rectas, por lo que su construcción resulta económica. La Figura 2.5 muestra un bosquejo de un techo cónico auto soportado.

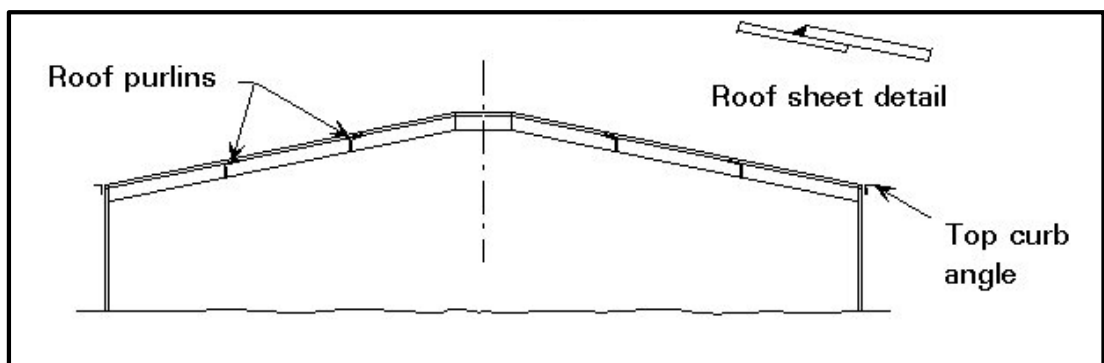


Figura 2.5. Techo cónico auto soportado

Fuente: Universidad de Ljubljana Facultad de Ingeniería Civil y Geodesia

2.5.1.3.1 Junta en el ángulo superior

Las planchas deben estar unidas al ángulo superior del tanque mediante soldadura continua en el lado superior y deben ajustarse a los siguientes requisitos:

- $\theta \leq 37$ grados (pendiente = 9:12)
- $\theta \geq 9.5$ grados (pendiente = 2:12)
- El espesor nominal no deberá ser inferior al mayor entre:

$$\frac{D}{4.8 \sin \theta} \sqrt{\frac{T}{2.2}} + CA \text{ y } 5 \text{ mm} \quad (2.8)$$

Dónde,

D: Diámetro nominal del tanque, en metros;

T: la mayor de las combinaciones de carga 2.5.2 (e)(1) y (e)(2);

θ : ángulo de los elementos de cono con la horizontal, en grados;

CA: Tolerancia a la corrosión

La Tabla 15 muestra las dimensiones mínimas del ángulo superior, según el diámetro del tanque.

Tabla 15. Dimensiones mínimas del ángulo superior

Tank Diameter (D)	Minimum Top Angle Size ^a (mm)
$D \leq 11 \text{ m}, (D \leq 35 \text{ ft})$	$50 \times 50 \times 5$
$11 \text{ m} < D \leq 18 \text{ m}, (35 \text{ ft} < D \leq 60 \text{ ft})$	$50 \times 50 \times 6$
$D > 18 \text{ m}, (D > 60 \text{ ft})$	$75 \times 75 \times 10$

Fuente: (American Petroleum Institute, 2013)

Se fijó el ángulo en 9.5° ya que no caerá nieve en el techo. Esto significó una altura del cono de 0.32 m. Luego se calculó el radio del disco plano del cual se obtiene este cono. Se fijó el espesor del techo en 6 mm.

2.5.1.3.2 Área requerida de compresión en la junta techo-pared

El área total requerida de compresión en la unión entre el techo y al depósito deberá calcularse a partir de la ecuación (2.9).

$$A_{req} = \frac{200D^2 \left(P_i - \frac{0.00127D_{LR}}{D^2} \right)}{F_y(\tan \theta)} \quad (2.9)$$

Dónde,

A_{req} : Área requerida de compresión

D: Diámetro nominal del tanque

P_i : Presión interna de diseño

D_{LR} : Carga muerta del techo y elementos acoplados al techo

F_y : Esfuerzo admisible del material

La carga muerta del techo y elementos acoplados al techo se la calculó mediante la ecuación (2.10):

$$D_{LR} = W_R + W_m + W_p + W_b \quad (2.10)$$

Dónde,

W_R : Peso de techo

W_m : Peso del motorreductor

W_p : Peso de dos personas adultas

W_b : Peso de la baranda de seguridad

La Figura 2.6 muestra el área transversal a considerar como área de compresión para la junta entre el techo y la pared (área sombreada) y las longitudes permisibles de la junta.

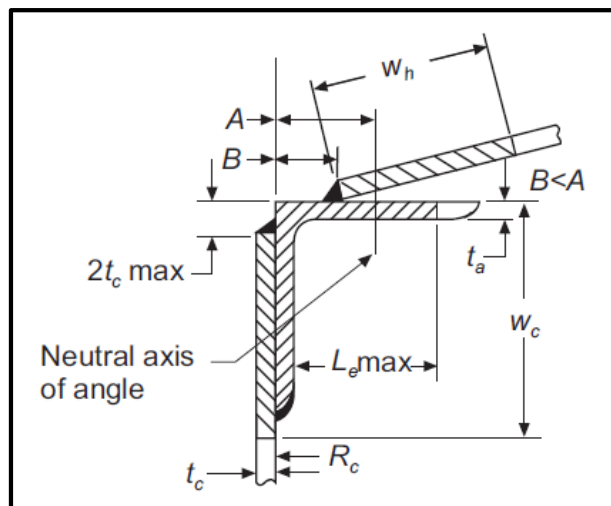


Figura 2.6. Detalles permisibles de la junta al ángulo superior

Fuente: (American Petroleum Institute, 2013)

t_a : Espesor del ángulo

t_c : Espesor de la plancha de la pared

t_h : Espesor de la plancha del techo

w_c : Ancho máximo de participación de la pared = $0.6(R_c t_c)^{0.5}$

w_h : Ancho máximo de participación del techo = el menor entre $0.3(R_2 t_h)^{0.5}$ y 300 mm

R_c : Radio interno del tanque

R_2 : Longitud de la normal al techo, medida desde el eje central vertical del tanque = $R_c/(\text{sen } 8)$

Se calcularon los valores y se obtuvo que el área requerida de compresión es igual a 8277 mm², pero con un espesor de 6 mm se tiene un área transversal de 1366 mm². Por lo tanto, se usarán vigas radiales para soportar el peso del techo y los elementos montados en el mismo.

2.5.1.4 Entrada de Hombre

Se utilizó una entrada hombre de 600 mm de diámetro. Las dimensiones de estas entradas son estándar según el diámetro que se elija. La norma API 650 especifica estas dimensiones que se encuentran en el Apéndice D.

2.5.1.5 Pintado

Para aplicar la pintura es necesario primero hacer una preparación de la superficie mediante un chorro de agua a alta presión hasta que la superficie de las planchas de acero alcance el grado WA2 de la norma ISO 8501-4:2006, equivalente a metal casi blanco.

Se deben aplicar dos capas de pintura: de pintura base anticorrosiva y de acabado a la superficie externa del cuerpo, techo y base del tanque, con un área total de 83.2 m² (medido del modelo a computadora en 3D). El espesor de capa seca de la pintura base debe ser 200 micras y la de acabado 50 micras, como lo sugiere un proveedor de pinturas local. La Tabla 16 detalla el rendimiento teórico de las pinturas seleccionadas para cada capa y el volumen de pintura que se requiere para pintar toda la superficie externa del tanque.

Tabla 16. Volumen de pintura requerido

	ECS (micras)	%SV	Rendimiento (m ² /L)	Volumen Requerido (L)	Pérdidas (30%)	Total (L)
Pintura Base	200	80	4.00	20.80	6.24	27.04
Acabado	50	50	10.00	8.32	2.50	10.82

Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Diseño del Sistema de Agitación

2.5.2.1 Selección del tipo de agitador mecánico adecuado

Para determinar el tipo de agitador, Penny (1970) propone la Figura 2.7. Esta gráfica tiene el volumen del tanque en el eje horizontal y viscosidad del fluido en el eje vertical. Al interceptar el valor correspondiente para cada eje en un punto, se obtiene el tipo de agitador apropiado.

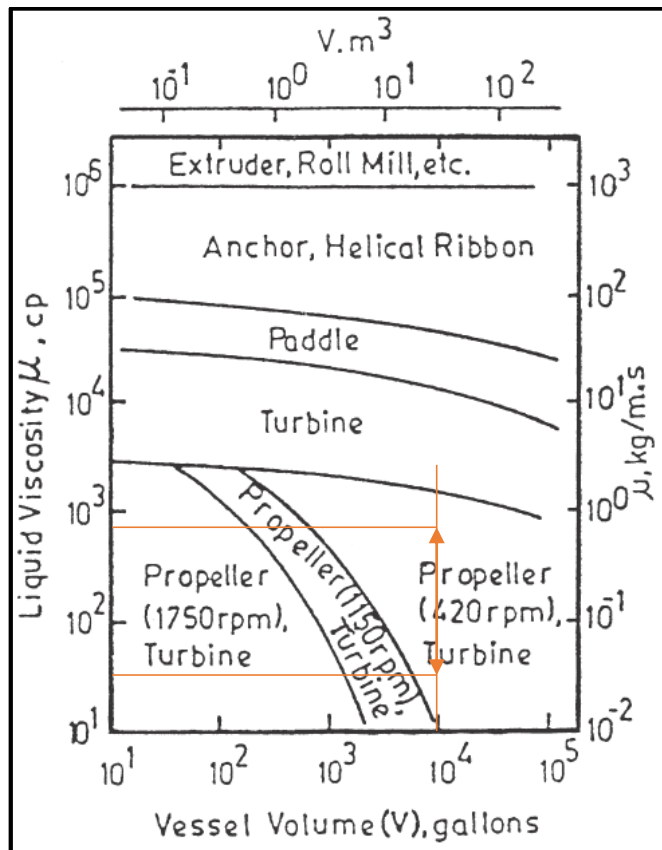


Figura 2.7. Selección del tipo de agitador

Fuente: (Penny, 1970)

Con los valores de viscosidad dinámica dados y el volumen del tanque (10^4 gal), se ingresa al gráfico y éste indica que, para el rango establecido en las especificaciones de diseño, se puede usar un agitador tipo hélice marina o un agitador tipo turbina.

Debido a su fabricación por fundición, una hélice marina se hace demasiado pesada cuando es grande. No se utiliza como agitador de entrada superior en tanques de un diámetro superior a cinco pies, sino como agitador de entrada lateral. (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

Por ende, se decidió utilizar un agitador tipo turbina de aspas inclinadas 45° ya que generan un patrón de flujo mixto y además son especialmente eficaces para el intercambio de calor con las paredes o serpentín interno.

2.5.2.2 Configuración del sistema de agitación

Varios tipos de recipientes y tanques de diferentes formas y tamaños geométricos se utilizan para el mezclado de fluidos. La Figura 2.8 muestra la configuración estándar de un tanque de mezcla.

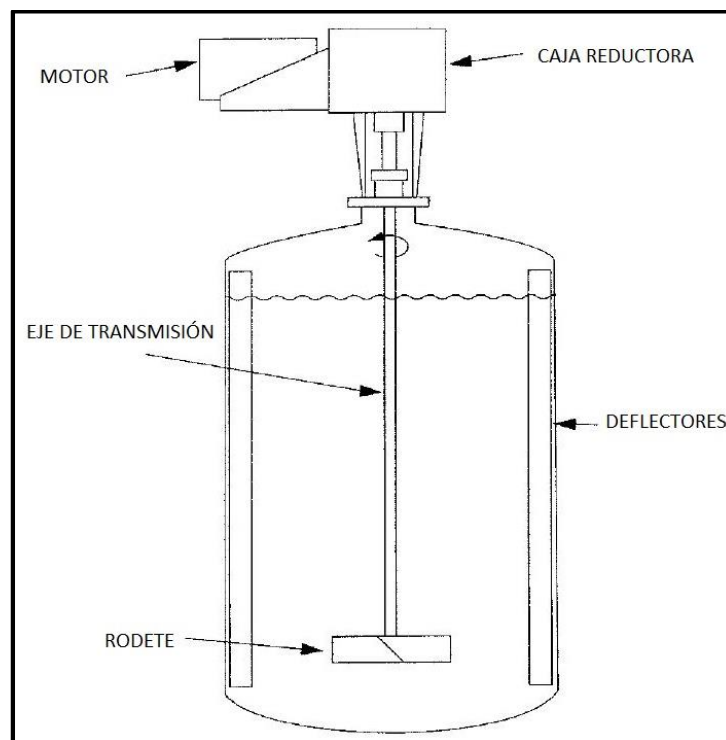


Figura 2.8. Configuración estándar de un Tanque de mezcla

Fuente: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

La Figura 2.9 muestra las variables dimensionales a considerar en para la configuración mostrada en la Figura 2.8, y la Tabla 17 muestra las proporciones geométricas de estas dimensiones para un sistema de agitación estándar.

Tabla 17. Proporciones geométricas de un sistema de agitación estándar

$\frac{D_A}{D_T} = \frac{1}{4}$	$\frac{H}{D_T} = 1$	$\frac{B}{D_T} = \frac{1}{12}$
$\frac{E}{D_A} = 1$	$\frac{W}{D_A} = \frac{1}{8}$	$\frac{S}{D_A} = 1$

Fuente: (Coker, 2001)

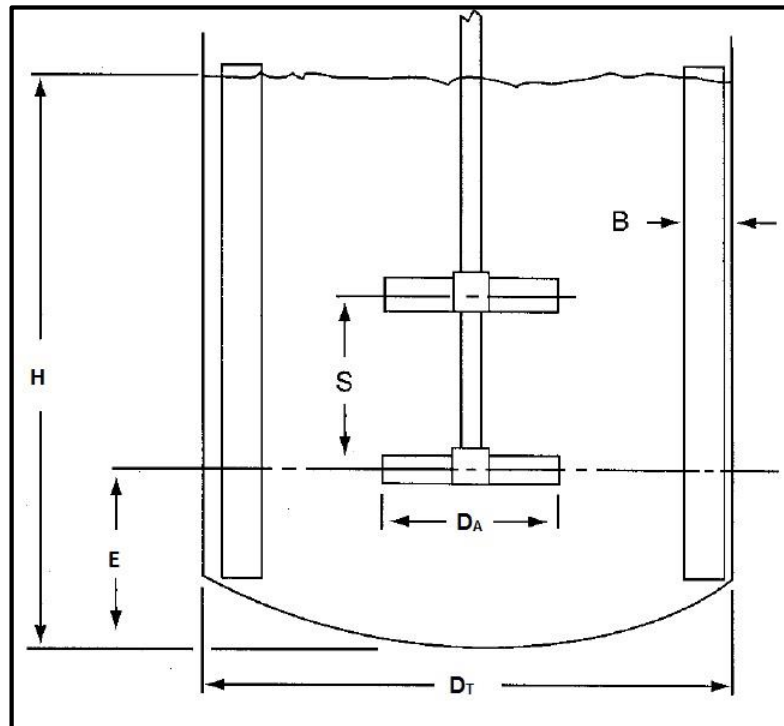


Figura 2.9. Variables dimensionales

Fuente: (Coker, 2001)

Dónde,

D_T : Diámetro del tanque

H : altura del líquido

D_A : Diámetro del agitador

B : ancho de la placa deflector

E: distancia del fondo del tanque hasta el rodete

S: Separación entre agitadores

W: ancho de las aspas de la turbina o agitador de paletas

Por lo general, se utilizan cuatro deflectores. La Tabla 18 muestra el número de agitadores necesarios y la elevación desde el fondo requerida, según la aplicación y la relación entre la altura de líquido y el diámetro del tanque (H/D_T).

Tabla 18. Número de agitadores requeridos

Mixing System	Maximum Liquid Height, Z/T	Number of Impellers	Impeller Elevation from Tank Bottom	
			Bottom	Top
Liquid blending	1.4	1	Z/3	—
	2.1	2	T/3	2 Z/3
Solids suspension	1.2	1	Z/4	—
	1.8	2	T/4	2 Z/3
Gas dispersion	1.0	1	T/6	—
	1.8	2	T/6	2 Z/3

Fuente: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

Se probaron con varios diámetros de agitador y velocidades de rotación y se calculó la potencia requerida, la tasa de circulación interna y el tiempo de mezcla hasta encontrar una configuración que esté acorde tanto a las proporciones geométricas de la Tabla 17, las proporciones indicadas en gráficas disponibles en los textos, a las velocidades de salida que ofrecen los motores eléctricos de inducción y a los resultados esperados. Después de varios intentos se estableció el diámetro del agitador en 1 m y la velocidad del agitador en 125 rpm.

2.5.2.3 Potencia requerida por el motor

La potencia consumida por un agitador, P, varía con respecto al diámetro del agitador, la gravedad, (g) la viscosidad del fluido (μ), la densidad (ρ), la velocidad de rotación del agitador (N), el diámetro del tanque, el ancho de las aspas y la altura del líquido. Esta expresión se muestra en la ecuación (2.13):

$$P = f(D_A, g, \mu, \rho, N, D_T, W, H) \quad (2.13)$$

Haciendo uso del Análisis Dimensional pueden agruparse dichas variables en distintos módulos adimensionales, dando como resultado la ecuación (2.14):

$$\frac{P}{D_A^5 N^3 \rho} = K \left\{ \left(\frac{\mu}{D_A^2 N \rho} \right)^b \left(\frac{g}{N^2 D_A} \right)^d \left(\frac{D_T}{D_A} \right)^f \left(\frac{W}{D_A} \right)^g \left(\frac{H}{D_A} \right)^h \right\} \quad (2.14)$$

La ecuación (2.14) se la puede expresar como la ecuación (2.15):

$$N_P = K \left\{ Re^{-b} Fr^{-d} \left(\frac{D_T}{D_A} \right)^f \left(\frac{W}{D_A} \right)^g \left(\frac{H}{D_A} \right)^h \right\} \quad (2.15)$$

Siendo:

N_p : Número de potencia

Re : Número de Reynolds

Fr : Número de Froude

Rushton et al. (1950) realizaron extensas mediciones de los requisitos de energía para sistemas geoméricamente similares y encontraron que, para tanques con deflectores, el número de Froude no juega ningún papel en la determinación de los requisitos de potencia, ya que no se forman vórtices en tales sistemas. (Coker, 2001)

2.5.2.3.1 Cálculo del Número de Reynolds del agitador

El número de Reynolds se lo calculó mediante la ecuación (2.16) con las propiedades promedio de los lubricantes y la velocidad del agitador:

$$Re = \frac{D_A^2 N \rho}{\mu} \quad (2.16)$$

$$Re = \frac{(1 \text{ m})^2 \left(125 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) (878 \text{ kg/m}^3)}{0.4375 \text{ kg/m} \cdot \text{s}}$$

$$Re = 4181$$

$Re < 10$ es régimen laminar

$10 < Re < 10,000$ es régimen de transición

$Re > 10,000$ es régimen turbulento

2.5.2.3.2 Determinación del Número de Potencia

Los valores del número de potencia han sido obtenidos experimentalmente y los resultados de la investigación hecha por (Bates Fondy & Corpstein, 1950) se presentan en la Figura 2.10, la cual muestra el valor del número de potencia en función del número de Reynolds para diferentes agitadores tipo turbina.

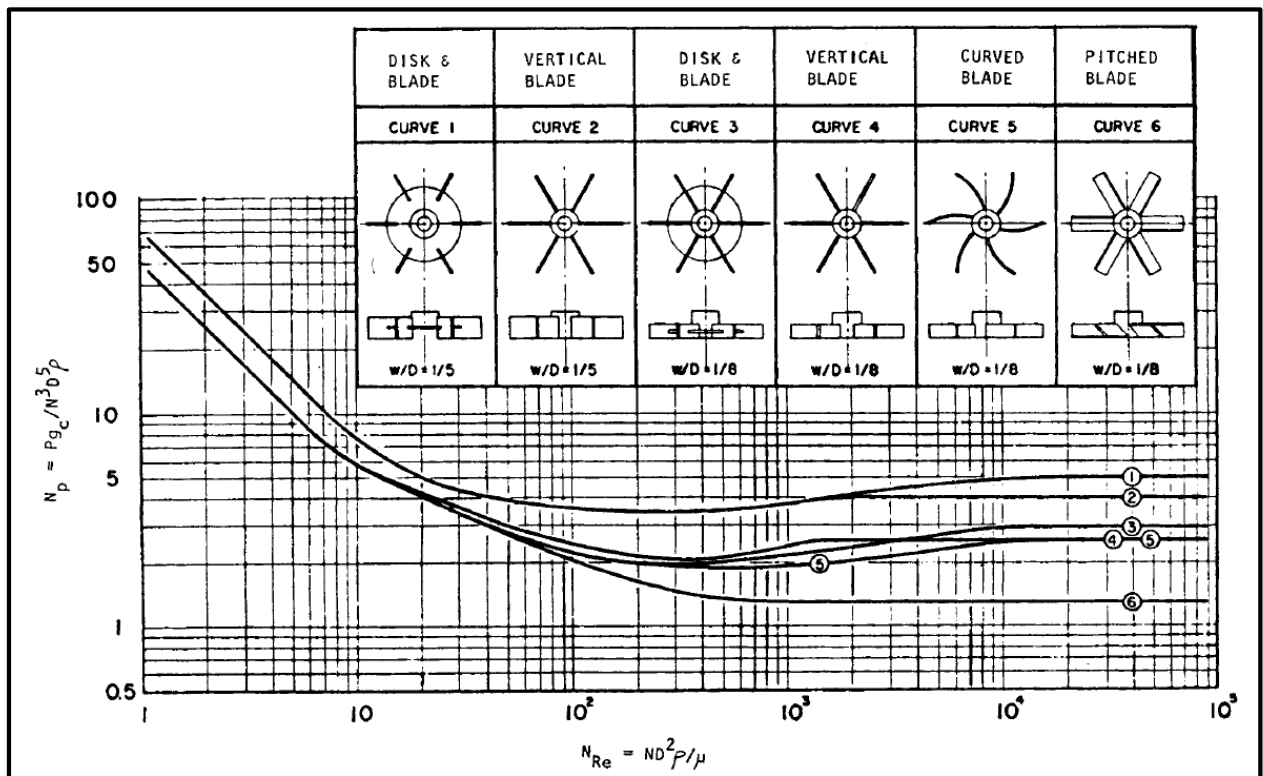


Figura 2.10. Número de potencia contra el Número de Reynolds para diferentes agitadores tipo turbina

Fuente: (Walas, 1990)

A partir de la Figura 2.10, curva #6, se obtuvo que el número de potencia para el agitador seleccionado es 1.1.

2.5.2.3.3 Cálculo de la Potencia requerida por el agitador

La potencia se la calculó a partir de la ecuación (2.17):

$$P = N_p D_A^5 N^3 \rho \quad (2.17)$$

$$P = 1.1(1 \text{ m})^5 \left(125 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)^3 (878 \text{ kg/m}^3)$$

$$P = 8733 \text{ W} = 11.7 \text{ HP}$$

2.5.2.3.4 Cálculo de la Potencia del motor eléctrico requerida

La potencia requerida del motor eléctrico debe considerar la eficiencia de sus elementos (η), y se la calculó mediante la ecuación (2.18):

$$P_m = \frac{P}{\eta} \quad (2.18)$$

$$P_m = \frac{11.7 \text{ HP}}{0.8}$$

$$P_m = 14.6 \text{ HP}$$

Por lo tanto, se requiere de un motor de 15 HP. La potencia de entrada por unidad de volumen es un parámetro que indica la intensidad del mezclado, ésta la obtiene al dividir la potencia del motor para el volumen del tanque y usualmente se mide en HP/1000 gal.

En este sistema, este valor resulta en 1.5 HP/1000 gal y en los tanques de mezcla actuales este valor es de 1.7 por lo que se puede inferir que la agitación proporcionada posee una intensidad adecuada.

2.5.2.4 Cálculo del diámetro del eje de transmisión

Se utilizó la ecuación para el diámetro de un eje sometido a torque constante y flexión completamente reversible (Norton, 2013).

$$d = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\left(K_f \frac{M_a}{S_f} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2.19)$$

En este caso, no existen fuerzas transversales aplicadas que causen flexión, por lo tanto $M_a = 0$, y la ecuación (2.19) se reduce a:

$$d = \left[\frac{16\sqrt{3}N_f}{\pi} \left(\frac{T_m}{S_y} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.20)$$

$$P = T_m \omega \quad (2.21)$$

Dónde,

N_f : Factor de seguridad

P : Potencia consumida por el agitador

ω : Velocidad angular

T_m : Torque medio

S_y : Resistencia a la fluencia del material

Se escogió usar acero de transmisión SAE 1018 y un factor de seguridad de 2.5. Despejando el torque de la ecuación (2.21) se obtuvo:

$$T_m = \frac{P}{\omega}$$

$$T_m = \frac{8733 \text{ W}}{125 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}}}$$

$$T_m = 667.15 \text{ N.m}$$

$$S_y = 304 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$d = \left[\frac{16\sqrt{3}(2.5)}{\pi} \left(\frac{667.15 \text{ N.m}}{304 \times 10^6 \text{ Pa}} \right) \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0.036 \text{ m}$$

$$d = 1 \frac{1}{2}''$$

2.5.2.5 Cálculo de la tasa de circulación interna

Los agitadores funcionan como bombas sin carcasa. La tasa de circulación interna, o flujo interno en el tanque, es la cantidad de flujo perpendicular al área de descarga del impulsor. Se la calculó mediante la ecuación (2.22).

$$Q = N_Q N D^3 \quad (2.22)$$

Dónde N_Q es el “número de flujo” o “número de bomba”, el cual depende del tipo de agitador, la relación D_A/D_T y el número de Reynolds del agitador. Los valores del número de bomba para los agitadores tipo turbina de aspas inclinadas se han obtenido experimentalmente. La Figura 2.11 muestra el

número de flujo graficado según el número de Reynolds para distintas relaciones D_A/D_T para este tipo de agitador.

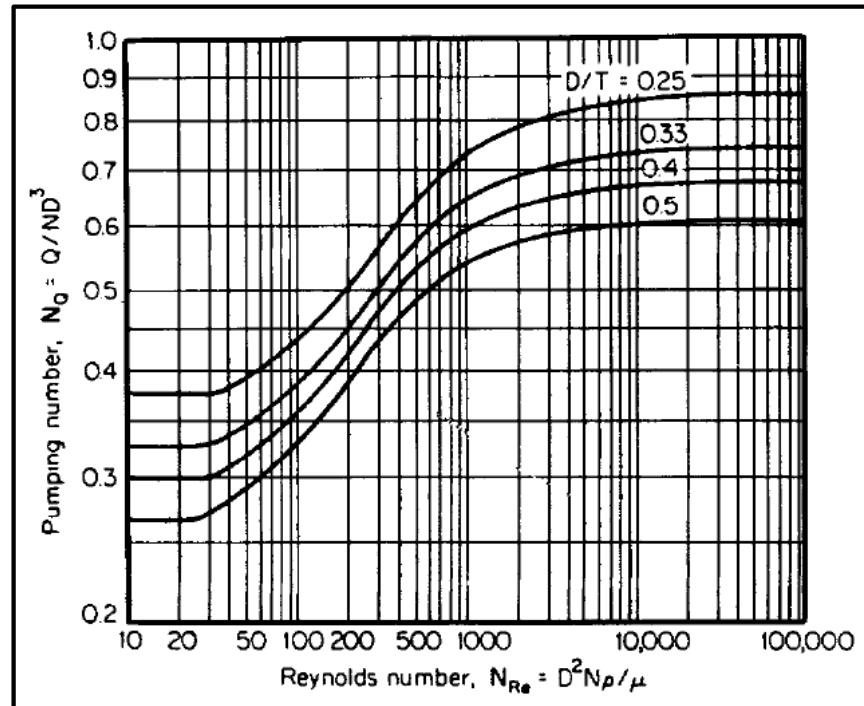


Figura 2.11. Número de flujo contra número de Reynolds para turbinas de aspas inclinadas

Fuente: (Walas, 1990)

A partir de la Figura 2.11 se obtuvo que el número de flujo para un agitador con un número de Reynolds de 4181 y relación $D_A/D_T = 0.26$ es 0.8. Este dato se lo reemplazó junto con la velocidad de rotación y el diámetro del agitador en la ecuación (2.22).

$$Q = 0.8 \left(125 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) (1 \text{ m})^3$$

$$Q = 1.67 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.5.2.6 Tiempo de mezcla

La tasa de bombeo y el número de rotaciones determinan el tiempo de mezcla. El número de rotaciones para alcanzar 95% de homogeneidad es una función

de la viscosidad del líquido, en la Tabla 19 se muestra el número de rotaciones para alcanzar 95% de homogeneidad.

Tabla 19. Número de rotaciones para alcanzar 95% de homogeneidad

Viscosidad (cP)	< 100	100 – 1000	1000 – 5000	> 5000
Número de rotaciones para 95% de homogeneidad	3	10	50	> 100

Fuente: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

La Tabla 19 indica que se requieren casi 9 rotaciones para alcanzar el 95% de homogeneidad para los lubricantes de mayor viscosidad. El tiempo para alcanzar el 95% de homogeneidad se lo calculó mediante la ecuación (2.23).

$$t_{95} = \frac{n \times V}{Q} \quad (2.23)$$

Dónde,

n: Número de rotaciones para alcanzar 95% de homogeneidad

V: Volumen nominal del tanque

Q: Tasa de bombeo

$$t_{95} = \frac{9 \times 37.85 \text{ m}^3}{1.67 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$t_{95} = 204 \text{ s}$$

Este tiempo de mezcla fue corregido para alcanzar el 99% de homogeneidad mediante la ecuación (2.24)

$$t_{99} = 1.537t_{95} \quad (2.24)$$

$$t_{99} = 1.537(204 \text{ s})$$

$$t_{99} = 314 \text{ s}$$

2.5.2.7 Calidad del mezclado

La velocidad lineal superficial-la tasa volumétrica de circulación interna por unidad de sección transversal del tanque-es adoptada como una medida de la

calidad del mezclado (Walas, 1990). La Tabla 20 relaciona esta velocidad con el desempeño de la mezcla de líquidos.

La velocidad lineal superficial se la calculó mediante la ecuación (2.25):

$$V = \frac{Q}{A_T} \quad (2.25)$$

$$V = \frac{1.67 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \frac{(3.82 \text{ m})^2}{4}}$$

$$V = 0.15 \text{ m/s} = 0.48 \text{ ft/s}$$

Tabla 20. Desempeño del mezclado según la velocidad lineal superficial

pie/s	Descripción
0.1 – 0.2	<p>Bajo grado de agitación; una velocidad de 0.2 pie/s:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) mezclará líquidos miscibles a la uniformidad cuando la diferencia de gravedad específica es menor a 0.1 b) mezclará líquidos miscibles a la uniformidad si la relación de viscosidades es menor a 100 c) establecerá movimiento del líquido a través del recipiente d) producirá una superficie plana, pero en movimiento
0.3 – 0.6	<p>Agitación moderada. Característica de la mayoría de la agitación utilizada en el procesamiento químico; una velocidad de 0.6 pie/s:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) mezclará líquidos miscibles a la uniformidad cuando la diferencia de gravedad específica es menor a 0.6 b) mezclará líquidos miscibles a la uniformidad si la relación de viscosidades es menor a 10,000 c) suspenderá s trazas de sólido (menos del 2%) con velocidades de sedimentación de 2 - 4 pies/min. d) Producirá una superficie ondulante a bajas viscosidades.
0.7 – 1.0	<p>Alto grado de agitación; una velocidad de 1.0 pie/s:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) mezclará líquidos miscibles a la uniformidad cuando la diferencia de gravedad específica es menor a 1.0 b) mezclará líquidos miscibles a la uniformidad si la relación de viscosidades es menor a 100,000 c) suspenderá s trazas de sólido (menos del 2%) con velocidades de sedimentación de 4 - 6 pies/min. d) Producirá una superficie ondulada a bajas viscosidades.

Fuente: (Walas, 1990)

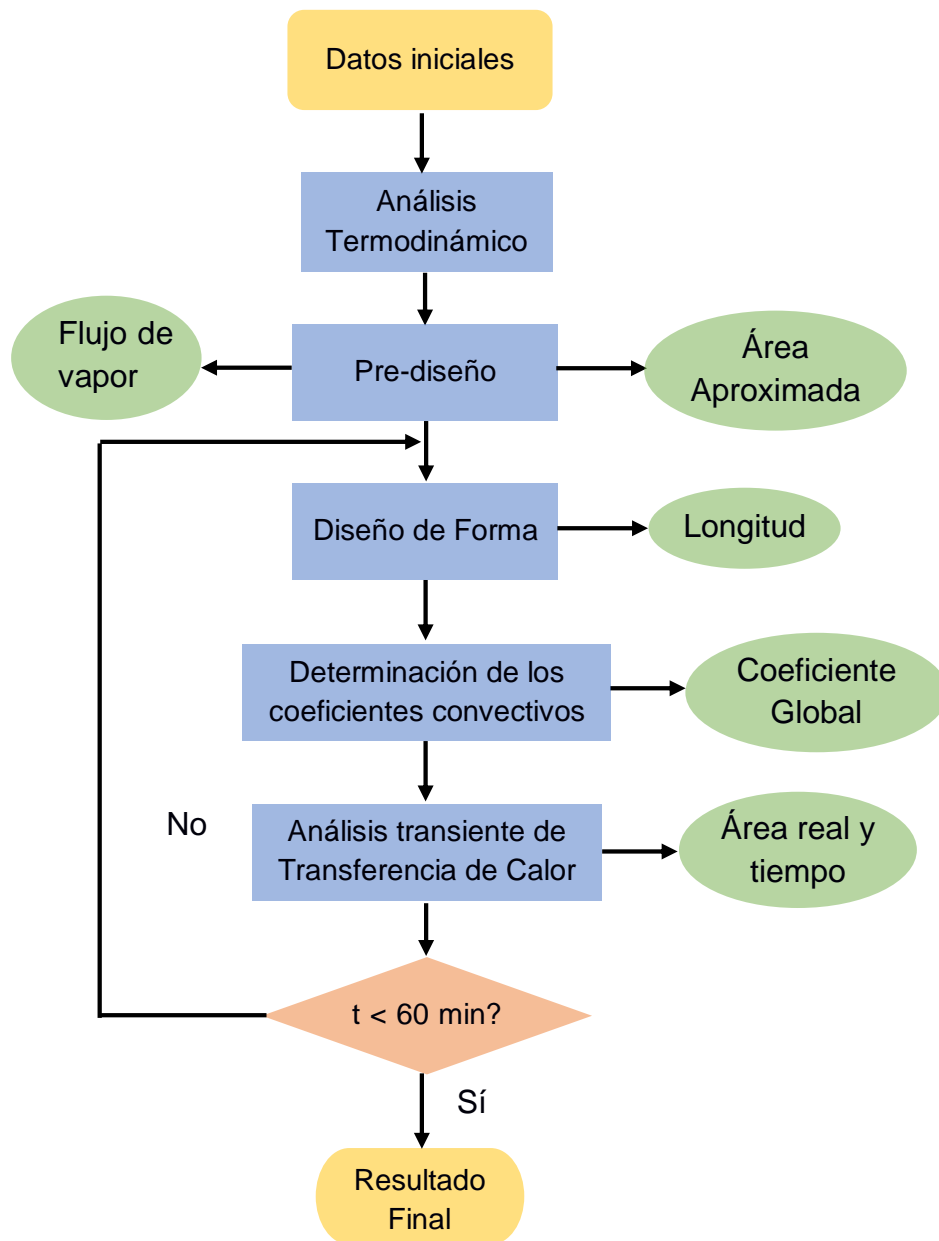
Según la Tabla 20, con esta velocidad lineal superficial se produce una agitación moderada.

2.5.3 Diseño del Sistema de Calentamiento

El diseño térmico del serpentín del tanque consiste en la determinación del área de transferencia de calor requerida para subir o bajar la temperatura del contenido por una magnitud especificada en un intervalo de tiempo.

2.5.3.1 Metodología del Diseño Térmico

Se siguió la metodología de diseño de intercambiadores de calor:



2.5.3.1.1 Datos iniciales

El aceite base y los aditivos entran al tanque de mezcla a 25 °C y deben calentarse hasta 50 °C en 60 minutos. Se requiere calcular el flujo de vapor necesario para proveer el calor requerido para lograr este proceso. Se diseñó para la masa de lubricante contenida hasta el nivel normal de llenado.

El fluido de calentamiento es vapor de agua suministrado por una caldera que opera a 80 psig, entra al serpentín con una calidad del 100% y sale del serpentín como líquido saturado (calidad igual a cero).

La Figura 2.12 muestra el diagrama Temperatura-Entropía del proceso que experimenta el vapor al pasar por el serpentín.

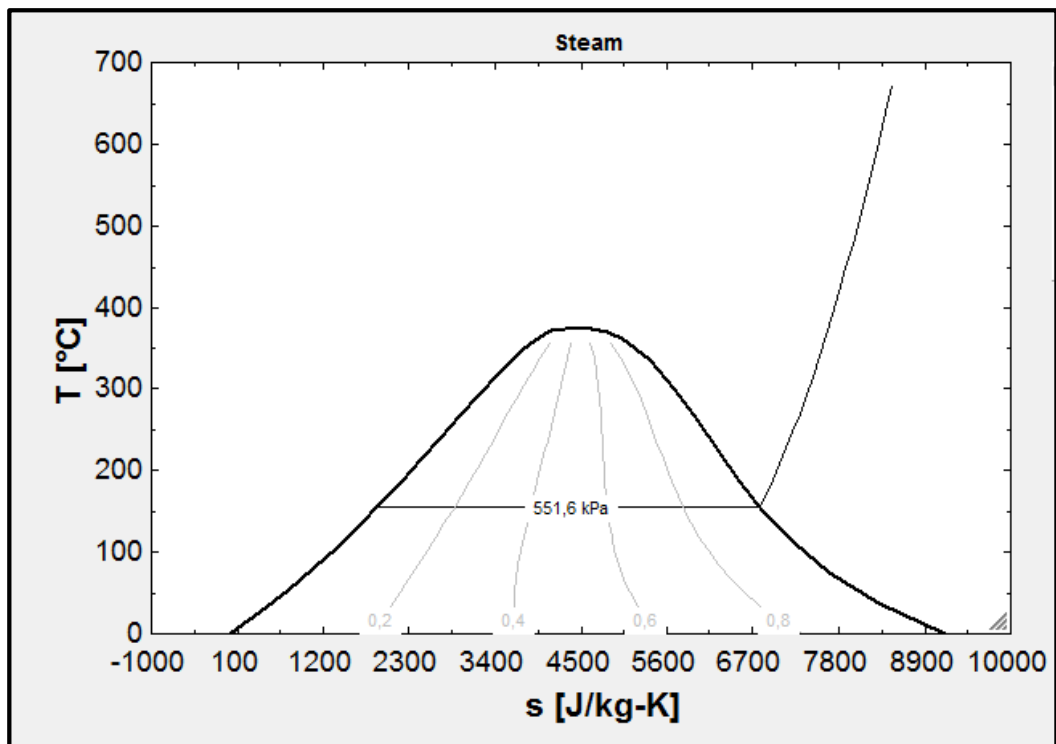


Figura 2.12. Proceso que atraviesa el vapor

Fuente: Elaboración propia

Para el del serpentín se empleó tubería ASTM A-53 grado B cédula 40 ya que la contaminación por corrosión es tolerable. Las propiedades de la mezcla agua-vapor se las determinó mediante un software para ingeniería y las propiedades del aceite lubricante mediante tablas encontradas en los textos. La Tabla 21 muestra las propiedades de los aceites lubricantes para motores no usados a diferentes temperaturas.

Tabla 21. Propiedades termo-físicas promedio de los aceites lubricantes

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^2$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	Pr	$\beta \cdot 10^3$ (K ⁻¹)
Engine Oil (Unused)								
273	899.1	1.796	385	4280	147	0.910	47,000	0.70
280	895.3	1.827	217	2430	144	0.880	27,500	0.70
290	890.0	1.868	99.9	1120	145	0.872	12,900	0.70
300	884.1	1.909	48.6	550	145	0.859	6400	0.70
310	877.9	1.951	25.3	288	145	0.847	3400	0.70
320	871.8	1.993	14.1	161	143	0.823	1965	0.70
330	865.8	2.035	8.36	96.6	141	0.800	1205	0.70
340	859.9	2.076	5.31	61.7	139	0.779	793	0.70

Fuente: (Incropera & DeWitt, 2011)

La Figura 2.13 muestra la configuración estándar de un tanque agitado y calentado mediante un serpentín helicoidal sumergido.

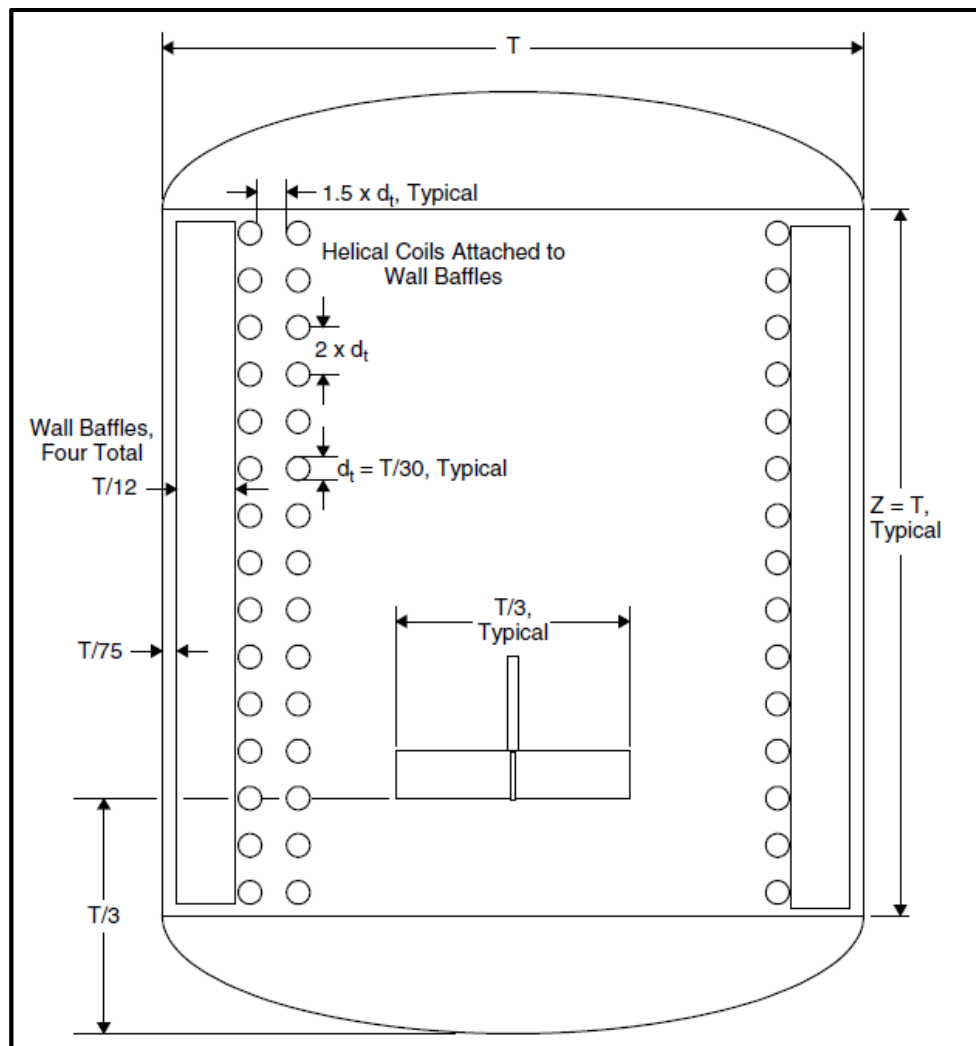


Figura 2.13. Configuración estándar de un serpentín helicoidal en un tanque agitado

Fuente: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

Para el cálculo se tomaron las siguientes asunciones:

- 1) El coeficiente global de transferencia de calor (U) es constante para el proceso y sobre toda la superficie.
- 2) El caudal del fluido de calentamiento es constante.
- 3) Los calores específicos de los fluidos son constantes a una temperatura promedio.
- 4) El medio de calentamiento tiene temperatura constante.
- 5) La agitación produce que la temperatura del fluido en el tanque sea uniforme.
- 6) Las pérdidas de calor son despreciables
- 7) No existe generación de calor.
- 8) Los cambios de energía cinética y potencial son despreciables

2.5.3.1.2 Análisis Termodinámico: Balance de Energía

Se definió una masa control que comprende solamente el fluido de proceso y un volumen de control que comprende al serpentín helicoidal de vapor, a partir de los cuales se realizaron sus balances de energía. La Figura 2.14. muestra el esquema de la masa y volumen de control definidos.

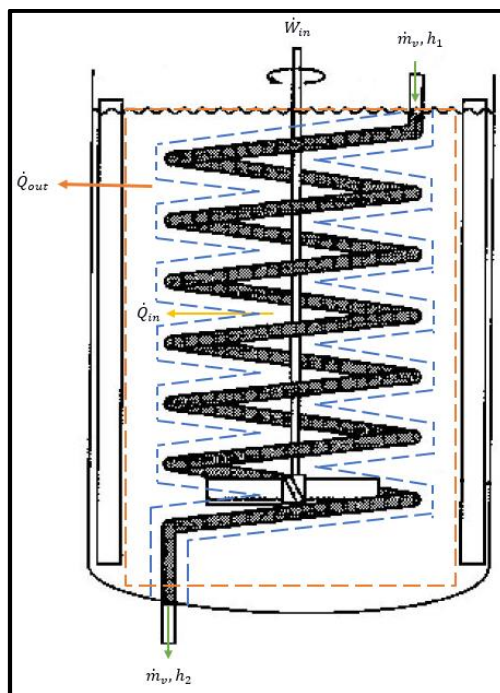


Figura 2.14. Masa y Volumen de Control

Fuente: Adaptado de (Coker, 2001)

Se aplicó la Primera Ley de la Termodinámica, representada por la ecuación (2.26) para realizar el balance de energía en el fluido de producto, que corresponde a la masa de control en color naranja.

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{dE_{cv}}{dt} \quad (2.26)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_o \left(h_o + \frac{V_o^2}{2} + gz_o \right) = \frac{dE_{cv}}{dt}$$

$$\dot{W}_{in} + \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = \frac{dU}{dt}$$

Cómo $\dot{Q}_{out} = 0$, $dU = mC_p dT$ y $\dot{Q}_{in} = UA\Delta T$, se obtuvo:

$$\dot{W}_{in} + UA(T_{sat} - T_{lub}) = mC_p \frac{dT_{lub}}{dt} \quad (2.27)$$

Se realizó el siguiente cambio de variables:

$$\theta = (T_{sat} - T_{lub}) \quad (2.28)$$

Se derivó la ecuación (2.28) y se obtuvo:

$$d\theta = -dT_{lub} \quad (2.29)$$

Se reemplazaron las ecuaciones (2.28) y (2.29) en la ecuación (2.27):

$$UA\theta + \dot{W}_{in} = -mC_p \frac{d\theta}{dt} \quad (2.30)$$

Se reordenó la ecuación (2.30):

$$-\frac{UA}{mC_p} \theta - \frac{\dot{W}_{in}}{mC_p} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.31)$$

Se sacó factor común:

$$-\frac{UA}{mC_p} \left(\theta + \frac{\dot{W}_{in}}{UA} \right) = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.32)$$

Se reordenó la ecuación (2.32):

$$-\frac{UA}{mC_p} dt = \frac{d\theta}{\left(\theta + \frac{\dot{W}_{in}}{UA} \right)} \quad (2.33)$$

Se integró la ecuación (2.33) entre los límites superior e inferior:

$$-\frac{UA}{mC_p} \int_0^t dt = \int_{\theta_i}^{\theta} \frac{d\theta}{\left(\theta + \frac{\dot{W}_{in}}{UA}\right)} \quad (2.34)$$

$$\theta_i = T_{sat} - T_{lub,i} \quad (2.35)$$

$$-\frac{UA}{mC_p} t = \ln \left(\frac{\theta + \frac{\dot{W}_{in}}{UA}}{\theta_i + \frac{\dot{W}_{in}}{UA}} \right) \quad (2.36)$$

Se despejó t de la ecuación (2.36):

$$t = -\frac{mC_p}{UA} \ln \left(\frac{\theta + \frac{\dot{W}_{in}}{UA}}{\theta_i + \frac{\dot{W}_{in}}{UA}} \right) \quad (2.37)$$

Se regresó a las variables iniciales:

$$t = -\frac{mC_p}{UA} \ln \left(\frac{T_{sat} - T_{lub} + \frac{\dot{W}_{in}}{UA}}{T_{sat} - T_{lub,i} + \frac{\dot{W}_{in}}{UA}} \right) \quad (2.38)$$

La ecuación (2.38) indica el tiempo que se tarda en calentar o enfriar el aceite lubricante desde una temperatura inicial. Se despejó la temperatura del aceite para obtener su variación en función del tiempo y se obtuvo la ecuación (2.39):

$$T_{lub}(t) = T_{sat} + \frac{\dot{W}_{in}}{UA} - \left(T_{sat} - T_{lub,i} + \frac{\dot{W}_{in}}{UA} \right) e^{-\frac{UA}{mC_p} t} \quad (2.39)$$

El término 1/U se lo obtiene mediante la ecuación (2.40):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R''_{f,i} + \frac{1}{h_o} + R''_{f,o} \quad (2.40)$$

$$A = \pi DL \quad (2.41)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.42)$$

Dónde,

Los subíndices i y o se refieren a interior y exterior respectivamente

A: Área de transferencia de calor

U: Coeficiente global de transferencia de calor

m: Masa del producto dentro del tanque

Cp: Calor específico del aceite lubricante

t: Tiempo de calentamiento

h: Coeficiente convectivo de transferencia de calor

R_f: Factor de ensuciamiento (fouling)

D: Diámetro de la tubería del serpentín

k: Conductividad térmica

L: Longitud del serpentín

T_{sat}: Temperatura de saturación del vapor

T_{lub}: Temperatura del aceite lubricante en el tanque

Nu: Número de Nusselt

Se deben calcular los coeficientes convectivos de transferencia de calor interno y externo mediante correlaciones adecuadas ya desarrolladas para el número de Nusselt según sea el caso.

Además, se realizó un balance de energía en el serpentín de vapor, cuyo volumen de control es de color azul y se obtuvo la ecuación (2.43).

$$\begin{aligned}\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} &= \frac{dE_{cv}}{dt} \\ \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_{v,i} \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_{v,o} \left(h_o + \frac{V_o^2}{2} + gz_o \right) &= \frac{dE_{cv}}{dt} \\ -\dot{Q}_{in} + \dot{m}_v (h_1 - h_2) &= 0 \\ \dot{Q}_{in} &= \dot{m}_v (h_g - h_f)\end{aligned}\tag{2.43}$$

Dónde,

h_g: Entalpía específica del vapor saturado

h_f: Entalpía específica del líquido saturado

\dot{m}_v : Flujo másico del vapor en el serpentín

2.5.3.1.3 Pre-diseño

Se realizó un balance de energía en la masa de control asumiendo una entrada de calor constante durante 60 minutos:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} &= \frac{dE_{cv}}{dt} \\ \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} &= \frac{Mc(T_f - T_i)}{t} \\ \dot{Q}_{in} &= \frac{Mc(T_f - T_i)}{t} - \dot{W}_{in} \\ \dot{Q}_{in} &= 441,516 \text{ W}\end{aligned}\tag{2.44}$$

Se reemplazó este flujo de calor en la ecuación (2.43) para obtener una primera aproximación del flujo másico de vapor:

$$\begin{aligned}\dot{m}_v &= \frac{\dot{Q}_{in}}{(h_g - h_f)} \\ \dot{m}_v &= \frac{441,516 \text{ W}}{(2.75 \times 10^6 - 2.1 \times 10^6) \text{ J/kg}} \\ \dot{m}_v &= 0.21 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Con el calor de entrada encontrado, se calculó también un área aproximada, aplicando la Ley de Newton de Transferencia de Calor con un coeficiente global típico, y la diferencia de temperaturas media logarítmica. La Tabla 22 muestra valores típicos del coeficiente global de transferencia de calor entre distintos fluidos para serpentines sumergidos en un recipiente agitado.

Tabla 22. Valores típicos del Coeficiente Global de Transferencia de Calor

Fluido en el serpentín	Fluido en el recipiente	U (W/m ² K)
Vapor	Soluciones acuosas diluidas	800 – 1500
Vapor	Aceites ligeros	300 – 500
Vapor	Aceites pesados	200 – 400
Soluciones acuosas	Agua	400 – 700
Aceites ligeros	Agua	200 – 300

Fuente: (Sinnott, 2005)

De la Tabla 22 se obtuvo que el valor promedio para vapor fluyendo dentro de un serpentín helicoidal sumergido en aceites pesados es 300 W/m²K.

La diferencia de temperaturas media logarítmica se la calculó mediante la ecuación (2.45):

$$\Delta T_{LM} = \frac{T_f - T_i}{\ln\left(\frac{T_{sat} - T_i}{T_{sat} - T_f}\right)} \quad (2.45)$$

$$\Delta T_{LM} = 117.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

La Ley de Newton de Transferencia de Calor se muestra en la ecuación (2.46):

$$Q = UA\Delta T_{LM} \quad (2.46)$$

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{LM}}$$

$$A = \frac{441,516 \text{ W}}{300 \text{ W/m}^2\text{K}(117.7 \text{ K})}$$

$$A = 12.51 \text{ m}^2$$

2.5.3.1.4 Diseño de Forma

El serpentín helicoidal se fabricará a partir de tubos de acero ASTM A-53 Céd. 40. Los tamaños nominales de tubería recomendados para esta aplicación son: 1 ½”, 2” y 2 ½”.

Se calculó la longitud aproximada de tubería necesaria para cada tamaño de tubería. La Tabla 23 muestra la longitud de tubería requerida por cada tamaño de tubería, para cumplir el área aproximada.

Tabla 23. Longitud aproximada de tubería

Tamaño nominal	1 ½”	2”	2 ½”
Díámetro exterior D_o (mm)	48.3	60.3	73.0
Perímetro externo (mm)	151.7	189.4	229.3
Longitud (m)	82.4	66.0	54.5

Fuente: Elaboración propia

Se decidió usar una tubería de diámetro 1-1/2 pulgadas para el serpentín helicoidal.

2.5.3.1.5 *Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor del lado del fluido de servicio*

Debido a que el vapor atraviesa el proceso de condensación, el coeficiente convectivo interno corresponderá a un coeficiente convectivo para flujo bifásico y por lo tanto, se debió usar una correlación para condensación en tubos horizontales. La Tabla 24 muestra la aplicación y desviación media de tres de las correlaciones generales para flujo bifásico más conocidas.

Tabla 24. Correlaciones conocidas para flujo bifásico

Correlación	Aplicación	Desviación media
Chen-Cooper	Tubos verticales	22.4%
Kandlikar	Tubos verticales y horizontales	46.0%
Shah	Tubos verticales y horizontales	17.3%

Fuente: (Shah, 2005)

Por ser la correlación más consistente y aplicable tanto en tubos verticales como horizontales, se decidió utilizar la correlación de (Shah, 1979). Esta correlación es de la forma mostrada en la ecuación (2.47):

$$\Psi = \frac{h_{TP}}{h_l} \quad (2.47)$$

$$\Psi = 1 + \frac{3.8}{Z^{0.95}} \quad (2.48)$$

$$h_l = 0.023 Re_L^{0.8} Pr_f^{0.4} k_f / D \quad (2.49)$$

$$Z = \left(\frac{1}{x} - 1 \right)^{0.8} p_r^{0.4} \quad (2.50)$$

$$Re_L = \frac{GD}{\mu_f} \quad (2.51)$$

$$p_r = \frac{p}{p_c} \quad (2.52)$$

Dónde,

Ψ : Parámetro adimensional de correlación

h_{TP} : Coeficiente convectivo de transferencia de calor bifásico

h_l : Coeficiente convectivo asumiendo la masa total fluyendo como líquido

Z: Parámetro de correlación para transferencia de calor en condensación

μ : Viscosidad dinámica

x: Calidad del vapor

p_r : Presión reducida

Re_L : Número de Reynolds asumiendo la masa total fluyendo como líquido

Pr: Número de Prandtl

G: Velocidad másica

D: Diámetro de la tubería

p: Presión de trabajo

p_c : Presión crítica

Al combinar las ecuaciones (2.47), (2.48) y (2.50) se obtuvo la ecuación (2.53):

$$h_{TP} = h_l \left[(1 - x)^{0.8} + \frac{3.8x^{0.76}(1 - x)^{0.04}}{p_r^{0.38}} \right] \quad (2.53)$$

La Figura 2.15 muestra la curva que representa la ecuación (2.48).

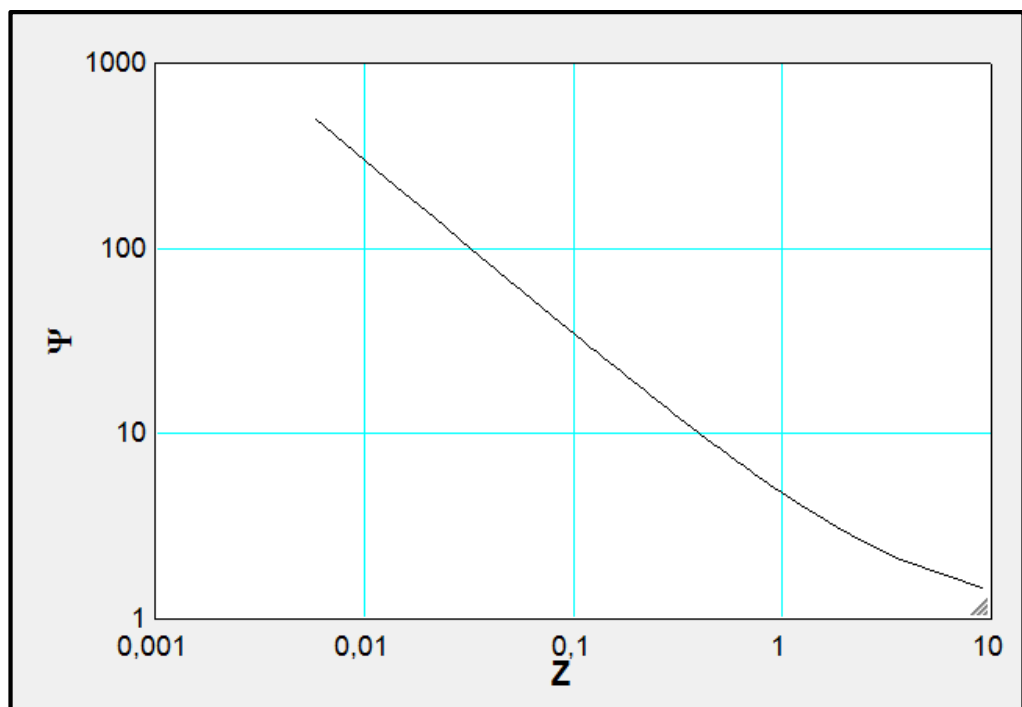


Figura 2.15. Ψ vs Z

Fuente: Elaboración propia

Shah también sugirió la integración de estas ecuaciones en una longitud de tubería para obtener el coeficiente medio de transferencia de calor en la región de condensación (Kakaç, Liu, & Pramuanjaroenkij, 2012).

$$h_{TP_m} = \frac{1}{L} \int_0^L h_{TP} dL \quad (2.54)$$

Para el caso de una variación lineal de la calidad en un rango de 100% a 0%, el resultado es:

$$h_{TP_m} = h_l \left(0.55 + \frac{2.09}{p_r^{0.38}} \right) \quad (2.55)$$

2.5.3.1.6 Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor del lado del fluido de proceso

Las correlaciones publicadas en los textos para el coeficiente de transferencia de calor del lado de proceso en un tanque con agitación mecánica son todos de la forma presentada en la ecuación (2.56):

$$Nu = h \frac{T}{k} = a \cdot Re^{2/3} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (2.56)$$

Dónde,

a: Constante que depende del tipo de agitador y superficie de calentamiento.

Re: Número de Reynolds en el filo del agitador

Pr: Número de Prandtl del fluido

μ_b : Viscosidad dinámica del fluido de proceso

μ_s : Viscosidad dinámica del fluido de proceso evaluada a la temperatura superficial, T_s

T: Diámetro del tanque

k: Conductividad térmica del fluido

La Tabla 25 muestra los valores de la constante “a” para distintas combinaciones de agitadores y superficies de calentamiento en tanques agitados de geometría estándar, obtenidos de (Oldshue, 1983).

Tabla 25. Valores de la constante “a”

Tipo de Agitador	Superficie	a
Turbina	Chaqueta	0.62
Turbina	Serpentín	1.50
Paletas	Chaqueta	0.36
Paletas	Serpentín	0.87
Ancla	Chaqueta	0.46
Hélice	Chaqueta	0.54
Hélice	Serpentín	0.83

Fuente: (Adum, 2015)

De la Tabla 25 se obtuvo que el valor de la constante “a” para este caso es de 1.50.

2.5.3.2 Desarrollo

Con el diámetro de tubería previamente seleccionado, se estableció una longitud y se ingresaron todas las ecuaciones junto con los datos y propiedades en el software de resolución de ecuaciones para ingeniería. Se resolvieron las ecuaciones y se obtuvo la variación de temperatura del aceite lubricante en función del tiempo junto con sus gráficas. Se determinó el tiempo que se tarda en calentar hasta 50 °C con cada longitud y en caso de ser mayor a 1 hora, se aumentó la longitud hasta cumplir el requerimiento. La Tabla 26 muestra el tiempo de calentamiento necesario para 3 distintas longitudes de serpentín.

Tabla 26. Tiempos de calentamiento

Longitud (m)	Tiempo (min)
18	216
42	96
66	60

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 26 muestra que se requiere de 66 metros de tubería para obtener un tiempo de calentamiento de 1 hora.

Todas las ecuaciones ingresadas en el programa y los resultados se encuentran en el Apéndice B. Las curvas se presentan en el Apéndice D.

2.5.3.1 Diseño de la geometría del serpentín helicoidal

Una vez determinados el diámetro de la tubería y la longitud del serpentín, se procedió a determinar las demás dimensiones del serpentín. La Figura 2.16 muestra las dimensiones que definen a un serpentín helicoidal.

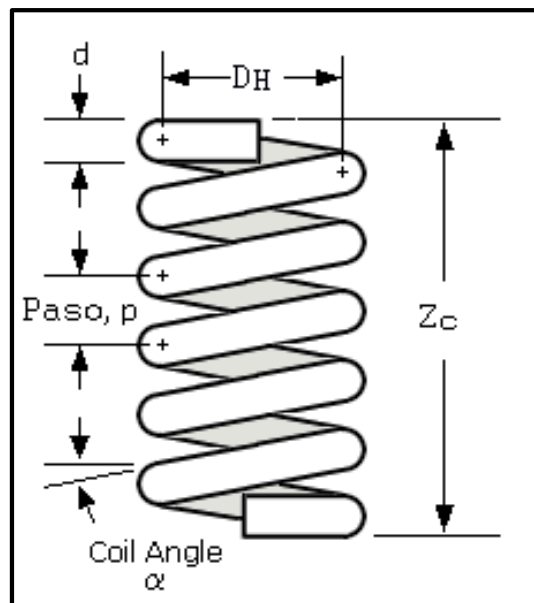


Figura 2.16. Dimensiones de un serpentín helicoidal

Fuente: Mahonkin Heavy Industries

Ya que el serpentín debe sujetarse a una base de 6 mm de espesor en el filo de los deflectores, los cuales tienen un ancho de 320 mm más una separación de 60 mm, y el diámetro exterior de la tubería es de 48 mm, el diámetro de la hélice debe ser la resta entre el diámetro del tanque y estas cuatro longitudes:

$$D_H = 3820 - 2(320) - 2(60) - 2(6) - 48 = 3000 \text{ mm}$$

La Figura 2.17 muestra que la altura recomendada del serpentín debe ser aproximadamente 0.65 de la altura del líquido Z , que es 3.9 m.

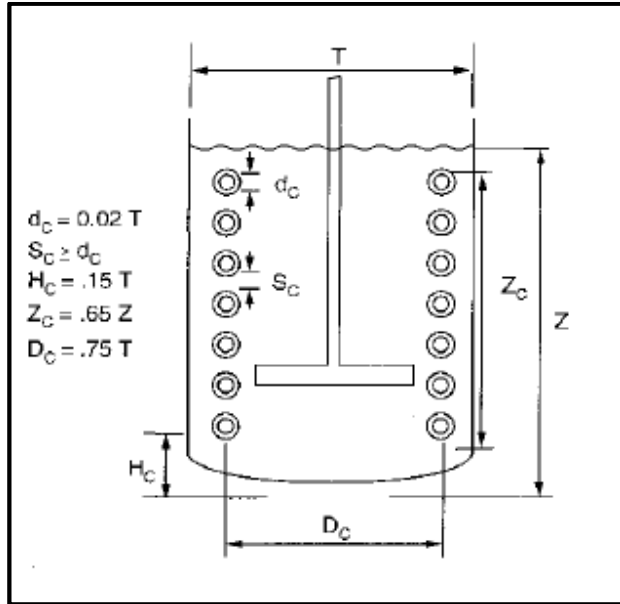


Figura 2.17. Dimensiones recomendadas del serpentín

Fuente: (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

Por lo tanto,

$$Z_c \approx 0.65(3900) = 2535 \text{ mm}$$

La longitud total de la hélice cilíndrica está sujeta a la ecuación (2.57):

$$L_H = N \times \sqrt{p^2 + (\pi D_H)^2} = 66 \text{ m} \quad (2.57)$$

Dónde,

L_H : Longitud de la hélice cilíndrica o del serpentín

N : Número de espirales

p : paso del serpentín

D_H : Diámetro de la hélice

La altura de la hélice está sujeta a la ecuación (2.58):

$$Z_c = N \times p + d = 2535 \text{ mm} \quad (2.58)$$

El ángulo de la hélice está dado por la ecuación (2.59):

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{p}{\pi D_H} \right) \quad (2.59)$$

Se resolvieron simultáneamente las ecuaciones (2.57), (2.58) y (2.59), y se obtuvo como resultado:

$$N = 6.998$$

$$p = 355.4 \text{ mm}$$

$$\alpha = 2.16^\circ$$

Por facilidad de construcción, se establecieron las dimensiones finales del serpentín en los valores mostrados en la Tabla 27:

Tabla 27. Dimensiones finales del Serpentín helicoidal

Dimensión	Valor Final
Número de espirales, N	7
Paso del serpentín, p	350 mm
Diámetro de la hélice, D_H	3000 mm
Altura del serpentín, Z_c	2500 mm
Ángulo de la hélice, α	2.13°
Longitud del serpentín, L_H	66000 mm

Fuente: Elaboración propia

A partir de las dimensiones establecidas para el tanque, el agitador y el serpentín helicoidal, se realizó un modelo en 3D a computadora con las dimensiones reales. Los planos de construcción de este modelo se encuentran en el Apéndice E.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1 Almacenamiento

La Tabla 28 detalla las especificaciones finales del tanque con relación a su función de almacenamiento.

Tabla 28. Especificaciones del tanque

Especificación	Detalle
Capacidad Total	14,775 gal
Capacidad Nominal	10,000 gal
Vida Útil	25 años
Diámetro	3.82 m
Altura del cuerpo	4.88 m
Altura total	6560 mm
Material	Acero ASTM A-36
Espesor de la plancha	6 mm
Tipo de techo	Cónico fijo
Tipo de fondo	Domo Toriesférico
Diámetro de la entrada de hombre	600 mm
Peso	~5 ton
Costo	\$ 7,120.30

Fuente: Elaboración propia

3.2 Sistema de agitación

La Tabla 29 detalla las especificaciones finales del tanque con relación a su función de agitación.

Tabla 29. Especificaciones del sistema de agitación

Especificación	Detalle
Método de agitación	Agitador mecánico
Tipo de agitador	Turbina de aspas inclinadas 45°
Número de aspas	6
Diámetro del agitador	1 m
Velocidad del agitador	125 r.p.m.
Potencia del motor	15 HP
Tasa de flujo interno	1.67 m ³ /s
Velocidad lineal superficial	0.15 m/s
Diámetro del eje	1 ½" npt

Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Simulación Dinámica

La Figura 3.1 muestra los contornos de la magnitud de la velocidad del fluido contenido en el tanque coloreada según la escala a la izquierda.

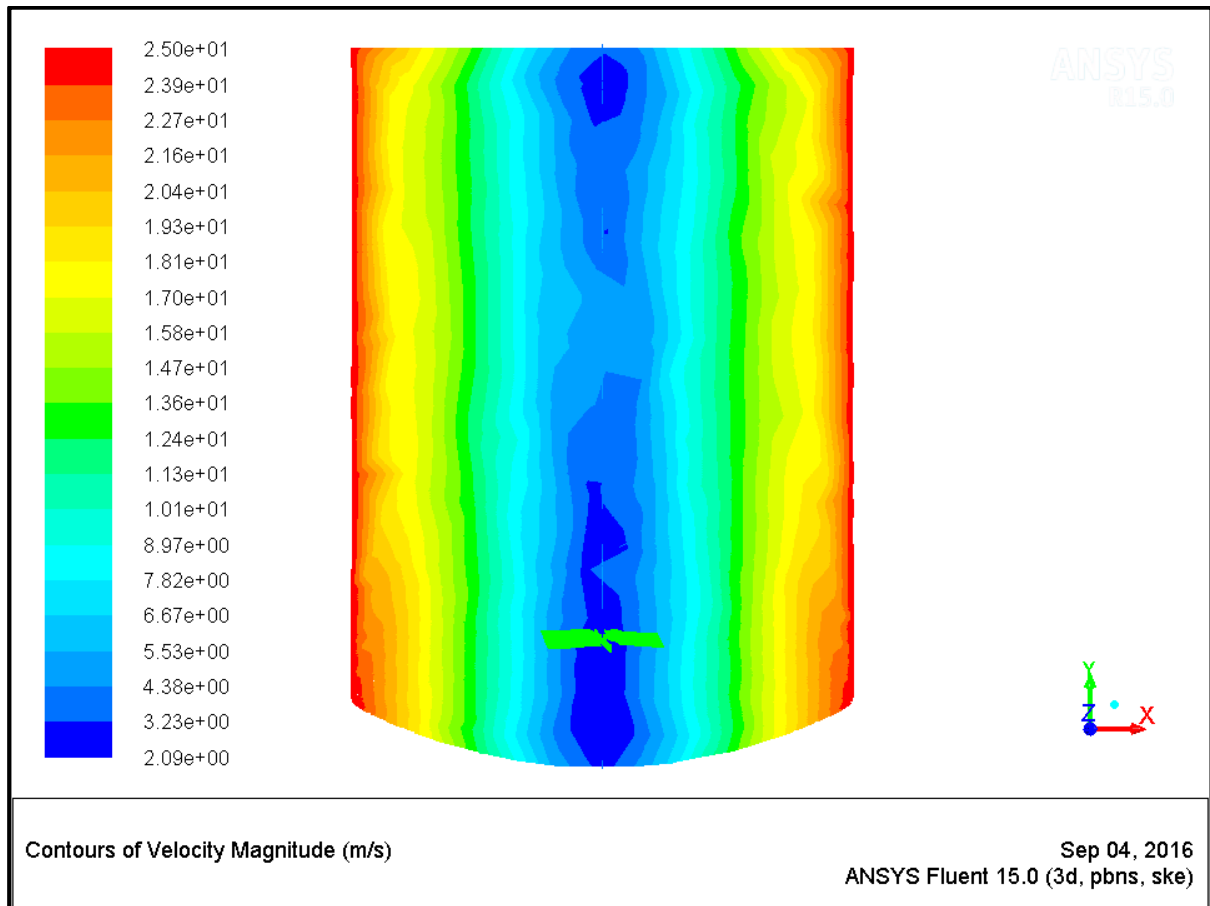


Figura 3.1. Contornos de la magnitud de la velocidad del fluido

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la velocidad aumenta radialmente, por lo que se deduce que la velocidad es en general, tangencial al tanque.

Esto se produce porque el tipo de agitador genera un flujo principalmente tangencial.

La Figura 3.2 muestra el campo vectorial de la componente vertical de la velocidad del fluido en el tanque con el agitador rotando a 125 rpm y en estado estable, coloreado según su magnitud.

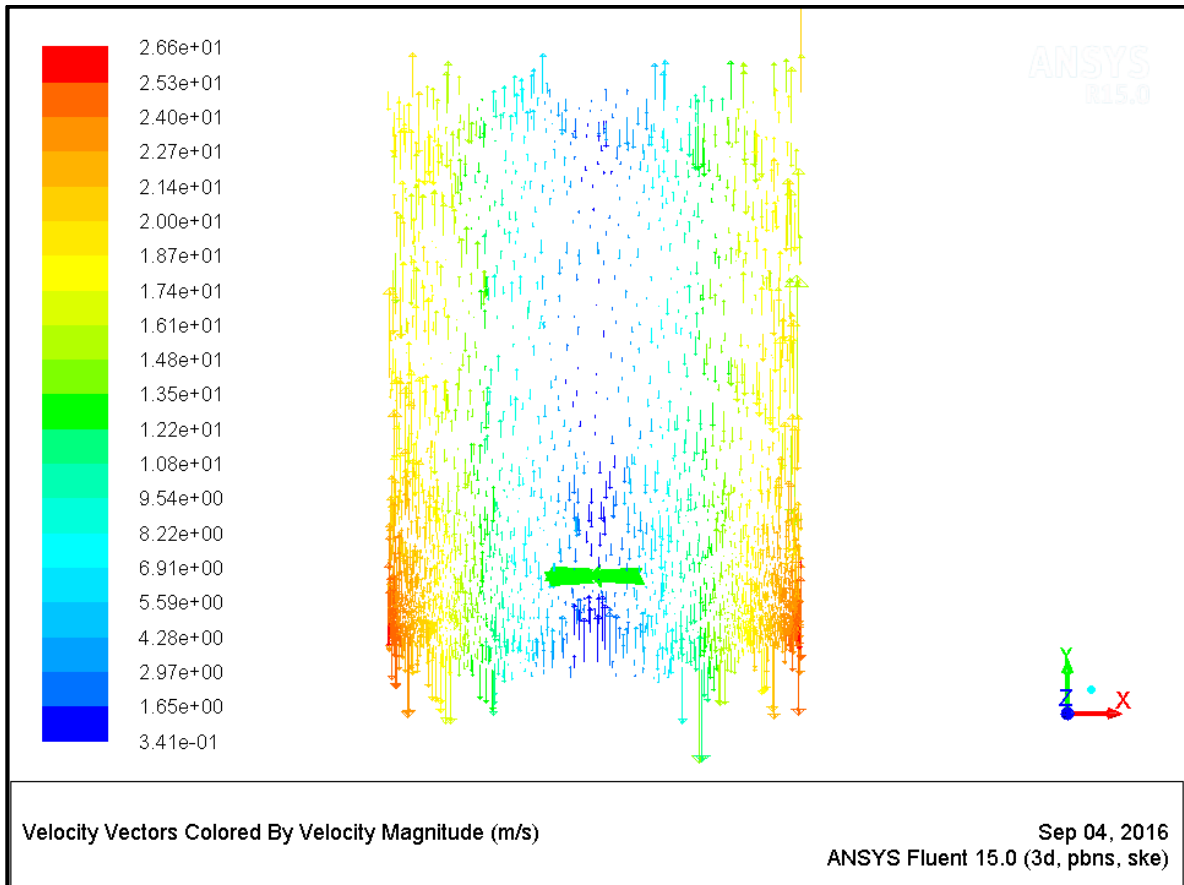


Figura 3.2. Campo vectorial de velocidades del fluido, componente vertical

Fuente: Elaboración propia

Cómo se observa en la Figura 3.2, el fluido también circula hacia el fondo del tanque en el área central y fluye hacia arriba en el área cercana a la pared. Se comprueba que el flujo tiene componente axial que da lugar a una circulación del fluido en sentido vertical. Sin embargo, la dirección que predomina es la componente tangencial.

3.3 Sistema de calentamiento

La Tabla 30 muestra las especificaciones finales del sistema de calentamiento diseñado.

Tabla 30. Especificaciones del sistema de calentamiento

Especificación	Detalle
Método de calentamiento	Serpentín helicoidal interno
Flujo de calor	436 kW
Material de la tubería	Acero ASTM A-53
Área de Transferencia de Calor	10 m ²
Diámetro de la tubería	1 1/2" npt cédula 40
Longitud de la tubería	66 m
Tiempo de calentamiento	60 min
Flujo másico de vapor	0.2 kg/s
Coeficiente Global de Transferencia de Calor	369 W/m ² K
Diámetro de la hélice	3 m
Paso del serpentín	350 mm
Número de espirales	7
Altura del serpentín	2500 mm

Fuente: Elaboración propia

3.4 Análisis de Costos

La Tabla 31 muestra el listado de materiales necesarios para la construcción del tanque, el sistema de calentamiento y el sistema de agitación con sus respectivos costos precios en el mercado.

Tabla 31. Costos de materiales

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	P. UNITARIO	SUBTOTAL
1	34	PLANCHA ACERO NEGRO A-36 6mm 1.22X2.44 mts	\$ 87.64	\$ 2979.76
2	1	PLANCHA ACERO NEGRO A-36 10mm 1.22X2.44 mts	\$ 146.10	\$ 146.10
3	1	PLANCHA ACERO NEGRO A-36 15mm 1.22X2.44 mts	\$ 304.28	\$ 304.28
4	1	VIGA HEB 140 ACERO NEGRO A-36	\$ 228.10	\$ 228.10
5	2	VIGA UPN 120 ACERO NEGRO A-36	\$ 77.58	\$ 155.16
6	10	ANGULO ACERO NEGRO A-36 1" X 1/8" X 6 mts	\$ 7.25	\$ 72.50
7	5	ANGULO ACERO NEGRO A-36 2" X 3/16" X 6 mts	\$ 16.60	\$ 83.00
8	4	PLANCHA ACERO NEGRO A-36 CORRUGADA 2 mm 1.22X2.44 mts	\$ 34.35	\$ 137.40
9	11	TUBERIA ACERO A-53 Ø1 1/2" X 5.8 mts S/COSTURA CED-40	\$ 23.45	\$ 257.95
10	2	CODO ACERO A-53 Ø1 1/2" X 90 SOLD CED- 40	\$ 0.70	\$ 1.40
11	2	BRIDA ACERO NEGRO ASME B16.5 Ø1 1/2" Clase 150	\$ 4.54	\$ 9.08
12	6	TUBO REDONDO ESTRUCTURAL NEGRO Ø1 1/4" X 2mm	\$ 8.80	\$ 52.80
13	1	EJE TRANSMISIÓN Ø1"	\$ 58.20	\$ 58.20
14	1	PLANCHA ACERO NEGRO A-36 2mm 1.22X2.44 mts	\$ 29.25	\$ 29.25
15	1	PLANCHA ACERO INOX 6mm 1.22X2.44 mts	\$ 156.23	\$ 156.23
16	1	Motorreductor A/C lineal 15 HP	\$ 1574.67	\$ 1574.67
SUB-TOTAL				\$ 6245.88
IVA 14%				\$ 874.42
TOTAL				\$ 7,120.30

Fuente: Cotización a proveedor local

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Más del 50% de la producción química mundial involucra a estos recipientes de agitación para la fabricación de productos de alto valor añadido.

En la industria química, un diseño adecuado del reactor es crucial, ya que es aquí donde se producen los procesos tanto de mezclado y reacción. Una mezcla y transferencia de masa insuficiente podrían influir en la velocidad de reacción y la distribución del producto. En 1989, el costo de una mala mezcla se estimó en mil millones a diez mil millones en la industria química de EE.UU. solamente. (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

El Ecuador es un país en desarrollo, gran cantidad de productos terminados que se elaboran en tanques de mezcla (no solamente aceites lubricantes) se importan mientras que las materias primas para elaborarlos se exportan. Hay una gran oportunidad de elaborar estos productos localmente con la materia prima que tenemos aquí y así desarrollar la industria del país. Mientras más procesos de manufactura se implementen y menos productos tengamos que importar porque se los elabora localmente con nuestra materia prima, el país avanzará más rápidamente.

4.1 Conclusiones

El tanque de mezcla diseñado permitirá aumentar la producción de aceite lubricante a la empresa que lo requiere ya que es capaz de mezclar diez mil galones de producto en un solo una hora. Sin embargo, cabe aclarar que este tiempo se refiere solamente al proceso de mezcla, hay otros procesos necesarios para la elaboración del producto terminado que también toman su tiempo, como lo son el bombeo de las materias primas, el análisis de laboratorio de la muestra y el envasado. Sumando los tiempos se estima que se puede lograr a elaborar un solo lote de diez mil galones por día cumpliendo todo el proceso de producción, y en el mejor de los casos, cuando el envasado se realiza sólo en envases grandes o es despachado a granel, se puede lograr a elaborar un lote completo y dejar mezclado el producto de un segundo lote para analizarlo y envasarlo el siguiente día. Ya que no todos los días se envasa en envases

grandes o se despacha producto terminado a granel, la producción real se estima en veintisiete lotes de diez mil galones al mes, dando como resultado una capacidad de producción de doscientos setenta mil galones al mes, lo cual cumple con el requerimiento del cliente.

Se realizó un modelo a computadora del tanque a escala real del cual se obtuvieron los planos de construcción, los cuales se encuentran en el Apéndice F. Se puede observar en el Plano #2 que el tanque ocupa un espacio en el suelo menor a cinco metros en su lado más ancho, por lo tanto, cumple con la disponibilidad de espacio. También posee un tramo de tubería de tres pulgadas soldada a su parte inferior para descarga de producto con una bomba.

El tanque cumple con los requerimientos del estándar API 650 y posee una escalera helicoidal que conduce a una plataforma en la parte superior del tanque para realizar trabajos en el techo.

El diseño de los sistemas de agitación y de calentamiento fueron realmente por prueba y error. Ambos sistemas fueron re-diseñados varias veces hasta que el diseño cumpla con los objetivos y sea viable desde el punto de vista económico e ingenieril. Se puede decir que el proceso de diseño tuvo varias retroalimentaciones, lo cual es normal en cualquier diseño y esto me permitió aprender mucho más de lo que hubiera aprendido si el diseño hubiera sido resuelto a la primera vez.

El sistema de agitación fue basado en los modelos convencionales de tanques agitados dado que ya han sido estudiados y sus correlaciones han sido desarrolladas y publicadas para uso en general. Se debe destacar la importancia de mantener las proporciones geométricas para las cuales las correlaciones fueron desarrolladas porque de otra forma no se puede asegurar el resultado. El diseño parece sencillo a simple vista, pero hay varios factores que se deben tomar en cuenta para un diseño final adecuado, y el diseño tal vez tenga que ser modificado varias veces hasta encontrar una configuración que cumpla tanto con las proporciones geométricas como con la información disponible en los textos y el resultado final de las variables calculadas. En el presente trabajo, el tipo de sistema de agitación fue cambiado de eductores a agitador mecánico debido a que para que el sistema de eductores funcione correctamente se requería de una bomba de gran tamaño. También el tipo de agitador fue cambiado ya que en

principio se esperaba utilizar un agitador tipo hélice marina pero debido al diámetro que debía tener, se volvía muy pesada y costosa.

El diseño del sistema de calentamiento también presentó un desafío, porque hay que saber escoger las correlaciones adecuadas para el número de Nusselt según el tipo de transferencia de calor que se tenga. Existen decenas de correlaciones diferentes para cada caso y cada correlación tiene su rango en el cual el autor que la desarrolló asegura que se cumple. En el presente trabajo se probaron con cinco correlaciones distintas para el número de Nusselt del lado de fluido de servicio, hasta que se determinó la correcta. Así mismo, existen decenas de correlaciones para el coeficiente de transferencia de calor del lado de fluido de proceso y hay que saber seleccionar correctamente según el tipo de agitación y método de calentamiento que se tenga de una fuente confiable.

4.2 Recomendaciones

El tanque fue diseñado para una vida útil de veinticinco años, sin embargo, con un mantenimiento adecuado se estima que la vida útil del tanque sobrepase los treinta años. Para lograr esto, se recomienda un plan de mantenimiento que incluya el pintado periódico del tanque.

Se recomienda instalar una trampa de vapor al final del serpentín, en el exterior del tanque para asegurar que el vapor entregue todo el calor latente de vaporización y abandone el serpentín como líquido saturado.

También se recomienda que la tubería de alimentación de vapor desde la caldera esté aislada para que no pierda calor al ambiente y que sea de mayor diámetro que la tubería del serpentín.

En casi todos los sistemas de calentamiento por vapor se acostumbra a instalar una válvula reguladora de temperatura a la entrada del serpentín, por seguridad. La válvula está regulada a una temperatura máxima y corta el flujo de vapor una vez que la temperatura del producto en el tanque llega a esta temperatura.

Si se desea mayor control se puede instalar un control automático de temperatura con una válvula reguladora de flujo y una termocupla tipo PT-100.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adum, V. (2015). SISTEMAS TÉRMICOS I. *Condensación*. Guayaquil, Ecuador.
2. American Petroleum Institute. (2013). API 650. *Welded Tanks for Oil Storage*. Washington, D.C., Estados Unidos.
3. APEL. (Mayo de 2016). *Boletín Estadístico Mensual*.
4. ASME. (2013). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII: Rules for Construction of Pressure Vessels*. New York, NY.
5. Blackmer. (2012). NP Series Fluid Processing and Transfer Sliding Vane Pumps.
6. Booser, E. R. (1983). *CRC Handbook of Lubrication (Theory and Practice of Tribology) Volume I: Application and Maintenance*. Boca Raton: CRC Press, Inc.
7. Brooks, G., & Su, G. J. (1959). Heat transfer in agitated vessels. *Chem. Eng. Prog.*, 55, 54-57.
8. Carmi, J. (2009). *Agitación en la Industria*. Obtenido de <http://descom.jmc.utfsm.cl/jcarmi/procesos2/documentos/apuntes/procesosII%20%20pdf/04%20agitacion%20y%20disolucion.pdf>
9. Carranza, R. (31 de Mayo de 2001). *Pulsair mixer offers thorough mixing at high efficiency*. Obtenido de Chemical Online: <http://www.chemicalonline.com/doc/pulsair-mixer-offers-thorough-mixing-at-high-0001>
10. Coker, A. K. (2001). *Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
11. Dobson, M. K., & Chato, J. C. (1998). Condensation in Smooth Horizontal Tubes. *ASME J. Heat Transfer* 120(1), 193-213.
12. Doran, P. M. (1995). *Bioprocess Engineering Principles*. Oxford: Academic Press.
13. Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
14. Holland, F., & Chapman, F. (1966). *Liquid Mixing and Processing in Stirred Tanks*. New York: Reinhold.
15. Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

16. Kakaç, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2012). *Heat Exangers: Selection, Rating, and Thermal Design*. Boca Raton, FL: CRC Press.
17. Kern, D. Q. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
18. McAdams, W. H. (1942). *Heat Transmission*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
19. Megyesy, E. F. (1992). *Manual de Recipientes a Presión: Diseño y Cálculo*. México, D.F.: LIMUSA S.A. de C.V.
20. NACE. (2002). *NACE Corrosion Engineer's Reference Book*. Houston, TX: NACE Press.
21. Norton, R. L. (2013). *Machine Design: An Integrated Approach*. New Jersey: Pearson.
22. Oldshue, J. Y. (1983). *Fluid Mixing Technology*. New York: McGraw-Hill.
23. Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2004). *Handbook of Industrial Mixing Science and Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
24. Penny, W. R. (1970). Guide to Trouble-free Mixers. *Chem. Eng.*, 77(12), 171-180.
25. Rodriguez, J. A. (2009). *Introducción a la Termodinámica con algunas Aplicaciones de Ingeniería*. Obtenido de <http://www.radiadoresgallardo.cl/topintercambiaodres.pdf>
26. Ruiz, C. L. (17 de Julio de 2009). *Agitación*. Obtenido de <http://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>
27. Sanchez, C. (18 de Noviembre de 2013). *Aceites, lubricantes, grasas industriales y comestibles*. Obtenido de <https://prezi.com/0xwranlxdx6y/aceites-lubricantes-grasas-industriales-y-comestibles/>
28. Shah, M. M. (1979). A general correlation for heat transfer during film condensation. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 22, 547.
29. Shah, M. M. (2005). ASME Summer Heat Transfer Conference. *Evaluation of General Correlations for Heat Transfer During* (pág. 1). San Francisco, California: ASME.
30. Shah, M. M. (2009). An Improved and Extended General Correlation for Heat Transfer During Condensation in Plain Tubes. *HVAC&R Research*, Vol. 15, No. 5, 889-913.

31. Sinnott, R. K. (2005). *Coulson and Richardson's Chemical Engineering Volume 6*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
32. Walas, S. M. (1990). *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Newton, MA: Butterworth-Heinemann.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Ficha técnica de los aceites lubricantes



HOJA TECNICA DEL PRODUCTO

APLICACIONES

Es un aceite lubricante mineral para servicio pesado puede ser utilizado en transmisiones manuales, transmisiones automáticas, transmisiones marítimas, mandos finales y sistemas hidráulicos, cuando son requeridos lubricantes según el grado de viscosidad y especificaciones establecidas por los fabricantes.

Utilice **Swissoil HIDRAULISCH SAE 10W CF** siguiendo las recomendaciones del fabricante del equipo en aplicaciones como:

- Motores de buses y camiones
- Equipos de construcción y minería
- Equipos agrícolas
- Motores marinos de alta velocidad
- Motores de generación eléctrica

BENEFICIOS

- Protege los metales contra la oxidación
- Protege los metales contra el desgaste
- Controla adecuadamente el hollín
- Disminuye el consumo de aceite
- Alarga el periodo de cambio del aceite

NORMAS TÉCNICAS LATINOAMÉRICA

Ecuador	NTE INEN 2030
Colombia	NTC 1295
Chile	NCh 2193
Perú	NTP 321.014
Venezuela	COVENIN 936-1

VISCOSIDAD

- SAE 10W

APROBACIONES

El lubricante **Swissoil HIDRAULISCH SAE 10W CF** cumple o excede con las normas:

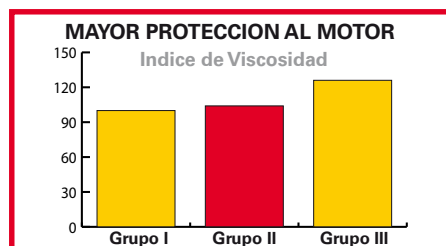
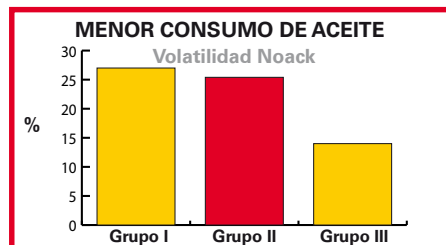
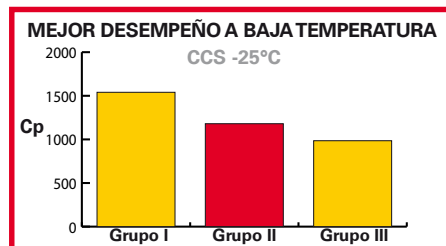
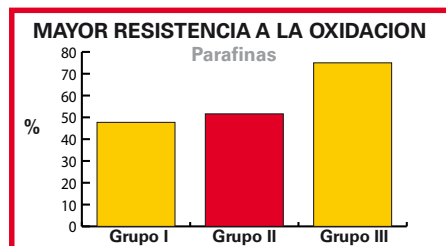
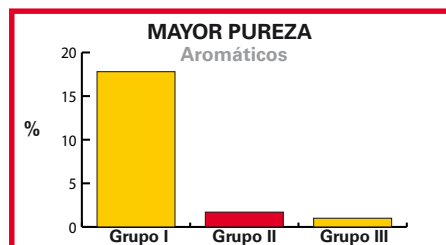
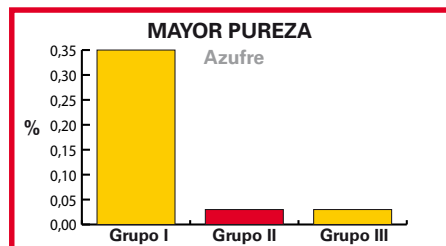
- API CF
- Allison C-4
- Caterpillar TO-2

TECNOLOGÍA

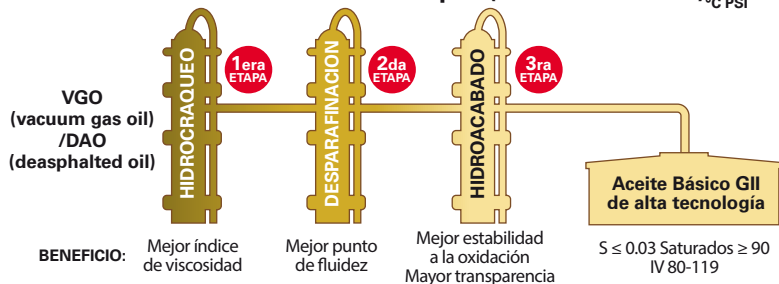
Los lubricantes Swissoil utilizan como materia prima aceites básicos GRUPO II de alta tecnología y aditivos selectos de calidad superior.

Los aceites básicos Grupo II de alta tecnología son obtenidos a través de un proceso de refinación en tres etapas llamado HIDROPROCESO. El proceso de refinación en tres etapas produce un aceite básico de mayor pureza, superior calidad, bajo en azufre y con un contenido de aromáticos extremadamente bajo comparado con los aceites básicos tradicionales Grupo I.

Los aceites básicos GRUPO II de alta tecnología proveen un mejor desempeño que se compara con los aceites sintéticos ya que contienen menos impurezas que los aceites básicos Grupo I:



Proceso de refinación en tres etapas (HIDROPROCESO)_{100°C PSI}



PROPIEDADES

ASTM	Propiedad	10W
D-4052	Gravedad Especifica @ 15,56°C	0.8724
D-445	Viscosidad cSt @ 40°C	35.02
D-445	Viscosidad cSt @ 100°C	6.01
D-2270	Indice de Viscosidad	117
D-92	Punto de Inflamación °C	228
D-97	Punto de Fluidez °C	-39
D-2896	TBN (Número de Base Total) mgKOH/g	10.5

Los datos de características típicas son solamente valores promedios. Pueden esperarse variaciones menores en fabricación normal que no afectan el desempeño del producto.

Condiciones de Conservación: Mantenga en lugar limpio, seco y libre de contaminación. Tiempo sugerido de consumo: 5 años a partir de la fecha de fabricación.



HOJA TECNICA DEL PRODUCTO

APLICACIONES

Es un aceite lubricante mineral recomendado para reductores y engranajes industriales cerrados que operan en condiciones severas de servicio.

Utilice **Swissoil GETRIEBE EP** siguiendo las recomendaciones del fabricante del equipo.

BENEFICIOS

- Protege los metales contra el desgaste por extrema presión.
- Protege los metales contra la herrumbre
- Protege los metales contra la corrosión
- Compatibilidad con los sellos del sistema
- Baja formación de espuma
- Contiene aditivo de extrema presión

VISCOSIDAD

- ISO 68
- ISO 150
- ISO 220
- ISO 320
- ISO 460
- ISO 680
- ISO 1000

NORMAS TECNICAS

Colombia NTC 4286
Venezuela COVENIN 987-1

APROBACIONES

- AGMA 9005-E02
- DIN 51517 Part 3
- U.S Steel 224
- GM LS 2 EP Gear Oil

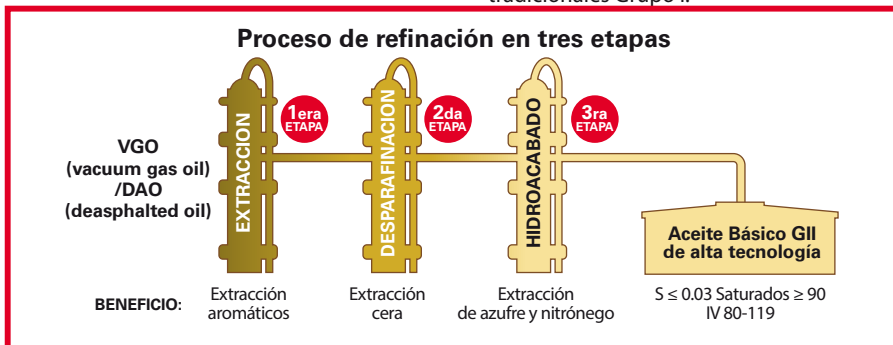
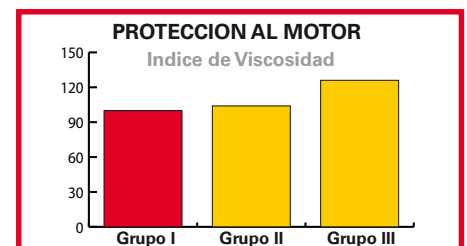
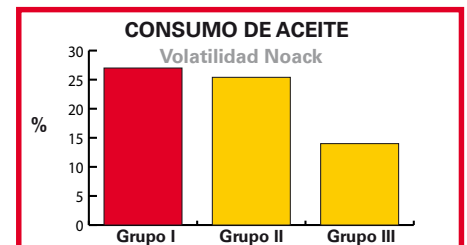
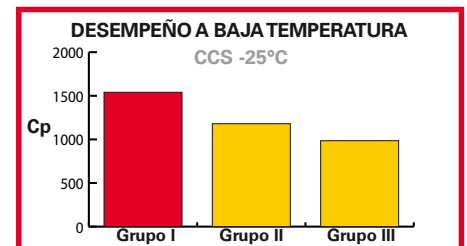
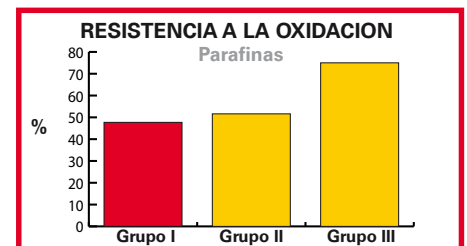
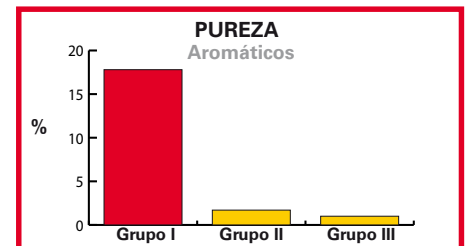
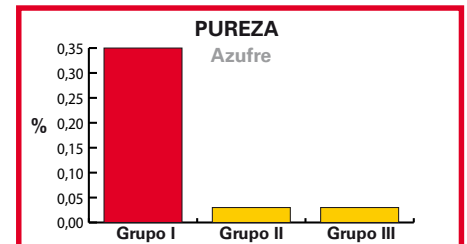
Nota: No aplica para **GETRIEBE ISO 1000**

TECNOLOGÍA

Los lubricantes Swissoil utilizan como materia prima aceites básicos GRUPO II de alta tecnología y aditivos selectos de calidad superior.

Los aceites básicos Grupo II de alta tecnología son obtenidos a través de un proceso de refinación en tres etapas llamado HIDROPROCESO. El proceso de refinación en tres etapas produce un aceite básico de mayor pureza, superior calidad, bajo en azufre y con un contenido de aromáticos extremadamente bajo comparado con los aceites básicos tradicionales Grupo I.

Los aceites básicos Grupo II de alta tecnología proveen un mejor desempeño que los aceites convencionales.



PROPIEDADES

ASTM	Propiedad	68	150	220	320	460	680	1000
D-4052	Gravedad Especifica @ 15,56°C	0.868	0.8823	0.8906	0.8991	0.9045	0.924	0.915
D-445	Viscosidad cSt @ 40°C	69.2	152.2	227.1	356	479.5	672	923
D-445	Viscosidad cSt @ 100°C	9.1	15.1	19.59	25.86	31.17	36	40.87
D-2270	Indice de Viscosidad	103	99	98	96	95	85	78
D-92	Punto de Inflamación °C	238	252	236	250	240	306	303
D-97	Punto de Fluidez °C	-15	-15	-12	-12	-9	-6	-3

Los datos de características típicas son solamente valores promedios. Pueden esperarse variaciones menores en fabricación normal que no afectan el desempeño del producto.

Condiciones de Conservación: Mantenga en lugar limpio, seco y libre de contaminación.
Tiempo sugerido de consumo: 5 años a partir de la fecha de fabricación.

APÉNDICE B
Cálculos

{Pre-diseño}

```
T_i=25
T_f=50
rho=877,9
Cp=1951 {J/kgK}
Vol=10000*convert(gal;m^3)
M=rho*Vol
t=3600
W=8733 {W}
DELTAU=(M*Cp*(T_f-T_i))/t
Q=DELTAU-W
P_1=80*convert(psi;kPa)
T_sat_1=T_sat(Steam;P=P_1)
h_g=Enthalpy(Steam;T=T_sat_1;x=x_1)
x_1=1
h_f=Enthalpy(Steam;T=T_sat_1;x=x_2)
x_2=0
h_fg=h_g-h_f
m_dot_v=Q/h_fg
rho_v_i=Density(Steam;T=T_sat_1;x=x_1)
v_dot_i=m_dot_v/rho_v_i
m_dot_i=m_dot_v*convert(kg/s;lbm/h)

Q=U*A*DELTAT_LM
U=300
DELTAT_LM=(T_f-T_i)/ln((T_sat_1-T_i)/(T_sat_1-T_f))
```

$$T_i = 25$$

$$T_f = 50$$

$$\rho = 877,9$$

$$C_p = 1951$$

$$\text{Vol} = 10000 \cdot \left| 0,003785412 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{gal}} \right|$$

$$M = \rho \cdot \text{Vol}$$

$$t = 3600$$

$$W = 8733$$

$$\Delta U = \frac{M \cdot C_p \cdot [T_f - T_i]}{t}$$

$$Q = \Delta U - W$$

$$P_1 = 80 \cdot \left| 6,895 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{psi}} \right|$$

$$T_{\text{sat},1} = T_{\text{sat}} \left[\text{'Steam'} ; P = P_1 \right]$$

$$h_g = h \left[\text{'Steam'} ; T = T_{\text{sat},1} ; x = x_1 \right]$$

$$x_1 = 1$$

$$h_f = h \left[\text{'Steam'} ; T = T_{\text{sat},1} ; x = x_2 \right]$$

$$x_2 = 0$$

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

$$\dot{m}_v = \frac{Q}{h_{fg}}$$

$$\rho_{v,i} = \rho \left[\text{'Steam'} ; T = T_{\text{sat},1} ; X = X_1 \right]$$

$$\dot{v}_i = \frac{\dot{m}_v}{\rho_{v,i}}$$

$$\dot{m}_i = \dot{m}_v \cdot \left| 7937 \cdot \frac{\text{lbm/h}}{\text{kg/s}} \right|$$

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{LM}}$$

$$U = 300$$

$$\Delta T_{\text{LM}} = \frac{T_f - T_i}{\ln \left[\frac{T_{\text{sat},1} - T_i}{T_{\text{sat},1} - T_f} \right]}$$

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa J mass deg

$$A = 12,51$$

$$\Delta U = 450249 \text{ [J/s]}$$

$$h_g = 2,753\text{E}+06 \text{ [J/kg]}$$

$$\dot{m}_v = 0,2106 \text{ [kg/s]}$$

$$\rho = 877,9 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$T_f = 50 \text{ [C]}$$

$$U = 300$$

$$W = 8733 \text{ [J/s]}$$

$$C_p = 1951 \text{ [J/kg-C]}$$

$$h_f = 656558 \text{ [J/kg]}$$

$$M = 33232 \text{ [kg]}$$

$$P_1 = 551,6 \text{ [kPa]}$$

$$\rho_{v,i} = 2,926 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$T_i = 25 \text{ [C]}$$

$$\text{Vol} = 37,85 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$x_1 = 1$$

$$\Delta T_{\text{LM}} = 117,7 \text{ [C]}$$

$$h_{fg} = 2,096\text{E}+06 \text{ [J/kg]}$$

$$\dot{m}_i = 1671 \text{ [lbm/h]}$$

$$Q = 441516 \text{ [J/s]}$$

$$t = 3600 \text{ [s]}$$

$$T_{\text{sat},1} = 155,6 \text{ [C]}$$

$$\dot{v}_i = 0,07197 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$x_2 = 0$$

{Transferencia de Calor}

{Datos y propiedades}

T=3,82 {m}
N=125/60 {rev/s}
D_a=1 {m}
W_dot_in=8733 {W}
P_1=80*convert(psi;kPa) {kPa}
T_sat_1=T_sat(Steam;P=P_1)
rho_lub=877,9 {kg/m3}
mu_lub=0,253 {N-s/m2}
Cp_lub=1951 {J/kgK}
k_lub=0,145 {W/m-K}
Pr_lub=3400
Vol=10000*convert(gal;m^3)
M=rho_lub*Vol
T_i=25
T_f=50
grv=9,8 {m/s2}
x_i=1
x_o=0
D_i=37,5 {mm}
D_o=48,3 {mm}
L=66 {m}

rho_f=Density(Steam;T=T_sat_1;x=x_o)
rho_g=Density(Steam;T=T_sat_1;x=x_i)
mu_f=Viscosity(Steam;T=T_sat_1;x=x_o)
mu_g=Viscosity(Steam;P=P_1;x=x_i)
h_g=Enthalpy(Steam;T=T_sat_1;x=x_i)
h_f=Enthalpy(Steam;T=T_sat_1;x=x_o)
k_f=Conductivity(Steam;T=T_sat_1;x=x_o)
Pr_f=Prandtl(Steam;T=T_sat_1;x=x_o)
R_f_i=FoulingFactor('Steam')
R_f_o=FoulingFactor('Engine lube oil')
p_c=P_crit(Steam)

{Fórmulas}

A_t=(pi/4)*(D_i/1000)^2 {m2}
G=m_dot_v/A_t
p_r=P_1/p_c
P_o=pi*D_o/1000 {m}
P_i=pi*D_i/1000 {m}
A_i=P_i*L
A_o=P_o*L

Q_dot=U*A_o*DELTAT
DELTAT=T_sat_1-T_lub
T_lub=T_sat_1+W_dot_in/(U*A_o)-(T_sat_1-T_i+W_dot_in/(U*A_o))*exp(-(U*A_o)/(M*Cp_lub)*tiempo)
U=1/((1/h_TP_m)+R_f_i+1/(h_o)+R_f_o)

Q_dot=m_dot_v*h_fg
h_fg=h_g-h_f

{Coeficiente convectivo interno}

{Correlación de Shah}

h_TP_m=h_l*(0,55+2,09/p_r^0,38)
h_l=0,023*Re_L^0,8*(Pr_f^0,4*k_f)/(D_i/1000)
Re_L=(G*D_i/1000)/mu_f

{Coeficiente convectivo externo}

$Nusselt_o = 1,5 \cdot Re_a^{(2/3)} \cdot Pr_{lub}^{(1/3)} \cdot (\mu_{lub}/\mu_s)^{0,14}$
 $Re_a = (D_a^2 \cdot N \cdot \rho_{lub}) / \mu_{lub}$
 $Nusselt_o = h_o \cdot T / k_{lub}$
 $\mu_s = 0,03739 \text{ {N-s/m}^2}$

$$T = 3,82$$

$$N = \frac{125}{60}$$

$$D_a = 1$$

$$\dot{W}_{in} = 8733$$

$$P_1 = 80 \cdot \left| 6,895 \cdot \frac{\text{kPa}}{\text{psi}} \right|$$

$$T_{sat,1} = T_{sat} \left[\text{'Steam'} ; P = P_1 \right]$$

$$\rho_{lub} = 877,9$$

$$\mu_{lub} = 0,253$$

$$Cp_{lub} = 1951$$

$$k_{lub} = 0,145$$

$$Pr_{lub} = 3400$$

$$Vol = 10000 \cdot \left| 0,003785412 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{gal}} \right|$$

$$M = \rho_{lub} \cdot Vol$$

$$T_i = 25$$

$$T_f = 50$$

$$grv = 9,8$$

$$x_i = 1$$

$$x_o = 0$$

$$D_i = 37,5$$

$$D_o = 48,3$$

$$L = 66$$

$$\rho_f = \rho \left[\text{'Steam'} ; T = T_{sat,1} ; x = x_o \right]$$

$$\rho_g = \rho \left[\text{'Steam'} ; T = T_{sat,1} ; x = x_i \right]$$

$$\mu_f = \mathbf{Visc} \left[\text{'Steam'} ; T = T_{sat,1} ; x = x_o \right]$$

$$\mu_g = \mathbf{Visc} \left[\text{'Steam'} ; P = P_1 ; x = x_i \right]$$

$$h_g = \mathbf{h} \left[\text{'Steam'} ; T = T_{sat,1} ; x = x_i \right]$$

$$h_f = h \left[\text{'Steam'} ; T = T_{\text{sat},1} ; X = X_o \right]$$

$$k_f = k \left[\text{'Steam'} ; T = T_{\text{sat},1} ; X = X_o \right]$$

$$Pr_f = Pr \left[\text{'Steam'} ; T = T_{\text{sat},1} ; X = X_o \right]$$

$$R_{f,i} = \text{FoulingFactor} \left[\text{'Steam'} \right]$$

$$R_{f,o} = \text{FoulingFactor} \left[\text{'Engine lube oil'} \right]$$

$$p_c = P_{\text{Crit}} \left[\text{'Steam'} \right]$$

$$A_t = \frac{\pi}{4} \cdot \left[\frac{D_i}{1000} \right]^2$$

$$G = \frac{\dot{m}_v}{A_t}$$

$$p_r = \frac{P_1}{p_c}$$

$$P_o = \pi \cdot \frac{D_o}{1000}$$

$$P_i = \pi \cdot \frac{D_i}{1000}$$

$$A_i = P_i \cdot L$$

$$A_o = P_o \cdot L$$

$$\dot{Q} = U \cdot A_o \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = T_{\text{sat},1} - T_{\text{lub}}$$

$$T_{\text{lub}} = T_{\text{sat},1} + \frac{\dot{W}_{\text{in}}}{U \cdot A_o} - \left[T_{\text{sat},1} - T_i + \frac{\dot{W}_{\text{in}}}{U \cdot A_o} \right] \cdot \exp \left[\frac{-U \cdot A_o}{M \cdot C_{p,\text{lub}}} \cdot \text{tiempo} \right]$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{TP},m}} + R_{f,i} + \frac{1}{h_o} + R_{f,o}}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_v \cdot h_{\text{fg}}$$

$$h_{\text{fg}} = h_g - h_f$$

$$h_{\text{TP},m} = h_l \cdot \left[0,55 + \frac{2,09}{p_r^{0,38}} \right]$$

$$h_l = 0,023 \cdot Re_L^{0,8} \cdot \frac{Pr_f^{0,4} \cdot k_f}{\frac{D_i}{1000}}$$

$$Re_L = \frac{G \cdot \frac{D_i}{1000}}{\mu_f}$$

$$\text{Nusselt}_o = 1,5 \cdot \text{Re}_a^{[2 / 3]} \cdot \text{Pr}_{\text{lub}}^{[1 / 3]} \cdot \left[\frac{\mu_{\text{lub}}}{\mu_s} \right]^{0,14}$$

$$\text{Re}_a = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho_{\text{lub}}}{\mu_{\text{lub}}}$$

$$\text{Nusselt}_o = h_o \cdot \frac{T}{k_{\text{lub}}}$$

$$\mu_s = 0,03739$$

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa J mass deg

(Table 1, Run 21)

$$A_i = 7,775$$

$$C_{p_{\text{lub}}} = 1951$$

$$D_i = 37,5$$

$$g_{rv} = 9,8$$

$$h_g = 2,753E+06 \text{ [J/kg]}$$

$$h_{TP,m} = 17247$$

$$L = 66$$

$$\mu_g = 0,00001418 \text{ [kg/m-s]}$$

$$\mu_v = 0,1866 \text{ [kg/s]}$$

$$\text{Pr}_f = 1,138$$

$$p_c = 22064 \text{ [kPa]}$$

$$p_r = 0,025 \text{ [1/kPa]}$$

$$\text{Re}_L = 36109$$

$$\rho_{\text{lub}} = 877,9$$

$$T = 3,82$$

$$T_i = 25 \text{ [C]}$$

$$U = 368,7$$

$$x_i = 1$$

$$A_o = 10,01$$

$$\Delta T = 106 \text{ [C]}$$

$$D_o = 48,3$$

$$h_f = 656558 \text{ [J/kg]}$$

$$h_i = 1908$$

$$k_f = 0,6673 \text{ [W/m-K]}$$

$$M = 33232$$

$$\mu_{\text{lub}} = 0,253$$

$$N = 2,083$$

$$\text{Pr}_{\text{lub}} = 3400$$

$$P_i = 0,1178$$

$$\dot{Q} = 391211$$

$$\rho_f = 911,8 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$R_{f,i} = 0,000088 \text{ [m}^2\text{-C/W]}$$

$$\text{tiempo} = 3600$$

$$T_{\text{lub}} = 49,65 \text{ [C]}$$

$$\text{Vol} = 37,85$$

$$x_o = 0$$

$$A_t = 0,001104$$

$$D_a = 1$$

$$G = 169 \text{ [kg/s]}$$

$$h_{fg} = 2,096E+06$$

$$h_o = 418,3$$

$$k_{\text{lub}} = 0,145$$

$$\mu_f = 0,0001755 \text{ [kg/m-s]}$$

$$\mu_s = 0,03739$$

$$\text{Nusselt}_o = 11021$$

$$P_1 = 551,6$$

$$P_o = 0,1517$$

$$\text{Re}_a = 7229$$

$$\rho_g = 2,926 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$R_{f,o} = 0,000176 \text{ [m}^2\text{-C/W]}$$

$$T_f = 50$$

$$T_{\text{sat},1} = 155,6 \text{ [C]}$$

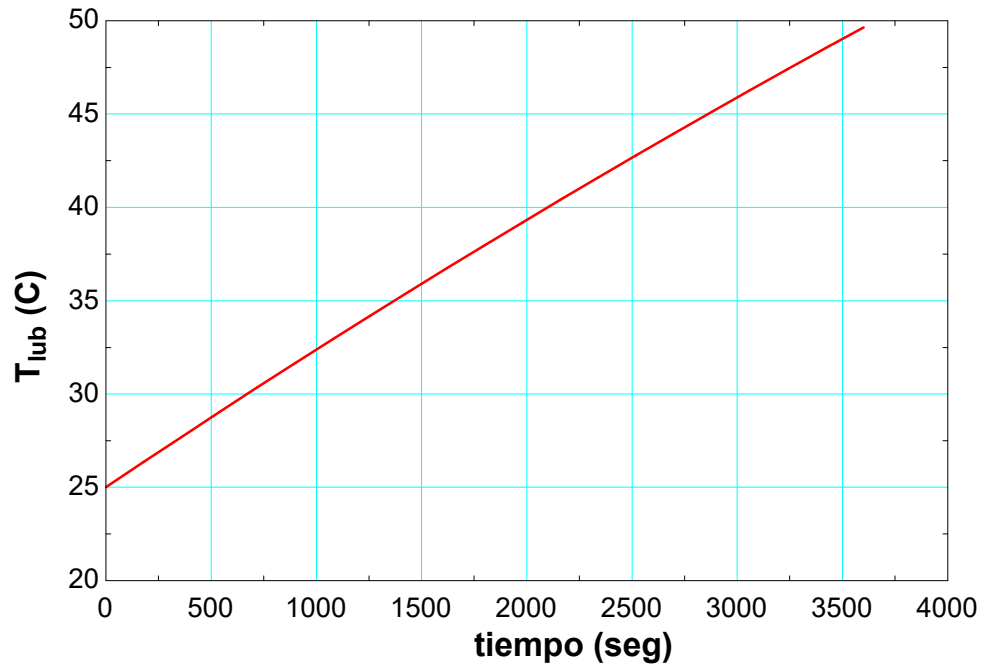
$$\dot{W}_{\text{in}} = 8733$$

Parametric Table: Table 1

	tiempo	\dot{m}_v [kg/s]	U	\dot{Q}	T_{lub} [C]
Run 1	0	0,2308	369,9	483830	25
Run 2	180	0,2283	369,9	478717	26,36
Run 3	360	0,2259	369,8	473658	27,71
Run 4	540	0,2235	369,7	468652	29,04
Run 5	720	0,2212	369,7	463699	30,36
Run 6	900	0,2188	369,6	458799	31,66
Run 7	1080	0,2165	369,6	453950	32,95
Run 8	1260	0,2142	369,5	449153	34,23
Run 9	1440	0,212	369,4	444406	35,49
Run 10	1620	0,2097	369,4	439709	36,74
Run 11	1800	0,2075	369,3	435062	37,98
Run 12	1980	0,2053	369,3	430464	39,2
Run 13	2160	0,2032	369,2	425915	40,41
Run 14	2340	0,201	369,1	421414	41,61
Run 15	2520	0,1989	369,1	416960	42,79
Run 16	2700	0,1968	369	412554	43,97

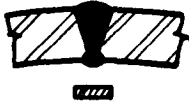





Parametric Table: Table 1

	tiempo	\dot{m}_v [kg/s]	U	\dot{Q}	T_{lub} [C]
Run 17	2880	0,1947	368,9	408194	45,13
Run 18	3060	0,1927	368,9	403880	46,27
Run 19	3240	0,1906	368,8	399612	47,41
Run 20	3420	0,1886	368,7	395389	48,53
Run 21	3600	0,1866	368,7	391211	49,65



APÉNDICE C
Eficiencia de la junta

TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS

TIPOS NORMA UW-12		EFICIENCIA DE LA JUNTA, E		
		Cuando la junta es:		
		a. Radiografiada totalmente	b. Examinada por zonas	c. No Examinada
1	 <p> Juntas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse ésta después de terminar la soldadura. </p>	1.00	0.85	0.70
2	 <p> Junta a tope de un solo cordón con tira de respaldo que queda en su lugar después de soldar En juntas circunferenciales únicamente </p>	0.90	0.80	0.65
3	 <p> Junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldo </p>	—	—	0.60
4	 <p> Junta a traslape de doble filete completo </p>	—	—	0.55
5	 <p> Junta a traslape de un solo filete completo con soldaduras de tapón </p>	—	—	0.50
6	 <p> Junta a traslape de un solo filete completo sin soldaduras de tapón </p>	—	—	0.45

APÉNDICE D

Gráfica T vs t

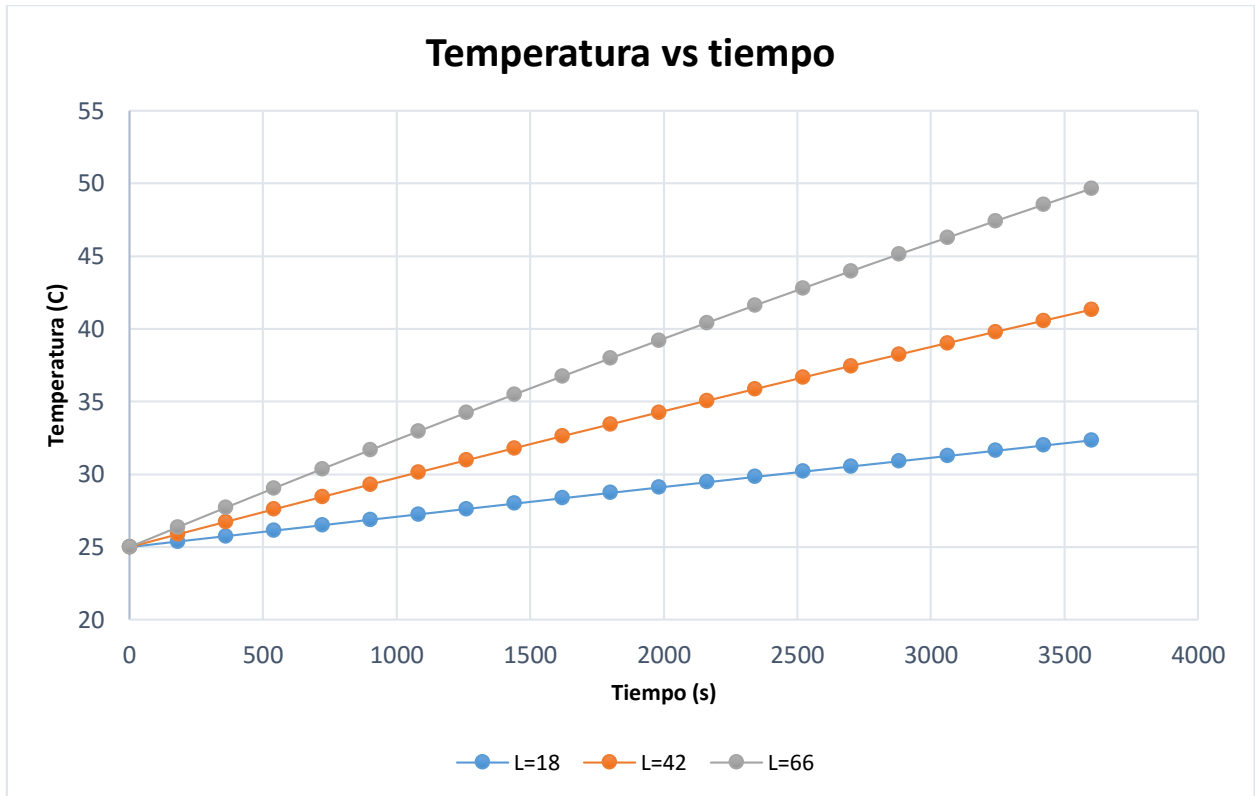
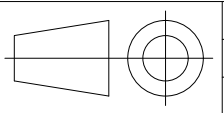
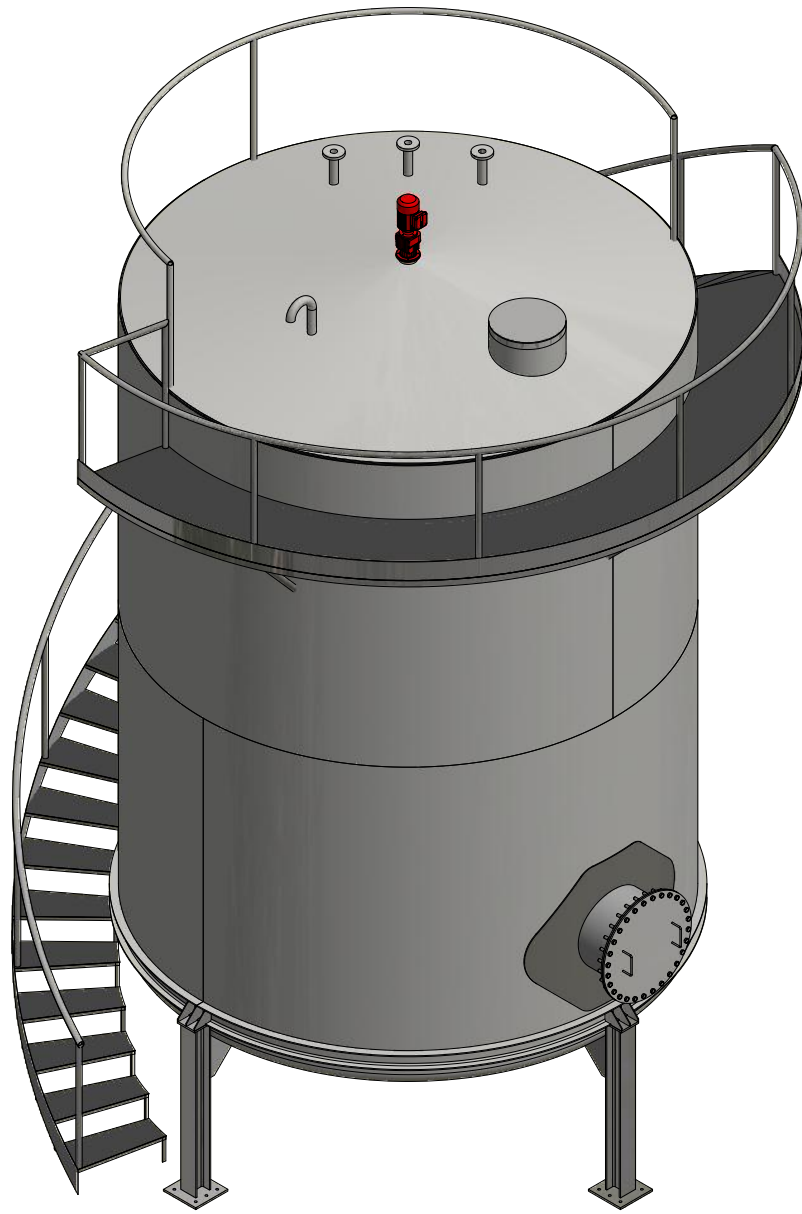


Figura 4.1. Variación de la temperatura del lubricante

Fuente: Creación propia

La Figura 4.1 muestra que a mayor superficie de calentamiento, la tasa de variación de la temperatura aumenta y la temperatura final en un tiempo cualquiera es mayor. Esta tendencia se puede validar a partir de la ecuación (2.38), la cual indica que el tiempo es inversamente proporcional al área de transferencia de calor. Para una temperatura final establecida, se tardará menos tiempo aquel serpentín que posea mayor longitud y por ende, mayor área de transferencia de calor.

APÉNDICE E
Planos



Dibujado por: Luis Ricaurte
Aprobado por:

Nombre:

Fecha:

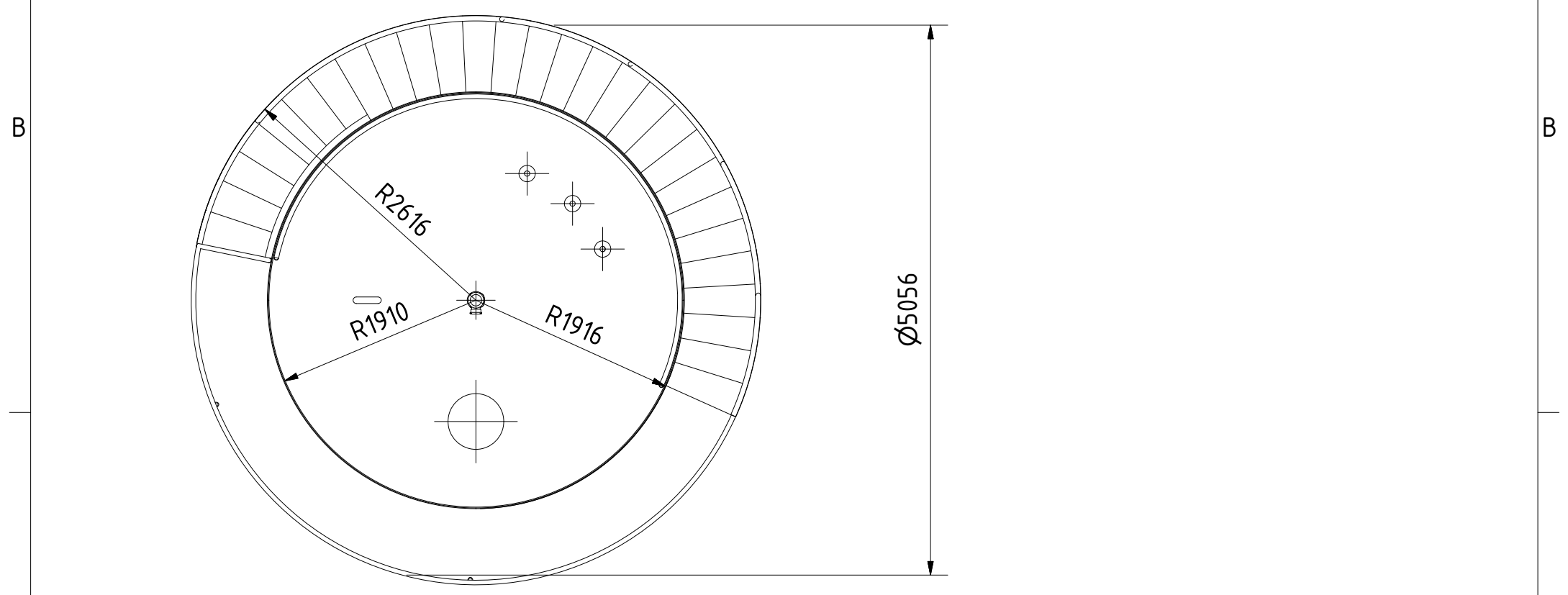
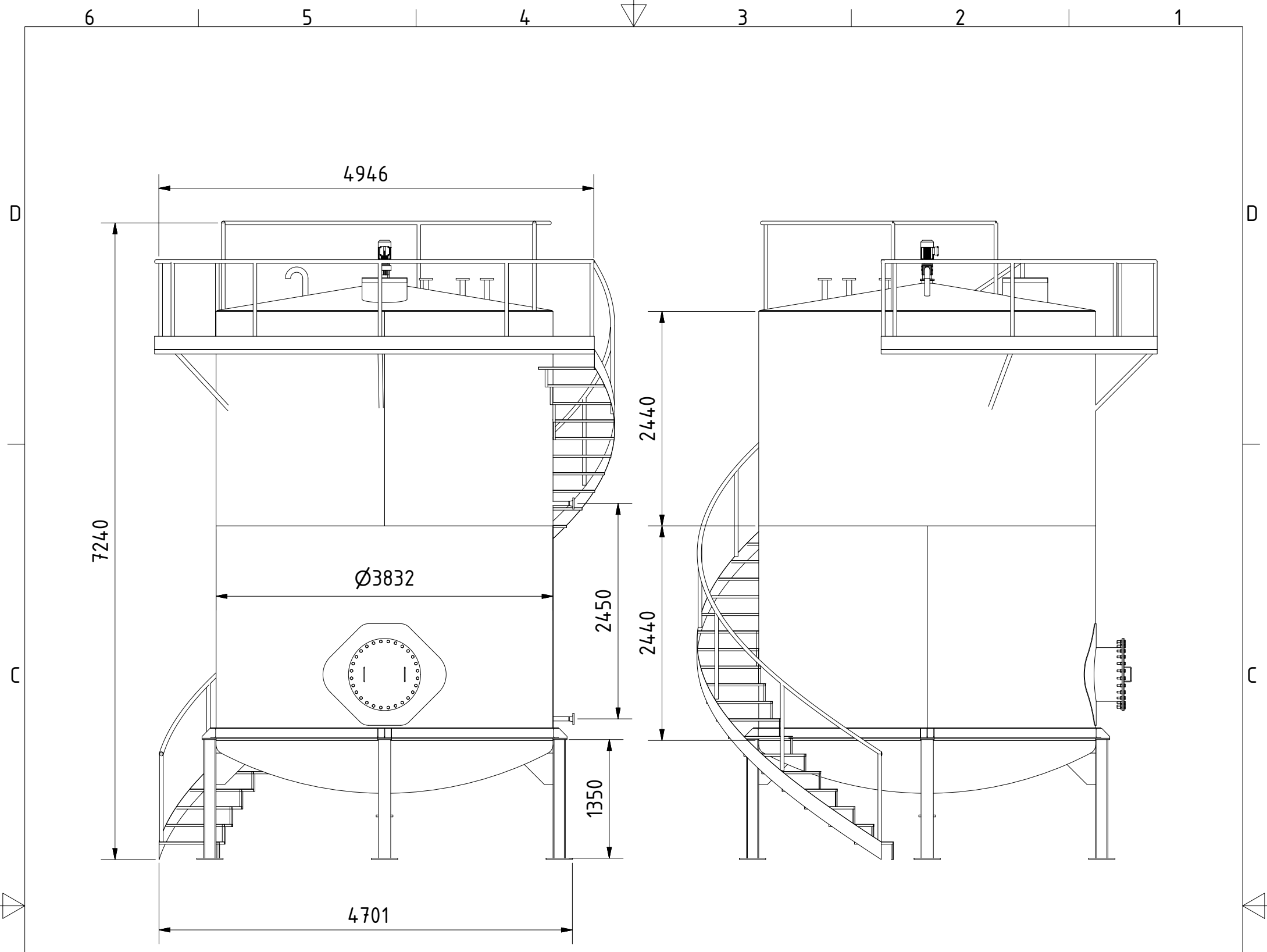
29/08/16

E S P O L

Escala:
1:50

TANQUE DE MEZCLA DE 10,000 gal

No.
1/11



	Nombre:	Fecha:	E S P O L
	Dibujado por: Luis Ricaurte	29/08/16	
Escala:	Aprobado por:		No.
1:50			2/11

DIMENSIONES GENERALES

Techo cónico
Pendiente = 2:12

A-A (1 : 50)

Motorreductor 15 HP

Eje de Transmisión
 $\varnothing 1 \frac{1}{2}''$

Serpentín de calentamiento

Deflectores

Agitador

Viga IPB 140

Domo Toriesférico

Tubería de descarga $\varnothing 3''$

Escalera Helicoidal

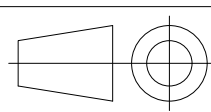
Tuberías de entrada $\varnothing 2''$

A

A

Abertura para visualización

Plataforma



Dibujado por:
Aprobado por:

Nombre:
Luis Ricaurte

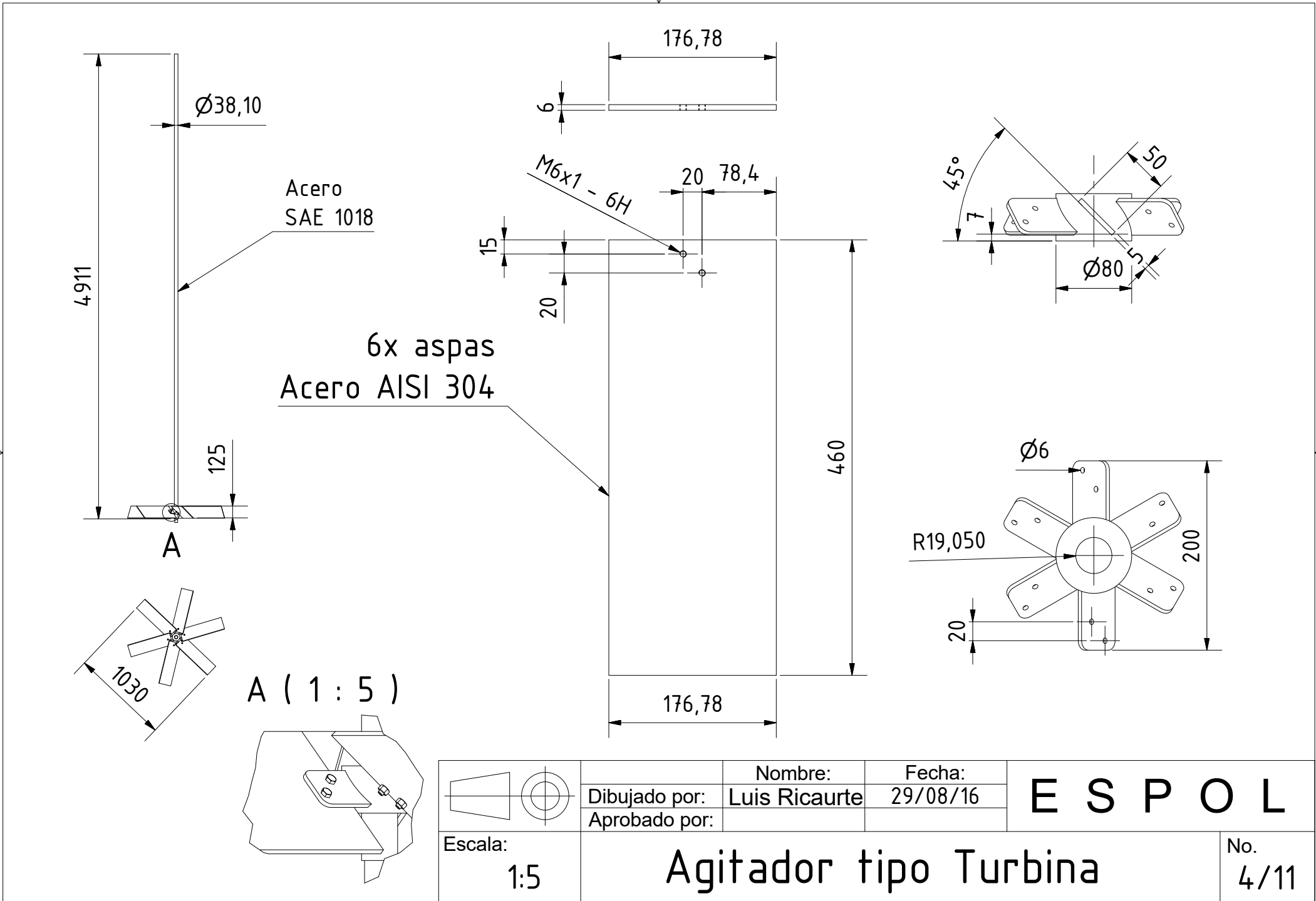
Fecha:
29/08/16

E S P O L

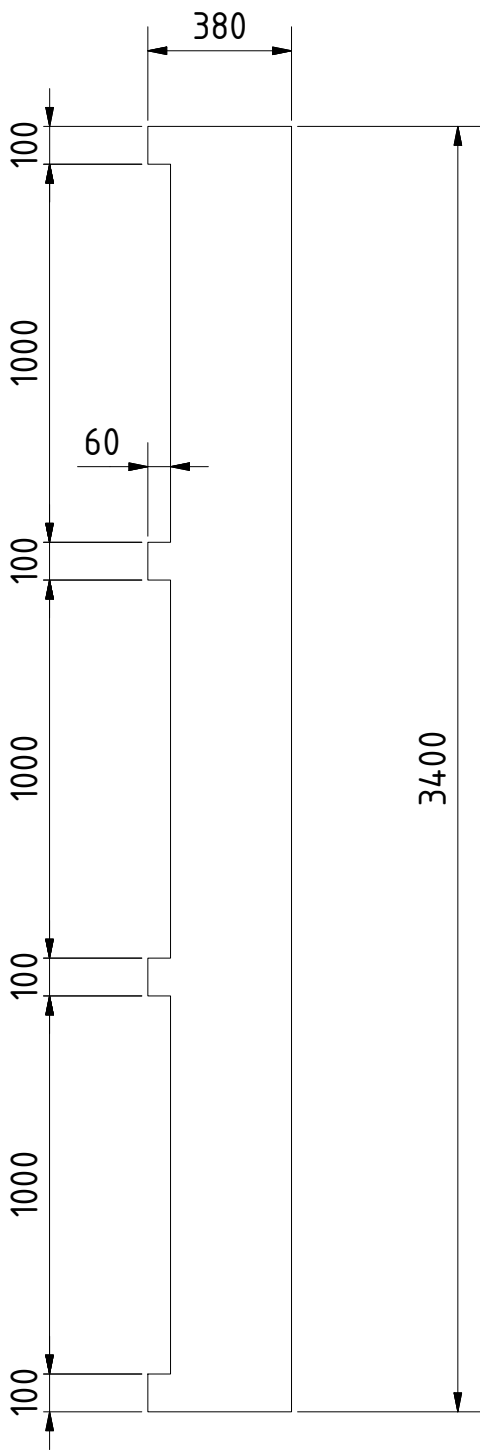
Escala:
1:50

Partes del Tanque de Mezcla

No.
3/11

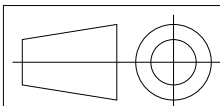
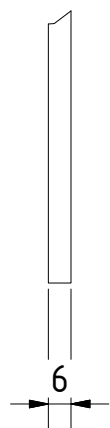


	Nombre:	Fecha:	E S P O L
	Dibujado por: Luis Ricaurte	29/08/16	
Escala:	Aprobado por:		No. 4/11
1:5	Agitador tipo Turbina		



Acero
ASTM A-36

A (1 : 2)



Dibujado por:
Aprobado por:

Nombre:
Luis Ricaurte

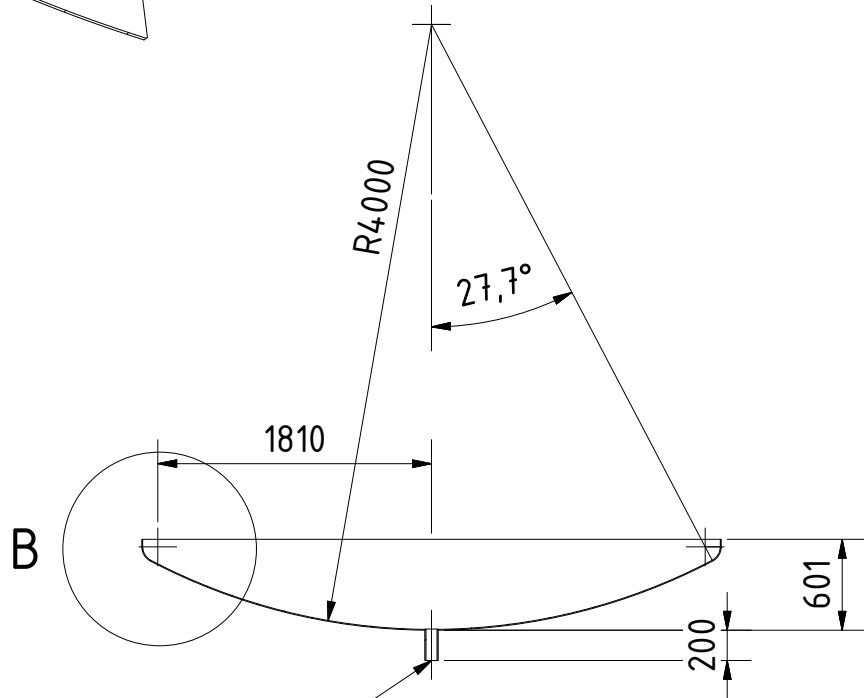
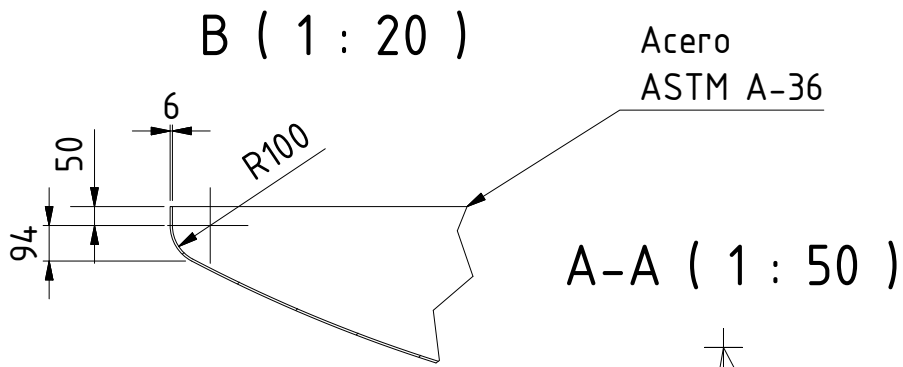
Fecha:
29/08/16

E S P O L

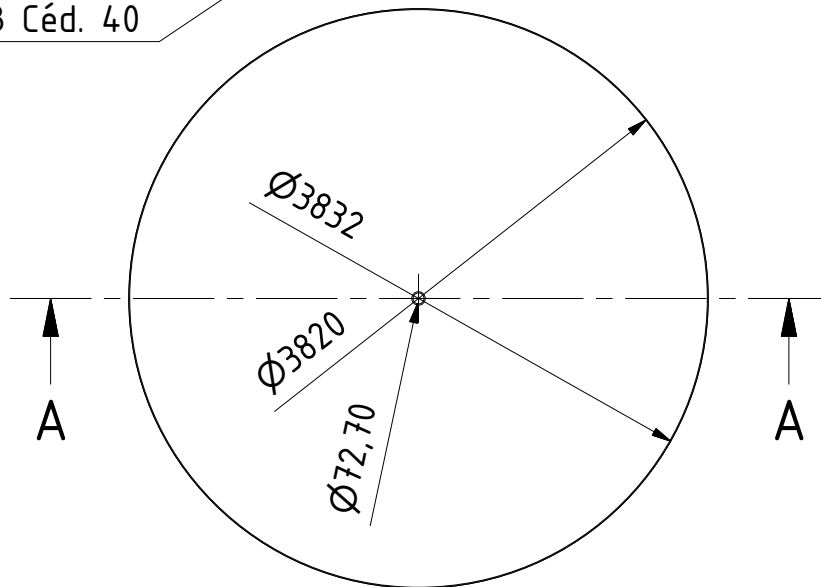
Escala:
1:20

Deflectores

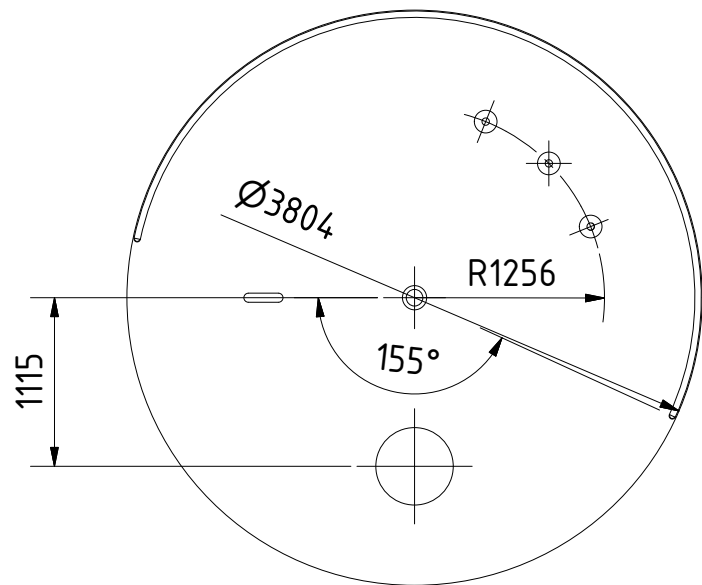
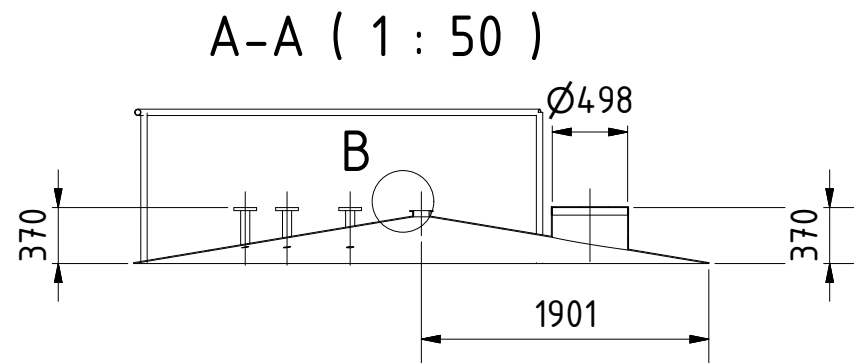
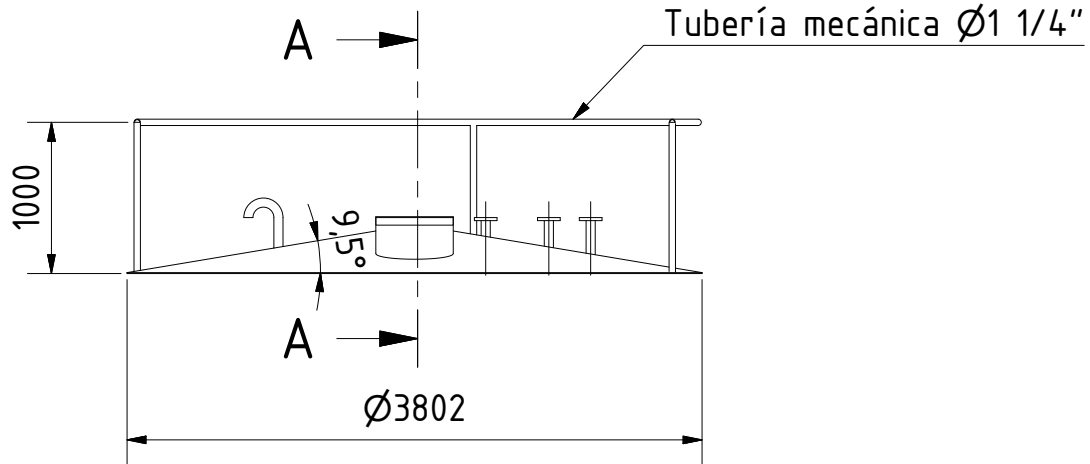
No.
5/11



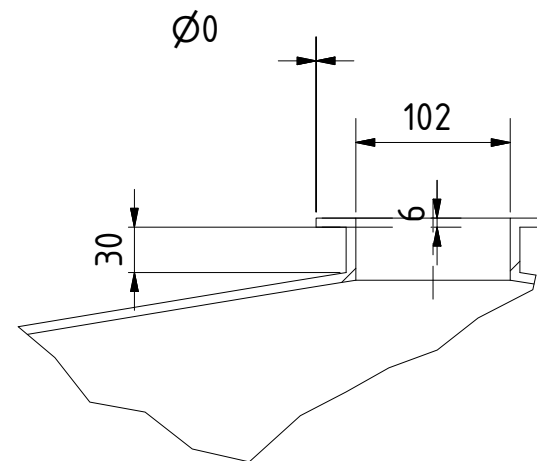
Tubería de descarga
ASTM A-53 Gr. B Céd. 40

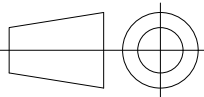


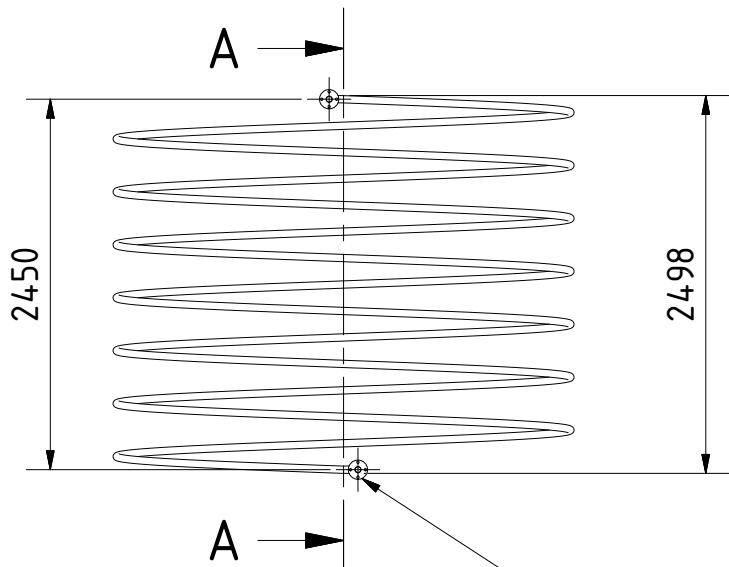
	Nombre:	Fecha:	E S P O L
	Dibujado por: Luis Ricaurte	29/08/16	
Escala:	Aprobado por:		No.
1:50	Domo Toriesférico - Fondo		6/10



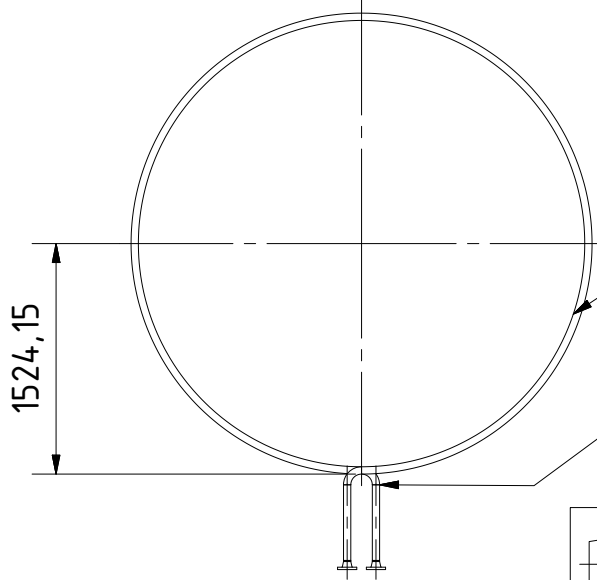
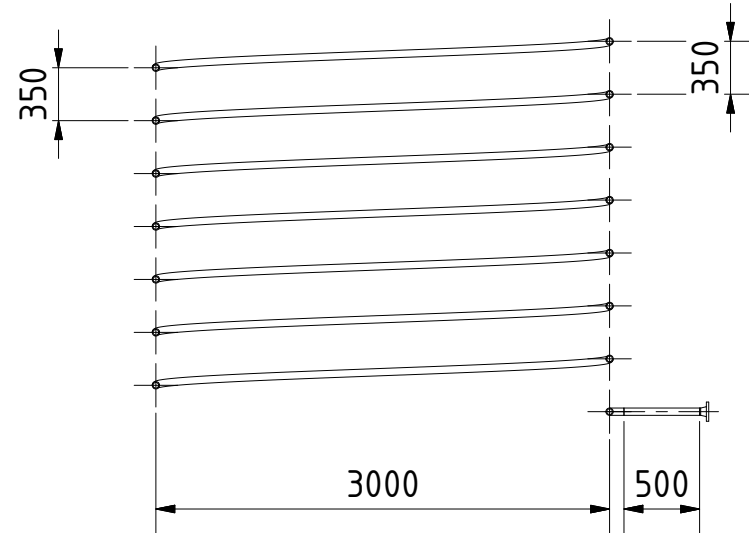
B (1 : 5)



	Nombre:	Fecha:	E S P O L
	Dibujado por: Luis Ricaurte	29/08/16	
Escala: 1:50	Aprobado por:		No. 7/11
Techo Cónico			



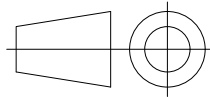
A-A (1 : 50)



Bridas ASME B16.5 \varnothing 1.5" Clase 150

Tubería de acero ASTM A-53 Gr. B Céd. 40 \varnothing 1 1/2"

2x Codo 90° soldable de Acero ASTM A-53 \varnothing 1 1/2"



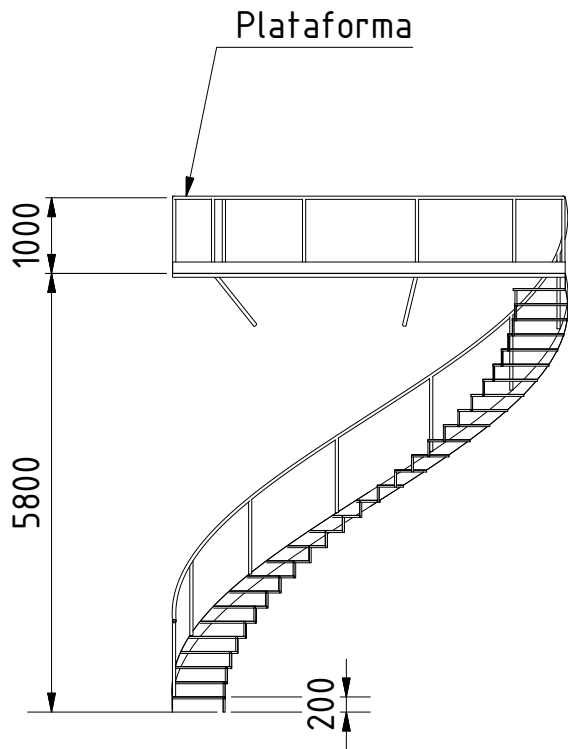
Escala:
1:50

	Nombre:	Fecha:
Dibujado por:	Luis Ricaurte	29/08/16
Aprobado por:		

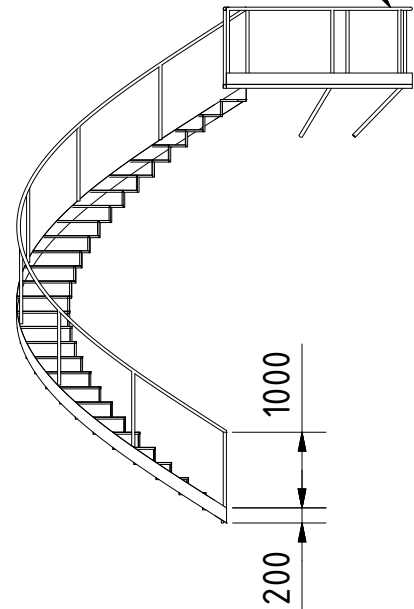
E S P O L

Serpentín de Calentamiento

No.
8/11

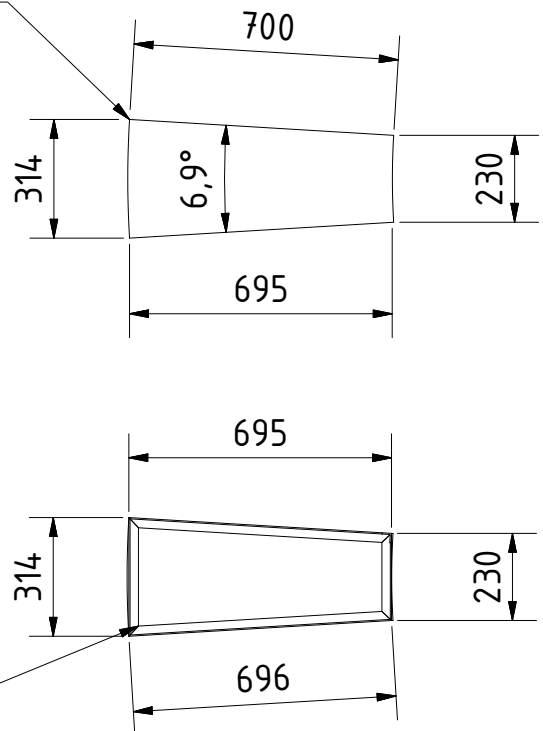
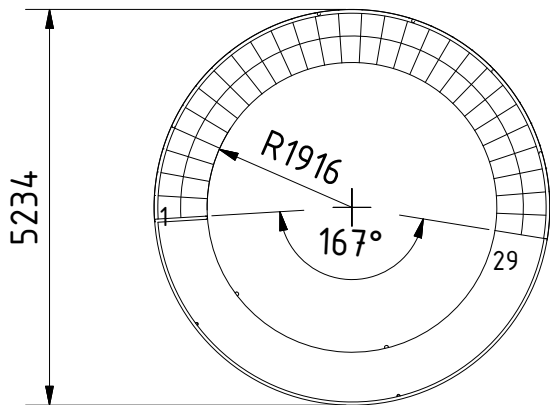


Tubería mecánica $\varnothing 1\ 1/4''$
Acero ASTM A-36

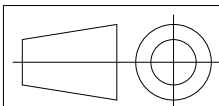


Detalle del escalón (1:20)

Plancha Antideslizante 2 mm



Ángulo 1"x1"x1/8"



Nombre: Luis Ricaurte
Fecha: 29/08/16
Dibujado por:
Aprobado por:

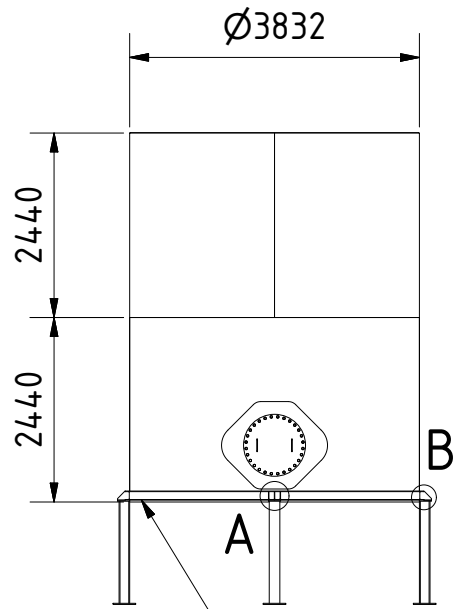
E S P O L

Escala:
1:100

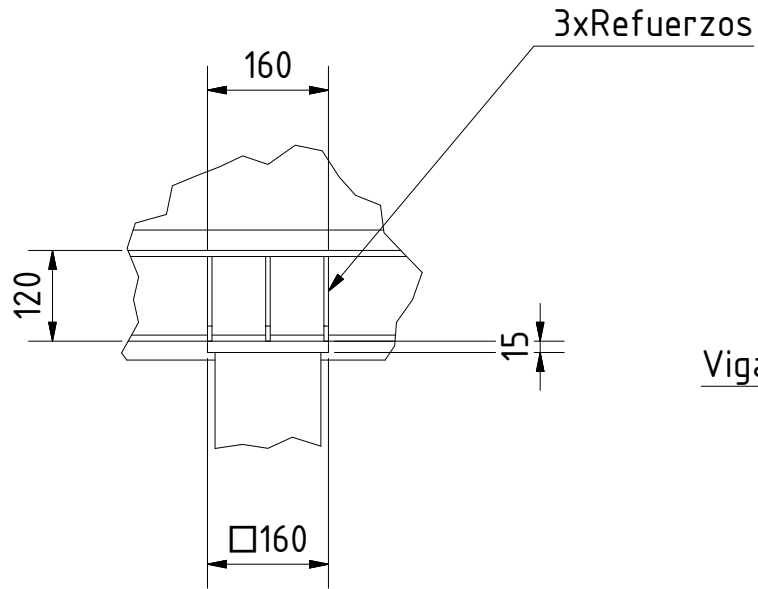
Escalera helicoidal y plataforma

No.
9/11

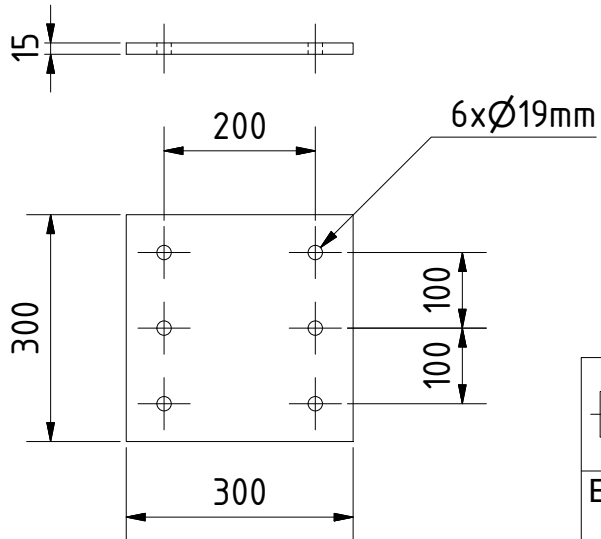
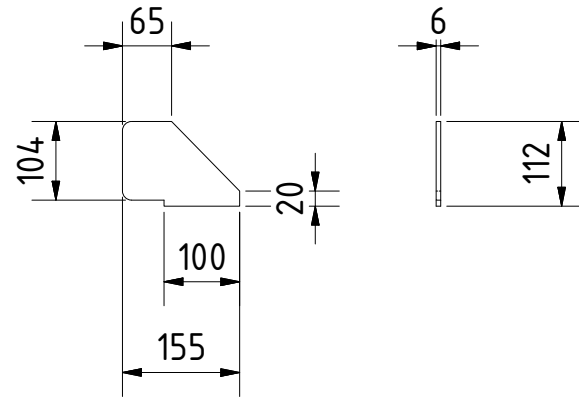
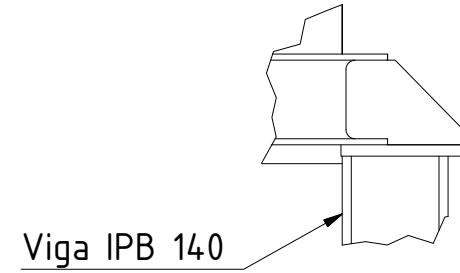
A (1 : 10)



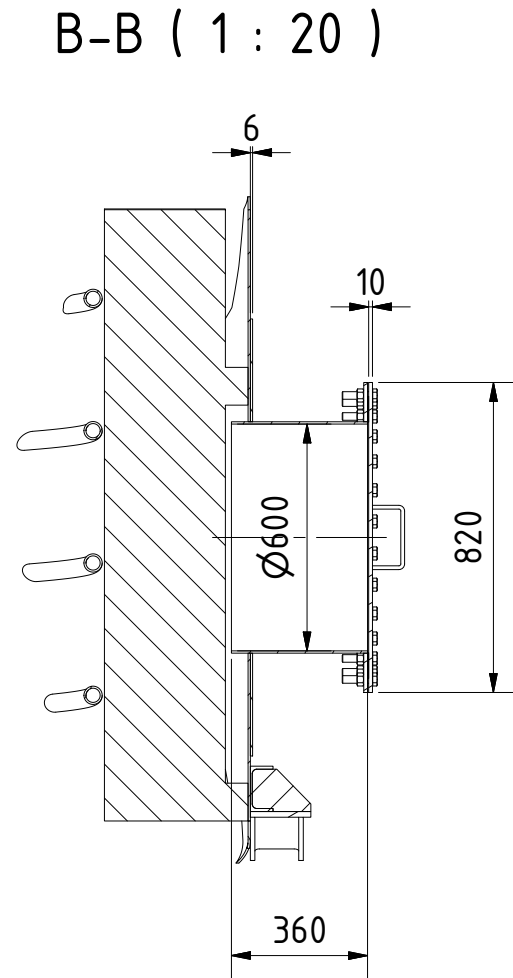
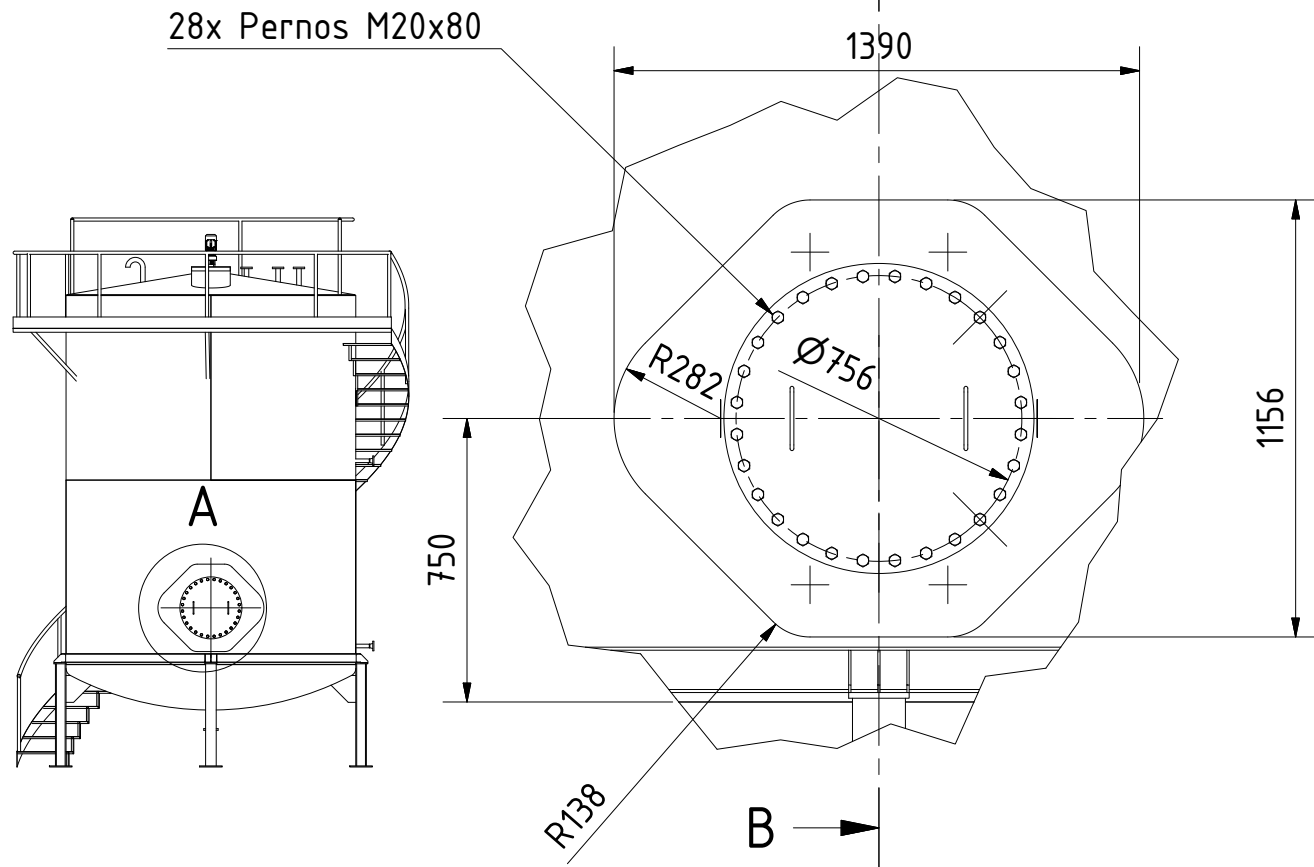
Viga UPN 120 Rolada a $\varnothing 3832$ mm

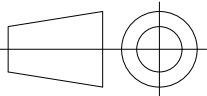


B (1 : 10)



	Nombre:	Fecha:	E S P O L
	Dibujado por: Luis Ricaurte	29/08/16	
	Aprobado por:		
Escala: 1:10	Junta Cuerpo-Base		No. 10/11



	Nombre:	Fecha:	E S P O L
	Dibujado por: Luis Ricaurte		
	Aprobado por:		
Escala: 1:20	Entrada de hombre		No. 11/11