

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

“Diseño de un reactor de transesterificación para pruebas de conversión
de aceites a biodiesel.”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Andrés Fernando Moreno Nicolalde

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y a mis tutores.

DECLARACIÓN EXPRESA

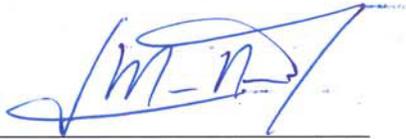
“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Andrés Fernando Moreno Nicolalde

Dra. Emérita Delgado

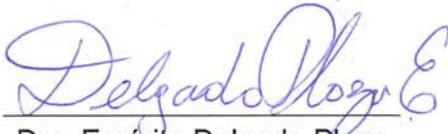
Dr. Juan Peralta

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



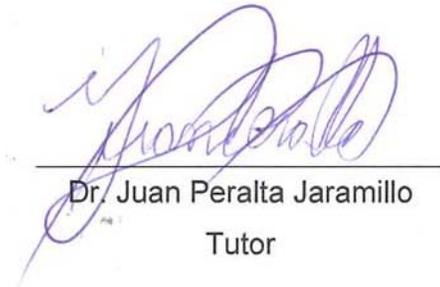
Andrés Moreno Nicolalde

Autor



Dra. Emérita Delgado Plaza

Tutora



Dr. Juan Peralta Jaramillo

Tutor

RESUMEN

El presente documento tiene como principal objetivo describir el proceso de diseño de un reactor de transesterificación con una capacidad nominal de 5 galones, tema que fue escogido como Proyecto de la Materia Integradora en el proceso de obtención de título de Ingeniero Mecánico.

El diseño de la estructura del reactor utilizó las normas ASME II y ASME VIII como fundamento ya que se ha considerado que el tanque está sometido a presiones internas y está constituido por un material que consta dentro de las normas ASME, como lo es el acero inoxidable AISI 304. El uso de dicho acero en el diseño es imperativo ya que el material estará expuesto a otros elementos de carácter corrosivo.

La reacción química del proceso de transesterificación se realizó gracias al sistema de agitación y al sistema de calentamiento pertenecientes al diseño del reactor.

Por su parte el mezclador se diseñó con un agitador mecánico radial tipo turbina y un motor de un caballo de fuerza. Todos los dimensionamientos del sistema de agitación obedecieron a las configuraciones estándar de tanques de mezclado.

El sistema de calentamiento calculado fue una resistencia eléctrica de inmersión cuya potencia requerida pasa los 2155 Watts.

La conjunción de dichos elementos fue diseñada para que el reactor fuera capaz de efectuar el proceso de transesterificación en un tiempo de media hora logrando así convertir la mezcla de aceite vegetal y metanol en el producto final, biodiesel.

Se realizaron dibujos asistidos por computadora en los que se representó con exactitud las medidas correspondientes a cada uno de los elementos del tanque de contención y del sistema de agitación.

Palabras Clave: Reactor, Transesterificación, Aceite Vegetal, Acero Inoxidable, Agitación, Resistencia de Inmersión.

ABSTRACT

The main objective of this document is to demonstrate to those who read it the design process of a transesterification reactor with a nominal capacity of 5 gallons, the topic was chosen as Project of the Integrative Subject in the process of obtaining the Mechanical Engineer Degree.

The design of the reactor structure used the ASME II and ASME VIII standards as a foundation since the tank has been considered to be subject to internal pressure and consists of a material consisting within ASME standards, such as stainless steel AISI 304. The use of such steel in the design is imperative since the material will be exposed to other corrosive elements.

The chemical reaction of the transesterification process was carried out thanks to the agitation system and the heating system belonging to the reactor design.

Meanwhile the mixer was designed with a turbine-type radial mechanical stirrer and 1 HP motor. All agitation system sizing obeyed standard mixing tank configurations.

The heating system calculated was an immersion electric resistance whose required power passes the 2155 Watts.

The combination of these elements was designed so that the reactor was able to carry out the transesterification process in half an hour thus achieving to convert the mixture of vegetable oil and methanol into the final biodiesel product.

Computer-aided drawings were made in which the measurements for each of the elements of the containment tank and of the agitation system were accurately represented.

Keywords: Reactor, Transesterification, Vegetable Oil, Stainless Steel, Agitation, Immersion Resistance.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGIA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE PLANOS	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Marco teórico.....	3
1.3.1. Definición de transesterificación.....	3
1.3.2. Materia prima.....	4
1.3.3. Procesos de transesterificación.....	5
1.3.4. Productos.....	6
1.4. Componentes.....	6
1.5. Tipos de reactor.....	6
1.5.1. Tanque contenedor.....	7
1.5.2. Sistema de agitación.....	9
1.5.3. Sistema de calentamiento.....	12
CAPÍTULO 2.....	14
2. METODOLOGÍA	14
2.1. Metodología de diseño	14
2.2. Especificaciones de diseño	14
2.3. Alternativas de diseño	15
2.4. Matriz de decisión.....	15
2.4.1. Selección del tanque contenedor.....	15
2.4.2. Selección del sistema de agitación.....	18
2.4.3. Selección del sistema de calentamiento.....	20

2.5. Diseño	22
2.5.1. Diseño del tanque	22
2.5.2. Diseño del sistema de agitación	28
2.5.3. Diseño del sistema de calentamiento	39
CAPÍTULO 3.....	41
3. RESULTADOS.....	41
3.1. Tanque de almacenamiento	41
3.2. Sistema de agitación	42
3.3. Sistema de calentamiento	43
3.4. Dibujo asistido por computadora.	44
3.5. Análisis de Costos	45
CAPÍTULO 4.....	46
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	46
4.1. Conclusiones	46
4.2. Recomendaciones.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	48
APÉNDICES.....	50

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable
API	American Petroleum Institute
INIER	Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables
INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo
ASME	American Society of Mechanical Engineers
Re	Número de Reynolds
N_p	Número de Potencia
F_D	Fuerza de Arrastre
BEP	Barriles equivalentes de petróleo

SIMBOLOGIA

mm	Milímetro
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro cuadrado
cm ³	Centímetro cúbico
m	Metro
m ³	Metro cúbico
Ø	Diámetro
t	Espesor
gal	Galón
J	Julio
N	Newton
MPa	Megapascal
s	Segundo
min	Minuto
rad	Radián
ω	Velocidad angular
σ	Esfuerzo de flexión
ρ	Densidad
μ	Viscosidad
m _a	Masa de aceite
Kg	Kilogramo
T _{amb}	Temperatura ambiental
T _{máx}	Temperatura máxima
°C	Grado Celcius
K	Kelvin
Cp	Calor específico a presión constante
E	Energía
W	Vatio
HP	Caballo de fuerza

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de transesterificación.	5
Figura 1.2. Cámara de contención rectangular.....	7
Figura 1.3. Cámara de contención esférica.....	8
Figura 1.4. Cámara de contención cilíndrica	8
Figura 1.5. Agitador tipo eductor.	9
Figura 1.6. Esquema de flujo de aire y mezcla en un pulsador.	10
Figura 1.7. Agitador de hélice.....	10
Figura 1.8. Agitador de paleta	11
Figura 1.9. Agitador de turbina	11
Figura 1.10. Calentador de chaqueta	12
Figura 1.11. Calentador de serpentín	13
Figura 1.12. Calentador de resistencias eléctricas	13
Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología del diseño.....	14
Figura 2.2. Volúmenes y niveles de tanques.....	23
Figura 2.3. Ejemplo de vista seccionada de una cabeza hemisférica.	27
Figura 2.4. Selección del tipo de agitador.	29
Figura 2.5. Tipos de Agitadores mecánicos.....	30
Figura 2.6. Descripción de impellers básicos.	32
Figura 2.7. N_p vs Re de diversos impellers.....	33
Figura 2.8. Coeficientes de arrastre comunes.	37
Figura 2.9. Dimensiones típicas de equipo de mezclado.	38
Figura 3.1. Vista seccional del reactor.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Alternativas de diseño	15
Tabla 2.2. Comparación de criterios del tanque contenedor.	17
Tabla 2.3. Matriz de decisión para el tanque contenedor.	17
Tabla 2.4. Comparación de criterios del sistema de agitación.....	19
Tabla 2.5. Matriz de decisión para el sistema de agitación	19
Tabla 2.6. Comparación de criterios del sistema de calentamiento.....	21
Tabla 2.7. Matriz de decisión para el sistema de calentamiento.	21
Tabla 2.8. Esfuerzos permisibles.....	26
Tabla 2.9. Propiedades del aceite vegetal.....	29
Tabla 2.10. Datos para el cálculo de la energía requerida.	40
Tabla 3.1. Especificaciones del tanque de almacenamiento.	41
Tabla 3.2. Especificaciones del sistema de agitación.....	42
Tabla 3.3. Especificaciones del sistema de calentamiento.....	43
Tabla 3.4. Costos de los componentes del reactor de pruebas.....	45

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO #1	Pared del tanque, Cabeza hemisférica y Deflectores.
PLANO #2	Disco de la turbina y Tapa del tanque.
PLANO #3	Eje de transmisión y Paleta de la turbina.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En el Ecuador se plantean varios objetivos como parte del Plan del Buen Vivir, del cual el punto número 7 establece que se debe garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global. De esta forma se necesita desarrollar en el país métodos de energía renovable.

En el Ecuador se busca incrementar el uso del biodiesel como fuente de energía, según lo dictamina el Plan del Buen Vivir bajo su sección "Transformación de la matriz productiva". De acuerdo al SENPLADES, dicha sección establece en su noveno punto que en el Ecuador se debe "Aprovechar los procesos de bio-digestión e impulsar la producción de etanol a partir de subproductos agrícolas, y la producción de biodiesel a partir de micro algas y piñón." (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2013)

En la zona de las Islas Galápagos el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable se encuentra trabajando en una iniciativa gubernamental denominada "Cero Combustibles Fósiles en Galápagos" que busca proteger al archipiélago de posibles afectaciones a su ecosistema debido a derrames y otros tipos de desastres. Dicha iniciativa no cuenta aún con un proyecto que considere a los biocombustibles como alternativa de fuente de energía para las islas encantadas, por lo que se vuelve necesario fomentar la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal que contribuya a la protección que ofrece el plan gubernamental para un futuro sustentable. (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2007)

La ONU plantea la eliminación de los subsidios a las llamadas energías sucias, es decir a los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) a gobiernos que tienen presente a este subsidio como parte de su política social. El Ecuador es uno de ellos, no obstante se plantea la eliminación de dicho subsidio ya que en los últimos años se han construido proyectos hidroeléctricos capaces de producir energía de manera mucho más limpia produciendo así grandes ahorros en consumo de combustibles que se usaban en las termoeléctricas. Con esto en mente el costo de los combustibles fósiles sufriría un incremento mientras que las energías renovables están en pleno auge en todo el mundo. (Planelles, 2016)

A pesar de que el biocombustible es criticado por varios sectores en el entorno mundial ya que sostienen que crea conflictos porque los territorios ocupados con el material usado para producir biocombustible reduciría el espacio para el cultivo de los productos alimenticios, se está buscando formas de no perjudicar al sector agrícola y continuar con la producción de combustibles ya que no solo los combustibles fósiles son más dañinos para los ecosistemas si no que tienen una fecha límite en su existencia. Según el Ministerio de Agricultura del Ecuador existe un área disponible de 332.755 hectáreas agroecológicamente aptas para el cultivo de palma aceitera que permita impulsar la producción de biodiesel. (Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones., 2013)

Según el reporte del Balance Energético Nacional del 2016 (año base 2015) en el Ecuador se consumió 90,5 millones de Barriles Equivalentes de Petróleo (BEP), de los cuales 28,4 millones (31,4%) fueron de diésel, representando así el mayor combustible consumido seguido por las gasolinas con 25,2 millones (27,8%). Esto representa un fuerte consumo de diésel distribuido en todos los consumidores, por lo que la producción de biodiesel toma fuerza en el contexto nacional. (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016)

En su historia Ecuador ha sido un país que exporta crudo e importa sus derivados para satisfacer el mercado interno por lo que se tiene un mercado fuerte en el medio nacional y la urgente necesidad de producción local de diésel. A continuación se citan dos ejemplos recientes:

En el año 2016 Petroecuador anunció la importación de 2'880.000 barriles de diésel para la industria. (Diario El Telégrafo, 2016)

En Abril del presente año Petroecuador anunció la importación de 2'400.000 barriles de diésel para la industria. Presentaron ofertas tan solo ocho empresas de 27 invitadas. (Diario El Comercio, 2017)

1.1. Descripción del problema.

El Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS) perteneciente a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), requiere el diseño de un tanque de pruebas para la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales, dicho tanque debe contar con una capacidad nominal de 5

gal. El tanque debe cumplir con normas y estándares internacionales para su dimensionamiento, además de poseer un sistema de mezclado, sistema de calentamiento apropiados para el proceso químico a realizarse.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un reactor piloto de transesterificación con una capacidad de 5 galones para pruebas de obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de aceite.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar la cámara de contención para realizar el proceso de transesterificación.
- Diseñar los elementos mecánicos complementarios para la operación del reactor.
- Seleccionar los materiales apropiados para la construcción del reactor experimental, a partir de criterios económicos y de diseño.
- Seleccionar los instrumentos de medición necesarios para el control de operación de la unidad experimental.
- Estimar los costos para la fabricación del reactor experimental.

1.3. Marco teórico

1.3.1. Definición de transesterificación.

La transesterificación es el término general usado para describir el proceso de intercambiar el grupo orgánico de un éster con el grupo orgánico de un alcohol. Cuando el éster original es mezclado con un alcohol, el proceso de transesterificación es llamado alcoholísis.

La transesterificación es una reacción de equilibrio y la transformación ocurre esencialmente al mezclar los reactivos. Cabe añadir que la presencia de un catalizador (típicamente un ácido fuerte o base) acelera considerablemente el ajuste del equilibrio. Con el fin de lograr un alto rendimiento del éster, el alcohol tiene que ser usado en exceso.

La aplicabilidad de la transesterificación no está restringida a escala de laboratorio. Muchos procesos industriales usan esta reacción para producir diferentes tipos de compuestos. (Schuchardt, Sercheli, & Vargas, 1998)

Con la excepción de la energía hidroeléctrica y energía nuclear, la mayor parte de toda la energía consumida a nivel mundial viene del petróleo, carbón y gas natural. No obstante, estos recursos están limitados, y se terminarán al final del próximo siglo.

Los aceites vegetales son renovables y potencialmente una fuente inagotable de energía de la cual se puede obtener biocombustible con un contenido energético cercano al del combustible diésel. Aunque a pesar de su capacidad energética, el uso directo de aceites vegetales en motores de combustión es problemático. Debido a su alta viscosidad y baja volatilidad (Schuchardt, Sercheli, & Vargas, 1998), los aceites vegetales no se queman completamente y se forman depósitos en los inyectores de combustible de motores diésel.

La transesterificación es la mejor opción para reducir la alta viscosidad de los aceites vegetales, ya que las características físicas de los ésteres de ácidos grasos (biodiésel) son muy cercanas a las de combustible diésel y el proceso es relativamente simple. (Schuchardt, Sercheli, & Vargas, 1998)

1.3.2. Materia prima.

En la transesterificación de aceites vegetales, un triglicérido reacciona con un alcohol en presencia de un ácido fuerte o una base, produciendo una mezcla de ésteres alquílicos de ácidos grasos y glicerol.

El proceso en general es una secuencia de tres reacciones consecutivas e irreversibles en las cuales diglicéridos y monoglicéridos son formados como intermedios.

Muchos tipos de aceites vegetales, con una diversa composición de ácidos grasos, pueden ser usados para la preparación de biodiesel. Los aceites de haba de soja, colza, girasol y palma son los más estudiados. No obstante, no hay restricciones técnicas sobre el uso de otros tipos de aceites vegetales. Considerando el tipo de alcohol, el uso de metanol es más ventajoso ya que permite la separación simultánea de glicerol. La misma reacción usando etanol es más complicada ya que requiere alcohol libre de agua, así como un aceite con bajo contenido de agua para que se dé la separación del glicerol.

1.3.3. Procesos de transesterificación.

Varios aspectos, incluyendo el tipo de catalizador (alcalino o ácido), la relación molar alcohol a aceite vegetal, temperatura, pureza de los reactantes (principalmente por el contenido de agua) y el contenido libre de ácidos grasos tienen influencia en el curso de la transesterificación. Los procesos se dividen de acuerdo al tipo de catalizador utilizado, como se muestra a continuación. (Schuchardt, Sercheli, & Vargas, 1998)

- Procesos catalizados por un ácido.
- Procesos catalizados por una base.
- Procesos catalizados por lipasa.
- Procesos catalizados por una base no iónica.
- Procesos catalizados heterogéneamente.

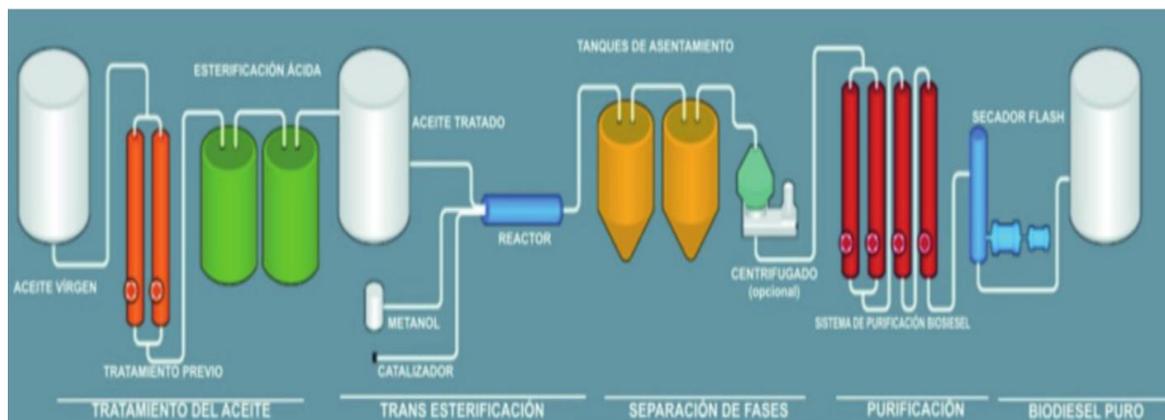


Figura 1.1. Proceso de transesterificación.

Fuente: (Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones., 2013).

1.3.4. Productos.

En el Ecuador la producción de biodiesel empezó en el 2005, y hasta el 2012 ésta se destinaba en su totalidad al mercado externo. La producción en la actualidad alcanza los 140 millones de litros al año. El biodiesel en el país se produce a partir del aceite de palma africana, y de piñón (*Jatropha curcas*). En el 2013 el Gobierno Nacional dispuso mediante el Decreto Ejecutivo 1303 que en un plazo de ocho meses el diésel consumido en el país contenga un 5% de biodiesel y se incremente progresivamente hasta el 10%. El INIAP y el INIER impulsan desde el 2014 el proyecto “Piñón para Galápagos” el cual busca aprovechar la biomasa de piñón como alternativa de combustible. La empresa Fabril es un exportador de biodiesel desde hace más de diez años llegando a exportar en la actualidad 16.6 millones de galones a EE.UU., Alemania y Perú. (Revista Líderes, 2017)

1.4. Componentes.

El reactor para el proceso de transesterificación requiere:

- Una cámara de contención donde se depositan los reactivos, se produce la mezcla y de la que salen los productos.
- Un sistema de mezclado por el cual se produce la reacción de manera homogénea.
- Un sistema de calentamiento para alcanzar la temperatura necesaria a la que se debe producir la reacción química.
- Sistemas de medición de temperatura de la mezcla, presión de la cámara de contención y velocidad angular del sistema de mezclado.

1.5. Tipos de reactor.

El reactor dependerá de la forma del tanque contenedor, del tipo de agitador y del sistema de calentamiento que se elija.

1.5.1. Tanque contenedor.

El tanque contenedor o cámara de contención variará según la forma que tenga. Este detalle es importante ya que según la forma de dicha cámara de contención se producirán variantes en detalles como la facilidad de la construcción, y facilidad de diseño al momento de realizar cálculos. Asimismo la forma del tanque influye en el diseño del sistema de agitación y calentamiento ya que mientras se mantenga una simetría en la forma del tanque y la disposición de dichos sistemas se producirá un mezclado y una distribución de calor más homogénea en la biomasa usada en la producción de biodiesel.

Una correcta selección de forma de la cámara de contención puede reducir costos en la cantidad de accesorios que se necesiten para los sistemas de calentamiento y agitación.

Se consideran tres formas para el tanque contenedor: rectangular, esférico y cilíndrico.

1.5.1.1. Tanque rectangular.

Una cámara de forma rectangular como la de la Fig. 1.2 presenta poca simetría en uno de sus ejes, lo cual dificulta la labor de mezclar y calentar de manera homogénea la biomasa. No obstante presenta gran facilidad de construcción y diseño.

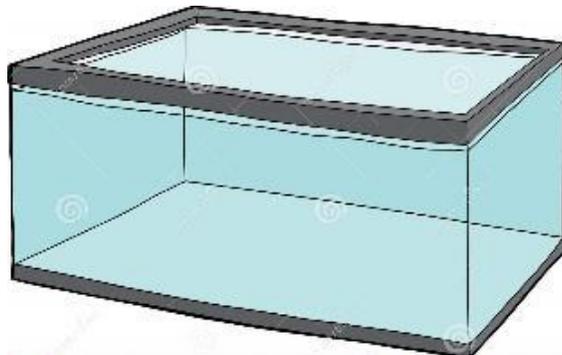


Figura 1.2. Cámara de contención rectangular

Fuente: Dreamstime.

1.5.1.2. Tanque esférico.

Es la más simétrica en todos sus ejes (Fig. 1.3), lo cual la hace ideal para la distribución de calor y agitación. No obstante presenta una gran complejidad de construcción y diseño ya que se requiere de mucha exactitud en su fabricación, elevando así su costo de fabricación.



Figura 1.3. Cámara de contención esférica

Fuente: Alibaba – Taishan Group Co., Ltd.

1.5.1.3. Tanque cilíndrico.

Una cámara de forma cilíndrica como el de la Fig. 1.4 podría ser vertical u horizontal, sin embargo se descarta la horizontal por obvias razones ya que comparte características consideradas con la rectangular. Por otro lado, el cilindro vertical presenta buenas facultades en la distribución de calor y mezclado ya que mantiene simetría con los sistemas necesarios para ese trabajo. Además es de fácil construcción y mediana complejidad en los cálculos de diseño.



Figura 1.4. Cámara de contención cilíndrica

Fuente: Agua Máquinas.

1.5.2. Sistema de agitación.

1.5.2.1. Eductores.

Un eductor consiste en bombas que impulsan un líquido en forma de chorro y los mezcla con otro para luego elevarlos contra la gravedad o alguna presión determinada (Fig 1.5). El primer líquido se expande en la tobera produciendo así un chorro de alta velocidad y crea un vacío en la conexión de aspiración, provocando así que el líquido a succionar sea bombeado. Ambos líquidos se mezclan a lo largo del eductor hasta igualar sus velocidades en la garganta del difusor, con un incremento de presión. En el tronco divergente la mezcla pierde aceleración y la energía cinética se vuelve trabajo de compresión adicional tal y como es dictado por el teorema de Bernoulli. (Ingeniería Bernoulli S.A., 2014)

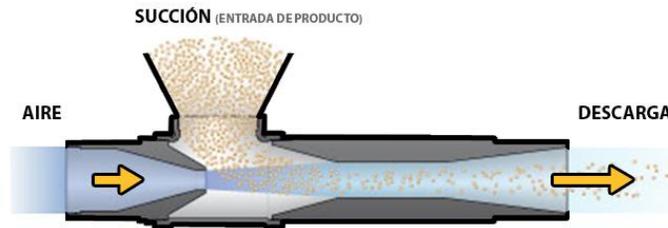


Figura 1.5. Agitador tipo eductor.

Fuente: CV International.

1.5.2.2. Pulsador de aire.

Se inyecta aire en el pulsador de aire (Fig. 1.6) comprimido con el uso de un plato acumulador, lo cual provoca que se libere una burbuja de aire desde el fondo del tanque. Dicha burbuja conforme se eleva a la superficie crea un vacío que arrastra los líquidos más densos que se encuentran en el fondo del tanque junto con ella, empujando así al líquido superior hacia la pared del tanque y descendiendo hasta el fondo. (Ricaurte Freire, 2016)

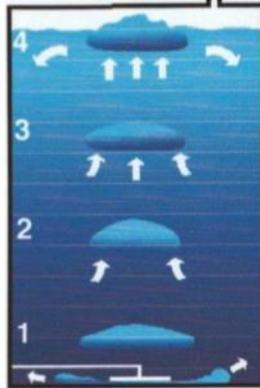


Figura 1.6. Esquema de flujo de aire y mezcla en un pulsador.

Fuente: Anfal Mohammed, 2016.

1.5.2.3. Agitador mecánico.

Los agitadores mecánicos pueden ser de flujo axial o de flujo radial. Los agitadores de flujo axial generan corrientes paralelas al eje del agitador y los de flujo radial generan corrientes en dirección tangencial o radial. Los tres tipos principales de agitadores son: de hélice, de paletas, y de turbina.

1.5.2.3.1. Agitador de hélice.

Un agitador de hélice (Fig. 1.7) es de flujo axial, opera a velocidades elevadas y se emplea para líquidos pocos viscosos. Estos agitadores son eficaces para tanques de gran tamaño.



Figura 1.7. Agitador de hélice

Fuente: Direct Industry – Sunkaier.

1.5.2.3.2. Agitador de paletas.

Un agitador de paletas (Fig. 1.8) está formado por una paleta plana que gira alrededor de un eje vertical. Presenta velocidades angulares bajas o moderadas en el centro del tanque. El líquido se dirige primero hacia la pared del tanque y luego hacia arriba o abajo.

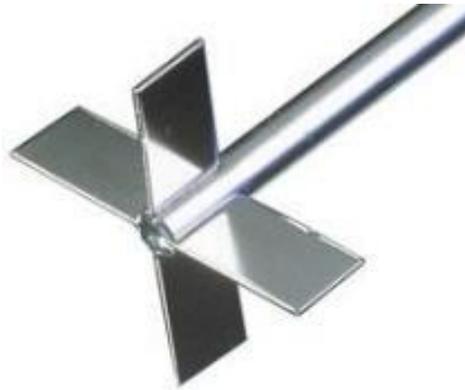


Figura 1.8. Agitador de paleta

Fuente: Instrumentación Científico Técnica, S.L.

1.5.2.3.3. Agitador de turbina

Un agitador de turbina (Fig. 1.9) presenta múltiples y cortas paletas. Se usa a velocidades elevadas sobre un eje que se monta en el centro del tanque. Las aspas del agitador pueden presentarse en distintas formas y posiciones.

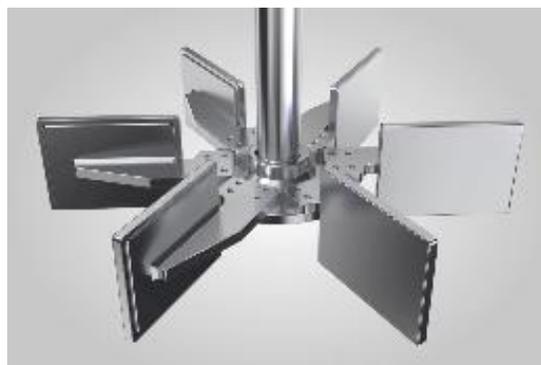


Figura 1.9. Agitador de turbina

Fuente: Direct Industry – Sunkaier.

1.5.3. Sistema de calentamiento

El sistema de calentamiento presenta tres posibles opciones: chaquetas de calentamiento, serpentines de tubería o calentadores eléctricos.

1.5.3.1. Calentador de chaqueta

Se denomina calentador de chaqueta (Fig. 1.10) a un recipiente que tiene doble fondo. Son menos eficientes que los serpentines, son de mayor costo y resultan ser difíciles de limpiar por el acceso complicado al interior de la chaqueta.



Figura 1.10. Calentador de chaqueta

Fuente: Alibaba – Dafeng.

1.5.3.2. Calentador de serpentines

Un serpentín es un tubo que se dobla de forma helicoidal y se ubica dentro del líquido (Fig. 1.11). Es de bajo costo y de construcción rápida. El calentamiento se produce por convección.

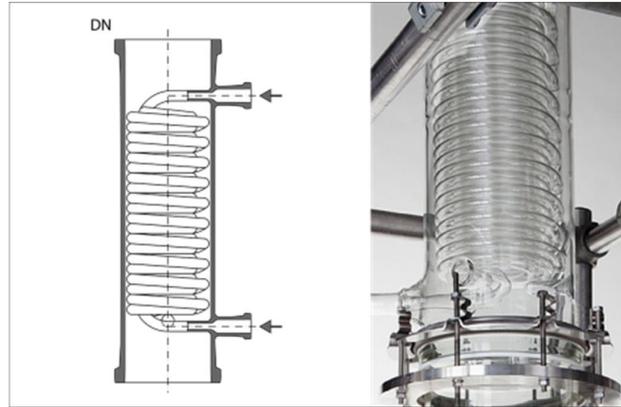


Figura 1.11. Calentador de serpentín

Fuente: De Dietrich Process Systems – Intercambiadores QVF Supra.

1.5.3.3. Calentador de resistencias eléctricas.

Como se puede observar en la Fig. 1.12, se trata de resistencias eléctricas hechas de cobre, acero o aleaciones de níquel-cromo. Su precio depende de la potencia que poseen, y son de fácil mantenimiento.



Figura 1.12. Calentador de resistencias eléctricas

Fuente: Dircasa – Proveedor Industrial.

CAPÍTULO 2

2.METODOLOGÍA

2.1. Metodología de diseño

En la Fig. 2.1 se muestra la metodología utilizada en el proceso de diseño del reactor de transesterificación.

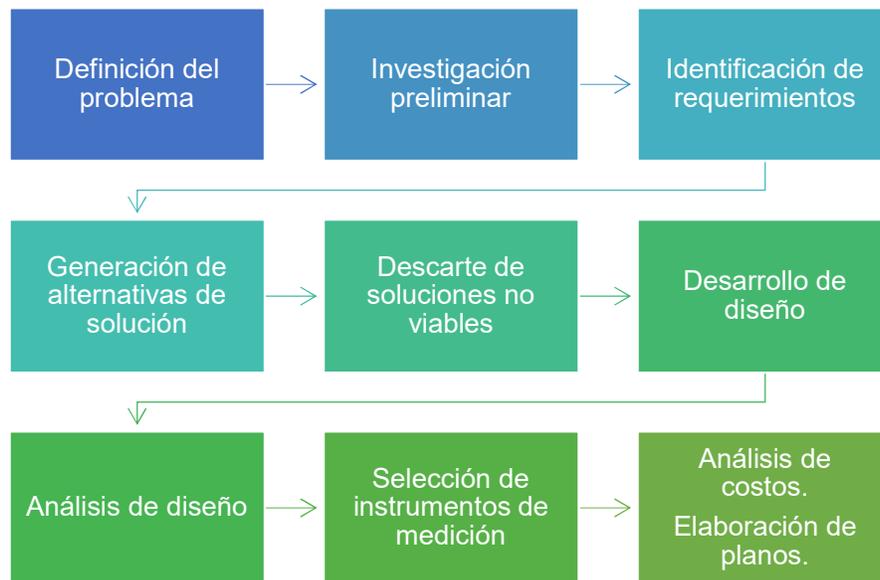


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología del diseño

Fuente: creación propia.

2.2. Especificaciones de diseño

El diseño final deberá cumplir con las siguientes especificaciones:

- Capacidad nominal de almacenamiento: 5 galones.
- Volumen necesario para burbujeo: 25% del volumen total del tanque.
- Temperatura máxima: 100°C.
- Presión máxima: 10 atmósferas.
- Cumplimiento de estándares ASME VIII o API 650.
- Capaz de mezclar aceite vegetal con una densidad específica de 0.911 y una viscosidad de $0.062 \frac{N \cdot s}{m^2}$. (Cruz y Victoria, Contreras-Tinoco, & Anaya-Sosa, 2016)
- Material de construcción debe ser resistente a la corrosión.
- Salida de la mezcla por la parte inferior del tanque.

2.3. Alternativas de diseño

El reactor necesita ser capaz de contener los reactivos para la transesterificación, mezclarlos y calentarlos para que se produzca la reacción. A partir de lo indicado en el capítulo 1, se procede a establecer las diferentes alternativas para el diseño del reactor en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Alternativas de diseño

Función	Alternativa #1	Alternativa #2	Alternativa #3
Contención	Tanque rectangular	Tanque esférico	Tanque cilíndrico
Mezclado	Eductor	Agitador mecánico	Pulsador de aire
Calentamiento	Chaqueta	Serpentines	Eléctrico

Fuente: creación propia.

2.4. Matriz de decisión

2.4.1. Selección del tanque contenedor.

Los criterios tomados en cuenta para la selección del tanque contenedor son:

- Capacidad del tanque: este detalle es crucial ya que se requiere que la capacidad nominal del tanque sea de tan sólo 5 galones, los cuales deben ser ocupados por los componentes para la producción de biodiesel. Mientras más simple sea la geometría del recipiente será más fácil garantizar que el tanque tenga la capacidad requerida.

- Facilidad de construcción: dependiendo de la forma que se le dé al tanque su fabricación se vuelve más compleja.
- Forma del tanque: según la forma del tanque contenedor el mezclado se produce de manera diferente, es decir que, mientras se mantenga una simetría entre dicha forma y los accesorios del sistema de agitación la mezcla se realizará de forma más homogénea. Esto representa además una reducción en costos de instalación.
- Facilidad para calentar: al tratarse de un tanque pequeño el espacio con el que se dispone para ubicar los sistemas de agitación y calentamiento en su interior también es pequeño, por lo tanto se debe asegurar de que éstos no se interfieran entre ellos.
- Facilidad de diseño: dependiendo de la simetría del tanque y su disposición geométrica el diseño se vuelve más fácil/exacto al momento de realizar cálculos y estimaciones.

Se comparó los criterios entre sí de manera que:

- La capacidad del tanque es el criterio más importante de todos con una puntuación de 1.
- La facilidad de construcción está en segundo lugar con una puntuación de 0.67. Es decir tiene las dos terceras ($2/3$) partes de importancia comparada con la capacidad del tanque.
- La forma del tanque está en tercer lugar con una puntuación de 0.50. Es decir tiene la mitad ($1/2$) de importancia comparada con la capacidad del tanque.
- La facilidad para calentar comparte el tercer lugar con la facilidad para mezclar con una puntuación de 0.50. Es decir que también tiene la mitad ($1/2$) de importancia al ser comparada con la capacidad del tanque.
- La facilidad de diseño está en quinto lugar con una puntuación de 0.33. Es decir que tiene la tercera ($1/3$) parte de importancia comparada con la capacidad del tanque.

En la tabla 2.2 se encuentra la comparación entre los criterios y el peso de cada uno.

Tabla 2.2. Comparación de criterios del tanque contenedor.

Criterios a evaluar	Capacidad del tanque	Facilidad de construcción	Facilidad para mezclar	Facilidad para calentar	Facilidad de diseño	Total (fila)	PESO
Capacidad del tanque	1.00	1.50	2.00	2.00	3.00	9.50	0.33
Facilidad de construcción	0.67	1.00	1.33	1.33	2.00	6.33	0.22
Forma del tanque	0.50	0.75	1.00	1.00	1.50	4.75	0.17
Facilidad para calentar	0.50	0.75	1.00	1.00	1.50	4.75	0.17
Facilidad de diseño	0.33	0.50	0.67	0.67	1.00	3.17	0.11
TOTAL						28.5	1.00

Fuente: creación propia.

Cada alternativa se evaluó tomando en cuenta los criterios, puntuando del 1 al 4, donde 4 es la mejor opción. Luego según el peso que presente cada criterio, se pondera una calificación para cada alternativa en cada criterio. Aquella alternativa que al final obtenga la mejor calificación será la escogida para el diseño.

Tabla 2.3. Matriz de decisión para el tanque contenedor.

Criterios	Peso	Alternativas					
		Rectangular		Esférico		Cilíndrico	
Capacidad del tanque	0.33	4	1.32	1	0.33	4	1.32
Facilidad de construcción	0.22	4	0.88	1	0.33	3	0.66

Forma del tanque	0.17	1	0.17	4	0.68	3	0.51
Facilidad para calentar	0.17	1	0.17	4	0.68	3	0.51
Facilidad de diseño	0.11	3	0.33	1	0.11	4	0.44
TOTAL	1.00	2.87		2.13		3.44	

Fuente: creación propia.

En la tabla 2.3 se presenta como resultado que la mejor alternativa para la forma del tanque contenedor del reactor es la cilíndrica ya que obtuvo el mayor peso.

2.4.2. Selección del sistema de agitación.

Al tratarse del diseño de un prototipo experimental, se ha procedido a establecer dos criterios para la selección del sistema de agitación son:

- Capacidad del tanque: dado que se requiere que la capacidad del tanque sea de diez litros se requiere de un sistema de agitación para dicha capacidad de producción.
- Velocidad angular: se debe elegir un sistema de agitación con capacidad acorde a lo necesario para la producción de biodiesel.

Se comparó los criterios entre sí de manera que:

- La capacidad del tanque es el criterio más importante con una puntuación de 1.
- La velocidad angular está en segundo lugar con una puntuación de 0.50. Es decir tiene la mitad (1/2) de importancia comparada con la capacidad del tanque.

En la tabla 2.4 se encuentra la comparación entre los criterios y el peso de cada uno.

Tabla 2.4. Comparación de criterios del sistema de agitación

Criterios a evaluar	Capacidad del tanque	Velocidad angular	Total (fila)	PESO
Capacidad del tanque	1.00	2.00	3.00	0.67
Velocidad angular	0.50	1.00	1.50	0.33
TOTAL			4.50	1.00

Fuente: creación propia.

Cada alternativa se evaluó tomando en cuenta los criterios, puntuando del 1 al 4, donde 4 es la mejor opción. Luego según el peso que presente cada criterio, se pondera una calificación para cada alternativa en cada criterio. Aquella alternativa que al final obtenga la mejor calificación será la escogida para el diseño.

Tabla 2.5. Matriz de decisión para el sistema de agitación

Criterios	Peso	Alternativas					
		Eductores		Agitador mec.		Pulsador de aire	
Capacidad del tanque	0.67	1	0.67	4	2.68	3	2.01
Velocidad angular	0.33	1	0.33	4	1.32	1	0.33
TOTAL	1.00	1.00		4.00		2.34	

Fuente: creación propia.

Cabe indicar que la puntuación del eductor es baja porque éste dispositivo es utilizado principalmente para tanques de gran capacidad. Mientras que el pulsador de aire puede ser utilizado en tanques pequeños pero no es posible controlar la velocidad angular en el mezclado.

Como se puede observar en la tabla 2.5 se presenta como resultado que la mejor alternativa para el sistema de mezclado del reactor es el agitador mecánico ya que obtuvo el mayor peso.

2.4.3. Selección del sistema de calentamiento.

Los criterios tomados en cuenta para la selección del sistema de calentamiento son:

- Interferencia con el proceso de mezcla: es de suma importancia considerar que el sistema de calentamiento no interrumpa al sistema de agitación, tarea que requiere de cuidado en un taque de diez litros.
- Costo: la instalación no debe representar precios excesivos en el diseño del reactor, especialmente porque es pequeño.
- Facilidad de mantenimiento: cualquier tipo de sistema de calentamiento requiere de un proceso de mantenimiento luego de cumplir determinadas horas de trabajo, dependiendo de qué sistema se trate la dificultad de realizar dichos procesos incrementa o disminuye.

Se comparó los criterios entre sí de manera que:

- La interferencia con el mezclado es el criterio más importante con una puntuación de 1.
- El costo de instalación está en segundo lugar con una puntuación de 0.50. Es decir tiene la mitad ($1/2$) de importancia comparada con la interferencia con el mezclado.
- La facilidad de mantenimiento está en tercer lugar con una puntuación de 0.25. Es decir tiene la cuarta ($1/4$) parte de importancia comparada con la interferencia con el mezclado.

En la tabla 2.6 se encuentra la comparación entre los criterios y el peso de cada uno.

Tabla 2.6. Comparación de criterios del sistema de calentamiento

Criterios a evaluar	Interferencia con el mezclado	Costo	Facilidad de mantenimiento	Total (fila)	PESO
Interferencia con el mezclado	1.00	2.00	4.00	7.00	0.57
Costo	0.50	1.00	2.00	3.50	0.29
Facilidad de mantenimiento	0.25	0.50	1.00	1.75	0.14
TOTAL				12.25	1.00

Fuente: creación propia.

Cada alternativa se evaluó tomando en cuenta los criterios, puntuando del 1 al 4, donde 4 es la mejor opción. Luego según el peso que presente cada criterio, se pondera una calificación para cada alternativa en cada criterio. Aquella alternativa que al final obtenga la mejor calificación será la escogida para el diseño.

Tabla 2.7. Matriz de decisión para el sistema de calentamiento.

Criterios	Peso	Alternativas					
		Chaqueta		Serpentín		Eléctrico	
Interferencia con el mezclado	0.57	4	2.28	1	0.57	3	1.71
Costo	0.29	1	0.29	4	1.16	3	0.87
Facilidad de mantenimiento	0.14	1	0.14	3	0.42	4	0.56
TOTAL	1.00	2.71		2.15		3.14	

Fuente: creación propia.

Como se puede observar en la tabla 2.7 se presenta como resultado que la mejor alternativa para el sistema de calentamiento del reactor es la resistencia ya que obtuvo el mayor peso.

2.5. Diseño

2.5.1. Diseño del tanque

2.5.1.1. Forma del tanque

Se debe considerar que la capacidad de producción del tanque es de 5 galones, es decir 18927.06 cm^3 .

Luego, dado que la relación óptima de diámetro/altura es 1:1, se puede determinar el diámetro, D , y la altura de llenado, H_{ll} del tanque. (ec. 1.1)

$$\frac{D}{H_{ll}} = 1 \rightarrow V = \pi r^2 H_{ll} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 H_{ll} = \pi \frac{D^2}{4} H_{ll} = \pi \frac{D^3}{4} \quad (2.1)$$

Calculando el diámetro:

$$\rightarrow D = \sqrt[3]{V \frac{4}{\pi}} = \sqrt[3]{18927.06 \frac{4}{\pi}} \quad (2.2)$$

$$D = H_{ll} = 28.88 \text{ cm}$$

Una vez determinado el diámetro y la altura de llenado se pueden calcular el perímetro del tanque.

$$P = \pi D = \pi(28.88) = 90.74 \text{ cm}$$

Para fines de construcción del tanque, se redondea el perímetro hacia un entero mayor, de manera que la relación diámetro/altura sea mayor a 1 como es recomendable considerando que dichas medidas deben cumplir con la capacidad requerida del tanque. (American Petroleum Institute, 2001). Ver Apéndice A.

Se redondea el perímetro a 100 cm de largo, con lo que se tiene un nuevo valor del diámetro (ec. 2.3):

$$D = \frac{P}{\pi} = \frac{100}{\pi} = 31.83 \text{ cm} \quad (2.3)$$

Posteriormente se calcula nuevamente la altura de llenado (ec. 2.4):

$$V = \pi \frac{(31.8310^2)}{4} H_{ll} = 18927.06 \text{ cm}^3 \quad (2.4)$$

$$\rightarrow H_{ll} = 23.78 \text{ cm}$$

De esta forma se tiene una relación diámetro/altura de 1.34, resultado aceptable.

De acuerdo al estándar API 650 se debe añadir una distancia sobre la altura de llenado como medida de protección en caso de sobrellenado, H_s . (American Petroleum Institute, 2001) Para evitar derrames en caso de que se llene excesivamente se considerará un galón (3785.41 cm^3) extra a la capacidad del tanque, es decir el 20% del volumen nominal. Con el valor obtenido del diámetro, se determina la altura de sobrellenado (ec. 2.5):

$$V = \pi \frac{(31.8310^2)}{4} H_s = 3785.41 \text{ cm}^3 \quad (2.5)$$

$$\rightarrow H_s = 4.76 \text{ cm}$$

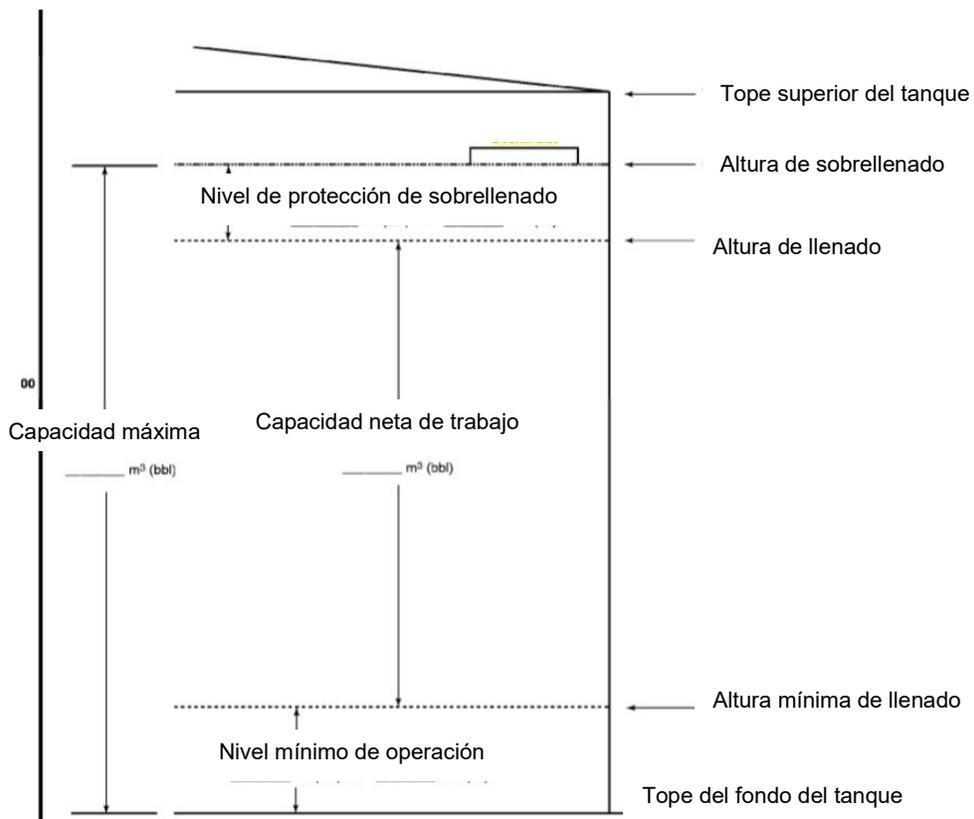


Figura 2.2. Volúmenes y niveles de tanques.

Fuente: American Petroleum Institute, 2001.

Como se observa en la Fig. 2.2 se requiere que el 25% del volumen total del tanque se encuentre libre en caso de producirse burbujeo se agrega otra distancia de protección a la altura del tanque. Considerando que se tiene un volumen nominal de 5 galones, más 1 litro de sobrellenado, el volumen de burbujeo es de 2 galones extra (7570.82 cm³), teniendo así un volumen final del tanque de 8 galones. Con el valor obtenido del diámetro, se determina la altura de burbujeo, H_b, del tanque (ec. 2.6):

$$V = \pi \frac{(31.83^2)}{4} H_b = 7570.82 \text{ cm}^3 \quad (2.6)$$

$$\rightarrow H_b = 9.51 \text{ cm}$$

La altura del tanque, H_t, será la suma de la altura de llenado, H_{ll}, altura de sobrellenado, H_s, y altura de burbujeo, H_b (ec. 2.7):

$$H_t = H_{ll} + H_s + H_b = 23.78 + 4.76 + 9.51 = 38.06 \text{ cm} \quad (2.7)$$

Para fines de fabricación se redondea éste valor de la altura del tanque a 40 cm.

Finalmente se tienen las siguientes dimensiones finales del cuerpo del tanque:

- Diámetro (D) = 31.83 cm
- Perímetro = 100 cm
- Altura (H_t) = 40 cm

Debido a las dimensiones finales obtenidas, se necesitará una placa de 100cmx40cm, fácilmente obtenibles en el mercado local.

2.5.1.2. Espesor del tanque.

La norma ASME VIII sección UG-16 literal (b) indica que el espesor mínimo permitido de componentes mecánicos sometidos a presión, después del formado y sin darle importancia a la forma del producto o al

material, debe ser 1/16 de pulgada, es decir 1.5 mm, medida que no incluye tolerancias por corrosión. Ninguna de las excepciones denotadas por la norma son aplicables al diseño de este proyecto. (The American Society of Mechanical Engineers, 2004)

Asimismo la norma ASME VIII sección UG-27 indica que el mínimo espesor requerido para tanques sometidos a presión interna no debe ser menor al calculado en las ecuaciones 2.1 y 2.2 aplicables a tanques de forma cilíndrica. (The American Society of Mechanical Engineers, 2004)

Se definen a continuación las variables utilizadas en las ecuaciones usadas para calcular el espesor del tanque.

- t = espesor mínimo requerido del tanque, en m.
- P = presión interna de diseño, en MPa.
- R = radio interno del tanque, en m.
- S = valor del esfuerzo máximo permisible, en MPa.
- E = eficiencia de la junta de soldadura, adimensional.

La ecuación #8 es aplicable cuando existen esfuerzos circunferenciales, los cuales son causados por hilos de soldadura longitudinales, y además la presión interna no excede el valor de $0.385SE$.

$$t_1 = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (2.8)$$

La ecuación #9 es aplicable cuando existen esfuerzos longitudinales, los cuales son causados por hilos de soldadura circunferenciales, y además la presión interna no excede el valor de $1.25SE$.

$$t_2 = \frac{PR}{2SE + 0.4P} \quad (2.9)$$

El valor del esfuerzo máximo permisible, S , se lo obtiene de la norma ASME II, tabla 1A. Dado que la temperatura máxima de diseño es de 100°C (212°F), el valor del esfuerzo máximo permisible para las ecuaciones 2.8 y 2.9 es el correspondiente a la columna de valores que

no exceden los 300°F. (The American Society of Mechanical Engineers, 2015)

Debido a los requerimientos de diseño se utiliza el acero inoxidable AISI 304 para la fabricación del tanque, ya que este acero es de los más comunes. La tabla 2.8 muestra los valores de esfuerzos correspondientes al acero inoxidable 304.

Tabla 2.8. Esfuerzos permisibles

Material		Límite elástico [ksi]	Tensión de rotura [ksi]	Esfuerzo máximo [ksi]
Spec. No. SA-240	Type/Grade 304	30	75	15

Fuente: The American Society of Mechanical Engineers, 2004.

El valor de la eficiencia de la junta de soldadura se la obtiene de la norma ASME VIII sección UW-12, ver Apéndice B. Se diseña para el caso más crítico cuando no existe examinación alguna del hilo de soldadura, de manera que el valor de la eficiencia es 0.45. (The American Society of Mechanical Engineers, 2004).

La presión requerida para el diseño es de 10 atmósferas lo cual equivale a 1.01 MPa y el esfuerzo máximo permisible para el diseño es de 15 ksi lo cual equivale a 103.4214 MPa, estos datos son requeridos con estas unidades de manera que las ecuaciones sean consistentes. Al reemplazar todos los valores en las ecuaciones 2.8 y 2.9 se obtuvieron los siguientes resultados:

$$t_1 = \frac{PR}{SE - 0.6P} = \frac{1.0132(0.159155)}{103.4214(0.45) - 0.6(1.0132)} = 0.0035118 \text{ m}$$

$$t_2 = \frac{PR}{2SE + 0.4P} = \frac{1.0132(0.159155)}{2(103.4214)(0.45) + 0.4(1.0132)} = 0.0017254 \text{ m}$$

$$t_1 = 0.35 \text{ cm}$$

$$t_2 = 0.17 \text{ cm}$$

De esta forma el espesor mínimo del tanque es de 0.35 cm.

2.5.1.3. Fondo del tanque.

El fondo del tanque debe contar con una salida para el biodiesel, por lo que se vuelve necesario que el tanque sea elevado. Considerando la magnitud de sus dimensiones se decide emplear una cabeza hemisférica (Fig. 2.3) cuyo espesor será el mismo de la placa que conforma el tanque. Ahora según la norma ASME VIII, sección UG-32 el diseñador tiene que asegurarse de que la cabeza hemisférica resiste la presión interna a la que está sometido el tanque. (The American Society of Mechanical Engineers, 2004)

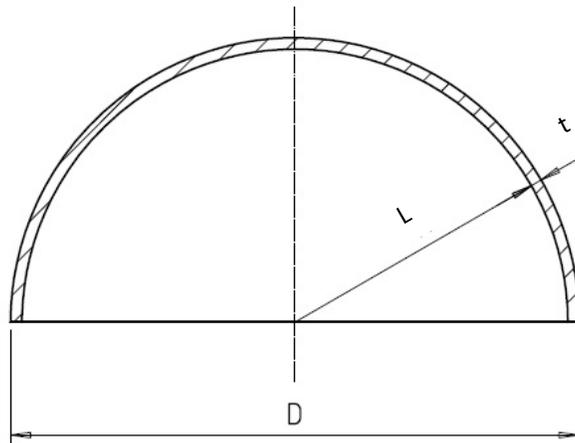


Figura 2.3. Ejemplo de vista seccionada de una cabeza hemisférica.

Fuente: Plaatijzerindustrie BV.

El radio de la corona, o radio de la cabeza hemisférica es el mismo de la parte cilíndrica del tanque, 15,92 cm.

El valor de la presión que el fondo del tanque es capaz de soportar está dado por la ecuación 2.10:

$$P_c = \frac{2SEt}{L + 0.2t} \quad (2.10)$$

Donde,

- P_c = presión que puede resistir la cabeza hemisférica, en MPa.
- S = valor del esfuerzo máximo permisible, en MPa.
- E = eficiencia de la junta de soldadura, adimensional.

- L = radio interno de la esfera o corona, en m.
- t = espesor mínimo requerido de la cabeza, en m.

Al reemplazar los datos en la ecuación 2.10, se tiene que:

$$P_c = \frac{2(103.4214)(0.45)(0.003518)}{0.159155 + 0.1(0.003518)} = 2.05 \text{ MPa}$$

Dado que la presión interna del tanque es de 1.0132 MPa, queda demostrado que la cabeza hemisférica es resistente para el diseño.

Dicha corona o cabeza hemisférica se forma a partir de un disco plano, con diámetro D_d moldeado con una prensa en frío. Para determinar el diámetro del disco plano se calcula el área de la cabeza, A_c , la cual es la mitad del área de una esfera completa cuyo diámetro es 15,92 cm.

$$A_c = 2\pi L^2 = 2\pi(15.91)^2 = 1591.55 \text{ cm}^2$$

Dicha área, A_c , representa el área del disco plano, por lo tanto se calcula D_d (ec. 2.11):

$$D_d = \sqrt{\frac{4A_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(1591.55)}{\pi}} = 45.02 \text{ cm} \quad (2.11)$$

2.5.1.4. Techo del tanque.

Por requerimientos de diseño el techo del tanque es plano y se sujeta sencillamente con pernos de forma externa. Su espesor y diámetros son los mismos de la pared cilíndrica del tanque.

2.5.2. Diseño del sistema de agitación

2.5.2.1. Selección del tipo de agitador mecánico.

Para seleccionar el tipo de agitador mecánico se debe considerar la viscosidad del líquido a mezclar y el volumen del tanque. Las

propiedades mencionadas del aceite vegetal extraído de la semilla del piñón a 25°C se muestran a continuación.

Tabla 2.9. Propiedades del aceite vegetal.

Líquido a mezclar	Viscosidad, $\mu \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right]$	Gravedad específica, ρ
Aceite vegetal (piñón)	0.062	0.911

Fuente: (Cruz y Victoria, Contreras-Tinoco, & Anaya-Sosa, 2016)

Dado el valor de la viscosidad (Tabla 2.9) y considerando que el volumen de la mezcla es de 5 galones, se puede utilizar la figura 2.4 para determinar qué tipo de agitador es el ideal para este diseño.

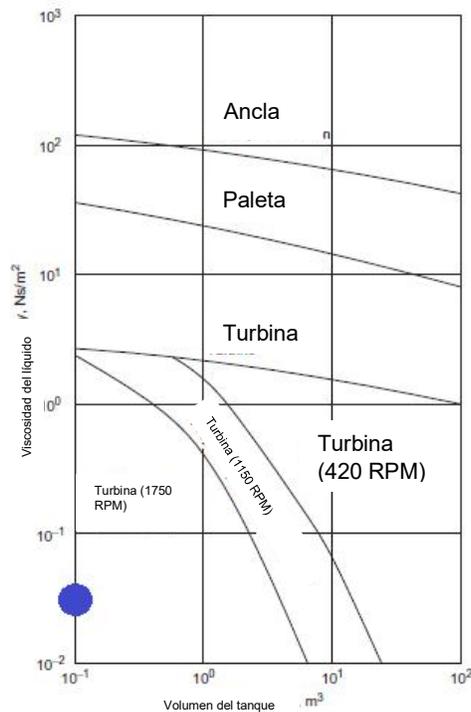


Figura 2.4. Selección del tipo de agitador.

Fuente: (Couper, Roy Penney, Fair, & Walas, 2012)

El punto azul en la gráfica marca la ubicación donde están los datos de volumen y viscosidad, de manera que el agitador a usar es una turbina con la capacidad de girar hasta 1750 RPM.

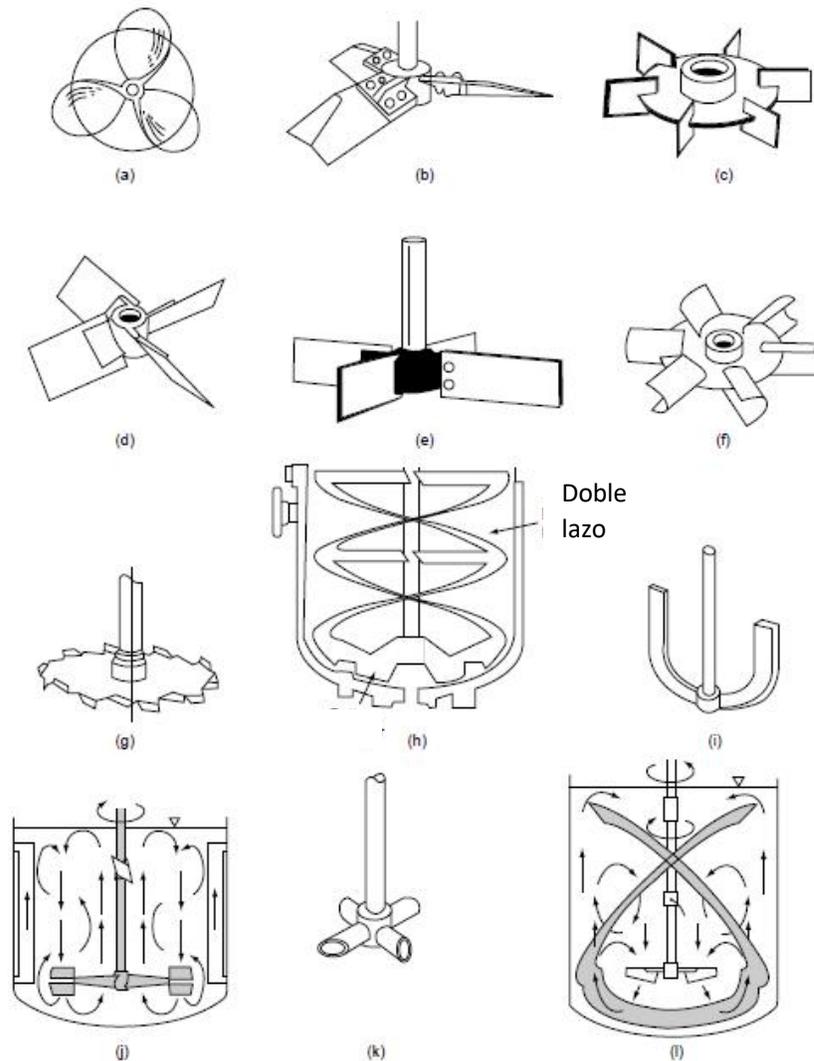


Figura 2.5. Tipos de Agitadores mecánicos.

Fuente: (Couper, Roy Penney, Fair, & Walas, 2012)

En la figura 2.5 se aprecian distintos tipos de agitadores mecánicos. El tipo (a) es de hélice, del tipo (b) al tipo (f) son turbinas, y de la (g) a la (l) son tipo ancla. Dado que la mejor producción de biodiesel se da con una intensidad de mezcla de 600 RPM (Rashid & Anwar, 2007), se selecciona la opción (c) ya que esta turbina ofrece un flujo de tipo radial gracias a sus paletas verticales, y además se la usa para altas velocidades y tanques pequeños.

2.5.2.2. Cálculo del número de Reynolds del agitador.

Para el diseño del agitador mecánico se procede a calcular el número de Reynolds, ecuación 2.12:

$$Re = 0.00001667 \frac{ND_i^2 \rho}{\mu} \quad (2.12)$$

Donde:

- Re = número de Reynolds del agitador, adimensional.
- N = velocidad del agitador, en RPM.
- D_i = diámetro de la turbina, en mm.
- ρ = gravedad específica del fluido, adimensional.
- μ = viscosidad del fluido, en Pa-s.

El diámetro del impeller se lo determina en función del diámetro del tanque. El valor de D_i se ubica en el rango de $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ de D, esta relación (ec. 2.13) obedece a las dimensiones típicas de equipos de mezclado, ver sección 2.5.2.6. (Tatterson, 1991)

$$D_i = \frac{D}{2} = \frac{31.83 \text{ cm}}{2} = 15.92 \text{ cm} \quad (2.13)$$

Se reemplazan estos datos en la ecuación 2.3 y se obtiene el valor del número de Reynolds como se muestra a continuación:

$$Re = 0.00001667 \frac{ND_i^2 \rho}{\mu} = 0.00001667 \frac{600(159.155)^2(0.911)}{0.062}$$
$$Re = 3722.67$$

Este resultado del número de Reynolds indica que la mezcla del aceite vegetal presentará un flujo laminar dentro del tanque ya que se considera como rango turbulento cuando Re excede el valor de 10^5 en todo tipo de agitadores. (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004)

2.5.2.3. Cálculo de la potencia requerida por el agitador o impeller.

La potencia de agitación se rige por la ecuación 2.14:

$$P = N_p \frac{N^3 D_i^5 \rho}{2.1857 \times 10^{17}} \quad (2.14)$$

Donde:

- P = potencia del agitador, en W.
- N = velocidad del agitador, en RPM.
- D_i = diámetro del impeller, en mm.
- ρ = gravedad específica del fluido, adimensional.
- N_p = número de potencia, adimensional.

Para obtener el número de potencia del agitador seleccionado se utiliza el método propuesto por el Handbook de la Industria de la Mezcla, en la cual la turbina (c) de la figura 2.6.

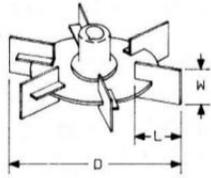
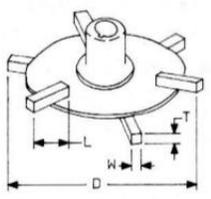
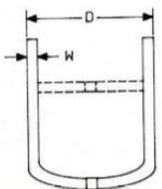
Número	Nombre	Descripción	
R-1	Paleta plana	Paletas verticales empernadas a un disco	 <p style="text-align: right;"> $L=1/4D$ $W=1/5D$ DISC DIA. = $2/3D$ </p>
R-2	Turbina de barras	Seis paletas empernadas a un disco	 <p style="text-align: right;"> $L=1/4D$ $W=1/20D$ $T=1/20D$ DISC DIA. = $2/3D$ </p>
R-3	Anclar	Dos aspas con o sin brazo	 <p style="text-align: right;"> $W=1/10D$ </p>

Figura 2.6. Descripción de impellers básicos.

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

Una vez determinada la categoría R-1 de la turbina del diseño y el número de Reynolds del agitador, se utiliza la Fig. 2.7 para determinar el número de potencia.

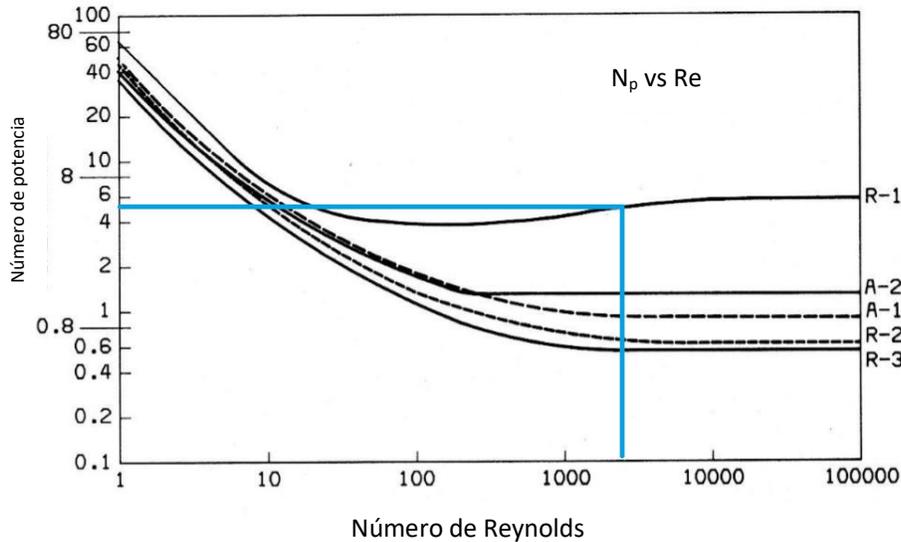


Figura 2.7. N_p vs Re de diversos impellers.

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

En la figura 2.7 se aprecia que el número de potencia apropiado para el diseño es 5. Se reemplazan los datos obtenidos en la ecuación 2.14 y se obtiene la potencia requerida por el agitador como se muestra a continuación:

$$P = N_p \frac{N^3 D_i^5 \rho}{2.1857 \times 10^{17}} = 5 \frac{600^3 159.155^5 0.911}{2.1857 \times 10^{17}} = 459.68 [W] = 0.62 [HP]$$

2.5.2.4. Cálculo de la potencia requerida por el motor eléctrico.

Asumiendo que los componentes del motor eléctrico utilizado tienen una eficiencia de 80%, la potencia requerida es (ec. 2.15):

$$P_m = \frac{P}{\eta} = \frac{0.6164}{0.8} = 0.77 \text{ HP} \quad (2.15)$$

Por lo tanto, se necesita un motor de 1 HP. Un motor de esta característica es fácil de encontrar en el mercado local.

2.5.2.5. Cálculo del diámetro del eje de transmisión.

Para el diseño del eje se utiliza la ecuación (2.16) propuesta por Robert L. Norton, la misma que considera un eje sometido a torque constante y flexión completamente reversible. (Norton, 2013)

$$d = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\left(K_f \frac{M_a}{S_f} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(K_{fsm} \frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2.16)$$

Norton señala que el estándar ASME asume que el concentrador de esfuerzos, K_{fsm} , es igual a 1. Y además para este caso no existen fuerzas que causen flexión sobre el eje, por lo que $M_a = 0$. Debido a esto la ecuación 2.16 se reduce a lo siguiente (ec. 2.17):

$$d = \left\{ \frac{16\sqrt{3}N_f}{\pi} \left(\frac{T_m}{S_y} \right) \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2.17)$$

Y además se conoce que, T_m es igual a ec. 2.18.

$$T_m = \frac{P}{\omega} \quad (2.18)$$

Donde,

- d = diámetro del eje de transmisión, en m.
- N_f = factor de seguridad, adimensional.
- P = potencia del agitador, en W.
- ω = velocidad del agitador, en RPM.
- T_m = torque medio, en N-m.
- S_y = resistencia a la fluencia del material, en Pa.

Para el eje se elige un factor de seguridad de 3 y se usa acero inoxidable 304, cuyo valor de S_y es 207 mega Pascales. Dado que para la ecuación 2.18 la velocidad angular necesita estar en radianes por segundo, se

transforman los 600 RPM en dicha unidad, con un resultado de 62.8319 rad/s.

$$T_m = \frac{P}{\omega} = \frac{459.6773}{62.8319} = 7.32 \text{ [N - m]}$$

Al reemplazar todos estos datos en la ecuación 2.17, se obtiene el diámetro del eje de transmisión como se muestra a continuación:

$$d = \left\{ \frac{16\sqrt{3}N_f (T_m)}{\pi (S_y)} \right\}^{\frac{1}{3}} = \left\{ \frac{16\sqrt{3}(3) (7.32)}{\pi (207 \times 10^6)} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0.00978 \text{ m} = 0.98 \text{ cm}$$

Por lo que el diámetro del eje de transmisión se deja en 1 cm.

2.5.2.6. Cálculo de las medidas de las paletas del impeller.

Las medidas de las paletas del impeller se rigen por relaciones que se muestran en la figura 2.6.

De esta manera:

$$L = \frac{1}{4} D_i \tag{2.19}$$

$$L = \frac{1}{4} (159.155 \text{ mm}) = 3.98 \text{ cm} \approx 4 \text{ cm}$$

$$W = \frac{1}{5} D_i \tag{2.20}$$

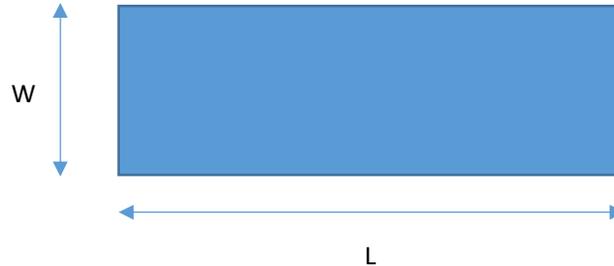
$$W = \frac{1}{5} (159.155 \text{ mm}) = 3.18 \text{ cm} \approx 3.2 \text{ cm}$$

$$\text{Diámetro del disco} = D_d = \frac{2}{3} D_i \tag{2.21}$$

$$D_d = \frac{2}{3} (15.92 \text{ cm}) = 10.61 \text{ cm}$$

$$\text{Área de la paleta} = A = L \times W \quad (2.22)$$

$$A = (0.040 \text{ m})(0.032 \text{ m}) = 0.00128 \text{ m}^2$$



Para calcular el espesor, t_p , se realiza un análisis hidrodinámico de las paletas. Primeramente se calcula la fuerza de arrastre (ec. 2.23) que actúa sobre una paleta como muestra la siguiente ecuación: (Mott, 2006)

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad (2.23)$$

Donde,

- F_d = fuerza de arrastre, en N.
- ρ = densidad del fluido, en Kg/m^3 .
- V = velocidad lineal en el extremo de la paleta, en m/s.
- C_d = coeficiente de arrastre, adimensional.
- A = área de la paleta, en m^2 .

La velocidad lineal, V , se calcula utilizando la ecuación 2.24:

$$V = \omega \frac{D_i}{2} \quad (2.24)$$

$$V = 62.8319 \left(\frac{0.1592}{2} \right) = 5.0014 \text{ m/s}$$

El coeficiente de arrastre, C_d , se determina mediante la relación entre la longitud y el ancho de la paleta (Fig. 2.8).

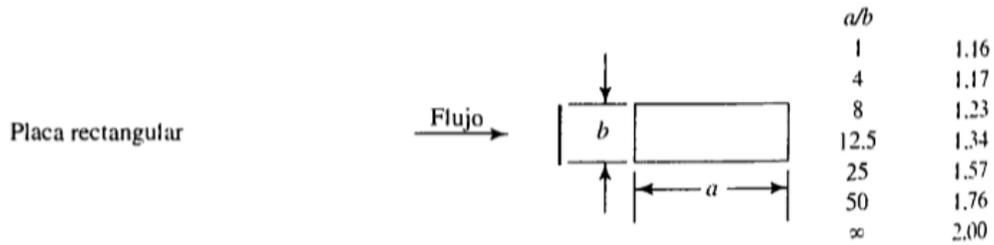


Figura 2.8. Coeficientes de arrastre comunes.

Fuente: (Mott, 2006)

De aquí se tiene que la relación $a/b = 40/32 = 1.25$. Lo que implica que el coeficiente de arrastre es 1.16.

Al reemplazar los datos en la ecuación 2.23, se tiene:

$$F_D = \frac{1}{2} (911)(5.0014)^2 (1.16)(0.00128) = 16.92 \text{ N}$$

Una vez obtenida la fuerza de arrastre se hace un análisis de esfuerzos sobre la paleta. El esfuerzo de flexión permisible, σ , se rige por la ecuación 2.25:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2.25)$$

Donde,

- M = momento con respecto al eje neutral, en N-m.
- c = distancia al eje neutral, en m.
- I = inercia de la paleta, en m^4 .

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{F_D \left(\frac{D_i}{2} - \frac{L}{2} \right) \frac{t_p}{2}}{\frac{W t_p^3}{12}}$$

Se reemplazaron los datos obtenidos hasta el momento y se obtiene la ecuación 2.26 en términos del esfuerzo de flexión y el espesor de la paleta.

$$\sigma = \frac{190.4230}{t_p^2} \quad (2.26)$$

El esfuerzo de flexión permisible es de 15 ksi, o 103.42 MPa. Por ende se despeja t_p :

$$t_p = 0.0014 \text{ m} \approx 0.002 \text{ m}$$

Se requiere una paleta de 0.20 cm de espesor.

2.5.2.7. Cálculo de las medidas de los deflectores

La figura 2.9 muestra las dimensiones típicas de los deflectores usados para reducir la formación de vórtices en el fluido del tanque.

De aquí se tiene que el ancho, B , de los deflectores o *baffles* debe estar en el rango de $1/10$ a $1/12$ del diámetro del tanque, D (ec. 2.27)

$$B = \frac{1}{10} D \quad (2.27)$$

Por lo que:

$$B = \frac{1}{10} (0.318310) = 0.03183 \text{ m} = 3.18 \text{ cm}$$

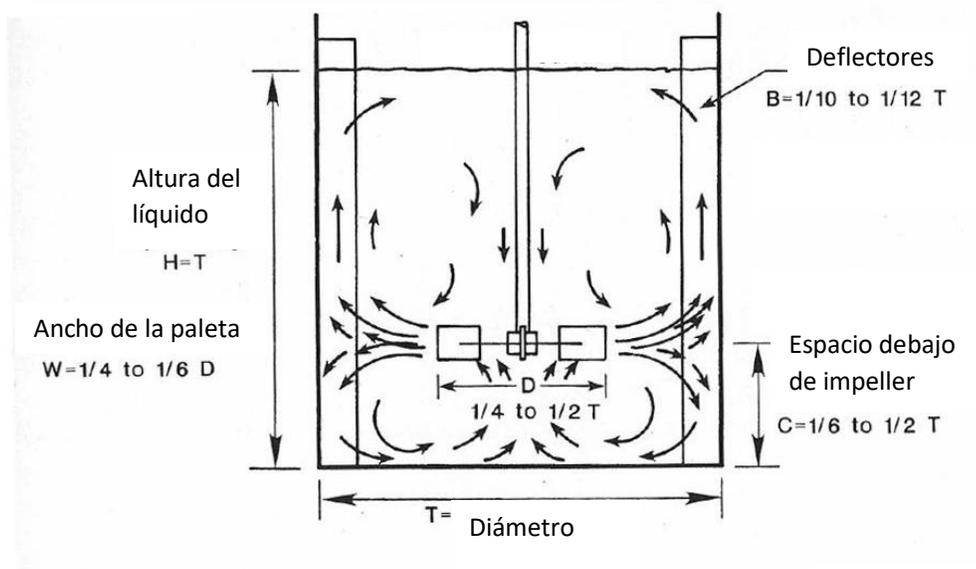


Figura 2.9. Dimensiones típicas de equipo de mezclado.

Fuente: (Tatterson, 1991)

2.5.2.8. Cálculo del espacio entre el impeller y el fondo del tanque.

La figura 2.9 muestra las dimensiones típicas del espacio entre el impeller y el fondo del tanque.

De aquí se tiene que el espacio, C, debe estar en el rango de 1/6 a 1/2 del diámetro del tanque, D. (ec. 2.28).

$$B = \frac{1}{6}D \quad (2.28)$$

Por lo que:

$$B = \frac{1}{6}D = \frac{1}{6}(0.318310) = 0.053 \text{ m} = 5.30 \text{ cm}$$

2.5.3. Diseño del sistema de calentamiento

El calentamiento del aceite se realiza con una resistencia eléctrica de inmersión.

Se necesita definir la potencia necesaria de dicha resistencia eléctrica, para ello es imperante establecer primero la cantidad de energía que se emplea en alcanzar la temperatura de 100°C, o temperatura máxima del aceite. Además se debe tener en cuenta que el tiempo total que tarda la reacción química del proceso de transesterificación es de 30 minutos.

La cantidad de energía se rige por la ecuación 2.29:

$$E = m_a C_{pa} (T_{m\acute{a}x} - T_{amb}) \quad (2.29)$$

Donde,

- E = energía requerida por la reacción, en J.
- M_a = masa del aceite, en Kg.
- C_{pa} = calor específico del aceite, en J/(Kg-K).
- T_{máx} = temperatura crítica del proceso, en °C.
- T_{amb} = temperatura ambiental, en °C.

Dado que la capacidad de producción es de 5 gal y la densidad (ρ) del aceite es de 911 Kg/m³, la masa de aceite es calculada por la ecuación $m=\rho V$ y los resultados se presentan en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Datos para el cálculo de la energía requerida.

Material	Masa [Kg]	C_p [J/(Kg-K)]	$T_{m\acute{a}x}$ [°C]	T_{amb} [°C]
Aceite vegetal	17.2426	2000	100	25

Fuente: creación propia.

Al reemplazar estos datos en la ecuación 2.29 se obtiene:

$$E = 17.2426(2000)(100 - 25) = 2.59 \times 10^6 J$$

Se calcula la potencia necesaria de la resistencia eléctrica de inmersión, P_r , mediante la ecuación 2.30:

$$P_r = \frac{E}{tiempo} = \frac{2.59 \times 10^6}{1800} = 1436.88 W \quad (2.30)$$

Considerando un factor de seguridad de 1.5 por motivos de pérdida de calor al cambiar la densidad y viscosidad de la mezcla, y pérdida de calor a través del acero del eje de transmisión y la turbina, se requiere entonces una resistencia eléctrica de inmersión cuya potencia sea de al menos 2155 W.

CAPÍTULO 3

3.RESULTADOS

3.1. Tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento debe ser de forma cilíndrica con una tapa plana en la parte superior y cabeza hemisférica en el fondo. Las dimensiones del tanque cumplen con la norma ASME. Se requiere que el material de fabricación sea inoxidable debido a la naturaleza corrosiva presentada por la mezcla a contener.

La tabla 3.1 muestra de manera detallada las especificaciones finales del tanque del reactor.

Tabla 3.1. Especificaciones del tanque de almacenamiento.

Especificación	Detalle
Capacidad Total	8.41 gal
Capacidad Nominal	5.00 gal
Diámetro	31.83 cm
Perímetro	100 cm
Altura del cuerpo	56 cm
Material	Acero AISI SA-240 304
Espesor de la plancha	0.35 cm
Tipo de pared	Cilíndrica
Tipo de tapa	Plano
Tipo de fondo	Cabeza hemisférica
Presión máxima	147 psi

Fuente: creación propia.

3.2. Sistema de agitación

El sistema de agitación se diseñó basado en configuraciones estándar. (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Se diseñó al agitador mecánico con una turbina de 6 paletas verticales y se determinó la potencia requerida por el motor a utilizar.

La tabla 3.2 muestra de manera detallada las especificaciones finales del sistema de agitación.

Tabla 3.2. Especificaciones del sistema de agitación.

Especificación	Detalle
Sistema de agitación	Agitador mecánico
Tipo de agitador	Turbina con paletas verticales
Número de paletas	6
Material	Acero AISI SA-240 304
Diámetro de la turbina	15.92 cm
Largo de la paleta	4 cm
Alto de la paleta	3.20 cm
Espesor de la paleta	0.20 cm
Diámetro del eje de transmisión	1 cm
Diámetro del disco de la turbina	10.61 cm
Largo de los deflectores	3.18 cm
Alto de los deflectores	24 cm
Espesor de los deflectores	0.20 cm
Espacio entre la turbina y el fondo	5.30 cm
Velocidad de la turbina	600 RPM
Potencia del motor	1 HP

Fuente: creación propia.

3.3. Sistema de calentamiento

Para el sistema de calentamiento se calculó la potencia requerida por una resistencia de inmersión eléctrica para luego seleccionar una de catálogos disponibles.

La tabla 3.3 muestra de manera detallada las especificaciones del sistema de calentamiento.

Tabla 3.3. Especificaciones del sistema de calentamiento.

Especificación	Detalle
Tipo de calentador	Resistencia eléctrica de inmersión
Temperatura máxima	100°C
Energía requerida	2.59x10 ⁶ J
Factor de seguridad	1.5
Potencia requerida por la resistencia	2155 W

Fuente: creación propia.

3.4. Dibujo asistido por computadora.

La figura 3.1 muestra una vista en corte transversal del reactor con sus componentes completos, como lo son el tanque de contención, el sistema de agitación y el sistema de calentamiento. Cuenta con dos entradas de $\frac{3}{4}$ de pulgada para el ingreso del aceite vegetal y el metanol que serán mezclados en el proceso de producción de biodiésel. Cuenta también con una salida en la parte de abajo para la extracción del producto una vez que se ha terminado la reacción. En el Apéndice C se muestran los planos detallados de cada uno de los componentes del reactor.

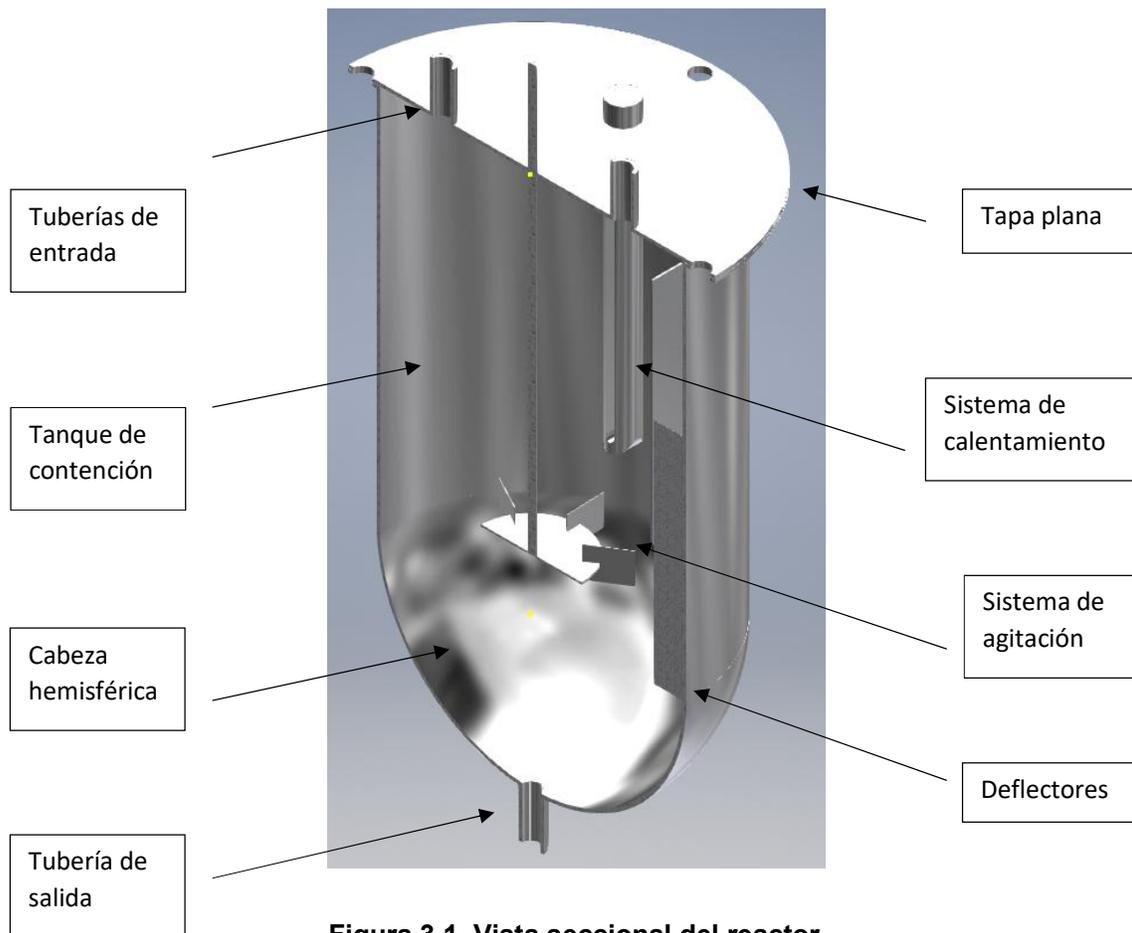


Figura 3.1. Vista seccional del reactor.

Fuente: creación propia.

3.5. Análisis de Costos

La tabla 3.4 muestra la lista de materiales que se requieren para la construcción del reactor. Es decir que esta lista contiene los costos tanto de los componentes del tanque de contención, el sistema de agitación, el sistema de calentamiento y los dispositivos de medición y control de la operación.

Tabla 3.4. Costos de los componentes del reactor de pruebas.

ÍTEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	P. UNIT.	SUBTOTAL
1	1	Tanque: Plancha Acero AISI SA-240 304 3.5mm 100x40 cm	\$ 90.00	\$90.00
2	1	Tapa: Disco Acero AISI SA-240 304 3.5mm Ø10.61 cm	\$ 60.00	\$ 60.00
3	4	Deflectores: Plancha Acero AISI SA-240 304 2mm 3.2x24cm	\$ 5.00	\$ 20.00
4	1	Cabeza Hemisférica: Disco Acero AISI SA-240 304 3.5mm Ø40.02 cm	\$150.00	\$ 150.00
5	1	Transmisión: Eje Acero AISI SA-240 304 44.7 cm Ø1 cm	\$ 40.00	\$ 40.00
6	1	Turbina: Disco Acero AISI SA-240 304 2mm Ø10.6 cm	\$ 50.00	\$ 50.00
7	6	Paletas: Plancha Acero AISI SA-240 304 40x32 cm	\$ 25.00	\$ 150.00
8	2	Resistencia Eléctrica de Inmersión 1400W 230V.	\$23.86	\$47.72
9	1	Termómetro Digital para medir temperatura interior y exterior de tanques.	\$ 7.77	\$ 7.77
10	1	Manómetro analógico 0-200 psi	\$ 230	\$ 230
11	1	Motor de 1 fase, Potencia 1 HP, 1725 RPM 110V/220V.	\$ 189.95	\$ 189.95
TOTAL				\$ 1035.44

Fuente: cotización a proveedores locales y catálogos online (Amazon).

CAPÍTULO 4

4.DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La producción de biodiesel es una actividad incipiente en el país, donde sobran los dedos de una mano para contar a las empresas que se han propuesto producir a gran escala y exportar al mercado extranjero. (Revista Líderes, 2017) Es importante diversificar la matriz productiva del país, y sobre todo dejar de ser un país extraccionista para pasar a obtener ingresos por productos elaborados en el país, tal y como lo es el biodiesel a través del proceso de transesterificación.

Para lograr esto los futuros ingenieros del país deben comprometerse con esta meta y deben conocer el proceso e inclinarse a la posible vocación de producirlo y venderlo, convirtiendo así en indispensable un reactor de pruebas en los que estudiantes universitarios puedan realizar prácticas para la producción de biodiesel.

4.1. Conclusiones

El reactor de pruebas permitirá producir biodiesel a nivel de laboratorio debido a que cuenta con una capacidad nominal de cinco galones para un tiempo de trabajo de media hora. No obstante, se debe tener en cuenta que también se debe considerar el tiempo que tomará el bombeo del aceite vegetal y el metanol hacia el tanque a través de las tuberías de entrada, y el tiempo de vaciado hacia la siguiente cámara del proceso de producción de biodiesel. Se estima que el tiempo que toma en entrar los materiales y salir la mezcla es de aproximadamente 40 minutos. Dicha mezcla luego deberá ser analizada para determinar los parámetros del biodiesel, y confirmar la calidad del mismo.

La elaboración del diseño del reactor bajo los estándares internacionales de la ASME garantiza que el tanque sea seguro y que cumpla con los objetivos propuestos.

El diseño del sistema de agitación se basó en estudios realizados donde la producción del biodiesel mostraba una mejor calidad cuando se efectuaba la agitación a 600 RPM, a partir de allí se realizan los demás cálculos y se

obtienen las dimensiones de las diversas partes que componen el sistema de agitación.

El sistema de calentamiento cuenta con un factor de seguridad en el cálculo de la potencia requerida por las resistencias de inmersión ya que existirá una pequeña pérdida de calor en el reactor debido a que la transmisión del sistema de agitación también se calentará, no obstante dicha pérdida se la consideró mínima. El factor de seguridad también protegerá el diseño de las variaciones de viscosidad y densidad de la mezcla, esto debido a que en los cálculos se utilizaron como datos de dichas variables a las características del aceite vegetal proveniente de la *Jatropha Curcas* o piñón. Sin embargo dichas variaciones no afectan en mayor parte al diseño puesto que las variaciones de viscosidad y densidad de la mezcla están por debajo del rango del 10%, y se tiene que considerar que una vez iniciado el proceso de mezcla y calentamiento estos parámetros se verán reducidos en su magnitud producto del ingreso del calor al sistema.

4.2. Recomendaciones

El tanque fue diseñado considerando como material al acero inoxidable SA-240 304, dicho acero es de índole alimenticio volviéndose así muy seguro para la producción del biodiesel en términos de que éste producto no se verá afectado en su pureza y calidad. Pero cabe recalcar que el acero 304 puede pasar por un proceso de satinado, aumentando así su calidad como acero de grado alimenticio, proceso que llevaría por supuesto un recargo en costo de fabricación.

El diseño incluye la selección de equipos capaces de medir temperatura y presión dentro del tanque, no obstante se sugiere instalar un sistema regulador de temperatura, como un potenciómetro de manera que se facilite la entrega de energía en los distintos pasos de la reacción química de la producción de biodiesel. Tampoco está demás considerar un sistema automatizado capaz de detener el reactor en caso de que se presente temperaturas o RPM demasiado elevadas, detalles que afectarían la calidad del biodiesel.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Petroleum Institute. (2001). *Welded Steel Tanks For Oil Storage*. Washington.
2. Couper, J. R., Roy Penney, W., Fair, J. R., & Walas, S. M. (2012). *Chemical Process Equipment, Selection and Design*.
3. Cruz y Victoria, M. T., Contreras-Tinoco, K. E., & Anaya-Sosa, I. (2016). *Aceite de la (Jatropha curcas), análisis de su composición*. México D. F.
4. Diario El Comercio. (14 de Abril de 2017). Petroecuador importará 2,4 millones de barriles de diésel premium. *Negocios*. Obtenido de <http://www.elcomercio.com/actualidad/petroecuador-importara-barriles-dieselpremium-negocios.html>
5. Diario El Telégrafo. (23 de Febrero de 2016). Petroecuador abrió sobres para la importación de 2'880.000 barriles de diésel. *Economía*. Obtenido de <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/8/petroecuador-abrio-sobres-para-la-importacion-de-2880000-barriles-de-diesel>
6. Ingeniería Bernoulli S.A. (2014). *Fluidodinámica y vacío. Tecnología de capa delgada agitada*. Obtenido de Eductores: <http://www.ibernoulli.com/eductores>
7. Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones. (2013). *Biocombustibles*. Ecuador.
8. La Fabril llena más tanques con biodiésel. (2017). *Revista Líderes*. Obtenido de <http://www.revistalideres.ec/lideres/fabril-llena-tanques-biodiesel.html>
9. Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2016). *Balance Energético Nacional 2016. Año Base 2015*.
10. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2007). *Cero Combustibles Fósiles en Galápagos*. Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/cero-combustibles-fosiles-en-galapagos-2/>
11. Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos* (Sexta Edición ed.). Dayton: Pearson.
12. Norton, R. L. (2013). *Machine Design. An Integrated Approach*. Worcester: Prentice Hall.
13. Paul, E., Atiemo-Obeng, V., & Kresta, S. (2004). *Handbook of Industrial Mixing*. Wiley Interscience.

14. Planelles, M. (16 de Noviembre de 2016). Los combustibles fósiles reciben el doble de subsidios que las renovables. *El País*. Obtenido de https://elpais.com/internacional/2016/11/16/actualidad/1479293012_872888.html
15. Rashid, U., & Anwar, F. (2007). *Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil*. Faisalabad.
16. Ricaurte Freire, L. E. (2016). *Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes*. Guayaquil.
17. Schuchardt, U., Sercheli, R., & Vargas, R. M. (1998). *Transesterification of Vegetable Oils: a Review*. Soc. Bras. Química.
18. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2013). *Buen Vivir Plan Nacional 2013-2017*. Obtenido de <http://www.buenvivir.gob.ec/versiones-plan-nacional>
19. Tatterson, G. B. (1991). *Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks*. McGraw-Hill.
20. The American Society of Mechanical Engineers. (2004). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Rules for Construction of Pressure Vessels. Section VIII*. New York.
21. The American Society of Mechanical Engineers. (2015). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Rules for Construction of Pressure Vessels. Section II. Part D*. New York.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Diseño sísmico de tanques de almacenamiento

APPENDIX E—SEISMIC DESIGN OF STORAGE TANKS

• E.1 Scope

This appendix provides minimum requirements that may be specified by the purchaser for the design of storage tanks subject to seismic load. These requirements represent accepted practice for application to flat-bottom tanks; however, other procedures and applicable factors or additional requirements may be specified by the purchaser or jurisdictional authorities. Any deviation from the requirements of this appendix must be by agreement between the purchaser and the manufacturer.

Note: The basis for these requirements, together with the formulas for the design curves in Figures E-2 through E-5 and information for calculating other seismic effects, is included in a paper by R. S. Wozniak and W. W. Mitchell, "Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks."¹⁴

E.2 General

The design procedure considers two response modes of the tank and its contents:

- The relatively high-frequency amplified response to lateral ground motion of the tank shell and roof, together with the portion of the liquid contents that moves in unison with the shell.
- The relatively low-frequency amplified response of the portion of the liquid contents that moves in the fundamental sloshing mode.

The design requires the determination of the hydrodynamic mass associated with each mode and the lateral force and overturning moment applied to the shell as a result of the response of the masses to lateral ground motion. Provisions are included to assure stability of the tank shell with respect to overturning and to preclude buckling of the tank shell as a result of longitudinal compression.

This appendix has no provisions for determining the increased hoop tension that would result from earthquake motion. The increased hoop tension, correctly calculated from the lateral force coefficients specified in this appendix, would not increase the hoop stresses above a generally acceptable stress level that could be used for seismic design of the tank shell.

E.3 Design Loading

E.3.1 OVERTURNING MOMENT

Note: The overturning moment determined in E.3.1 is the moment applied to the bottom of the shell only. The tank foundation is sub-

jected to an additional overturning moment as a result of lateral displacement of the tank contents; this additional moment may need to be considered in the design of some foundations, such as pile-supported concrete mats.

The overturning moment due to seismic forces applied to the bottom of the shell shall be determined as follows:

$$M = ZI (C_1 W_S X_S + C_1 W_r H_t + C_1 W_1 X_1 + C_2 W_2 X_2)$$

where

- M = overturning moment applied to the bottom of the tank shell, in N-m (ft-lbf),
- Z = seismic zone factor (horizontal seismic acceleration) as determined by the purchaser or the appropriate government authority that has jurisdiction. The seismic zone maps of Figure E-1, the seismic zone tabulation for areas outside the United States (see Table E-1), or the *Supplement to National Building Code of Canada* may be used as an aid to determine the seismic zone. Table E-2 can be used to determine the seismic zone factor, Z ,
- I = importance factor,
= 1.0 for all tanks unless a larger importance factor is specified by the purchaser. The I factor should not exceed 1.25, and this maximum value should be applied only to tanks that must provide emergency post-earthquake service or to tanks that store toxic or explosive substances in areas where an accidental release of product would be considered to be dangerous to the safety of the general public,
- C_1, C_2 = lateral earthquake force coefficients determined according to E.3.3,
- W_s = total weight of the tank shell, in N (lbf),
- X_s = height from the bottom of the tank shell to the shell's center of gravity, in m (ft),
- W_r = total weight of the tank roof (fixed or floating) plus a portion of the snow load, if any, specified by the purchaser, in N (lbf),
- H_t = total height of the tank shell, in m (ft),
- W_1 = weight of the effective mass of the tank contents that move in unison with the tank shell, as determined according to E.3.2.1, in N (lbf),
- X_1 = height from the bottom of the tank shell to the centroid of lateral seismic force applied to W_1 , as determined according to E.3.2.2, in m (ft),
- W_2 = weight of the effective mass of the tank contents that move in the first sloshing mode, as determined according to E.3.2.1, in N (lbf),
- X_2 = height from the bottom of the tank shell to the centroid of lateral seismic force applied to W_2 , as determined according to E.3.2.2, in m (ft).

¹⁴R. S. Wozniak and W. W. Mitchell, "Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks," *1978 Proceedings—Refining Department*, Volume 57, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 1978, pp. 485–501.

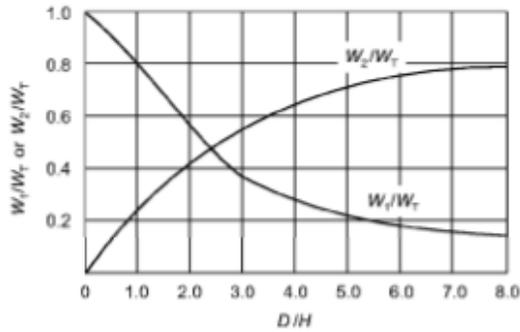


Figure E-2—Effective Masses

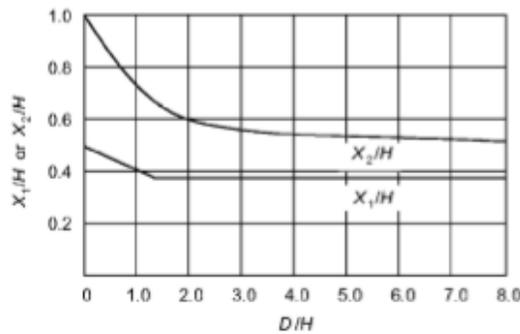


Figure E-3—Centroids of Seismic Forces

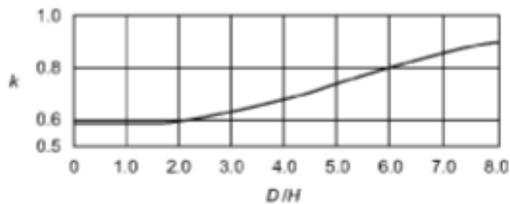


Figure E-4—Factor *k*

The spectrum for the factor ZIC_2 should correspond to the spectrum for ZIC_1 modified for a damping coefficient of 0.5% of critical. In determining the factor ZIC_1 from the spectrum, the fundamental period of the tank with its contents shall be taken into account unless the maximum spectral acceleration is used.

E.4 Resistance to Overturning

E.4.1 Resistance to the overturning moment at the bottom of the shell may be provided by the weight of the tank shell and by the anchorage of the tank shell or, for unanchored tanks, the weight of a portion of the tank contents adjacent to the shell. For unanchored tanks, the portion of the contents that may be used to resist overturning depends on the width of the bottom plate under the shell that lifts off the foundation and may be determined as follows:

In SI units:

$$w_L = 99t_b\sqrt{F_{by}GH}$$

However, w_L shall not exceed $196GHD$

where

w_L = maximum weight of the tank contents that may be used to resist the shell overturning moment, in N/m of shell circumference,

t_b = thickness of the bottom plate under the shell, in mm, used to calculate w_L (see E.4.2),

F_{by} = minimum specified yield strength of the bottom plate under the shell, MPa,

• G = design specific gravity of the liquid to be stored, as specified by the purchaser,

H = maximum design liquid level, m (see 3.6.3.2),

D = nominal tank diameter, m (see 3.6.1.1, Note 1).

In U.S. Customary units:

$$w_L = 7.9t_b\sqrt{F_{by}GH}$$

However, w_L shall not exceed $1.25GHD$

where

w_L = maximum weight of the tank contents that may be used to resist the shell overturning moment, in lbf/ft of shell circumference,

t_b = thickness of the bottom plate under the shell in inches, used to calculate w_L (see E.4.2),

F_{by} = minimum specified yield strength of the bottom plate under the shell (lbf/in.²),

• G = design specific gravity of the liquid to be stored, as specified by the purchaser,

H = maximum design liquid level (ft) (see 3.6.3.2),

D = nominal tank diameter (ft) (see 3.6.1.1, Note 1).

APÉNDICE B

Eficiencia de la junta

(8) exemptions from radiographic examination for certain welds in nozzles and communicating chambers as described in (2), (4), and (5) above take precedence over the radiographic requirements of Subsection C of this Division.

(b) *Spot Radiography.* Except as required in (a)(5)(b) above, butt welded joints made in accordance with Type No. (1) or (2) of Table UW-12 which are not required to be fully radiographed by (a) above, may be examined by spot radiography. Spot radiography shall be in accordance with UW-52. If spot radiography is specified for the entire vessel, radiographic examination is not required of Category B and C butt welds in nozzles and communicating chambers that exceed neither NPS 10 (DN 250) nor $1\frac{1}{8}$ in. (29 mm) wall thickness.

NOTE: This requirement specifies spot radiography for butt welds of Type No. (1) or No. (2) that are used in a vessel, but does not preclude the use of fillet and/or corner welds permitted by other paragraphs, such as for nozzle and manhole attachments, welded stays, flat heads, etc., which need not be spot radiographed.

(c) *No Radiography.* Except as required in (a) above, no radiographic examination of welded joints is required when the vessel or vessel part is designed for external pressure only, or when the joint design complies with UW-12(c).

(d) Electrode gas welds in ferritic materials with any single pass greater than $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm) and electrode slag welds in ferritic materials shall be ultrasonically examined throughout their entire length in accordance with the requirements of Appendix 12. This ultrasonic examination shall be done following the grain refining (austenitizing) heat treatment or postweld heat treatment.

(e) In addition to the requirements in (a) and (b) above, all welds made by the electron beam process shall be ultrasonically examined for their entire length in accordance with the requirements of Appendix 12.

(f) When radiography is required for a welded joint in accordance with (a) and (b) above, and the weld is made by the inertia and continuous drive friction welding processes, the welded joints shall also be ultrasonically examined for their entire length in accordance with Appendix 12.

(g) For radiographic and ultrasonic examination of butt welds, the definition of nominal thickness at the welded joint under consideration shall be the nominal thickness of the thinner of the two parts joined. Nominal thickness is defined in 3-2.

UW-12 JOINT EFFICIENCIES

Table UW-12 gives the joint efficiencies E to be used in the formulas of this Division for joints completed by

an arc or gas welding process. Except as required by UW-11(a)(5), a joint efficiency depends only on the type of joint and on the degree of examination of the joint and does not depend on the degree of examination of any other joint. The User or his designated agent [see U-2(a)] shall establish the type of joint and the degree of examination when the rules of this Division do not mandate specific requirements. Rules for determining the applicability of the efficiencies are found in the various paragraphs covering design formulas [for example, see UG-24(a) and UG-27]. For further guidance, see Appendix L.

(a) A value of E not greater than that given in column (a) of Table UW-12 shall be used in the design calculations for fully radiographed butt joints [see UW-11(a)], except that when the requirements of UW-11(a)(5) are not met, a value of E not greater than that given in column (b) of Table UW-12 shall be used.

(b) A value of E not greater than that given in column (b) of Table UW-12 shall be used in the design calculations for spot radiographed butt welded joints [see UW-11(b)].

(c) A value of E not greater than that given in column (c) of Table UW-12 shall be used in the design calculations for welded joints that are neither fully radiographed nor spot radiographed [see UW-11(c)].

(d) Seamless vessel sections or heads shall be considered equivalent to welded parts of the same geometry in which all Category A welds are Type No. 1. For calculations involving circumferential stress in seamless vessel sections or for thickness of seamless heads, $E = 1.0$ when the spot radiography requirements of UW-11(a)(5)(b) are met, $E = 0.85$ when the spot radiography requirements of UW-11(a)(5)(b) are not met, or when the Category A or B welds connecting seamless vessel sections or heads are Type No. 3, 4, 5, or 6 of Table UW-12.

(e) Welded pipe or tubing shall be treated in the same manner as seamless, but with allowable tensile stress taken from the welded product values of the stress tables, and the requirements of UW-12(d) applied.

(f) A value of E not greater than 0.80 may be used in the formulas of this Division for joints completed by any of the pressure welding processes given in UW-27(a), except for electric resistance welding, provided the welding process used is permitted by the rules in the applicable parts of Subsection C for the material being welded. The quality of such welds used in vessels or parts of vessels shall be proved as follows: Test specimens shall be representative of the production welding on each vessel. They may be removed from the shell itself or from a prolongation of the shell including the longitudinal joint, or, in the case of vessels not containing a longitudinal joint, from a test plate of the same material and thickness as the

TABLE UW-12
MAXIMUM ALLOWABLE JOINT EFFICIENCIES^{1,5} FOR ARC AND GAS WELDED JOINTS

Type No.	Joint Description	Limitations	Joint Category	Degree of Radiographic Examination		
				(a) Full ²	(b) Spot ³	(c) None
(1)	Butt joints as attained by double-welding or by other means which will obtain the same quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surfaces to agree with the requirements of UW-35. Welds using metal backing strips which remain in place are excluded.	None	A, B, C, & D	1.00	0.85	0.70
(2)	Single-welded butt joint with backing strip other than those included under (1)	(a) None except as in (b) below (b) Circumferential butt joints with one plate offset; see UW-13(b)(4) and Fig. UW-13.1, sketch (k)	A, B, C, & D A, B, & C	0.90 0.90	0.80 0.80	0.65 0.65
(3)	Single-welded butt joint without use of backing strip	Circumferential butt joints only, not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) thick and not over 24 in. (600 mm) outside diameter	A, B, & C	NA	NA	0.60
(4)	Double full fillet lap joint	(a) Longitudinal joints not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) thick (b) Circumferential joints not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) thick	A B & C ⁴	NA NA	NA NA	0.55 0.55
(5)	Single full fillet lap joints with plug welds conforming to UW-17	(a) Circumferential joints ⁴ for attachment of heads not over 24 in. (600 mm) outside diameter to shells not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) thick (b) Circumferential joints for the attachment to shells of jackets not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) in nominal thickness where the distance from the center of the plug weld to the edge of the plate is not less than $1\frac{1}{2}$ times the diameter of the hole for the plug.	B C	NA NA	NA NA	0.50 0.50

**TABLE UW-12
MAXIMUM ALLOWABLE JOINT EFFICIENCIES^{1,5} FOR ARC AND GAS WELDED JOINTS (CONT'D)**

Type No.	Joint Description	Limitations	Joint Category	Degree of Radiographic Examination		
				(a) Full ²	(b) Spot ³	(c) None
(6)	Single full fillet lap joints without plug welds	(a) For the attachment of heads convex to pressure to shells not over $\frac{3}{8}$ in. (6 mm) required thickness, only with use of fillet weld on inside of shell; or (b) for attachment of heads having pressure on either side, to shells not over 24 in. (600 mm) inside diameter and not over $\frac{3}{4}$ in. (6 mm) required thickness with fillet weld on outside of head flange only	A & B	NA	NA	0.45
(7)	Corner joints, full penetration, partial penetration, and/or fillet welded	As limited by Fig. UW-1.3.2 and Fig UW-1.6.1	C ⁷ & D ⁷	NA	NA	NA
(8)	Angle joints	Design per U-2(g) for Category B and C joints	B, C, & D	NA	NA	NA

NOTES:

- (1) The single factor shown for each combination of joint category and degree of radiographic examination replaces both the stress reduction factor and the joint efficiency factor considerations previously used in this Division.
- (2) See UW-1.2(a) and UW-5.1.
- (3) See UW-1.2(b) and UW-5.2.
- (4) Joints attaching hemispherical heads to shells are excluded.
- (5) $E = 1.0$ for butt joints in compression.
- (6) For Type No. 4 Category C joint, limitation not applicable for bolted flange connections.
- (7) There is no joint efficiency E in the design formulas of this Division for Category C and D corner joints. When needed, a value of E not greater than 1.00 may be used.

vessel and welded in accordance with the same procedure. One reduced-section tension test and two side-bend tests shall be made in accordance with, and shall meet the requirements of QW-150 and QW-160, Section IX.

UW-13 ATTACHMENT DETAILS

(a) Definitions

t_h = nominal thickness of head

t_p = minimum distance from outside surface of flat head to edge of weld preparation measured as shown in Fig. UW-13.2

t_s = nominal thickness of shell

(See UG-27, UG-28, UG-32, UG-34, and other paragraphs for additional definitions.)

(b)(1) Ellipsoidal, torispherical, and other types of formed heads, shall be attached to the shell as illustrated in the applicable Fig. UW-13.1 sketches (a), (b), (c), (d), (e), and (k). The construction shown in sketch (f) may also be used for end heads when the thickness of the shell section of the vessel does not exceed $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) [see also (c) below]. Limitations relative to the use of these attachments shall be as given in the sketches and related notes and in Table UW-12. Figure UW-13.1 sketches (g), (h), and (j) are examples of attachment methods which are not permissible.

(2) Formed heads, concave or convex to the pressure, shall have a skirt length not less than that shown in Fig. UW-13.1, using the applicable sketch. Heads that are fitted inside or over a shell shall have a driving fit before welding.

(3) A tapered transition having a length not less than three times the offset between the adjacent surfaces of abutting sections as shown in Fig. UW-13.1 sketches (l) and (m) shall be provided at joints between formed heads and shells that differ in thickness by more than one-fourth the thickness of the thinner section or by more than $\frac{1}{8}$ in. (3 mm), whichever is less. When a taper is required on any formed head thicker than the shell and intended for butt welded attachment [Fig. UW-13.1 sketches (n) and (o)], the skirt shall be long enough so that the required length of taper does not extend beyond the tangent line. When the transition is formed by removing material from the thicker section, the minimum thickness of that section, after the material is removed, shall not be less than that required by UG-23(c). When the transition is formed by adding additional weld metal beyond what would otherwise be the edge of the weld, such additional weld metal buildup shall be subject to the requirements of UW-42. The center line misalignment between shell and head shall be no greater than one-half the difference between the actual shell and head thickness,

as illustrated in Fig. UW-13.1 sketches (l), (m), (n), and (o).

(4) Shells and heads may be attached to shells or heads using a butt weld with one plate offset as shown in Fig. UW-13.1 sketch (k). The weld bead may be deposited on the inside of the vessel only when the weld is accessible for inspection after the vessel is completed. The offset shall be smooth and symmetrical and shall not be machined or otherwise reduced in thickness. There shall be a uniform force fit with the mating section at the root of the weld. Should the offset contain a longitudinal joint the following shall apply.

(a) The longitudinal weld within the area of the offset shall be ground substantially flush with the parent metal prior to the offsetting operation.

(b) The longitudinal weld from the edge of the plate through the offset shall be examined by the magnetic particle method after the offsetting operation. Cracks and cracklike defects are unacceptable and shall be repaired or removed.

(c) As an acceptable alternative to magnetic particle examination or when magnetic particle methods are not feasible because of the nonmagnetic character of the weld deposit, a liquid penetrant method shall be used. Cracks and cracklike defects are unacceptable and shall be repaired or removed.

(c)(1) Intermediate heads, without limit to thickness, of the type shown in Fig. UW-13.1 sketch (f) may be used for all types of vessels provided that the outside diameter of the head skirt is a close fit inside the overlapping ends of the adjacent length of cylinder.

(2) The butt weld and fillet weld shall be designed to take shear based on $1\frac{1}{2}$ times the maximum differential pressure that can exist. The allowable stress value for the butt weld shall be 70% of the stress value for the vessel material and that of the fillet 55%. The area of the butt weld in shear is the width at the root of the weld times the length of weld. The area of the fillet weld is the minimum leg dimension times the length of weld. The fillet weld may be omitted if the construction precludes access to make the weld, and the vessel is in noncorrosive service.

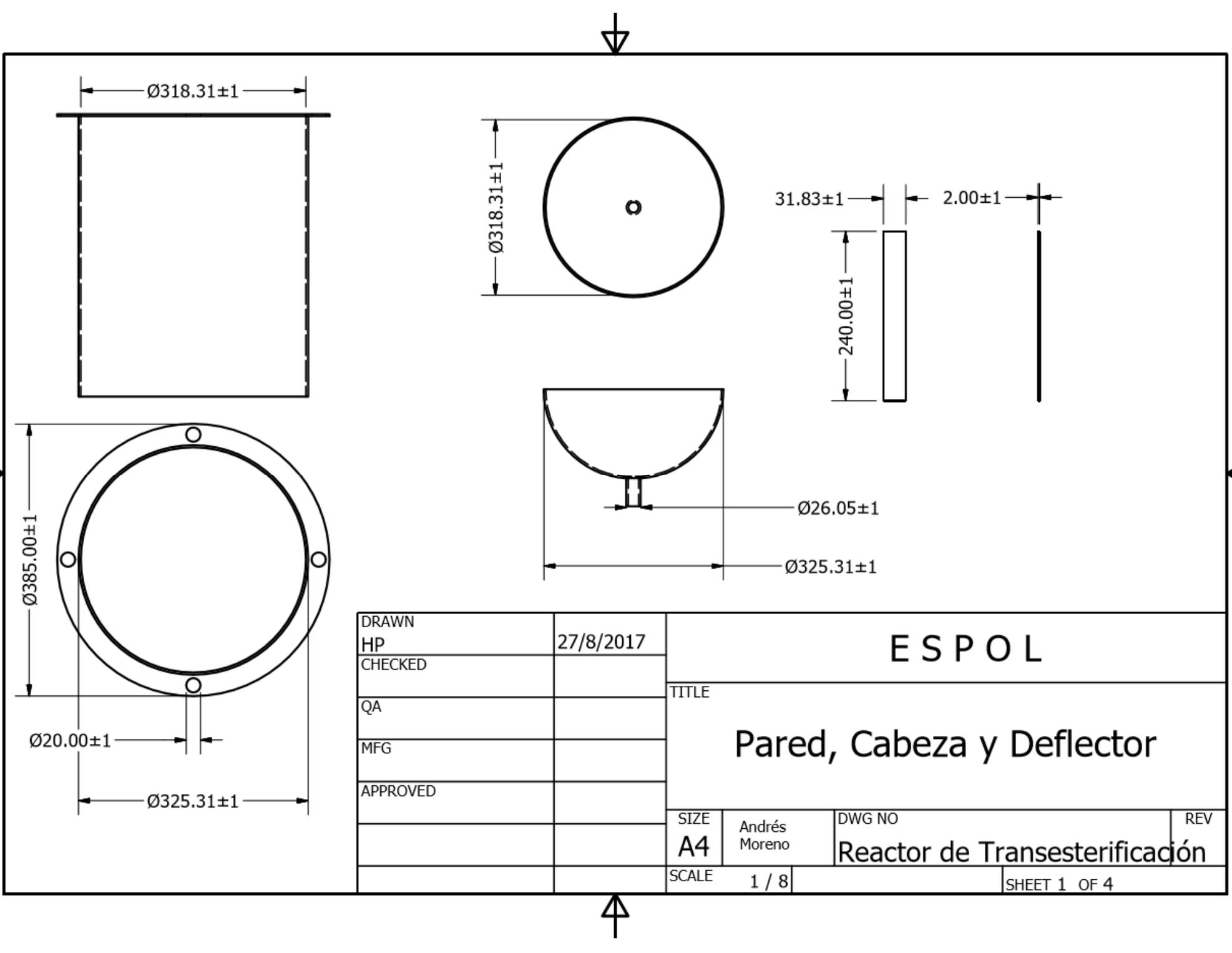
(d) The requirements for the attachment of welded unstayed flat heads to shells are given in UG-34 and in (e) and (f) hereunder.

(e) When shells, heads, or other pressure parts are welded to a forged or rolled plate to form a corner joint, as in Fig. UW-13.2, the joint shall meet the following requirements [see also UG-93(d)(3)].

(1) On the cross section through the welded joint, the line of fusion between the weld metal and the forged or rolled plate being attached shall be projected on planes

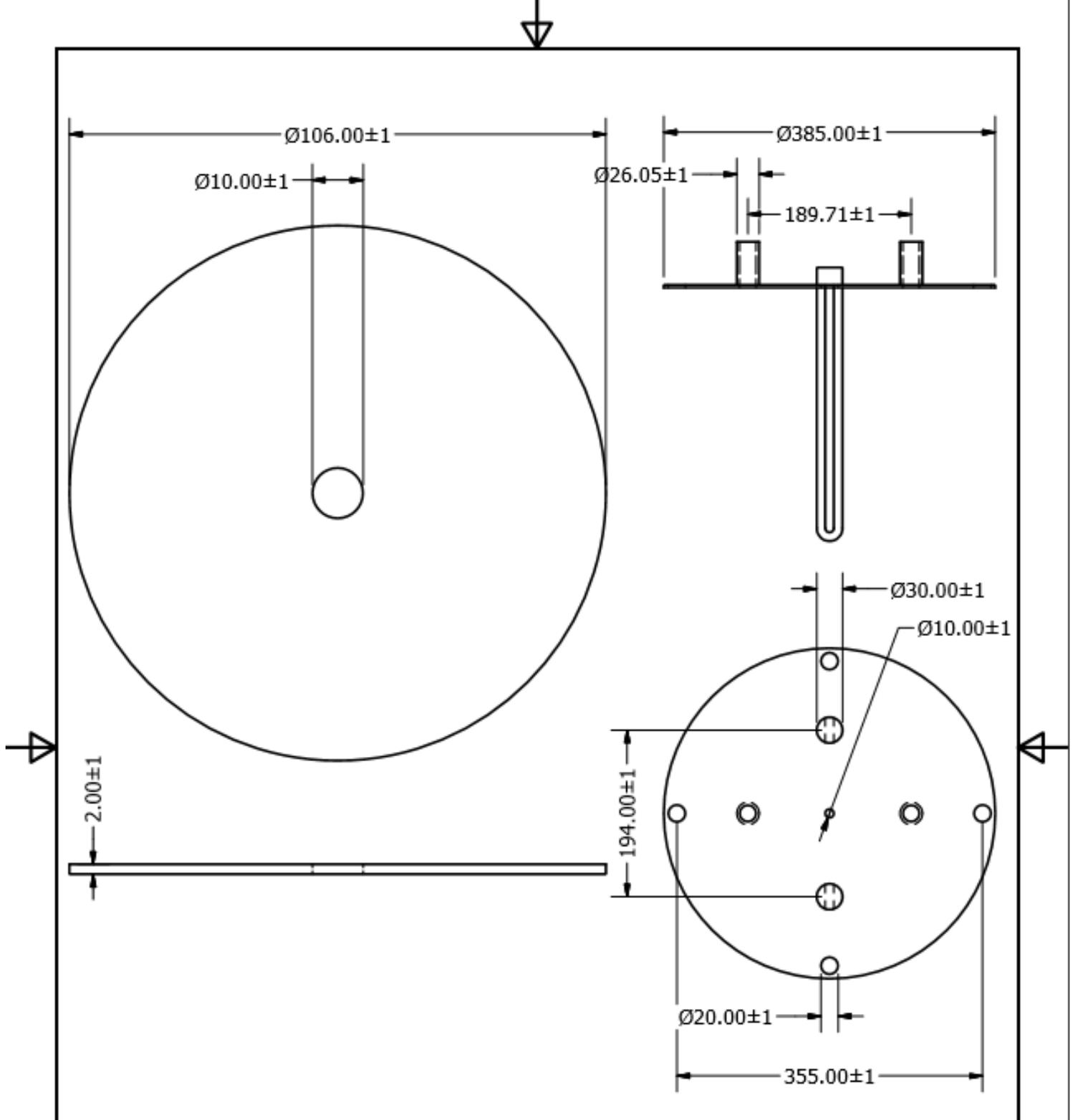
APÉNDICE C

Planos

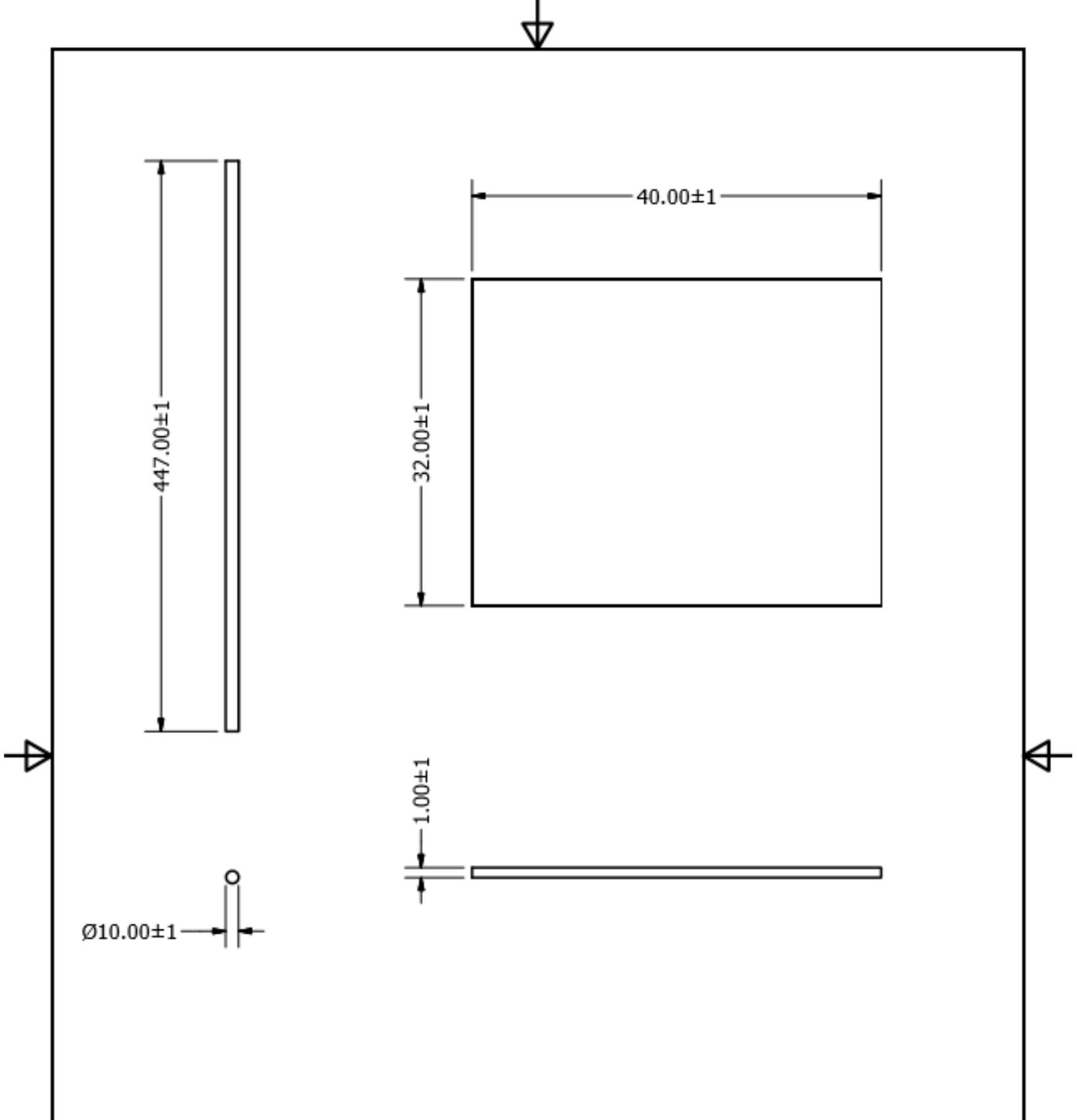


DRAWN	HP	27/8/2017
CHECKED		
QA		
MFG		
APPROVED		

ESPOL		
TITLE		
Pared, Cabeza y Deflector		
SIZE	Andrés Moreno	DWG NO
A4		Reactor de Transesterificación
SCALE	1 / 8	REV
		SHEET 1 OF 4



DRAWN		ESPOL			
HP	27/8/2017				
CHECKED		TITLE			
QA		Disco Impeller y Tapa Tanque			
MFG					
APPROVED		SIZE	Andrés Moreno	DWG NO	REV
		A4		Reactor de Transesterificación	
		SCALE	1 : 1	SHEET 2 OF 4	



DRAWN		ESPOL			
HP	27/8/2017				
CHECKED		Eje Transmisión y Paleta Impeller			
QA					
MFG					
APPROVED					
		SIZE	Andrés Moreno	DWG NO	REV
		A4		Reactor de Transesterificación	
		SCALE	1 / 4	SHEET 3 OF 4	