

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**DISEÑO DEL MÓDULO DE TRANSESTERIFICACIÓN DE
UNA PLANTA PILOTO PARA PRODUCCIÓN DE
BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES USADOS DE COCINA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,
que presenta el bachiller:

EDUARDO ANTONIO BARRIGA MORENO

**ASESOR: Dipl. Ing. Benjamín Barriga Gamarra
Dra. Sayda Estela Mujica Bueno**

Lima, septiembre del 2011



© 2011, Eduardo Barriga Moreno

Se autoriza la reproducción total o parcial,
Con fines académicos a través de cualquier
Medio o procedimiento, incluyendo la cita
Bibliográfica del documento.

RESUMEN

El propósito de esta tesis es el diseño del módulo de transesterificación de una planta piloto de producción de biodiésel a partir de aceites usados de cocina, que debe servir para hacer investigaciones y generar una base de conocimientos que permita aumentar la eficiencia de los procesos productivos, disminuir los costos de producción y cumplir con las normativas actuales de calidad.

Para ello, se comenzó realizando una extensiva investigación bibliográfica de todas las tecnologías implicadas en el proceso de producción de biodiésel, así como las proporciones adecuadas de materia prima para optimizar las diversas reacciones. Aplicando la metodología de diseño se definió el proceso y el concepto de solución del módulo que permitiese realizar de manera eficiente los objetivos planteados. Así, luego de una evaluación técnico – económica, se decidió diseñar un módulo que permita el control de los sistemas de agitación mecánica, temperatura y presión. En el que se trabajará por lotes (tipo batch) obteniéndose del proceso productivo biodiésel y glicerina.

Posteriormente, se realizó un análisis económico de los costos de fabricación del módulo de transesterificación (costos de adquisición de materiales y de equipos, costos de manufactura de los elementos mecánicos y finalmente los costos de montaje); dando como resultado que es económicamente viable.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
DERECHO DE AUTOR.....	i
RESUMEN.....	ii
INDICE DEL CONTENIDO.....	iii
LISTA DE SIMBOLOS.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
1. ESTADO DEL ARTE	
1.1. El sistema energético (análisis energético y ambiental).....	4
1.2. Biodiésel.....	6
1.2.1. Naturaleza.....	6
1.2.2. Características generales.....	6
1.2.3. Ventajas y desventajas respecto al diesel.....	7
1.3. Materias primas para producción de biodiésel en Perú y problemática.....	9
1.4. Tecnología actual para la producción de biodiésel.....	11
1.4.1. Transesterificación ácida.....	12
1.4.2. Transesterificación enzimática.....	12
1.4.3. Transesterificación heterogénea.....	12
1.4.4. Transesterificación supercrítica.....	12
1.4.5. Transesterificación alcalina.....	13
1.5. Proceso de producción de biodiésel a partir de aceites usados de cocina.....	13
1.5.1. Pretratamiento del aceite.....	14
1.5.1.1. Filtrado.....	14
1.5.1.2. Desgomado.....	14
1.5.1.3. Neutralización, lavado y secado.....	14
1.5.1.4. Esterificación ácida.....	15
1.5.2. Transesterificación alcalina.....	15
1.5.2.1. Producción por agitación y calor.....	16
1.5.2.2. Producción por ultrasonido.....	17
1.5.2.3. Producción por microondas.....	17
1.5.2.4. Comparación entre el proceso continuo y por lote.....	17
1.5.3. Postratamiento del biodiésel.....	18
1.5.3.1. Separación de fases.....	18
1.5.3.2. Recuperación de metanol y lavado del biodiesel.....	19

1.5.3.3. Secado.....	19
1.6. Marco Legal Nacional asociada al biodiésel.....	19
2. ELABORACIÓN DEL CONCEPTO DE LA PLANTA	
2.1. Proceso de producción a adoptar.....	21
2.1.1. Pretratamiento.....	21
2.1.1.1. Desgomado.....	22
2.1.1.2. Esterificación Ácida.....	22
2.1.1.3. Secado y filtrado.....	22
2.1.2. Transesterificación.....	23
2.1.3. Postratamiento.....	24
2.2. Fases de la metodología del diseño.....	24
2.2.1. Lista de exigencias.....	25
2.2.2. Estructura de funciones.....	26
2.2.3. Morfología de funciones.....	27
2.2.3.1. Concepto de solución N°1.....	27
2.2.3.2. Concepto de solución N°2.....	28
2.2.3.3. Concepto de solución N°3.....	29
2.2.4. Determinación del concepto óptimo.....	29
3. DISEÑO DEL MÓDULO DE TRANSESTERIFICACIÓN, SELECCIÓN DE EQUIPOS	
3.1. Dimensionamiento de los reactores.....	33
3.2. Reactor de transesterificación.....	35
3.2.1. Cálculo del espesor del reactor (cilindro y cono).....	36
3.2.2. Esfuerzos en cascos cilíndricos.....	37
3.2.3. Cálculo de la tapa del reactor (cabeza torisférica).....	38
3.2.4. Diseño de soportes.....	38
3.2.5. Cálculo de cordones de soldadura.....	41
3.2.6. Cálculo de la potencia de la resistencia eléctrica.....	46
3.2.7. Cálculo de tornillos.....	47
3.3. Reactor de metóxido.....	53
3.3.1. Cálculo de esfuerzos máximos en el casco cilíndrico y la parte cónica.....	54
3.3.2. Diseño de soportes.....	55
3.4. Cálculo de la potencia requerida para la agitación.....	55

3.5. Selección de motores.....	57
3.6. Cálculo del diámetro del árbol de los agitadores.....	60
3.7. Cálculo de chaveta.....	63
3.8. Cálculo de prisioneros.....	64
3.9. Espesor de paletas.....	66
3.10. Cálculo estructural.....	67
3.10.1. Cálculo del soporte del motorreductor.....	68
3.10.2. Cálculo de la estructura base.....	71
4. PLANOS.....	90
Nº PLANOS	DESCRIPCIÓN
ENS-E1-A0	Ensamble del módulo de transesterificación
ENS-E2-A2	Detalles del ensamble
DES-D1-A1	Despiece de estructura base
DES-D2-A3	Despiece de estructura superior
DES-D3-A4	Despiece de soporte de motorreductor
DES-D4-A2	Despiece de reactor de metóxido
DES-D5-A4	Despiece de agitador de metóxido
DES-D6-A4	Despiece de eje de agitador de metóxido
DES-D7-A4	Despiece de tornillo M36x3x35 de metóxido
DES-D8-A4	Despiece de acople motor/árbol de metóxido
DES-D9-A1	Despiece de reactor de transesterificación
DES-D10-A4	Despiece de agitador de transesterificación
DES-D11-A4	Despiece de eje de transesterificación
DES-D12-A4	Despiece de tornillo M36x3x35 de transesterificación
DES-D13-A4	Despiece de acople motor/árbol de transesterificación
DES-D14-A4	Despiece de cobertor de sello hidráulico y centrador
DES-D15-A4	Despiece de chavetas y arandelas para agitador
5. COSTOS DE FABRICACIÓN.....	91
CONCLUSIONES.....	97
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
BIBLIOGRAFÍA.....	99
ANEXOS	

LISTA DE SIMBOLOS

σ_f (N/mm ²)	:	Resistencia de fluencia del AISI304.
σ_b (N/mm ²)	:	Resistencia máxima a la tracción del AISI304.
E (N/mm ²)	:	Módulo de elasticidad del AISI304 = 19300.
D_t (mm)	:	Diámetro del recipiente.
D_a (mm)	:	Diámetro del agitador.
L (mm)	:	Longitud de la paleta.
W (mm)	:	Ancho de la paleta.
J (mm)	:	Ancho del deflector.
V (mm)	:	Distancia entre la base del recipiente y el agitador.
H (mm)	:	Altura total del contenido de líquido en el recipiente.
h_{tubo} (mm)	:	Altura total de la parte cilíndrica del recipiente.
h_{cono} (mm)	:	Altura total de la parte cónica del recipiente.
$\sigma_{AISI304}$ (N/mm ²)	:	Resistencia de fluencia reducida por temperatura.
$P_{diseño}$ (lb/pulg ²)	:	Presión de diseño.
σ_{mp} (lb/pulg ²)	:	Esfuerzo meridional o longitudinal.
σ_{cp} (lb/pulg ²)	:	Esfuerzo circunferencial.
h_1 (mm)	:	Altura de la parte cilíndrica con líquido del recipiente.
h_2 (mm)	:	Altura de la parte cónica con líquido del recipiente.
R (mm)	:	Radio interior del recipiente.
t (mm)	:	Espesor de pared.
α (grados)	:	Ángulo entre el eje z y la tangente al meridiano.
U	:	Eficiencia de la unión soldada (ver anexo A8)
r (pulg)	:	Radio interior de las curvaturas.
F (pulg)	:	Radio interior del casquete.
M	:	Factor = 1,65 (cuando L/r < 16 ² / ₃) (ver anexo A9)
r_c (pulg)	:	Radio exterior del recipiente.
$\rho_{AISI304}$ (kg/m ³)	:	Densidad del acero inoxidable AISI304 = 7850 .
$\rho_{metanol}$ (kg/m ³)	:	Densidad del metanol a 20°C = 791,5 .
ρ_{mezcla} (kg/m ³)	:	Densidad de la mezcla.
γ_{mezcla} (N/m ³)	:	Peso específico de la mezcla.
D_e (mm)	:	Diámetro exterior del recipiente.
L_1 (mm)	:	Longitud del cordón de soldadura.

a (mm)	:	Espesor del cordón de soldadura.
c (mm)	:	Distancia perpendicular del eje neutro al punto más alejado de este eje y sobre el cual actúa el momento.
I (m ⁴)	:	Momento de inercia de los cordones respecto al eje neutro.
A (mm ²)	:	Área de los cordones de soldadura.
m (N/m ²)	:	Esfuerzo normal en una cara del cordón de soldadura.
t_n (N/mm ²)	:	Esfuerzo paralelo a una cara del cordón de soldadura.
t_a (N/mm ²)	:	Esfuerzo longitudinal a una cara del cordón de soldadura.
σ (N/mm ²)	:	Esfuerzo normal en la garganta del cordón de soldadura.
τ_m (N/mm ²)	:	Esfuerzo paralelo en la garganta del cordón de soldadura.
τ_a (N/mm ²)	:	Esfuerzo longitudinal en la garganta del cordón.
σ_{Alt} (N/mm ²)	:	Limite de resistencia a la fatiga
σ_{Alt}' (N/mm ²)	:	Limite de resistencia a la fatiga disminuido (debido a concentradores de esfuerzos)
σ_A' (N/mm ²)	:	Limite a la fatiga disminuido (debido a concentradores de esfuerzos)
d (mm)	:	Diámetro del tornillo.
b (mm)	:	Longitud roscada del tornillo.
l (mm)	:	Longitud del tornillo.
d_{int} (mm)	:	Diámetro interior de la arandela.
d_{ext} (mm)	:	Diámetro exterior de la arandela.
s (mm)	:	Espesor de la arandela.
m (mm)	:	Ancho de la tuerca.
d_1 (mm)	:	Diámetro de la circunferencia encerrada en el hexágono de la tuerca.
d_{ag} (mm)	:	Diámetro del agujero por el cual pasa el tornillo.
d_2 (mm)	:	Diámetro primitivo de la rosca del tornillo.
d_3 (mm)	:	Diámetro de raíz de la rosca del tornillo.
P^* (mm)	:	Paso de la rosca del tornillo.
L_p (mm)	:	Espesor de la placa sometida a compresión.
D_{ext} (mm)	:	Diámetro de una circunferencia que represente el ancho de la placa

$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	:	Diámetro máximo del cono
n (rpm)	:	Velocidad de giro
ρ (kg/m ³)	:	Densidad del líquido
μ (N.s/m ²)	:	Viscosidad dinámica del líquido
g (m/s ²)	:	Aceleración de la gravedad
n_b	:	Número de paletas
z	:	Factor cuyo rango va desde 0.5 a 0.8
P_{carga} (W)	:	Potencia de carga
P_{est} (W)	:	Potencia estática requerida por el reactor
P_{real} (W)	:	Potencia real del motor
P_n (W)	:	Potencia nominal del motor
ω (rpm)	:	Velocidad de giro del agitador
ω_n (rpm)	:	Velocidad angular del motor
η_{motor}	:	Eficiencia mecánica del motor
C_s	:	Coefficiente de servicio del motor eléctrico
PD_{rotor}^2 (kg.m ²)	:	Momento volante del rotor
T_a (N.m)	:	Torque de arranque del motor
T_n (N.m)	:	Torque nominal del motor
T_{min} (N.m)	:	Torque mínimo del motor
T_{max} (N.m)	:	Torque máximo del motor
T_{ac} (N.m)	:	Torque acelerador promedio
T_{motor} (N.m)	:	Torque promedio del motor
tpm (s)	:	Tiempo de puesta en marcha del motor
I_{rotor} (kg.m ²)	:	Momento de inercia de masas del rotor del motor
I_{masas} (kg.m ²)	:	Momento de inercia de masas giratorias del reactor referidas al eje del motor
I_{total} (kg.m ²)	:	Momento de inercia total
l_{sh} (mm)	:	Longitud del árbol
D_{sh} (mm)	:	Diámetro del árbol
h^* (mm)	:	Altura de la chaveta
b^* (mm)	:	Ancho de la chaveta
t_1^* (mm)	:	Altura de la chaveta en contacto con el cubo
t_2^* (mm)	:	Altura de la chaveta en contacto con el árbol

$L_b(mm)$:	Longitud efectiva
$P_e(N)$:	Fuerza crítica de Euler
$M_{máximo}(N \cdot m)$:	Momento flector máximo
$\Delta_{máximo}(mm)$:	Deflexión máxima del perfil





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO	:	DISEÑO DEL MÓDULO DE TRANSESTERIFICACION DE UNA PLANTA PILOTO PARA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES USADOS DE COCINA.
ÁREA	:	Diseño y Energía
ASESORES	:	Dipl. Ing. Benjamín Barriga Gamarra Dra. Sayda Estela Mujica Bueno
TESISTA	:	Eduardo Antonio Barriga Moreno
CÓDIGO	:	2004.2045.5
FECHA	:	20 de Julio de 2011

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Las exigencias ambientales y de demanda energética presentan la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía, dando especial interés a las energías renovables; entre ellas los biocombustibles. El uso de un desecho contaminante para la producción de biodiésel, como son los aceites usados domésticos permitiría dar valor agregado a este desecho y al mismo tiempo aminorar la contaminación ambiental.

Objetivo general

Diseño de un módulo de transesterificación para un proceso de producción de biodiésel a partir de aceites domésticos usados.

Objetivos específicos

Revisión de los diversos tipos de procesos.

Selección y determinación del proceso de producción de biodiésel tipo batch.

Diseño del módulo de transesterificación para procesar los aceites usados mediante agitación, calor y presión.

Evaluación económica del costo de los elementos diseñados para la implementación del módulo.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**DISEÑO DEL MÓDULO DE TRANSESTERIFICACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO
PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITES USADOS DE
COCINA**

Introducción

1. Estado del arte
2. Elaboración del concepto de la planta
3. Diseño de la planta, selección de equipos
4. Planos
5. Costos de fabricación

Observaciones y Recomendaciones

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Dipl. Ing. Benjamín Barriga Gamarra

Asesor

Dra. Sayda Mujica Bueno

Asesor

INTRODUCCION

Las actividades humanas demandan cada día mayor cantidad de energía. Dentro de las fuentes de energía o combustibles más usados está el diesel, considerado como fuente energética básica en todo el mundo, su consumo alcanza 934 millones de toneladas por año [1]; asimismo se prevé que las actuales reservas de diesel solo puedan ser usadas por otros 40 años más [2]. La combustión de petróleo diesel es la mayor fuente de gases de Efecto Invernadero y sus emisiones contaminantes dañan la salud humana: el sistema respiratorio, el sistema nervioso y ocasiona enfermedades a la piel, entre otras.

Para mantener los ritmos de crecimiento energético protegiendo el medio ambiente y buscando la no dependencia del combustible diesel basado en el petróleo, es que surge la necesidad de una fuente alternativa de energía; dando especial interés a las Energías Renovables provenientes de fuentes No Convencionales (ERNC).

En la actualidad, tanto los últimos informes emitidos por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) como las restricciones que plantea el Protocolo de Kyoto respecto a las emisiones de gases de Efecto Invernadero, ha despertado el interés por el desarrollo de biodiésel, como una mejor alternativa para reemplazar al diesel de petróleo puesto que presenta como principales ventajas la disminución de las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero como CO_2 y especialmente SO_x .

Particularmente en Perú existe un alto nivel de importaciones de diesel, más del 63% equivalente a 109 BPMD (miles de barriles por día) de la carga a las refinerías es importado por la existencia de grandes consumidores directos [3]; es por ello que poder contar con producción propia reduciría la dependencia en la importación de combustible diesel.

La producción de biodiésel utilizando aceites vegetales vírgenes, tiene como principal inconveniente el alto costo de manufactura que se debe al elevado costo de los aceites de origen vegetal (soya, canola, etc.); a este tema se suma la crítica debido a la utilización de tierras de cultivo y materia prima, que en vez de ser destinadas para el consumo alimenticio, se utilizan en la producción de biodiésel. Una solución particular es la producción de biodiésel a partir de aceites usados de cocina por ser menos costosos que los aceites vegetales. Además, su uso permitiría aprovechar ese desecho y dar uso a un producto contaminante, logrando así aminorar la

contaminación ambiental. Esta es la intención de Eq-SAC- Equipo de Seguridad Ambiente y Calidad de la red de equipos – e-quipu de la PUCP, quienes vienen trabajando con la finalidad de poder hacer uso de los aceites usados de la municipalidad local, por lo que los objetivos de esta tesis aportan a esta intención y es parte del proyecto de Eq-SAC sobre Producción de Biodiésel con aceites usados.

Los datos obtenidos en varios países indican que el biodiésel obtenido de aceites reciclados de cocina probablemente no reemplace al combustible diesel completamente; sin embargo una sustancial cantidad de diesel puede ser mezclado con biodiésel preparado de aceites reciclados de cocina, ayudando en parte a disminuir la dependencia de combustible basado en petróleo [1].

Una de las tecnologías, como parte central de uno de los procesos de producción de biodiésel a partir de aceites reciclados, con mayor empleo actualmente es la Transesterificación alcalina por lotes o tipo batch; la cual algunos estudios recomiendan que ocurra a una presión determinada, entre 2 a 4 bar, ya que agiliza la reacción y aumenta la conversión de ésteres, mejorando así la eficiencia del proceso. Se adoptó esta idea como punto de inicio para el desarrollo del diseño y fabricación del módulo de Transesterificación por lotes con una capacidad de 48 litros, con la finalidad de realizar los ensayos productivos y verificar qué tan eficiente es la producción de biodiésel mediante este método, para posteriormente concluir si es económicamente viable su producción a mayor escala.

Los 5 capítulos que constituyen esta tesis, que se elaboraron para responder a esta necesidad, se detallan a continuación: el capítulo 1, en el estado del arte, se podrá apreciar información sobre las bondades del biodiésel, las tecnologías actuales para su producción y los procesos de producción a partir de aceites reciclados; en el capítulo 2, en la elaboración del concepto de la planta, se desarrolla el proceso de producción que se adopta y se realizó la metodología del diseño para determinar las características del módulo de Transesterificación a diseñar; en el capítulo 3, se realizó el dimensionamiento y los cálculos pertinentes para el diseño y selección de los equipos del concepto de solución adoptado; en el capítulo 4, se aprecian los planos de ensamble y despiece; finalmente, en el capítulo 5, se hace una presentación de los costos de los diferentes elementos para la implementación del módulo.

De acuerdo a lo mencionado, se planteó el diseño y fabricación de un módulo de Transesterificación para un proceso de producción de biodiésel a partir de aceites domésticos usados, para ello se realizó lo siguiente:

- La revisión de los diversos tipos de procesos.
- La selección y determinación del proceso de producción de biodiésel tipo batch.
- Se diseñó el módulo de Transesterificación para procesar los aceites usados mediante agitación, calor y presión.
- Se evaluó el costo de los elementos diseñados para la implementación del módulo.



CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE

1.1. El sistema energético (análisis energético y ambiental)

En la actualidad el sistema energético está basado en el empleo de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) y leña. Entre estas, el petróleo constituye la primera fuente de energía en el mundo, particularmente en Perú aporta el 53% del total de energía consumida [3].

Se ha demostrado que las principales emisiones de CO₂ se debe al producto de la combustión de los combustibles fósiles [4]. El incremento de partículas de CO₂ en el aire, origina el aumento del Efecto Invernadero; asimismo la excesiva presencia de azufre en el aire tiene como consecuencia el incremento de las enfermedades crónicas no transmisibles como asma, faringitis, etc [5].

Con la finalidad de disminuir la dependencia del petróleo como combustible y sus emisiones de compuestos dañinos a la atmósfera, surge un fuerte incremento del uso de combustibles renovables; entre estos el biodiésel como combustible alternativo al petróleo diesel tradicional.

La combustión de biodiésel no implica un aumento neto de CO₂ a la atmósfera, ya que el dióxido de carbono emitido será absorbido por otro vegetal en el proceso de fotosíntesis de manera que contribuye a minimizar los gases de Efecto Invernadero según se muestra en la figura No. 1.1.

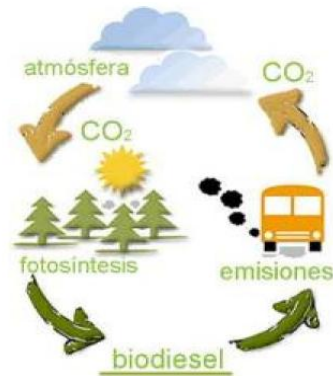


Fig. No 1.1. Ciclo básico del carbono para el biodiésel [6].

Sin embargo, Lechón [7] usando la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) menciona que las mayores emisiones de gases de Efecto Invernadero en la producción de biodiésel con aceites vegetales crudos “B100”, se producen en dos etapas: la etapa de extracción de aceite debido a la combustión del gas natural o gasoil en la planta para producir la energía térmica necesaria para el proceso y en la etapa agrícola debido fundamentalmente a las emisiones de óxido nitroso originadas por el uso de fertilizantes nitrogenados. La figura No. 1.2 ilustra las etapas del Análisis del Ciclo de Vida de los Biocombustibles. En cuanto a la producción y distribución de biodiésel con aceites vegetales usados, los procesos de mayores emisiones son: la recogida de aceite y su transporte a la planta de reciclado.



Fig. No 1.2. Etapas a considerar en el Análisis del Ciclo de Vida de los Biocombustibles.

Para lograr minimizar la dependencia del petróleo diesel; se debe lograr que en el proceso de obtención de biodiésel se consigan balances energéticos positivos y lleguen al mercado a un coste similar al de los productos derivados del petróleo a los que se pretende sustituir (Ballesteros, 2003).

1.2. Biodiésel

1.2.1. Naturaleza

El biodiésel está constituido generalmente de ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos de cadena larga; se obtiene a partir de la reacción (denominada Transesterificación) entre un tipo de aceite vegetal u otro cuerpo graso y un alcohol en presencia de un catalizador, para ser utilizados tanto en fuentes fijas (hornos, calderas, motores diesel estacionarios) como móviles (motores de ignición por compresión - motores diesel).

La ASTM (*American Standards for Testing and Materials*) lo define como “Ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y que se emplean en los motores de ignición de compresión o en calderas de calefacción” [8].

Los aceites vegetales y las grasas animales están constituidos por moléculas de ácidos grasos y glicerol. A éste último, los aceites y grasas le deben su elevada viscosidad. El proceso de Transesterificación, en sencillo, consiste en reemplazar el glicerol (alcohol trivalente) por un alcohol monovalente («más ligero») usualmente Metanol o Etanol, formando moléculas más pequeñas (ésteres monoalquílicos, comúnmente denominado biodiésel), con una viscosidad similar a la del combustible diésel derivado del petróleo [9]. Asimismo se produce Glicerina, sustancia que tiene numerosos usos en diversas industrias químicas, cosméticas y farmacéutica.

1.2.2. Características generales

El biodiésel presenta propiedades similares al combustible diesel y puede utilizarse puro llamado B100 o en mezclas de diferentes concentraciones con el diesel de petróleo. Se usa el símbolo Bxx para designar la proporción de biodiésel, xx designando el porcentaje de biodiésel en el diesel.

Uno de sus principales beneficios es su bajo contenido de azufre, debido a la presencia de oxígeno en su composición química, su combustión es más completa, reduciendo la emisión de partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, entre otros contaminantes [10].

Tabla No 1.1. Características físico – químicas comparativas típicas de biodiésel con mayor producción en Perú

Propiedad	Unidad	Diesel de petróleo [10]	Metil éster de palma [11]	Metil éster de colza [10]
Densidad a 15°C	Kg/m ³	840	880,1	883
Punto de inflamación	°C	63	---	153
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s (cSt)	3,2	1.77	4,8
Número de cetano		45 - 50	50	52
Residuo de carbón	(% peso)	0,2	---	---
Azufre	(% peso)	0,3	0,12	< 0,01

El biodiésel producido debe de cumplir con estándares de calidad para ser utilizados en motores diesel; para ello existen normas técnicas internacionales y nacionales las cuales están colocadas en el anexo A2 de esta tesis.

Los aceites vegetales vírgenes utilizados para la producción de biodiésel representan más del 85% del costo total de la producción de biodiésel, esto dificulta tener un precio competitivo frente al diesel [12]. El uso de aceites usados como materia prima permite además de minimizar los costos dar un adecuado uso a los restos de aceites usados de comida, que son contaminantes y tóxicos para la salud; asimismo comienza a surgir el interés concerniente a la obtención de biodiésel a partir de grasas, algas y aceites no comestibles como *Jatropha* o Piñón (su cultivo se adapta a suelos pobres, arenosos y es muy resistente a la sequía).

1.2.3. Ventajas y desventajas respecto al diesel

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es un recurso renovable, biodegradable (en caso de derrame se disuelve fácilmente en la naturaleza) y no tóxico. • Combustión más completa debido a la presencia de oxígeno en su composición química. • Tiene balance neutro respecto a la contaminación con CO₂ y prácticamente no contiene sulfuros. • Se puede usar en motores diesel hasta un 20% de mezcla sin necesidad de cambios en el motor y para porcentajes mayores no son necesarias adaptaciones especiales [9]. • Tiene mayor número de cetano; por lo 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene menor poder calorífico (1 litro de diesel equivale energéticamente a 1.1 litros de biodiésel) esto afecta la potencia y el consumo del motor • Aumentan las emisiones de óxidos de nitrógeno NOx (genera smog y contribuye a la lluvia ácida). • Mayores costos de producción. • Su vida útil es inferior a los 6 meses debido a su escasa estabilidad oxidativa, en otras palabras pierde la capacidad de oxidarse en el proceso de combustión en la cámara del motor. El biodiésel viejo se vuelve ácido y forma sedimentos saliendo de los estándares de calidad [10].

<p>tanto presenta mayor capacidad de autoencendido.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Posee punto de inflamación muy alto cercano a los 130°C y además no produce vapores explosivos, lo cual hace más seguro al momento de operar, transportar y almacenar. • Puede ser bombeado, manipulado y almacenado con los mismos equipos que se emplean en el diesel convencional. • Presenta mayor viscosidad cinemática, lo que mejora su capacidad en lubricar el motor; esto permite minimizar los aditivos utilizados en el diesel convencional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta problemas de fluidez a bajas temperaturas, bajo los 0°C se puede congelar o generar depósitos en el motor. • No es compatible con tanques cuyo material sea de cobre, plomo, zinc y estaño y sus aleaciones, pues estos metales pueden catalizar reacciones químicas de degradación del combustible. • Debido a que es un buen solvente; puede disolver sedimentos presentes en el sistema de combustible del motor y causar obstrucción de filtros en su primer uso en motores que operan con diesel, por lo que se recomienda hacer una limpieza del sistema de combustible.
--	---

La figura No. 1.3 presenta por medio de colores las diferentes etapas consideradas en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), desde la producción de la semilla en verde hasta la etapa de uso final en gris; las columnas en la Abscisa representan la cantidad de gramos de CO₂ equivalente emitidos por cada uno de los diferentes tipos de biodiésel, como lo indica la graduación de la Ordenada. En la que se puede apreciar que en el ciclo de vida del biodiésel de aceites vegetales crudos al 100% (BD100A1), las mayores emisiones de CO₂ equivalente se da en la etapa de producción de la semilla seguida de la etapa de extracción de aceite. Respecto al biodiésel de aceites vegetales usados al 100% (BD100A2), las mayores emisiones son atribuibles al proceso de recogida de los aceites. En cuanto al diesel EN-590 las mayores emisiones se producen en la etapa de uso debido a la combustión. El resto de columnas BDXA_ son mezclas en las cuales X representa en porcentaje el contenido de biodiésel en diesel, asimismo A1 y A2 representan que el biodiésel proviene de aceites vegetales y reciclados respectivamente.

Asimismo, como se podrá ver en la figura No 1.4, la producción y uso de biodiésel de aceites vegetales crudos puro, evita la emisión de 92 gramos de CO₂ equivalente por cada km recorrido en comparación con el diesel EN-590, logrando un 57% de ahorro; y el biodiésel de aceites reciclados puro permite evitar la emisión de 144 gramos de CO₂ equivalente, logrando un 88% de reducción de emisiones.

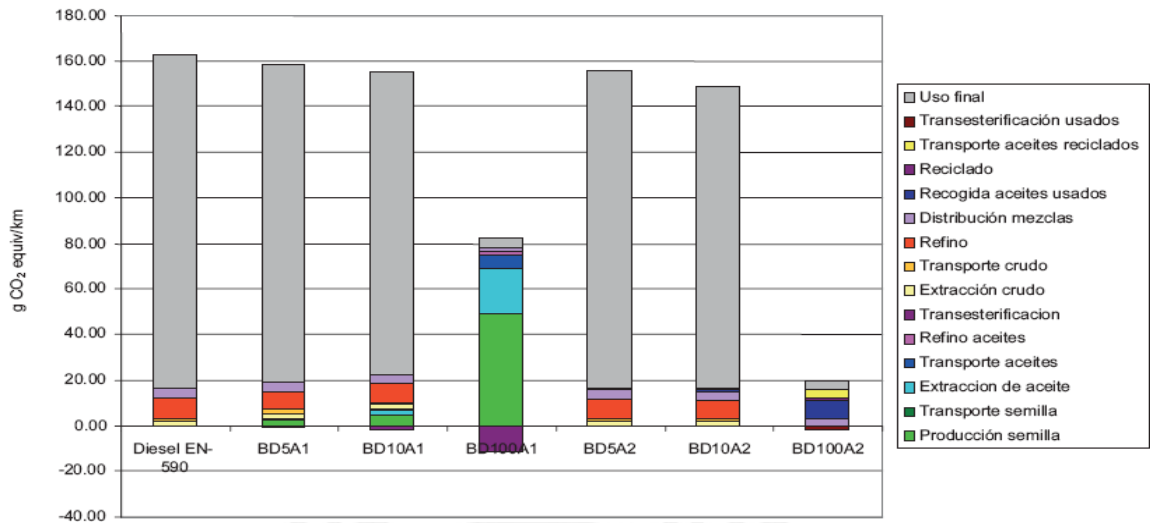


Fig. No 1.3. Distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero en las distintas etapas del ciclo de vida [7].

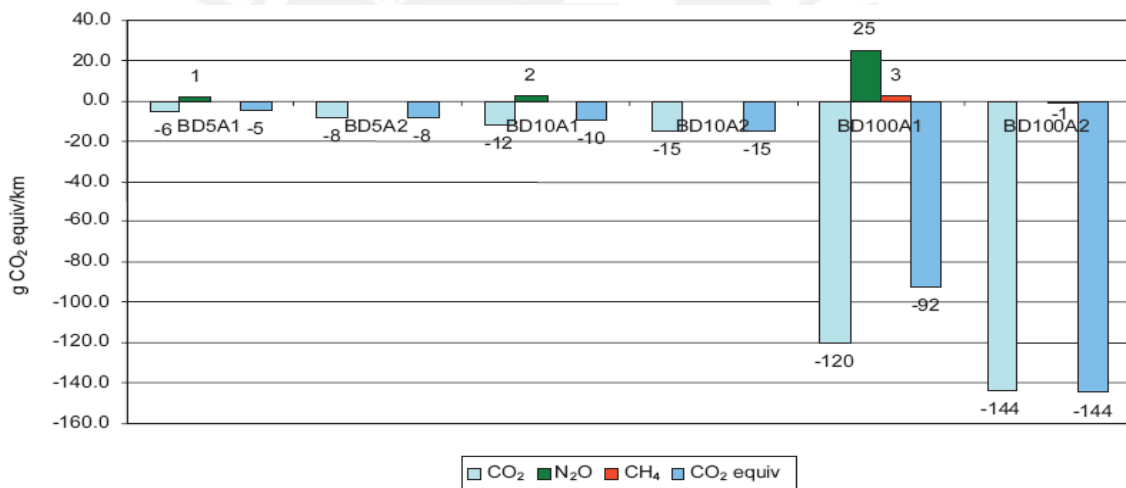


Fig. No 1.4. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero respecto al Diesel EN-590 [7].

1.3. Materias primas para producción de biodiésel en Perú y problemática

Las materias primas que mayor interés ha despertado en el Perú por su potencial para la producción de biodiésel son, sin duda alguna, la palma aceitera en la selva y la colza llamada también canola en la sierra. Otras materias primas potenciales serían también, la soya en la selva, el girasol en la sierra, la semilla de algodón en la costa, el piñón o tempate en zonas diversas, así como algunas fuentes alternativas como los aceites y grasas usadas, el aceite de pescado y el sebo animal [9].

La producción actual de cultivos oleaginosos no es suficiente para satisfacer la posible demanda a gran escala de biodiésel, la cual se muestra en la tabla No. 1.2.

Tabla No 1.2. Proyección de la demanda de biodiésel en el Perú, calculada sobre la base de la demanda proyectada de Diesel N° 2 (millones de galones).

COMBUSTIBLE	AÑOS							
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Petroleo N° 2	905.00	925.00	965.00	1,060.00	1,090.00	1,138.00	1,168.00	1,212.00
Biodiesel (2%)	18.10	18.50	19.30	21.20	21.80	-	-	-
Biodiesel (5%)	-	-	-	-	-	56.90	58.40	60.60

Fuente: IIAP - SNV : Línea de Base sobre Biocombustibles en la Amazonia Peruana. Junio 2008

Esta dificultad de abastecimiento tiene como consecuencia que al comenzar a escasear el insumo nacional de las plantas para la producción, se tendría que comenzar a importar aceite vegetal; esto es inconveniente si se tiene en cuenta que el precio de los aceites vegetales como de los alimentos en general viene incrementándose de manera alarmante, como se muestra en la figura No. 1.5.

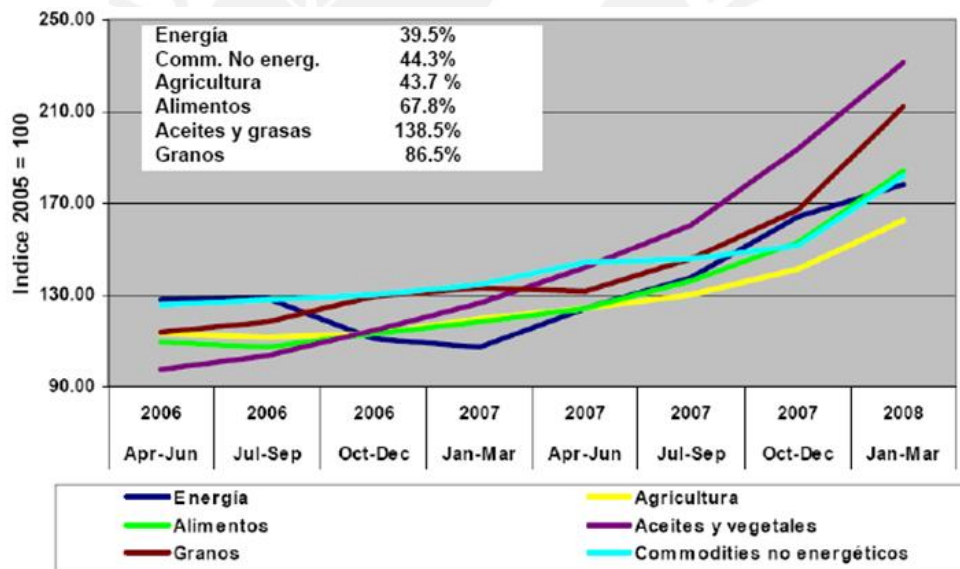


Fig. No 1.5. Porcentaje de aumento de precios en países de ingresos medios y bajos, entre el 1er trimestre de 2006 y el 1ro del 2008. (Fuente: a. Rodríguez, op.cit. A partir de Banco Mundial, Commodity Price data).

Además, el índice de población en estado de subnutrición en Perú asciende a más del 10% (CEPAL / FAO 2004); es por ello que se debe de considerar el impacto social de los agrocombustibles. Como ejemplo se puede mencionar que 200kg de maíz sirve para producir 1 tanque de combustible como también para alimentar a 400 personas. Debido a que Perú tiene aún un amplio potencial de crecimiento de cultivos oleaginosos es que se están desarrollando proyectos para la ampliación de estos cultivos. Frente a esto se ha dado ya las primeras voces de preocupación por el

peligro del cultivo indiscriminado, debido a que se requiere de grandes superficies de terreno para obtener materia prima, lo que puede llevar a la deforestación y la pérdida de captación de los gases de Efecto Invernadero como el CO_2 ; a esto se suma la utilización de fertilizante nitrogenado, gas que retiene 310 veces más calor que el CO_2 según se muestra en la tabla No. 1.3.

Tabla No 1.3. Potenciales de calentamiento global

	CO_2	CH_4	N_2O
100 años	1	21	310

Fuente: IPCC (Houghton et al, 1996)

Es importante mencionar los impactos sobre el hábitat de especies silvestres que no han sido consideradas ni objetadas por las autoridades ambientales nacionales (Ministerio del Ambiente y/o Ministerio de Agricultura), además de afectar los derechos territoriales de comunidades campesinas que habitan en su zona de influencia y que no han podido obtener títulos formales de propiedad de su tierra por razones económicas.

En cuanto a la producción de biodiésel a partir de aceite de pescado, aún se tiene poca experiencia en el mundo y por lo tanto se requiere investigación específica sobre el proceso de producción y la calidad de combustible que se obtendría; asimismo los precios del aceite de pescado son aún muy altos en comparación con los aceites vegetales.

Por último, muchas investigaciones demuestran que es viable y eficiente la producción de biodiésel a partir de aceites usados de cocina; esta podría tener como principal beneficio, evitar su vertimiento en los desagües y, por ende, a cuerpos de agua como mares, ríos o lagos; que significa disminuir con la contaminación hídrica (introducción de materias en el agua, que implique una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos asignados al recurso) al igual que la afectación del suelo. Un inconveniente inmediato supondría la logística de recolección que habría que implementar para el recojo de los aceites vegetales usados.

1.4. Tecnología actual para la producción de biodiésel

Se mencionará los métodos más difundidos de producción de biodiésel:

1.4.1. Transesterificación ácida

La Transesterificación se da con catalizadores ácidos como el fosfórico, sulfúrico, clorhídrico, etc. Las conversiones a ésteres son elevadas, pero la velocidad de reacción es extremadamente lenta; además requiere mayor cantidad de alcohol lo cual la hace menos atractiva económicamente. La separación del glicerol es difícil de realizar y se requieren materiales de construcción resistentes a los ácidos.

1.4.2. Transesterificación enzimática

La reacción enzimática es insensible a los ácidos grasos libres y al contenido de agua de los aceites usados de cocina (por tanto no se requiere el pretratamiento de los aceites usados de cocina); presenta como ventajas que no genera subproductos, la recuperación de productos es fácil, las condiciones de operación no son rigurosas y el catalizador es recuperable [1].

Tiene como desventajas que el catalizador es caro, la cinética de la reacción es muy lenta y, debido a la inactivación de la enzima por medio de Metanol, la reacción no llega a ser completa como para cumplir con los requerimientos exigidos por las normas técnicas de calidad [13].

1.4.3. Transesterificación heterogénea

Este proceso utiliza un catalizador sólido (insoluble en el alcohol y el aceite), presenta como ventaja que el catalizador no se incluye como una impureza, y son fácilmente recuperables al final de la reacción; la cinética de separación de los productos es rápida lo que simplifica el proceso de purificación de biodiésel. Además, el glicerol producido tiene una pureza más alta que en otros procesos [6]. La desventaja es que en la reacción se requiere mayor temperatura y presión, y además se suele realizar en dos etapas para alcanzar niveles de reacción máximos.

1.4.4. Transesterificación supercrítica

En este método los reactivos se llevan a las condiciones críticas del alcohol utilizado (generalmente Metanol), y se cargan al reactor. La cinética es 10 veces más rápida

que el mejor de los anteriores casos, con conversiones superiores al 99%. Posee como desventajas las condiciones extremas de operación (350°C y 30Mpa), que lo hacen inviable para la producción a gran escala [10].

1.4.5. Transesterificación alcalina

Dentro de estas la Transesterificación alcalina es el proceso más simple y más utilizado para fabricar biodiésel; ya que los catalizadores empleados (KOH, NaOH) son baratos, presentan menor corrosión que los catalizadores ácidos, se logra alcanzar conversiones superiores al 99% y la cinética es relativamente rápida; se puede añadir que no requiere equipos complicados y la separación de los productos es fácil de realizar. Presenta como desventaja la necesidad de tener aceites con ausencia total de agua, puesto que esta induce una hidrólisis con formación de jabones y pérdidas de éster; asimismo se requiere un bajo contenido de ácidos grasos libres, y otras impurezas. Luego de la Transesterificación, el biodiésel requiere de un postratamiento con la finalidad de disminuir el contenido de impurezas como restos de catalizador.

1.5. Proceso de producción de biodiésel a partir de aceites usados de cocina

Se explicará de manera general cada uno de los procesos por los que tiene que pasar la materia prima (aceites usados) para obtener biodiésel como producto. Tal como se muestra en la figura No. 1.6.

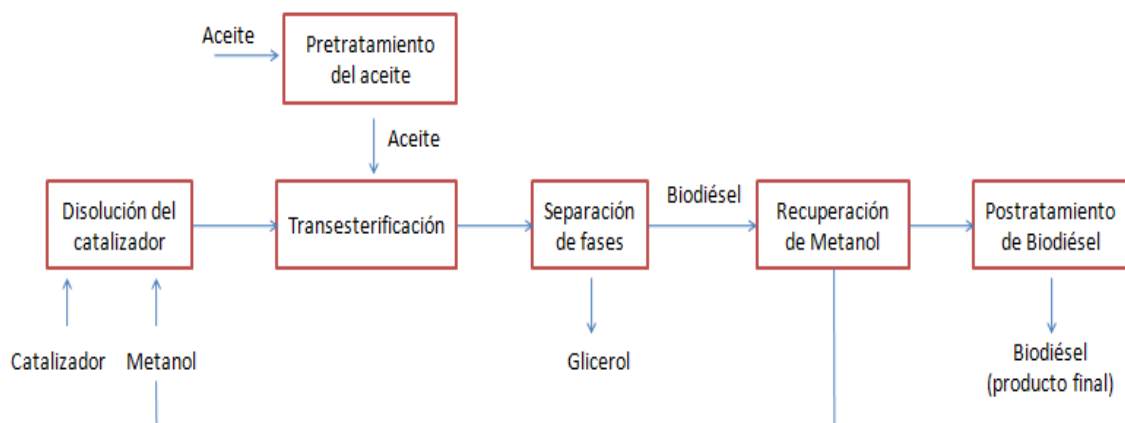


Fig. No 1.6. Proceso de producción de biodiésel por Transesterificación alcalina

1.5.1. Pretratamiento del aceite

El pretratamiento consiste en acondicionar los aceites usados de cocina para que puedan ser procesados con catálisis alcalina, ya que presentan como problema la presencia de gran cantidad de ácidos grasos libres, humedad e impurezas sólidas.

1.5.1.1. Filtrado

Consiste en la retención de impurezas sólidas y generalmente se hace con un tamiz de 5 micras. Puede efectuarse en caliente para agilizar el flujo del aceite o a baja temperatura “winterización” para eliminar grasas que solidifican (ceras) o productos con bajos puntos de fusión provenientes de los procesos de fritura.

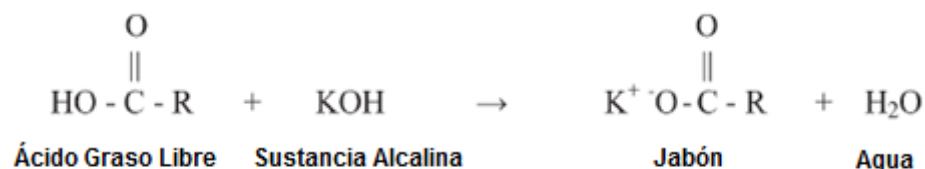
1.5.1.2. Desgomado

El desgomado con agua se realiza para reducir la cantidad de fosfolípidos y fosfátidos en los aceites. Se busca hidratar las gomas y hacerlas insolubles en el aceite, para posteriormente puedan ser removidas por decantación o centrifugación.

La cantidad de agua a usar debe ser similar al peso seco de las gomas a remover.

1.5.1.3. Neutralización, lavado y secado

Consiste en una reacción entre un ácido graso libre y una sustancia alcalina (NaOH, KOH) que lleva a una formación de agua y jabón [13].



El jabón es removido por centrifugación o decantación. Luego, el aceite se lava con agua para eliminar las últimas trazas de jabón, para finalmente pasar a un proceso de secado.

La cantidad de catalizador se añade en exceso para favorecer la separación de los jabones y evitar la formación de emulsiones.

Este proceso no es conveniente cuando la cantidad de ácidos grasos libres es significativa puesto que implica la pérdida de los ácidos grasos libres en forma de jabones; siendo más conveniente el proceso de esterificación.

1.5.1.4. Esterificación ácida

Al aceite se le añade una cantidad adecuada Metanol para reaccionar con los AGL que permite, al contrario de la neutralización, reaprovecharlos para producir biodiésel.



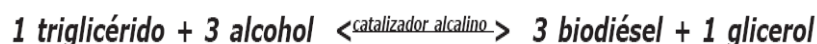
La reacción ácida es lenta y requiere mayores cantidades de alcohol, es por ello que el costo de recuperación de este alcohol determina la factibilidad de este proceso; además necesita retirar el agua generada puesto que puede detener la reacción, por lo que es necesario trabajar en dos o más etapas para ir separando el agua antes de continuar con el proceso y así obtener un mejor rendimiento.

El uso de ácido sulfúrico como catalizador produce efluentes ácidos contaminantes, es por esto que la esterificación ácida, con el uso de este catalizador, se justifica solo si la materia prima a utilizar tiene un contenido de AGL realmente alto.

De aquí en adelante el proceso es común independiente del tipo de materia prima, pudiéndose utilizar aceites usados de cocina como aceites vegetales vírgenes.

1.5.2. Transesterificación alcalina

Los aceites son mezclas complejas de Triglicéridos que en presencia de un alcohol más base, promueven una reacción denominada Transesterificación. Químicamente la reacción se da en una proporción molar de alcohol a Triglicérido de 3:1 y es equivalente a:



En la realidad la relación empleada es de 6:1 con la finalidad de desplazar la reacción hacia la formación de éster metílico (se obtiene una reacción completa y mejora la velocidad de conversión a ésteres).

El proceso global de Transesterificación es una secuencia de tres reacciones reversibles y consecutivas (ver ilustración en el anexo A1); los Triglicéridos son convertidos a diglicéridos, los cuales son convertidos a monoglicéridos y

posteriormente, en glicerol. En cada etapa de la reacción se produce una molécula de éster de un ácido graso.

Para que la reacción se lleve a cabo, es indispensable la presencia del catalizador, el cual mejora la velocidad de reacción y el rendimiento final [9].

Ya que la reacción química de Transesterificación es una reacción de equilibrio, ocurre lo siguiente: el aceite y el alcohol reaccionan para producir ésteres metílicos y glicerol, pero igualmente los ésteres metílicos pueden reaccionar con el glicerol para producir Triglicéridos y alcohol nuevamente. Por lo tanto para desplazar lo más posible el equilibrio hacia la derecha (para obtener ésteres metílicos), hay dos maneras de hacerlo: agregar más insumos (es por esto que se utiliza una razón molar alcohol : aceite 6:1 en lugar de 3:1) o quitar parte de los productos (el glicerol) y de ese modo forzar la reacción a avanzar aún más para producir el glicerol faltante para restablecer el equilibrio [9]. La segunda propuesta es la más atractiva económicamente y se logra realizando la Transesterificación en dos etapas. Consiste en agregar primero un 80% del alcohol y catalizador al aceite, se realiza la Transesterificación y se separa el glicerol; el producto se lleva a una segunda reacción con el 20% de alcohol y catalizador restante. Este proceso logra reducir la cantidad de Metanol que interviene en la reacción y mejorar la eficiencia de la misma [13].

A continuación se describen tres procesos, de Transesterificación alcalina, que en la actualidad son los más utilizados para la producción de biodiésel y las diferencias que existen entre el proceso de producción continuo y por lotes.

1.5.2.1. Producción por agitación y calor

En este proceso el aceite se calienta hasta llegar a la temperatura de consigna mientras que en otro reactor el Metanol es mezclado con el catalizador, para posteriormente hacer ingresar esta mezcla “Metóxido” dentro del reactor y comenzar con ello la etapa de Transesterificación a través de agitación por medio de un agitador de aspas, que ocurre en un tiempo determinado. La agitación también puede realizarse por medio de una bomba de recirculación.

Algunos estudios recomiendan que la reacción de Transesterificación ocurra a una presión determinada (2 – 4 bar), ya que agiliza la reacción y aumenta la conversión de ésteres.

1.5.2.2. Producción por ultrasonido

Teniendo en cuenta que la reacción de Triglicéridos con alcohol puede ocurrir solo en la región interfacial entre estos dos líquidos inmiscibles, un mezclado riguroso es requerido para incrementar el área de contacto entre los líquidos; por ello se comprende que la reacción mediante agitación sea lenta [14].

Es conocido que la irradiación ultrasónica produce en un líquido cavitación acústica, que da como resultado un mezclado rápido en el líquido. El elevado rendimiento bajo las condiciones de irradiación ultrasónica se debe a la elevada velocidad de mezclado y transferencia de masa entre el Metanol y los Triglicéridos. Los resultados muestran que el mezclado ultrasónico produce dispersión con tamaño de gota promedio 42% más pequeño que los generados usando agitación estándar, que conduce a mayor área de interfase para que se produzca Transesterificación [12].

Diversos autores señalan que la reacción por ultrasonido es de 3 a 5 veces más rápida que la reportada en la literatura para agitación mecánica; además presenta como ventaja que los reactivos son más baratos y las condiciones de operación no son tan rigurosas; haciendo plantas químicas menos costosas y pequeñas.

1.5.2.3. Producción por microondas

Se viene estudiando el uso de irradiación microondas para Transesterificación con catalizadores sólidos, donde el tiempo de reacción es de 1 – 2 minutos. Una de las limitaciones es la elevada energía que consume y la elevada condición de temperatura; se suma que es importante encontrar un catalizador más efectivo para la Transesterificación (Barbosa et al.).

1.5.2.4. Comparación entre el proceso continuo y por lote

La diferencia se encuentra en la etapa de decantación o separación de fases. Mientras que en el proceso continuo se extrae parte del glicerol de forma continua para posteriormente retirar el remanente en los hidrociclones, en el proceso por lotes (batch) se utiliza el reactor como medio absoluto de decantación y separación de fases, esto se logra aumentando el tiempo de residencia de la mezcla dentro de los

reactores, hecho que no podría ocurrir en el proceso continuo, dado que siempre hay un nuevo lote de aceite esperando ingresar al sistema.

1.5.3. Postratamiento del biodiésel

Luego de la reacción de Transesterificación, se requiere de un postratamiento de la mezcla de productos para asegurar que cumpla con los estándares de calidad exigidos, ver anexo A2. Los principales contaminantes obtenidos de la reacción pueden ser: Triglicéridos que no reaccionaron, parte de Metanol en exceso, posiblemente jabones, trazas de catalizador y glicerol. A continuación se describirá estos post procesos en el orden que comúnmente es aplicado.

1.5.3.1. Separación de fases

El proceso de separación de los productos principales de la reacción se basa en el hecho de que estos son poco solubles y que tienen densidades diferentes. Por ello pueden ser separados por gravedad en un decantador o como alternativa a esta se puede utilizar una centrífuga, que agiliza la separación pero requiere de una mayor inversión en equipos.

La agitación en la reacción de Transesterificación origina que el glicerol se disperse en finas gotitas en toda la mezcla, lo que acarreará un mayor tiempo de decantación de las partículas en la fase de glicerol. Por esta razón, la agitación se disminuye a medida que la reacción progresa, lo que permite disminuir el tiempo necesario para la separación de las fases (Van Gerpen et al., 2004).

Otro factor importante es el pH del medio de reacción. Cuanto más cerca al neutro más rápida será la separación de fases. Esta es una de las razones para minimizar el uso de catalizador [10].

Debido a que el Metanol contribuye a la separación de fases e impide que la reacción de Transesterificación sea inversa, se entiende el hecho que al producto generalmente se le separa antes de recuperar el Metanol.

1.5.3.2. Recuperación de Metanol y lavado del biodiésel

Los métil – ésteres se someten a temperatura y vacío para evaporar el Metanol y recuperarlo, esto permite el ahorro de insumos y evita las emisiones de Metanol al ambiente. Luego son llevados a un proceso de lavado cuyo principal interés es remover vestigios de catalizador, jabón, Metanol y glicerol. El lavado se realiza por aspersion de agua caliente (50 a 60 °C); la aspersion no debe promover la agitacion para evitar la precipitacion de los ésteres de ácidos grasos saturados y la formacion de emulsiones. El lavado se realiza con agua acidulada con el objetivo de neutralizar el catalizador remanente, formando una sal que es eliminada conjuntamente con el agua de lavado. También separa los jabones que se puedan haber formado en la reaccion, convirtiéndolos en ácidos grasos libres (que se quedan en el biodiésel) y en sales solubles en agua. Este lavado se realiza al menos dos veces con agua nueva cada vez, hasta que se halla eliminado todo el residual de catalizador alcalino y el efluente tenga un color claro.

1.5.3.3. Secado

La separacion entre las fases de agua y éster ocurre rápidamente y de forma bien definida. Sin embargo, aunque se considere insoluble al biodiésel con el agua, este combustible lleva considerablemente más agua que el petróleo diesel clásico. El biodiésel puede contener hasta 1500 ppm de agua disuelta y el diesel tiene generalmente un contenido de 50 ppm [6]. Esta solubilidad del agua en éster supera el contenido especificado por las normas de calidad, ver anexo A2; por lo tanto el biodiésel tiene que pasar por un proceso de secado, generalmente por secadores por vacío que opera a una presión muy baja para evaporar el agua a temperatura mucho más baja. Debido a que la concentracion de agua es baja, se pueden utilizar tamices moleculares o geles de silicona; una ventaja de estos procesos es que son pasivos.

1.6. Marco Legal Nacional asociado al biodiésel

En Perú, existen Normativas y Organismos de carácter Multisectorial que regulan el desarrollo de los biocombustibles los cuales se mencionarán a continuacion:

En la actualidad existen tres normas relacionadas a la producción de biodiésel:

- Ley N° 28054, Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles.
- D.S. N° 013-2005 EM Reglamento de la Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles.
- D.S. N° 021-2007-EM Reglamento de Comercialización de Biocombustibles.

Los organismos competentes respecto al desarrollo de los biocombustibles en Perú de acuerdo a los reglamentos mencionados son los siguientes:

- MINAG.- promueve el desarrollo de las áreas disponibles con aptitud agrícola para la producción de biocombustibles.
- MEM.- autorización para la comercialización de biocombustibles y sus mezclas con gasolinas y el diesel 2.
- PRODUCE.- autorización para la instalación y funcionamiento de las plantas productoras de biocombustibles.
- Osinergmin.- supervisión y fiscalización.
- ProInversion.- programa del uso de biocombustibles – PROBIOCOM.

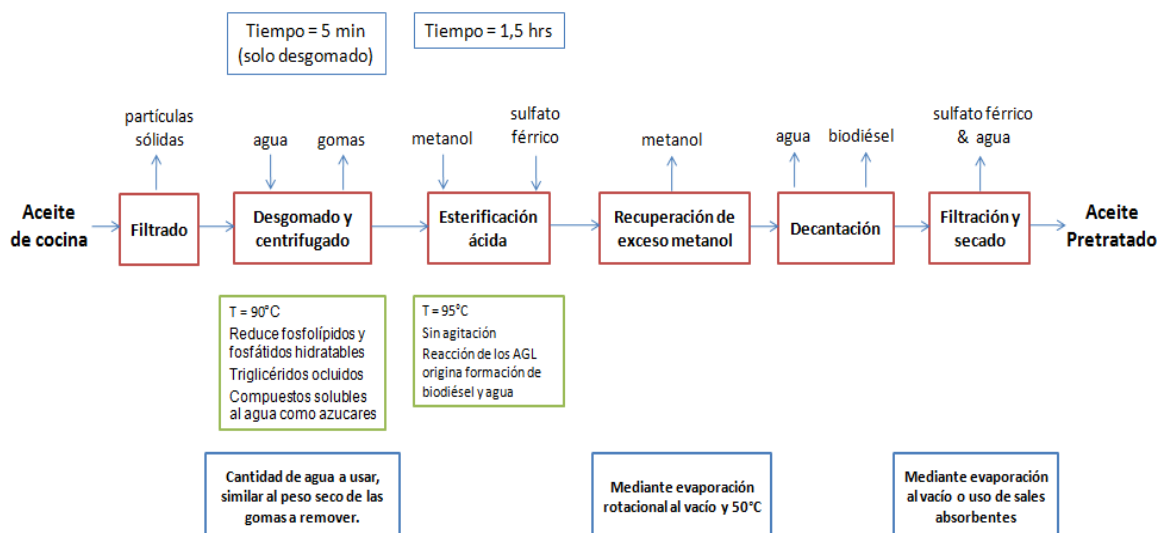
CAPÍTULO 2 ELABORACION DEL CONCEPTO DE LA PLANTA

2.1. Proceso de producción a adoptar

La planta piloto ha de ser para la producción de biodiésel utilizando como materia prima aceites usados de cocina; el proceso a adoptar será tipo batch o por lotes, cuya capacidad será de 48 litros, a continuación se describe los procesos que se utilizarán para la producción de biodiésel.

2.1.1. Pretratamiento

Los aceites usados de cocina tienen varios componentes indeseables tales como grandes cantidades de ácidos grasos libres (AGL), gomas, humedad y otras impurezas que son formados durante la fritura. Ya que el contenido de AGL en los aceites usados de cocina es elevado, el proceso de refinación sugerido es la esterificación ácida.



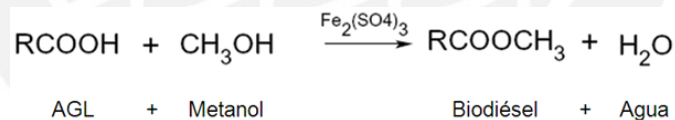
2.1.1.1. Desgomado

Previo al desgomado, las impurezas sólidas se separan del aceite reciclado haciéndolo fluir a través de un tamiz de 5 micras.

El desgomado con agua consiste en reducir la cantidad de fosfolípidos y fosfátidos en los aceites. El aceite se calienta a aproximadamente 90°C, se agregan pequeñas cantidades de agua para hidratar las gomas y hacerlas insolubles en el aceite. La cantidad de agua a usar debe ser similar al peso seco de las gomas a remover. Luego de 5 minutos las gomas hidratadas pueden ser removidas por centrifugación o decantación. Se emplea ácido cítrico y/o fosfórico para mejorar la velocidad y la eficacia del proceso y permitir la separación de las gomas no hidratables. El ácido puede estar disuelto en agua para facilitar la separación y luego el aceite es lavado con agua [9].

2.1.1.2. Esterificación ácida

Este proceso elimina los AGL que contiene el aceite, convirtiéndolos en biodiésel; la reacción se da de la siguiente manera:



Al aceite llevado a una temperatura de 95°C, se le agrega Metanol en una proporción respecto al aceite de 10:1 y catalizador ácido que en este caso sería sulfato férrico en una proporción de 2 wt% y se deja reaccionar por un periodo de 1.5 horas. Debido a la temperatura a la que se da la reacción, este proceso no necesita de agitación; el sulfato férrico es insoluble en el aceite, fácil de separar y reutilizable; comparado con otras esterificaciones ácidas utiliza menor cantidad de Metanol y el sulfato férrico es amigable con el ambiente, lo cual hace que este proceso sea más eficiente [15].

2.1.1.3. Filtrado y secado

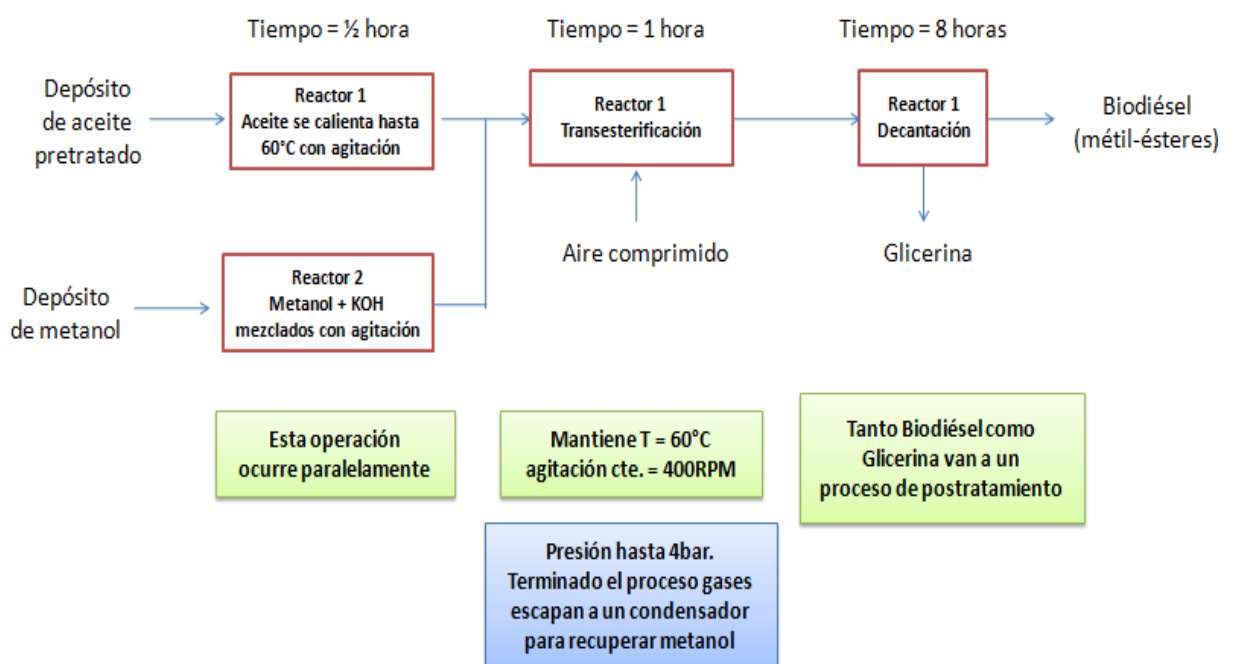
Debido a que se trata de aceites usados de cocina, la posible humedad que contenga

se retira por medio de un evaporador rotacional (previa filtración del sulfato férrico) por 1 hora en condiciones de vacío y a una temperatura de 90°C.

2.1.2. Transesterificación

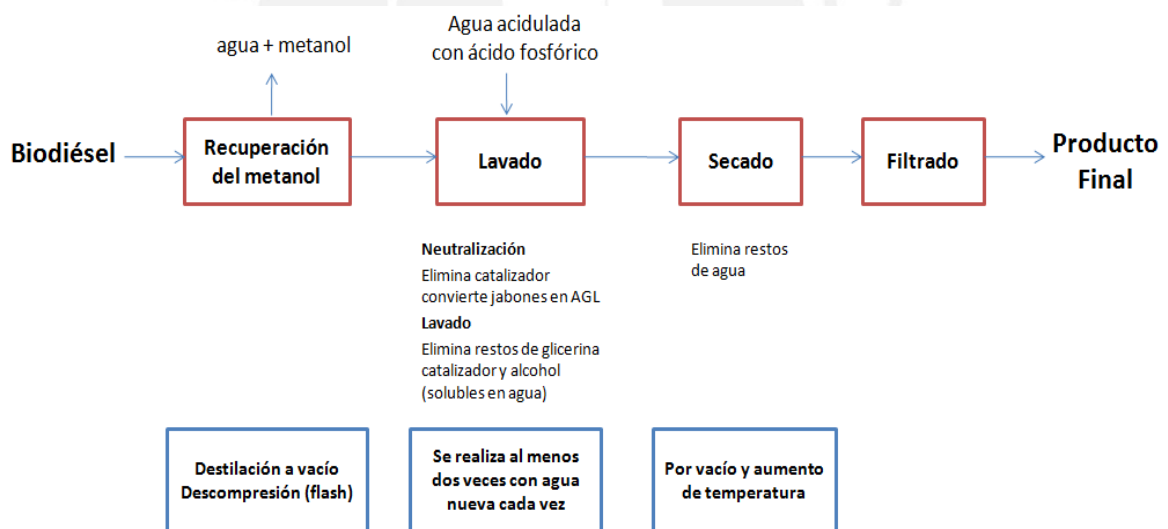
A continuación se menciona los pasos a seguir en el proceso de Transesterificación: se comienza con la disolución de catalizador sólido KOH (hidróxido de potasio) en el alcohol CH_3OH (Metanol), el tiempo de agitación para que la disolución sea total es media hora; la cantidad de catalizador a utilizar depende de la acidez del aceite, pero el valor más usual es de 1 wt% con una proporción de Metanol sobre los Triglicéridos de 6:1. Paralelamente en otro reactor se va elevando la temperatura del aceite a 60°C. Luego se mezcla el Metóxido ($CH_3OH + KOH$) con el aceite para realizar la reacción de Transesterificación a una presión de 4 bar, con agitación constante a 400 RPM y manteniendo la temperatura a 60°C. El tiempo de reacción es aproximadamente una hora. Como resultado se tiene dos fases: biodiésel (que contiene Metanol, restos de catalizador y jabones) y como fase más densa a la Glicerina que consiste en una mezcla de glicerol, jabones, catalizador, Metanol y agua.

Se requiere de un tanque decantador donde ambas fases se puedan separar por gravedad en un tiempo de 8 horas, o de una centrifuga para separarlas rápidamente.



2.1.3. Postratamiento

El biodiésel obtenido pasa a un proceso de postratamiento en donde se le somete a temperatura 50°C y vacío para recuperar parte del Metanol en exceso, luego es llevado a un proceso de lavado para separar todas las impurezas. El lavado se realiza con agua acidulada (ácido fosfórico o cítrico) que se mezcla con el biodiésel, neutralizando el catalizador residual presente y separa los jabones que se puedan haber formado en la reacción. Los jabones se convierten en ácidos grasos libres (que se quedan en el biodiésel) y en sales solubles en agua. Así, los restos de catalizador, jabón, sales, Glicerina y Metanol se quedan en el agua de lavado. Este lavado se realiza al menos dos veces con agua nueva cada vez hasta que el efluente tenga un color claro. Por último el biodiésel pasa a un proceso de secado (calor y vacío) para separar toda el agua restante [9].



2.2. Fases de la metodología del diseño

Dentro de todo el proceso de producción de biodiésel adoptado; esta propuesta se concentra en el diseño y fabricación del módulo de Transesterificación en el cual se realizarán los ensayos de la parte central del proceso de producción de biodiésel.

Se siguió la metodología de diseño [16], la cual se aplica para organizar la actividad creadora del diseñador y acelerar el proceso de diseño; asimismo permite optimizar en

cada una de sus fases, lo que obliga a que las soluciones entregadas por el diseñador sean las mejores, a continuación se describe las fases:

2.2.1. Lista de exigencias

Tiene como finalidad clasificar y cuantificar los parámetros de fabricación para lograr un buen diseño. Aquí se detalla lo que el solicitante espera del diseño y lo que el diseñador está obligado a cumplir al momento de diseñar.

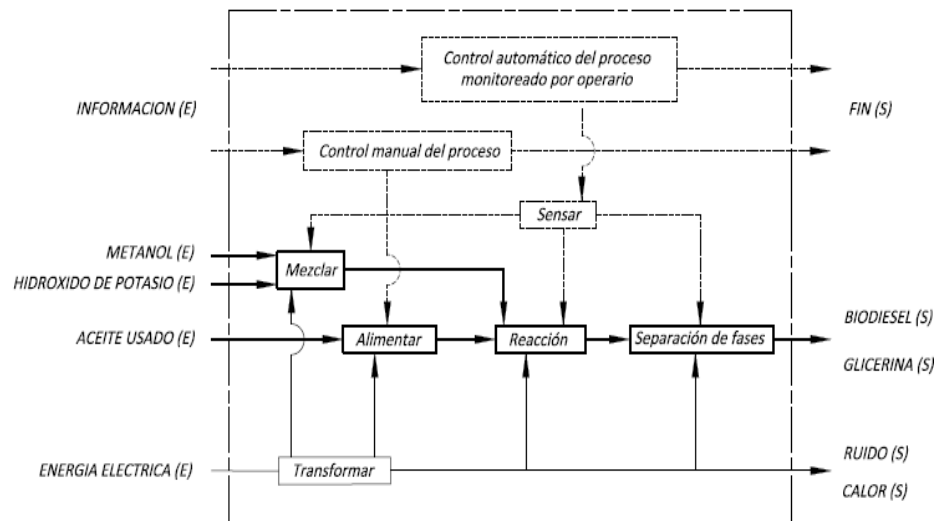
LISTA DE EXIGENCIAS		
PROYECTO:		DISEÑO DEL MÓDULO DE TRANSESTERIFICACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITES USADOS DE COCINA.
CLIENTE:		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Nº	Deseo "D" o Exigencia "E"	Descripción
1	E	Función principal: Procesar mediante Transesterificación por lotes 40 litros de aceite reciclado de cocina pretratado, para obtener biodiésel.
2	E	FABRICACIÓN: El proyecto podrá fabricarse en los talleres del país usando materiales de buena calidad de fácil adquisición y con la tecnología disponible en el medio. Se deberá cumplir con las normas AWS D1.6 requeridas para un correcto proceso de soldadura para el caso de los reactores de acero inoxidable. Los materiales empleados para la fabricación tendrán compatibilidad con las sustancias utilizadas y no contaminarán el aceite reciclado de cocina.
3	E	GEOMETRÍA: El sistema deberá ocupar el menor espacio posible, no debiendo exceder los $2 \times 2 \times 3 \text{ m}^3$ de volumen.
4	E	ENERGÍA: Se deberá tener líneas de energía eléctrica de 380V trifásica y 220V monofásica. Se aprovechará la energía potencial en una parte del proceso.
5	E	MATERIA: Se procesará aceite usado de cocina, pudiendo también utilizar vegetal virgen. El flujo de aceite será por lotes.
6	E	MONTAJE: El sistema será de fácil ensamblaje e instalación en el lugar de trabajo.
7	E	TRANSPORTE: El sistema deberá poder ser movilizadofácilmente, razón por la cual se usarán uniones desmontables para el ensamble.

8	E	MANTENIMIENTO: Se tendrá fácil acceso a las partes que necesiten mantenimiento. Debido al proceso batch, este se realizará luego de cada ensayo, requiriéndose de 2 personas por un periodo de 1 hora.
9	E	CONTROL DE CALIDAD: Al reactor de transesterificación se le hará la prueba de hermeticidad neumática según la norma ASME, sección XIII, división 1, y el biodiésel producido cumplirá con la norma vigente en Perú para su utilización como combustible.
10	E	COSTOS: Se minimizarán los costos en la medida que sea posible. El costo total del diseño, fabricación y montaje no deberá exceder los US\$ 5000.
11	D	SEÑALES: El sistema contará con señales que indiquen el inicio y fin de los procesos más importantes.
12	E	SEGURIDAD: Se deberá evitar el contacto entre los elementos móviles del sistema y el/los operarios; asimismo el sistema contará con una parada de emergencia y deberá ser ubicado en un lugar que cuente con ventilación adecuada.
13	E	ERGONOMÍA: Los elementos de manejo serán de fácil acceso para el/los operarios.

2.2.2. Estructura de funciones

El proceso completo por el que debe pasar el aceite reciclado para que se obtenga como producto biodiésel que cumpla con los estándares de calidad, se detallará en la estructura de funciones que ha de tener la planta piloto (ver anexo A3). A continuación se ilustra la estructura de funciones que rige el funcionamiento del módulo de Transesterificación.

ESTRUCTURA DE FUNCIONES DEL MÓDULO DE TRANSESTERIFICACIÓN



2.2.3. Morfología de funciones

La función de la matriz morfológica es presentar una serie de posibles soluciones para las distintas funciones parciales del proceso, esto permitió realizar un estudio de todas las diversas alternativas viables para cada función y así (realizando una combinación factible de los correspondientes portadores de funciones) encontrar diversos conceptos de solución que conlleven a la adopción de la solución óptima.

El esquema representativo de la matriz es el siguiente: en la primera columna de la izquierda se indica el nombre de las funciones a realizar y en las demás columnas las alternativas propuestas para cada función; las mejores alternativas serán unidas a través de flechas para obtener de esta manera un concepto de solución.

Como resultado del análisis realizado en la matriz morfológica (ver anexo A4) se obtienen tres conceptos de solución como los más relevantes, a las cuales se le harán una descripción y representación gráfica. Cabe mencionar que el suministro de Metóxido es igual para todos los conceptos de solución y se hará aprovechando la diferencia de alturas entre los reactores (bombeo por gravedad).

2.2.3.1. Concepto de solución No. 1

El aceite reciclado es suministrado por una persona a través de un recipiente, luego se realiza la reacción, como se explicó en el acápite 1.5.2.1, a través de agitación más calor y presión, por lo que se necesita un motor eléctrico, una resistencia eléctrica y un compresor de aire para suministrar estos requerimientos respectivamente. En esta solución la separación de fases luego de la reacción se haría aprovechando la diferencia de densidades de los productos por medio de decantación; es por ello que el reactor tendría una parte cónica en la parte inferior para que al momento de descarga se retire primero la Glicerina como parte más densa del producto de la reacción y luego el biodiésel.

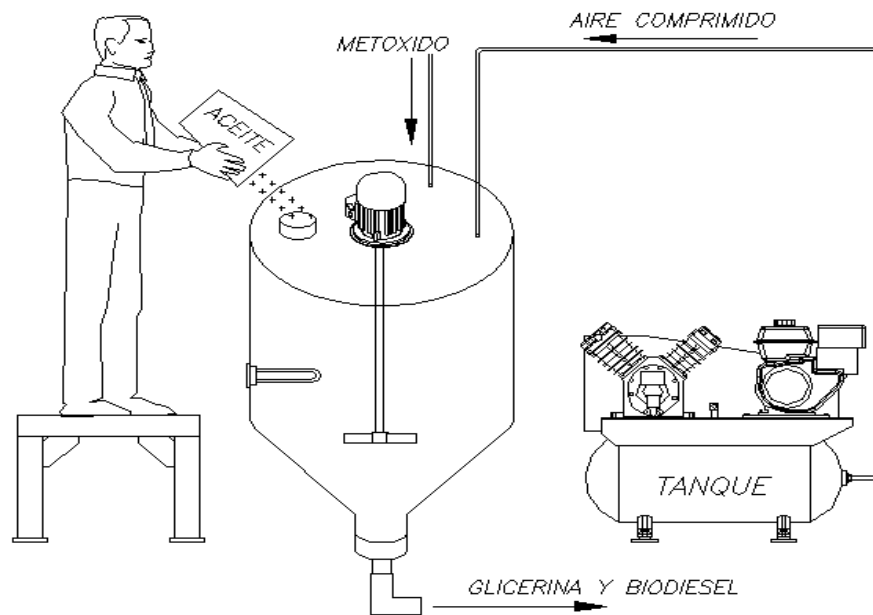


Figura No. 2.1. Concepto de solución 1

2.2.3.2. Concepto de solución No. 2

En este concepto de solución el aceite reciclado es suministrado por medio de una bomba manual y la agitación necesaria para lograr la reacción se da por medio de una bomba de recirculación. Terminada la reacción el fluido pasa a una separadora centrífuga, en la cual los fluidos no miscibles se separan por medio de la aceleración centrífuga mediante giro acelerando el proceso de separación de productos.

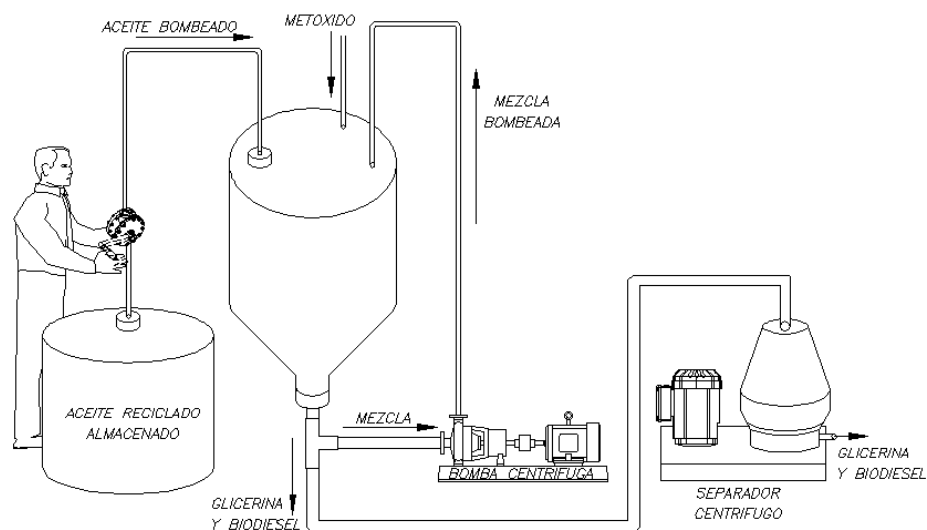


Figura No.2.2. Concepto de solución 2

2.2.3.3. Concepto de solución No. 3

En este concepto de solución el aceite reciclado es suministrado por medio de una bomba eléctrica centrífuga y la reacción se da, como se explicó en el acápite 1.5.2.2 por medio de irradiación ultrasónica. Terminada la reacción la mezcla pasa a otro reactor en el cual se realiza una separación electrostática (usando alto voltaje y bajo amperaje) de la Glicerina acelerando así el proceso de separación de productos.

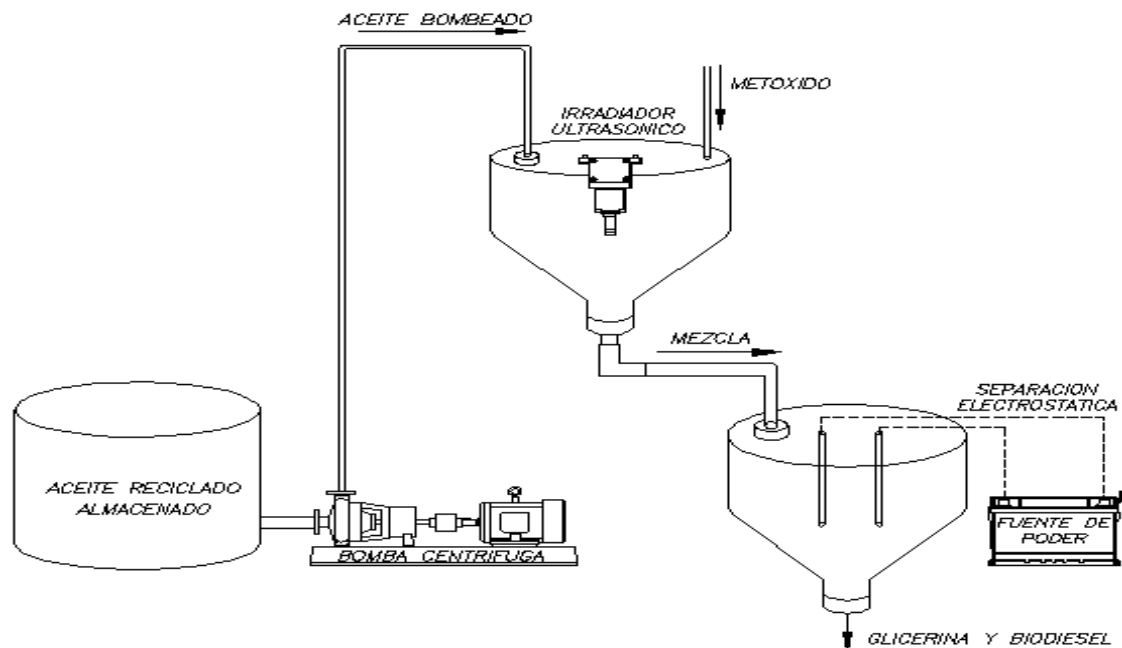


Figura No.2.3. Concepto de solución 3

2.2.4. Determinación del concepto óptimo

Para evaluar los conceptos de solución determinados, se realizó dos cuadros comparativos en los cuales se tiene como parámetros a evaluar tanto los aspectos económicos como técnicos. Cada criterio se evalúa comparándolos con una solución ideal hipotética como referencia para encontrar la solución óptima. El rango de valores del puntaje se encuentra entre 0 a 4, siendo:

0	=	No aceptable
1	=	Casi aceptable.
2	=	Suficiente.
3	=	Bien.
4	=	Muy bien o calificación ideal.
g	=	Factor que cuantifica la importancia de los criterios a evaluar

Tabla No.2.1. Evaluación técnica de los conceptos de solución

DISEÑO MECÁNICO - EVALUACIÓN DE CONCEPTOS DE SOLUCIÓN										
Valor Técnico										
Aspectos Técnicos			PROYECTOS							
			CONCEPTO DE SOLUCIÓN 1		CONCEPTO DE SOLUCIÓN 2		CONCEPTO DE SOLUCIÓN 3		CONCEPTO DE SOLUCIÓN IDEAL	
Nº	Criterios	g	p	g*p	p	g*p	p	g*p	p	g*p
1	Forma	3	3	9	3	9	3	9	4	12
2	Diseño	4	3	12	2	8	2	8	4	16
3	Seguridad	4	2	8	2	8	3	12	4	16
4	Fabricación	3	3	9	3	9	2	6	4	12
5	Montaje	3	3	9	2	6	2	6	4	12
6	Buen uso de energía	4	2	8	2	8	3	12	4	16
7	Rapidez	4	2	8	2	8	4	16	4	16
8	Confiabilidad	3	4	12	2	6	3	9	4	12
9	Facilidad de manejo	3	3	9	3	9	3	9	4	12
10	Mantenimiento	3	2	6	2	6	2	6	4	12
11	Automatización	2	2	4	2	4	3	6	4	8
12	Calidad de trabajo	4	3	12	2	8	4	16	4	16
TOTAL		40	32	106	27	89	34	115	48	160
Valor técnico			0.67	0.66	0.56	0.56	0.71	0.72	1	1
Orden				2		3		1		

Tabla No.2.2. Evaluación económica de los conceptos de solución

DISEÑO MECÁNICO - EVALUACIÓN DE CONCEPTOS DE SOLUCIÓN										
Valor Económico										
Aspectos Económicos			PROYECTOS							
			CONCEPTO DE SOLUCIÓN 1		CONCEPTO DE SOLUCIÓN 2		CONCEPTO DE SOLUCIÓN 3		CONCEPTO DE SOLUCIÓN IDEAL	
Nº	Criterios	g	p	g*p	p	g*p	p	g*p	p	g*p
1	Número de piezas	2	3	6	2	4	2	4	4	16
2	Fácil adquisición	3	3	9	3	9	2	6	4	12
3	Costo de tecnología	3	3	9	2	6	2	6	4	16
4	Costos diversos	3	3	9	2	6	2	6	4	16
5	Productividad	4	3	12	2	8	4	16	4	12
6	Pocos desperdicios	4	3	12	2	8	4	16	4	12
7	Número de operarios	2	2	4	2	4	2	4	4	8
8	Facilidad de montaje	3	3	9	2	6	2	6	4	12
9	Fácil mantenimiento	2	2	4	3	6	2	4	4	16
10	Costos de operación	4	3	12	2	8	3	12	4	16
11	Contaminación	4	3	12	2	8	3	12	4	12
12	Fácil reciclaje	3	2	6	2	6	3	9	4	12
TOTAL		37	33	104	26	79	31	101	48	148
Valor económico			0.68	0.7	0.54	0.53	0.65	0.68	1	1
Orden				1		3		2		

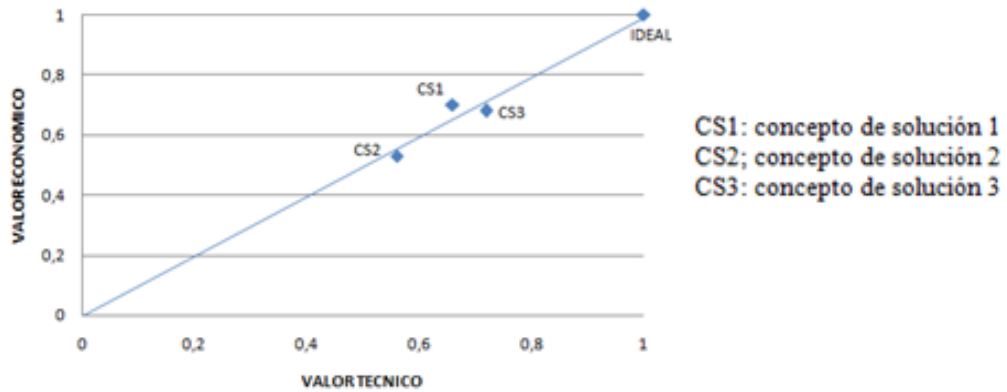


Figura No.2.4. Diagrama de Evaluación

Del gráfico de evaluación Técnico - Económico y de los valores de las tablas se concluye que el concepto de solución No. 3 es el óptimo. Este trabajo de tesis se concentra en el diseño y fabricación del concepto de solución No. 1 puesto que se tiene mayor información de la metodología del proceso, parámetros tanto de tiempo de reacción como de las cantidades de insumos a requerir y recomendaciones de fuentes bibliográficas revisadas.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL MÓDULO DE TRANSESTERIFICACIÓN, SELECCIÓN DE EQUIPOS



Figura No. 3.1. Módulo de Transesterificación

El material empleado para la fabricación de los reactores fue AISI 304 (acero inoxidable austenítico), debido a la apropiada compatibilidad con las sustancias empleadas en la producción de biodiésel, según se muestra en la tabla No. 3.1.

Tabla No 3.1. Compatibilidad de algunos materiales con las sustancias que intervienen en la producción de biodiésel [9], [17].

Material	KOH	Metanol	Glicerina	Ácidos grasos	Sulfato férrico	Diesel 2
AISI 304	Buena	Excelente	Excelente	Buena	Buena	Excelente

Este material tiene la ventaja de ser una opción económicamente intermedia respecto a otros materiales; además presenta buenas propiedades mecánicas, que lo hace

seguro para el diseño tanto de recipientes a presión como para recipientes que contengan fluido. Las propiedades mecánicas del AISI 304 son las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Resistencia de fluencia} & : \quad \sigma_f = 30000 \text{ lb/pulg}^2 \approx 205 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Resistencia última} & : \quad \sigma_b = 70000 \text{ lb/pulg}^2 \approx 480 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

3.1. Dimensionamiento de los reactores

Se inició el dimensionamiento teniendo en cuenta las siguientes consideraciones dadas para un sistema de agitación:

- El tipo y localización del agitador, las proporciones del tanque, el número y dimensiones de las placas deflectoras, entre otros, afectan la velocidad de circulación e interacción de las moléculas de los diferentes líquidos, los modelos de velocidad y el consumo de potencia.
- Generalmente se emplea un agitador del tipo turbina y el número de placas deflectoras es de 4; asimismo el número de palas del agitador varía entre 4 y 16, pero generalmente es de 6 u 8. [17]
- Los factores de forma dependen del tipo y disposición del equipo de agitación. Los cuales presentan curvas típicas que sirven para calcular la potencia requerida para la agitación. Ver figuras No. 3.20 y 3.21.

Se colocaron 4 placas deflectoras para evitar los remolinos y la formación de vórtices, asimismo en el reactor de Metóxido y de Transesterificación se eligió un agitador del tipo turbina de 4 y 6 palas verticales respectivamente.

Se dimensionó el reactor y el agitador de Transesterificación cumpliendo con los siguientes factores de forma:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{V}{D_a} = 1 \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{4} \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{10} \quad \frac{H}{D_t} = 1$$

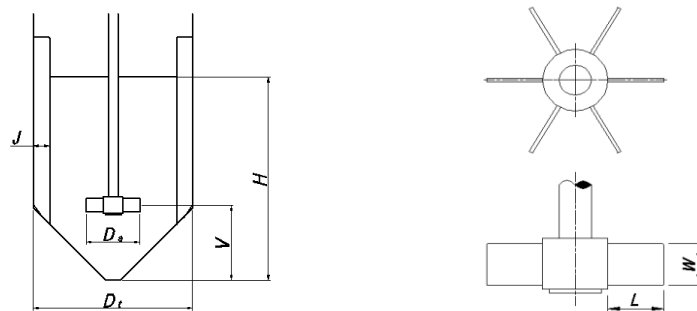


Figura No. 3.2. Diseño del reactor de Transesterificación: dimensiones.

La capacidad será de 48 litros en total, de los cuales 40 litros son de aceite reciclado pretratado y 8 litros de Metóxido.

$$V_{TOTAL} = V_{metanol} + V_{aceite}$$

$$V_{TOTAL} = 8 + 40 = 48 \text{ l} = 0,048 \text{ m}^3$$

Se sabe también que:

$$V_{TOTAL} = V_{TUBO} + V_{CONO}$$

Entonces, el volumen total del reactor como mínimo debe ser:

$$\frac{\pi \times D_t^2}{4} \times h_{tubo} + \frac{1}{3} \pi \left(\frac{D_t}{2}\right)^2 h_{cono} \geq 0,048 \text{ m}^3$$

Donde:

h_{tubo} (mm) : Altura total de la parte cilíndrica del recipiente.

h_{cono} (mm) : Altura total de la parte cónica del recipiente.

Considerando

$$h_{cono} = V$$

$$h_{tubo} = H$$

Entonces, combinando las relaciones de forma:

$$h_{cono} = V = \frac{D_t}{3}$$

$$h_{tubo} = H = D_t$$

Reemplazando:

$$\frac{\pi \times D_t^2}{4} \times D_t + \frac{1}{3} \pi \left(\frac{D_t}{2}\right)^2 \times \frac{D_t}{3} \geq 0,048 \text{ m}^3$$

$$D_t \geq 380 \text{ mm}$$

Se eligió un tubo de $\varnothing = 16''$, entonces cumpliendo con los factores de forma las dimensiones del agitador y del reactor son las siguientes:

$D_t = 400 \text{ mm}$	$D_a = 136 \text{ mm}$	$V = 188 \text{ mm}$
$J = 41 \text{ mm}$	$W = 34 \text{ mm}$	$L = 43 \text{ mm}$

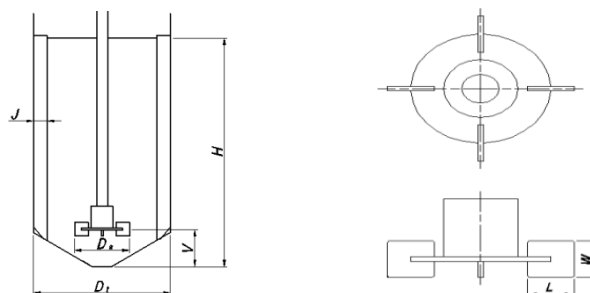


Figura No. 3.3. Diseño del reactor de Metóxido: dimensiones.

El reactor de Metóxido, como se aprecia en la figura No. 3.3, se dimensionó cumpliendo con los siguientes factores de forma:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{V}{D_a} = 1 \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \quad \frac{H}{D_t} = 1$$

La máxima capacidad a contener es de 15 litros de Metóxido. Se realizó el procedimiento anteriormente empleado (ver anexo A5), en donde se obtiene que:

$$D_t \geq 258 \text{ mm}$$

El valor sugerido solo es un referente y como medida cercana, se eligió un tubo de $\phi = 10''$, entonces cumpliendo con los factores de forma las dimensiones del agitador y del reactor son las siguientes:

$D_t = 254 \text{ mm}$	$D_a = 100 \text{ mm}$	$V = 69 \text{ mm}$
$J = 25 \text{ mm}$	$W = 25 \text{ mm}$	$L = 25 \text{ mm}$

3.2. Reactor de Transesterificación

Se diseña para operar a la temperatura de 60°C y a la presión de 4 bar; se decidió optar por esta geometría teniendo en cuenta que la máxima capacidad a contener será de 48 litros de aceite reciclado más Metóxido, así como los accesorios que deben estar conectados sobre el reactor. La parte cónica sirve para decantar las dos fases formadas de la reacción (biodiésel y Glicerina) y para vaciar todo el fluido del reactor. La operación a la temperatura de 60°C (140°F) hace que la resistencia a la fluencia disminuya (ver anexo A6) al valor de **[18]**:

$$\sigma_{AISI304} = 15700 \text{ lb/pulg}^2 \approx 110 \text{ N/mm}^2$$

A continuación se muestra las características geométricas del reactor:

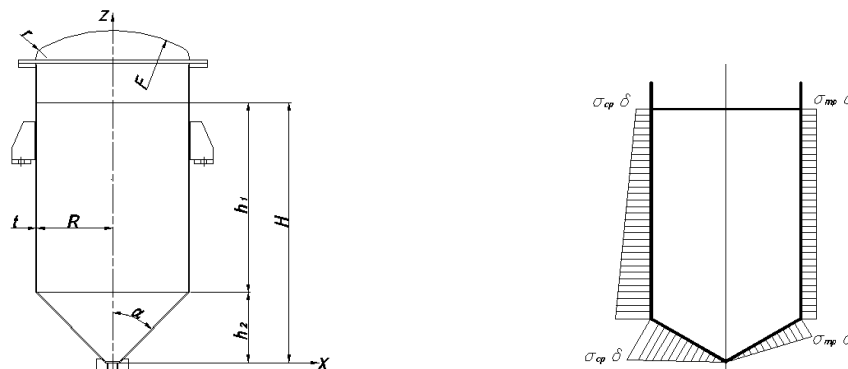


Figura No. 3.4. Izquierda: reactor de Transesterificación. Derecha: diagrama de tensiones normales circunferenciales y meridianales en paredes del reactor.

Para efectos de cálculo, se consideró que el reactor debe tener un mismo espesor de pared en el cilindro y el cono. Además, se consideró como presión de diseño “ $P_{diseño}$ ” a la presión de prueba hidrostática que es 1,5 veces la presión de operación. Esta, considera la presión del fluido y de cualquier otra sustancia contenida en el recipiente.

$$P_{operación} = 4 \text{ bar}$$

$$P_{diseño} = 1,5 \times P_{operación} = 6 \text{ bar} \approx 87,1 \text{ psi}$$

3.2.1. Cálculo del espesor del reactor (cilindro y cono)

A continuación, se calculará el mínimo espesor de pared que deben tener las partes del reactor para soportar la presión de diseño y la cantidad de mezcla a contener, para así determinar y luego seleccionar un espesor de pared adecuado.

Según la Teoría Membranal, los esfuerzos circunferencial “ σ_{cp} ” y meridional “ σ_{mp} ” que se originan en el recipiente, como se muestran en la figura No. 3.4, son máximos en la unión cono-cilindro. Siendo los valores de los esfuerzos máximos los siguientes:

En la parte cónica del recipiente:

$$\sigma_{cp} = \frac{P_{diseño} \times R}{t \times \cos\alpha} + \frac{\gamma \times h_1 \times R}{t \times \cos\alpha}$$

$$\sigma_{mp} = \frac{P_{diseño} \times R}{2 \times t \times \cos\alpha} + \frac{\gamma \times R}{2 \times t} \left(\frac{h_1}{\cos\alpha} + \frac{R}{3 \operatorname{sen}\alpha} \right)$$

En la parte cilíndrica del recipiente:

$$\sigma_{cp} = \frac{P_{diseño} \times R}{t} + \frac{\gamma \times h_1 \times R}{t}$$

$$\sigma_{mp} = \frac{P_{diseño} \times R}{2 \times t} + \frac{\gamma \times R}{2 \times t} \left(h_1 + \frac{R}{3} \operatorname{ctg}\alpha \right)$$

Estas fórmulas fueron deducidas a partir de la Teoría Membranal y puede verse en el anexo A7. Asimismo en los anexos A8 y A9 se puede ver el cálculo de la densidad de la mezcla “ ρ_{mezcla} ” y la altura de la parte cilíndrica con fluido “ h_1 ” respectivamente:

Siendo:

$H = 494 \text{ mm}$	$h_1 = 308,2 \text{ mm}$	$h_2 = 185,8 \text{ mm}$	$\gamma_{mezcla} = 8,81 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$
$\alpha = 45^\circ$	$R = 203,2 \text{ mm}$	$P_{diseño} = 0,6 \text{ N/mm}^2$	$\rho_{mezcla} = 898,3 \text{ kg/m}^3$

Reemplazando valores:

En la parte cónica del recipiente

$$\sigma_{cp} = \frac{0,6 \times 203,2}{t \times 0,707} + \frac{8,81 \times 10^{-6} \times 308,2 \times 203,2}{t \times 0,707} = \frac{172,45}{t} + \frac{0,78}{t} = \frac{173,23}{t}$$

$$\sigma_{mp} = \frac{0,6 \times 203,2}{2 \times t \times 0,707} + \frac{8,81 \times 10^{-6} \times 203,2}{2 \times t} \left(\frac{308,2}{0,707} + \frac{203,2}{2,12} \right) = \frac{86,22}{t} + \frac{0,476}{t} = \frac{86,7}{t}$$

En la parte cilíndrica del recipiente

$$\sigma_{cp} = \frac{0,6 \times 203,2}{t} + \frac{8,81 \times 10^{-6} \times 308,2 \times 203,2}{t} = \frac{121,92}{t} + \frac{0,55}{t} = \frac{122,47}{t}$$

$$\sigma_{mp} = \frac{0,6 \times 203,2}{2 \times t} + \frac{8,81 \times 10^{-6} \times 203,2}{2 \times t} \left(308,2 + \frac{203,2 \times 1}{3} \right) = \frac{60,96}{t} + \frac{0,34}{t} = \frac{61,3}{t}$$

Entonces, el valor del esfuerzo crítico es:

$$\frac{173,23}{t}$$

Luego, aplicando la teoría del máximo esfuerzo cortante (TRESCA) y considerando un factor de seguridad igual a 1.5, debe cumplir:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{AISI304}}{1,5} \geq \sigma_{cp} = \frac{173,23}{t}$$

$$t \geq \frac{1,5 \times 173,23}{110}$$

$$t \geq 2,4 \text{ mm}$$

Elegimos: tubo DN 400 (diámetro = 406,4 mm y espesor = 2,9 mm) de acero inoxidable de acuerdo con DIN-2463.

3.2.2. Esfuerzos en el casco cilíndrico

Nos interesa conocer el estado de esfuerzos en el casco cilíndrico al nivel de los apoyos del recipiente, para hacer un análisis con el esfuerzo que se añade debido a la fuerza originada en los apoyos que se verá en el acápite 3.2.34

Se consideró que los esfuerzos en el casco cilíndrico situados al nivel de los apoyos (que son originados por la presión del aire comprimido y parte del líquido contenido), son iguales a los máximos esfuerzos que se obtiene en la superficie del cilindro.

Por lo tanto:

$$\sigma_{cp} = \frac{122,47}{t} = \frac{122,47}{2,9} = 42,23 \text{ N/mm}^2 \approx 6123 \text{ lb/pulg}^2$$

$$\sigma_{mp} = \frac{61,3}{t} = \frac{61,3}{2,9} = 21,14 \text{ N/mm}^2 \approx 3065 \text{ lb/pulg}^2$$

3.2.3. Cálculo de la tapa del reactor (cabeza torisférica)

Debido a que la tapa del reactor soporta presión constante en toda su superficie, se calculó el mínimo espesor de pared que debe tener la tapa del reactor para soportar la presión de diseño según la norma ASME, sección VIII, división 1. Su valor es:

$$t_{mínima} = \frac{P_{diseño} \times F \times M}{2 \times \sigma_{AISI304} \times U - 0,2 \times P_{diseño}}$$

Las características geométricas de la tapa del reactor se muestran en la figura No. 3.5

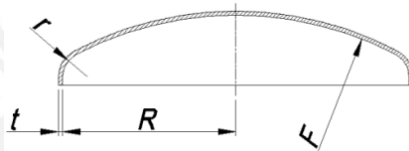


Figura No. 3.5. Tapa del reactor de Transesterificación

Siendo:

$P_{diseño} = 87,1 \text{ lb/pulg}^2$	$U = 0,55$	$R = 7,87 \text{ pulg.}$
$F = 15 \text{ pulg.}$	$r = 1,125 \text{ pulg.}$	$M = 1,65$

Para ver los valores de U y M determinados, ver los anexos A10 y A11 respectivamente.

Reemplazando valores:

$$t_{mínima} = \frac{87,1 \times 15 \times 1,65}{2 \times 15700 \times 0,55 - 0,2 \times 87,1} = 0,125 \text{ pulg.}$$

Se selecciona un disco con espesor de $t_{seleccionado} = 5 \text{ mm} \approx 0,196 \text{ pulg.}$, que será bombeado y pestañado para formar la geometría torisférica.

Entonces, el cálculo de la máxima presión que puede soportar la tapa torisférica con el espesor de pared seleccionado es:

$$P_{máx.} = \frac{2 \times \sigma_{AISI304} \times U \times t_{seleccionado}}{F \times M + 0,2 \times t_{seleccionado}} = \frac{2 \times 15700 \times 0,55 \times 0,196}{15 \times 1,65 + 0,2 \times 0,196} = 136,5 \text{ psi} = 9 \text{ bar}$$

3.2.4. Diseño de soportes

Se realizó considerando que el esfuerzo debido a las fuerzas que se originan en el apoyo, en combinación con los esfuerzos de trabajo del depósito (ver acápite 3.2.2.), no deberá ser mayor que el esfuerzo admisible permitido en el depósito.

La fuerza sobre cada apoyo se asumió vertical debido a la simetría existente de los componentes ubicados sobre el reactor y la posición vertical del mismo. Y será igual al peso total que soportan (ver anexo A12) dividido entre el número de cartelas de los apoyos a colocar, que en nuestro caso son 8. Siendo:

$W_{motor} = 25 \text{ kg}$	$W_{tapa} = 17,5 \text{ kg}$	$W_{tubo} = 18 \text{ kg}$
$W_{liquido} = 42 \text{ kg}$	$W_{accesorios} = 16 \text{ kg}$	$W_{cono} = 4,5 \text{ kg}$

$$F = \frac{\text{Peso total}}{\text{No. cartelas}} = \frac{25 + 42 + 16 + 17,5 + 18 + 4,5}{8} = \frac{123}{8} = 15,375 \text{ kg} = 33,9 \text{ lb}$$

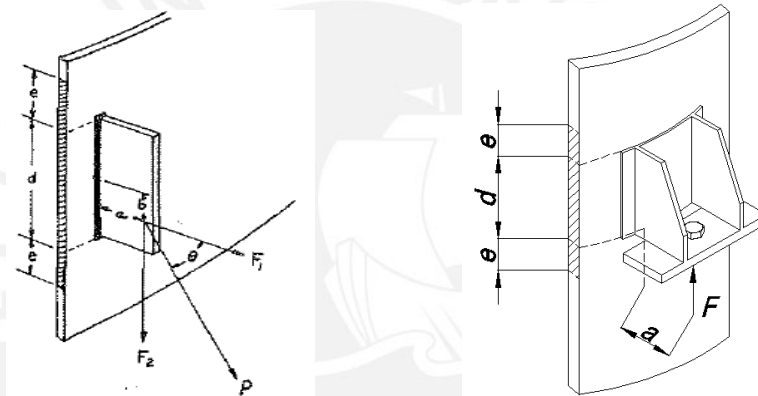


Figura No. 3.6. Soporte del reactor de Transesterificación (izquierda: modelo de soporte para cálculo [19]; derecha: soporte diseñado).

DATOS	$F = 33,9 \text{ lb}$	$a = 1,5 \text{ pulg}$
$t = 2,9 \text{ mm} = 0,114 \text{ pulg}$	$\theta = 90^\circ$	$b = d/2 = 50 \text{ mm}$
$r_c = 8 \text{ pulg}$	$d = 100 \text{ mm} = 3,937 \text{ pulg}$	$N_{cartelas} = 8$

El momento " M_t " sobre la sección del depósito debido a la fuerza aplicada sobre el apoyo es:

$$F_1 = F \times \cos\theta = 0$$

$$F_2 = F \times \text{sen}\theta = 33,9 \text{ lb}$$

$$M_t = a \times F_2 + b \times F_1 = 1,5 \times 33,9 + 0 = 50,85 \text{ lb.pulg}$$

El ancho efectivo del recipiente " e " en cada lado del apoyo es:

$$e = \frac{\sqrt{t \times r_c}}{2} = \frac{\sqrt{0,114 \times 8}}{2} = 0,477 \text{ pulg}$$

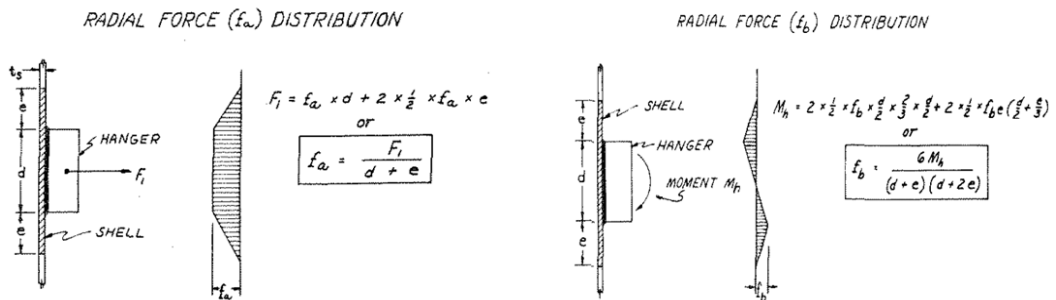


Figura No. 3.7. Distribución de la fuerza radial sobre el recipiente (izquierda: debido a la fuerza radial " F_1 "; derecha: debido al momento " M_t "). [19]

Los valores de f_a y f_b son equivalentes a la fuerza en un anillo de ancho igual a 1" del recipiente y sus valores son determinados de la siguiente manera:

$$f_a = \frac{F_1}{d + e} = 0$$

$$f_b = \frac{6M_t}{(d + e)(d + 2e)} = \frac{6 \times 50,85}{(3,937 + 0,477)(3,937 + 2 \times 0,477)} = 14,13 \text{ lb / 1 pulg. anillo}$$

La fuerza total radial " f_1 " aplicada sobre el depósito es:

$$f_1 = f_a + f_b = 14,13 \text{ lb / 1 pulg. anillo}$$

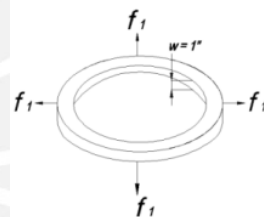


Figura No. 3.8. Fuerza total radial sobre un anillo de 1" de ancho del recipiente

La fuerza total radial " f_1 " (normal al depósito) que actúa sobre el depósito como resultado de la fuerza " F " aplicada en el apoyo, crea una fuerza de tensión tangencial " T " y un momento de flexión " M_r " en el anillo del depósito.

De tabla (ver anexo A13): $K_1 = 1,207$ y $K_2 = 0,0625$; donde:

$$T = K_1 f_1 = 1,207 \times 14,13 = 17,05 \text{ lb / 1 pulg. anillo}$$

$$M_r = K_2 f_1 r_c = 0,0625 \times 14,13 \times 8 = 7,07 \text{ lb - pulg.}$$

Con " T " y " M_r " sobre un anillo de 1 pulgada de ancho del depósito, se calcula el esfuerzo de tensión " σ_{ct} " y de flexión " σ_{cb} " en el apoyo de la siguiente manera:

Siendo:

A = Área de la sección frontal del anillo del recipiente.

S = Módulo resistente del área de la misma sección.

$$A = w \times t = 1 \times 0,114 = 0,114 \text{ pulg.}^2$$

$$S = \frac{w \times t^2}{6} = \frac{1 \times 0,114^2}{6} = 2,166 \times 10^{-3} \text{ pulg.}^3$$

$$\sigma_{cb} = \frac{M_r}{S} = \frac{7,05}{2,166 \times 10^{-3}} = 3254,85 \text{ lb/pulg}^2$$

$$\sigma_{ct} = \frac{T}{A} = \frac{17,05}{0,114} = 149,6 \text{ lb/pulg}^2$$

Los esfuerzos σ_{cb} y σ_{ct} son añadidos al σ_{cp} para dar un esfuerzo circunferencial total " σ_c " en una sección del anillo del recipiente crítica, mostrado en la figura 3.9 Siendo:

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_{mp} = 2990 \text{ lb/pulg}^2$$

$$\sigma_c = \sigma_{cp} + \sigma_{cb} + \sigma_{ct}$$

$$\sigma_c = 6123 + 3254,85 + 149,6 = 9527,45 \text{ lb/pulg}^2$$

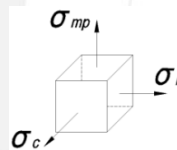


Figura No. 3.9. Esfuerzos actuantes sobre una fibra externa en la sección crítica del recipiente

Entonces, aplicando la teoría del máximo esfuerzo cortante (TRESCA) y considerando un factor de seguridad de 1.5, debe cumplir:

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_c$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{AISI304}}{FS} = \frac{15700}{1,5} = 10466,7 \text{ lb/pulg}^2 \dots ok$$

3.2.5. Cálculo de cordones de soldadura

Se realizó el cálculo de los cordones de soldadura siguiendo las normas del Eurocódigo 3. Estos tendrán propiedades mecánicas equivalente al AISI304. A continuación se muestra el análisis de cálculo de dos de las partes críticas del reactor:

a) Soporte del reactor: en este caso se trata de cordones frontales longitudinales con un espesor de 3 mm. El valor de las cargas máximas actuantes sobre los cordones se hallaron en el acápite anterior 3.2.4 y son las siguientes:

$$F = 15,375 \text{ kg} = 151 \text{ N}$$

$$M_t = 50,85 \text{ lb.pulg} = 5,75 \text{ N.m}$$

En este caso, como condición crítica, estos cordones también tendrán que soportar una fuerza de corte " F_c " originada por el torque del motor, que es máxima momentáneamente en el arranque, " T_a " (ver acápite 3.5).

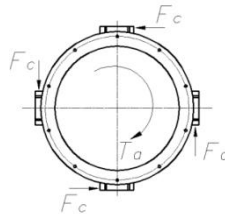


Figura No. 3.10. Fuerza de corte producida por el torque del motor

Siendo:

$D_e = 16" = 406,4 \text{ mm}$	$T_a = 13,5 \text{ N.m}$
--------------------------------	--------------------------

Puesto que son cuatro apoyos, como se ve en la figura No. 3.10, entonces:

$$T_a = 4F_c (D_e/2)$$

$$F_c = \frac{T_a}{2 D_e} = \frac{13,5}{2 \times 406,4 \times 10^{-3}} = 16,6 \text{ N}$$

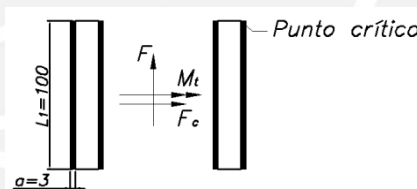


Figura No. 3.11. Cargas actuantes en los cordones de soldadura del soporte del reactor

Las cargas varían en el tiempo, ya que cuando termina el proceso el motor deja de funcionar y existe una descarga total del fluido, entonces la carga mínima se halla quitando los 42 kg de peso del líquido y haciendo la fuerza de corte " F_c " igual a cero.

<i>Carga mínima</i>	$F = 106 \text{ N}$	$M_t = 4,1 \text{ N.m}$	$F_c = 0$
<i>Carga máxima</i>	$F = 151 \text{ N}$	$M_t = 5,75 \text{ N.m}$	$F_c = 16,6 \text{ N}$

El cálculo se realizó considerando al reactor como elemento estructural. Siendo:

$L_1 = 100 \text{ mm}$	$a = 3 \text{ mm}$	$c = 50 \text{ mm}$
------------------------	--------------------	---------------------

$$I = \frac{a \cdot L_1^3}{12} = 25 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$A = 4 \cdot a \cdot L_1 = 1200 \text{ mm}^2$$

Se realizó el cálculo por resistencia en el punto crítico, indicado en la figura No. 3.11, de uno de los cuatro cordones de soldadura.

CARGA	$m = \frac{M_t \cdot c}{I}$ (N/mm ²)	$t_a = \frac{F}{A}$ (N/mm ²)	$t_n = \frac{F_c}{A}$ (N/mm ²)	$\sigma = \frac{m + t_n}{\sqrt{2}}$ (N/mm ²)	$\tau_m = \frac{m - t_n}{\sqrt{2}}$ (N/mm ²)	$\tau_a = t_a$ (N/mm ²)
máxima	1,196	0,131	0,011	0,85	0,84	0,131
mínima	0,82	0,088	0	0,58	0,58	0,088

Resistencia

Con los esfuerzos máximos obtenidos, se verifica si cumple con la carga estática.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_m^2 + \tau_a^2)} \leq \sigma_{adm} = \frac{\sigma_b}{\beta\gamma}$$

De tablas (ver anexo A14):

β : Factor que depende del material = 0,8

γ : Factor de seguridad = 1,5

Reemplazando valores:

$$\sigma_{eq} = 1,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} = \frac{480}{0,8 \times 1,5} = 400 \text{ N/mm}^2$$

400 ≥ 1,7 ... cumple!

Fatiga

Del diagrama de resistencia a la fatiga según Haigh, debe cumplir:

$$\sigma'_A = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_{Alt}} + \frac{\sigma_{eq\ m}}{\sigma_{eq\ a}} \left(\frac{1}{\sigma_b}\right)} > \sigma_{eq\ a}$$

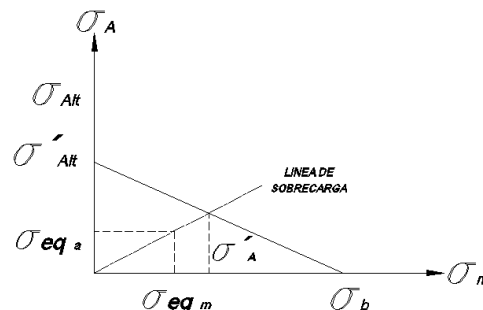


Figura No. 3.12. Diagrama de resistencia a la fatiga según Haigh

Se calcula el esfuerzo medio y el esfuerzo alternante como la semisuma y la semidiferencia entre los esfuerzos mínimo y máximo respectivamente.

Esfuerzo medio (N/mm^2)	Esfuerzo alternante (N/mm^2)
$\sigma = 0,715$	$\sigma = 0,135$
$\tau_m = 0,71$	$\tau_m = 0,13$
$\tau_a = 0,11$	$\tau_a = 0,022$

Luego, se calcula el esfuerzo equivalente medio " σ_{eq_m} " y alternante " σ_{eq_a} ". Siendo:

$$\sigma_{eq_m} = 1,44 N/mm^2$$

$$\sigma_{eq_a} = 0,27 N/mm^2$$

Cumple:

$$\sigma_{Alt} = \frac{\sigma_b}{2} = 240 N/mm^2$$

De tablas (ver anexo A14)	$v_1 = 0,35$	$v_2 = 0,8$
---------------------------	--------------	-------------

$$\sigma_{Alt}' = \frac{v_1 v_2}{FS} \sigma_{Alt} = \frac{0,35 \times 0,8}{1,5} \times 240 = 44,8 N/mm^2$$

Entonces, reemplazando valores:

$$\sigma_A' = \frac{1}{\frac{1}{44,8} + \frac{1,44}{0,27} \left(\frac{1}{480}\right)} = 30 N/mm^2$$

$$\sigma_A' > \sigma_{eq_a} \dots \text{cumple}$$

- b) Brida para la tapa del reactor: en este caso, se tiene dos costuras anulares con un espesor de 3 mm. El valor de las cargas máximas actuantes sobre los cordones son: la fuerza de tracción " F " producida por la presión interna del reactor (que es transmitida por la unión atornillada con la tapa) y la fuerza de corte " F_c " originada por el torque del motor, que es máxima momentáneamente en el arranque, " T_a ".

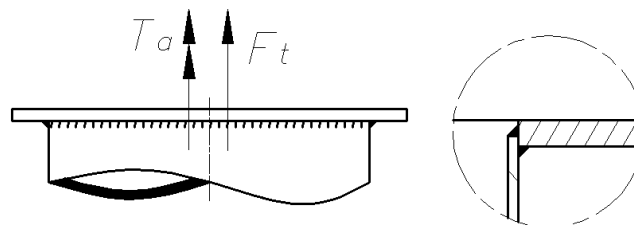


Figura No. 3.13. Brida del reactor de Transesterificación

$$F = P_{diseño} \cdot A_{tapa} = 0,6 N/mm^2 \times \frac{\pi \times 400^2 mm^2}{4}$$

$$F = 75398,2 N$$

$$F_c = \frac{T_a}{D_e/2} = \frac{2 \times 13,5}{406,4 \times 10^{-3}} = 66,44 N$$

Las cargas varían en el tiempo, ya que cuando termina el proceso el motor deja de funcionar y existe una descarga del aire comprimido. Por lo tanto, la carga mínima es igual a la suma del peso de la tapa del reactor (17,5 kg) y el peso del motor (30 kg); y haciendo la fuerza de corte " F_c " igual a cero.

Carga mínima	$F = -496 \text{ N}$	$F_c = 0$
Carga máxima	$F = 75398,2 \text{ N}$	$F_c = 66,44 \text{ N}$

Debido a que son dos anillos de soldadura, ver figura No. 3.13, el área del cordón de soldadura es:

$$A = 2 \times \frac{\pi}{4} \times [(D_e + 2a)^2 - D_e^2]$$

$$A = \frac{\pi}{2} \times [(406,4 + 2 \times 3)^2 - 406,4^2] = 7717 \text{ mm}^2$$

CARGA	$m = \frac{M_t \cdot c}{I}$ (N/mm^2)	$t_a = \frac{F}{A}$ (N/mm^2)	$t_n = \frac{F_c}{A}$ (N/mm^2)	$\sigma = \frac{m + t_n}{\sqrt{2}}$ (N/mm^2)	$\tau_m = \frac{m - t_n}{\sqrt{2}}$ (N/mm^2)	$\tau_a = t_a$ (N/mm^2)
máxima	0	9,77	0,009	0,006	-0,006	9,77
mínima	0	-0,064	0	0	0	-0,064

Resistencia

Con los esfuerzos máximos obtenidos, se verifica si cumple con la carga estática.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_m^2 + \tau_a^2)} \leq \sigma_{adm} = \frac{\sigma_b}{\beta\gamma}$$

De tablas (ver anexo A12)	$\beta = 0,8$	$\gamma = 1,5$
---------------------------	---------------	----------------

Reemplazando valores:

$$\sigma_{eq} = 17 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} = 400 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_{eq} \dots \text{cumple!}$$

Fatiga

Siguiendo el procedimiento de cálculo realizado. Se tiene:

Esfuerzo medio (N/mm^2)	Esfuerzo alternante (N/mm^2)
$\sigma = 0,003$	$\sigma = 0,003$
$\tau_m = -0,003$	$\tau_m = -0,003$
$\tau_a = 4,853$	$\tau_a = 4,917$

Luego, se calcula el esfuerzo equivalente medio " σ_{eq_m} " y alternante " σ_{eq_a} ". Siendo:

$$\sigma_{eq_m} = 8,41 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{eq_a} = 8,52 \text{ N/mm}^2$$

Cumple:

$$\sigma_{Alt} = \frac{\sigma_b}{2} = 240 \text{ N/mm}^2$$

De tablas (ver anexo A12)	$v_1 = 0,35$	$v_2 = 0,8$
---------------------------	--------------	-------------

$$\sigma_{Alt}' = \frac{v_1 v_2}{FS} \sigma_{Alt} = \frac{0,35 \times 0,8}{1,5} \times 240 = 44,8 \text{ N/mm}^2$$

Entonces, reemplazando valores:

$$\sigma_A' = \frac{1}{\frac{1}{44,8} + \frac{8,41}{8,52} \left(\frac{1}{480}\right)} = 41 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_A' > \sigma_{eq_a} \dots \text{cumple}$$

3.2.6. Cálculo de la Potencia de la Resistencia Eléctrica

Debido a que el proceso es endotérmico, se eligió como elemento calefactor a una resistencia eléctrica, para satisfacer la necesidad de elevar la temperatura de los 40 litros de aceite reciclado pretratado a procesar hasta los 60°C en un tiempo de 30 minutos. Este aumento de temperatura se da a presión atmosférica constante.

Para efectos de cálculo, se realizó las siguientes consideraciones:

- La temperatura inicial del aceite reciclado pretratado es 20°C.
- En el periodo de 30 minutos requerido para elevar la temperatura a 60°C; se considera despreciable tanto el calor generado por el trabajo técnico sobre el fluido (agitación) como el calor perdido por las paredes del reactor hacia el ambiente. (ver anexo A15).
- Para líquidos y sólidos se cumple que los calores específicos a presión " C_p " y volumen " C_v " constante son aproximadamente iguales $C_p \approx C_v$ y dependen únicamente de la temperatura.

Para efectos de cálculo tomaremos el valor del calor específico del aceite de colza ($C_p = 0,47 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$), valor válido entre 0 - 100°C [10]. Por lo tanto la potencia eléctrica de la resistencia " \dot{Q} " viene dada por la siguiente fórmula:

$$\dot{Q} = \frac{m}{t} C_p \Delta T$$

$$\dot{Q} = \frac{40 \text{ l} \times 884,55 \times 10^{-3} \text{ kg/l}}{30 \text{ min}} 0,47 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} (60 - 20)^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = 22,17 \text{ kcal/min} \approx 1,55 \text{ kW}$$

Por lo tanto se eligió una resistencia eléctrica comercial de 1500 Watts de potencia, que presenta como característica geométrica de diseño ser de forma espiral para generar mayor área de contacto entre la resistencia y el fluido de manera que la intensidad de transferencia de calor sea la menor posible para evitar la degradación del aceite pretratado. Asimismo, el material de la resistencia eléctrica es AISI 316 puesto que es compatible con las sustancias que intervienen en la reacción.



Figura No. 3.14. Resistencia eléctrica monofásica de 1500 Watts.

3.2.7. Cálculo de tornillos

Para la unión atornillada entre la tapa y el recipiente se realizó el cálculo de la cantidad mínima de tornillos y el torque necesario para el ajuste, para cumplir con las condiciones de hermeticidad.

Se empleó tornillos M16 según norma DIN 931, asimismo el número de agujeros en la brida debe tener disposición simétrica y ser múltiplo de 4 según norma DIN 2508.

El material de las placas, tornillos, arandelas y tuercas es AISI304, por lo tanto el módulo de elasticidad será: $E = 1,93 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$.

Las consideraciones de hermeticidad son las siguientes:

- La fuerza de compresión entre placas " $F_{residual}$ " debe ser como mínimo 2000 N.
- La separación entre los tornillos " e " debe cumplir con: $2D_{ext} < e < 7D_{ext}$
- El plano de aplicación de la carga " n " será: $n = 0,35$

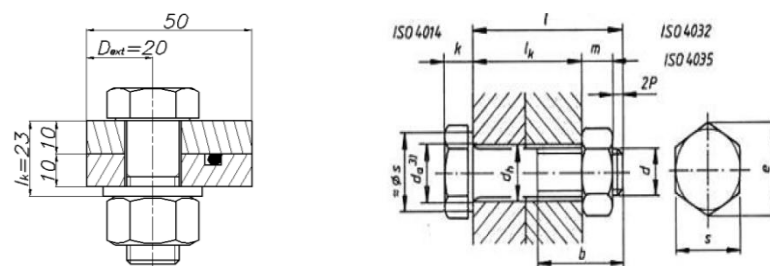


Figura No. 3.15. Izquierda: ubicación de los tornillos para la unión tapa – recipiente. Derecha: simbología de tornillo y tuerca.

Siendo:

Tornillo DIN 931	Arandela DIN 125	Tuerca DIN 934	Rosca DIN 13
$d = 16 \text{ mm}$	$d_{int} = 17 \text{ mm}$	$m = 13 \text{ mm}$	$d_2 = 14,701 \text{ mm}$
$b = 38 \text{ mm}$	$d_{ext} = 30 \text{ mm}$	$d_1 = 24 \text{ mm}$	$d_3 = 13,546 \text{ mm}$
$l = l_k + d = (20 + 3) + 16 = 39$	$s = 3 \text{ mm}$	Agujero DIN 69	$P^* = 2 \text{ mm}$
$l = 50 \text{ mm}$ (longitud disponible)		$d_{ag} = 17 \text{ mm}$ (fino)	

La constante de rigidez del tornillo " C_t " es:

$$\frac{1}{C_t} = \sum \frac{L_i}{EA_i} = \frac{4}{\pi E} \sum \frac{L_i}{d_i^2}$$

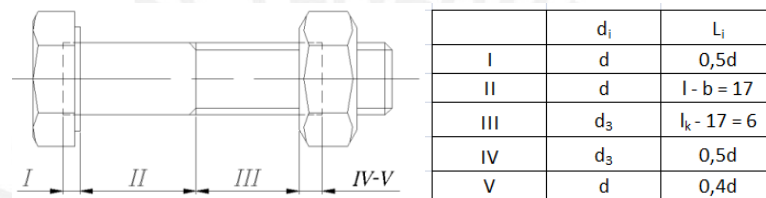


Figura No. 3.16. Tramos del tornillo y valores involucrados con el cálculo de rigidez

$$\frac{1}{C_t} = \frac{4}{\pi E} \left(\frac{0,5d}{d^2} + \frac{17}{d^2} + \frac{6}{d_3^2} + \frac{0,5d}{d_3^2} + \frac{0,4d}{d^2} \right)$$

$$\frac{1}{C_t} = \frac{4}{\pi \times 193 \times 10^3} \left(\frac{0,5}{16} + \frac{17}{16^2} + \frac{6}{13,546^2} + \frac{0,5 \times 16}{13,546^2} + \frac{0,4}{16} \right)$$

$$C_t = 761,9 \times 10^3 \text{ N/mm}$$

Para hallar la constante de rigidez de las placas " C_p " se tiene que conocer primero la distribución de esfuerzos en las mismas. Donde, según gráfico 3.17:

$D_{ext} = 40 \text{ mm}$	$L_p = 23 \text{ mm}$
---------------------------	-----------------------

$$tg(\gamma) = 0,362 + 0,032 \ln\left(\frac{L_p}{2d_1}\right) + 0,153 \ln\left(\frac{D_{ext}}{d_1}\right)$$

$$tg(\gamma) = 0,362 + 0,032 \times \ln\left(\frac{23}{48}\right) + 0,153 \times \ln\left(\frac{40}{24}\right) = 0,417$$

$$D_{m\acute{a}x} = d_1 + L_p \cdot tg\gamma = 24 + 23 \times 0,417 = 34,43 \text{ mm}$$

Ya que:

$$D_{ext} = 40 \text{ mm} > D_{m\acute{a}x} = 34,43 \text{ mm}$$

Entonces, según el lineamiento presentado en la norma VDI 2230, se determinó que se trata de dos troncos de cono.

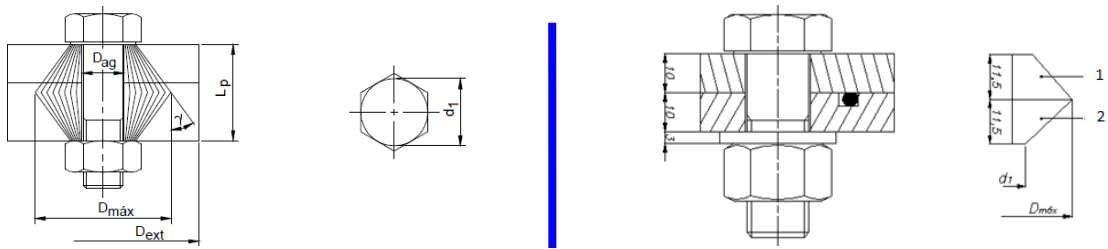


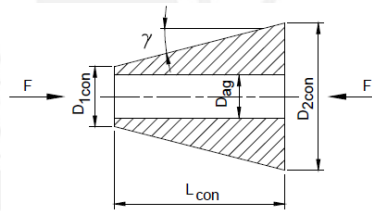
Figura No. 3.17. Izquierda: Distribución de esfuerzos en unión tornillo tuerca (según norma VDI 2230). Derecha: Distribución de esfuerzos aplicado a nuestro caso.

Debido a la simetría en la distribución de esfuerzos y que todos los elementos son del mismo material, solo es necesario hacer el cálculo de rigidez de un tronco cónico. Cuyo valor es igual a:

$$C_{con} = \frac{\pi E_{con} D_{ag} \operatorname{tg}(\gamma)}{\ln \left(\frac{(D_{2con} - D_{ag})(D_{1con} + D_{ag})}{(D_{2con} - D_{1con})(D_{1con} + D_{ag})} \right)}$$

Siendo:

D_{ag} (mm)	17
D_{1con} (mm)	24
L_{con} (mm)	11,5
D_{2con} (mm)	33,6
$\operatorname{tg}(\gamma)$	0,417
E (N/mm ²)	$1,93 \times 10^5$



Reemplazando valores:

$$C_{con} = 6581,2 \times 10^3 \text{ N/mm}$$

Luego, la constante de rigidez de las placas " C_p " es:

$$\frac{1}{C_p} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{6581,2 \times 10^3} + \frac{1}{6581,2 \times 10^3} = 3,04 \times 10^{-7}$$

$$C_p = 3290,6 \times 10^3 \text{ N/mm}$$

Las pérdidas de pretensión " F_{as} ", debido al asentamiento " f_{as} ", vienen dadas por:

$$F_{as} = \emptyset C_p f_{as}$$

Donde:

$$\emptyset = \frac{C_t}{C_t + C_p} = 0,188$$

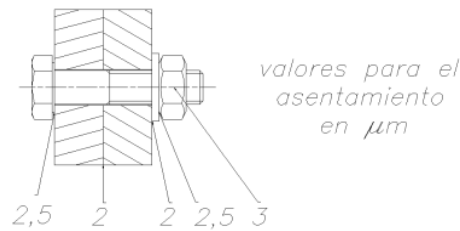


Figura No. 3.18. Valores del asentamiento para una rugosidad entre 10-40 μm y carga normal

Según la figura No. 3.18 el valor del asentamiento es:

$$f_{as} = 12 \mu m$$

Por lo tanto:

$$F_{as} = 0,188 \times 3290,6 \times 12 = 7423,6 N$$

Para el cálculo del número de tornillos "NT" se tiene los siguientes datos:

El factor de ajuste $\alpha_A = 1,4$ (ajuste controlado con torquímetro)

La fuerza externa originada por la presión de diseño es igual a:

$$F_{ext} = P_{diseño} \cdot A_{tapa} = 0,6 N/mm^2 \times \frac{\pi \times 400^2 mm^2}{4}$$

$$F_{ext} = 75398,2 N$$

La fuerza externa sobre la placa " $F_{ext/p}$ " es:

$$F_{ext/p} = (1 - n\phi)F_{ext}$$

$$F_{ext/p} = (1 - 0,35 \times 0,188) \times 75398,2 = 70437 N$$

La fuerza de montaje admisible para tornillos M16 considerando ajuste con torquímetro es igual a:

$$F_{M_{adm}} = \frac{0,9\sigma_f A_s}{\sqrt{1 + 3 \left(\frac{\tan(\varphi + \rho') d_2 A_s}{2W_t} \right)^2}}$$

Donde:

$$\varphi = \frac{P^*}{\pi d_2} = \frac{2}{\pi \times 14,701} = 0,0433^\circ$$

$$\rho' = \frac{\mu}{\cos 30^\circ} = \frac{0,15}{\cos 30^\circ} = 0,173^\circ$$

$$d_s = \frac{d_2 + d_3}{2} = \frac{14,701 + 13,546}{2} = 14,124 mm$$

$$A_s = \frac{\pi d_s^2}{4} = \frac{\pi \times 14,124^2}{4} = 156,7 mm^2$$

$$W_t = \frac{\pi \times d_s^3}{16} \dots \text{momento polar de inercia}$$

Reemplazando valores:

$$F_{M_{adm}} = \frac{0,9 \times 205 \times 156,7}{\sqrt{1 + 3 \left(\frac{16 \times \tan(0,0433^\circ + 0,173^\circ) \times 14,701 \times 156,7}{2 \times \pi \times 14,124^3} \right)^2}}$$

$$F_{M_{adm}} = 28908 \text{ N}$$

Se tiene que:

$$F_{min} = F_{ext/p} + F_{as} + F_{residual}$$

Considerando el factor de ajuste " α_A ", entonces:

$$\alpha_A = \frac{F_{M_{adm}}}{F_{min}}$$

$$\frac{F_{M_{adm}}}{\alpha_A} = \frac{F_{ext/p}}{NT} + F_{as} + F_{residual}$$

Por lo tanto, el número de tornillos "NT" es:

$$NT = \frac{F_{ext/p}}{\frac{F_{M_{adm}}}{\alpha_A} - F_{as} - F_{residual}}$$

Reemplazando valores:

$$NT = \frac{70437}{\frac{28908}{1,4} - 7423,6 - 2000} = 6,3$$

Con NT = 8 y 12 falla en la verificación en el montaje, por lo tanto:

$$NT = 16$$

Verificamos:

$$2D_{ext} < e = \frac{\pi \phi_{tornillos}}{NT} < 7D_{ext}$$

$$2 \times 40 < \frac{\pi \times 460}{16} < 7 \times 40$$

$$80 < 90,3 < 210 \dots \text{cumple!}$$

Verificación en el montaje:

Debe cumplir:

$$0,9 \sigma_f \geq \sigma_{eq}$$

La fuerza de montaje " F_M " es:

$$F_M = \alpha_A \left(\frac{F_{ext/p}}{NT} + F_{as} + F_{residual} \right)$$

$$F_M = 1,4 \left(\frac{70437}{16} + 7423,6 + 2000 \right)$$

$$F_M = 19356,3 \text{ N}$$

Considerando:

El coeficiente de fricción " μ " entre los filetes del tornillo y tuerca es $\mu = 0,15$

El coeficiente de fricción " μ_p " entre la tuerca y la placa es $\mu_p = 0,15$

Entonces el momento de ajuste " M_{tM} " sería:

$$M_{tM} = F_M \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\phi + \rho') + F_M \frac{d_m}{2} \mu_p$$

Donde:

$$d_m = \frac{d_{ag} + d_1}{2} = \frac{17 + 24}{2} = 20,5 \text{ mm}$$

Reemplazando valores:

$$M_{tM} = 19356,3 \times \left[\frac{14,701}{2} \operatorname{tg}(0,0433 + 0,173) + \frac{20,5}{2} \times 0,15 \right]$$

$$M_{tM} = 34555 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

Por lo tanto:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_M^2}$$

Donde:

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A_s} = \frac{19356,3}{156,7} = 123,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_M = \frac{16M_{tM}}{\pi d_s^3} = \frac{16 \times 34555}{\pi \times 14,124^3} = 62,5 \text{ N/mm}^2$$

Reemplazando valores:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{123,5^2 + 3 \times 62,5^2} = 164,23 \text{ N/mm}^2$$

Entonces:

$$0,9 \times 205 = 184,5 \geq 164,23 \text{ ... cumple!}$$

Verificación por presión superficial:

Debe cumplir:

$$p_{adm} = 210 \geq p = \frac{F_M}{A_a}$$

Donde:

$$A_a = \frac{\pi}{4} (d_1^2 + d_{ag}^2) = \frac{\pi}{4} (24^2 - 17^2) = 225,41 \text{ mm}^2$$

Entonces:

$$p = \frac{19356,3}{225,41} = 85,9 \text{ N/mm}^2$$

$$210 \geq 85,9 \text{ ... cumple!}$$

Verificación en el servicio:

Resistencia:

$$\sigma_{adm} = 0,9 \sigma_f \geq \sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(0,5\tau_M)^2}$$

Donde:

$$\sigma = \frac{F_M + F_{ext/t}}{A_s}$$

$$F_{ext/t} = F_{ext} - F_{ext/p} = 75398,2 - 70437 = 4961,2 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{19356,3 + 4961,2}{156,7} = 155,2 \text{ N/mm}^2$$

Reemplazando valores:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{155,2^2 + 3(0,5 \times 62,5)^2} = 164,4 \text{ N/mm}^2$$

$$0,9 \times 205 = 184,5 \geq 164,4 \dots \text{cumple!}$$

Fatiga:

Debido a que la operación se dará una vez al día por un periodo de una hora, la fuerza externa sobre el tornillo será pulsante.

$$\sigma_a = \frac{2 \cdot F_{ext/t}}{\pi d_3^2} = \frac{2 \times 4961,2}{\pi \times 13,546^2} = 17,21 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_m = \frac{4 \cdot F_M}{\pi d_3^2} = \frac{4 \times 19356,3}{\pi \times 13,546^2} = 134,31 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_b = 480 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Alt} = \frac{\sigma_b}{2} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_A = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_{Alt}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_a} \left(\frac{1}{\sigma_b} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{240} + \frac{134,31}{17,21} \left(\frac{1}{480} \right)} = 48,96 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_A > \sigma_a \dots \text{cumple}$$

3.3. Reactor de Metóxico

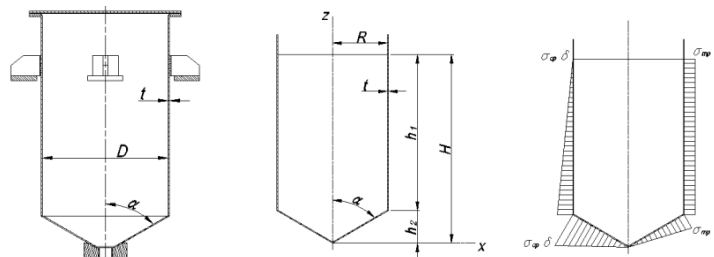


Figura No. 3.19. Izquierda: reactor de Metóxico. Centro: dimensiones del reactor. Derecha: diagrama de tensiones normales circunferenciales y meridionales en paredes del reactor.

Se diseña para condiciones normales de trabajo (presión atmosférica y temperatura de 20 °C); se decidió optar por esta geometría teniendo en cuenta que la capacidad a contener es de 15 litros de Metanol, así como los accesorios que deben estar conectados sobre el reactor. La parte cónica sirve para transferir todo el líquido hacia el reactor de Transesterificación aprovechando la diferencia de alturas entre estos.

3.3.1. Cálculo de esfuerzos máximos en el casco cilíndrico y la parte cónica

Se empleará la Teoría Membranal para calcular los esfuerzos máximos soportados por el reactor [20], el cual tiene un espesor de 2 mm. Para cumplir con los requerimientos de diseño, estos esfuerzos deben ser menores que el esfuerzo admisible.

Siendo:

$H = 400 \text{ mm}$	$h_1 = 275 \text{ mm}$	$h_2 = 75 \text{ mm}$
$\alpha = 60^\circ$	$R = 127 \text{ mm}$	$t = 2 \text{ mm}$

- La carga en dirección longitudinal que genera el peso del líquido es transmitido sobre las paredes del recipiente a través de los soportes.
- El esfuerzo en dirección circunferencial es desarrollado por la presión del líquido.

Como se observa en la figura No. 3.19 la sección peligrosa del reactor es la parte superior de la parte cónica; siendo la máxima tensión circunferencial y meridional las siguientes:

$$\sigma_{t \text{ máximo}} = \frac{\rho_{\text{metanol}} \times R}{t} \left(\frac{H}{\cos \alpha} - \frac{R}{\text{sen} \alpha} \right) = \frac{\rho_{\text{metanol}} \times R \times h_1}{t \times \cos \alpha}$$

$$\sigma_{m \text{ máximo}} = \frac{\rho_{\text{metanol}} \times R}{2 \times t} \left(\frac{h_1}{\cos \alpha} - \frac{R}{3 \times \text{sen} \alpha} \right)$$

Reemplazando los valores numéricos que se tienen:

$$\sigma_{t \text{ máximo}} = \frac{791,5 \text{ kg/m}^3 \times 0,127 \text{ m} \times 0,275 \text{ m} \times 9,81 \text{ m/s}^2}{0,002 \text{ m} \times \cos 60^\circ} \times \left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right)^2$$

$$\sigma_{t \text{ máximo}} = 0,27 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m \text{ máximo}} = \frac{791,5 \text{ kg/m}^3 \times 0,127 \text{ m} \times 9,81 \text{ m/s}^2}{2 \times 0,002 \text{ m}} \left(\frac{0,355 \text{ m}}{\cos 60^\circ} - \frac{0,127 \text{ m}}{3 \times \text{sen} 60^\circ} \right) \times \left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right)^2$$

$$\sigma_{m \text{ máximo}} = 0,16 \text{ N/mm}^2$$

Entonces, aplicando la teoría del máximo esfuerzo cortante (TRESKA) y considerando un factor de seguridad de 2, debe cumplir:

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_{t \text{ máximo}}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{AISI304}}{FS} = \frac{205}{2} = 102,5 \text{ N/mm}^2 \dots ok$$

Por lo tanto, se concluye en que los esfuerzos máximos son menores que los esfuerzos admisibles para un espesor del reactor de 2 mm.

3.3.2. Diseño de soportes

Se realizó el mismo procedimiento descrito en el acápite 3.2.5 (ver anexo A16). En este caso, el tipo de soporte empleado tiene 4 cartelas de apoyo tal como se aprecia en la figura No. 3.19 y la temperatura de operación de este reactor es de 20°C.

El esfuerzo principal máximo es circunferencial y su valor es:

$$\sigma_c = 17211 \text{ lb/pulg}^2$$

Se consideró un factor de seguridad de 1,5. Entonces:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{AISI304}}{FS} = \frac{30000}{1,5} = 20000 \text{ lb/pulg}^2$$

Por lo tanto, se concluye que los esfuerzos máximos son menores que los admisibles.

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_c \dots \text{Cumple!}$$

3.4. Cálculo de la potencia requerida para la agitación

Para estimar la potencia que se requiere para hacer girar un rodete dado con una velocidad determinada, es necesario disponer de correlaciones empíricas del número de potencia " N_p " con los factores de forma adoptados para el dimensionamiento de los reactores, lo cual se trató en el acápite 3.1.

Las figuras No. 3.20 y 3.21 representan las curvas típicas con número de potencia " N_p " vs. número de Reynolds " N_{Re} " para tanques con cuatro placas deflectoras equipados con turbinas de seis y cuatro palas respectivamente. Para los factores de forma adoptados en el reactor de Transesterificación, la curva "A" de la figura No. 3.20 es la que rige su funcionamiento.

Los valores de " N_p " y " N_{Re} " se determinan de la siguiente manera:

$$N_p = \frac{Pg}{n^3 D_a^5 \rho}$$

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 n \rho}{\mu}$$

Los valores de ambos reactores se muestran en la tabla No. 3.2, en el anexo A8 puede verse el cálculo de los valores de densidad y viscosidad dinámica para la mezcla en el caso del reactor de Transesterificación.

Tabla No 3.2. Parámetros para el cálculo del número de Reynolds "N_{Re}"

Reactor de metóxido	$\rho = 790$	$\mu = 0,00059$	$n = 200$	$D_a = 100$
Reactor de transesterificación	$\rho = 898,3$	$\mu = 0,0301$	$n = 400$	$D_a = 136$

Se realizó el cálculo del número de Reynolds y posteriormente de cada figura se determinó el número de potencia.

Para el reactor de Transesterificación:

$$N_{Re} = \frac{0,136^2 m^2 \times 400 rpm \times 898,3 kg/m^3}{0,0301 N \cdot s/m^2} \times \left(\frac{N}{kg \cdot m/s^2} \times \frac{1 min}{60s} \right)$$

$$N_{Re} = 3680$$

Para el reactor de Metóxido:

$$N_{Re} = \frac{0,1^2 m^2 \times 200 rpm \times 790 kg/m^3}{0,00059 N \cdot s/m^2} \times \left(\frac{N}{kg \cdot m/s^2} \times \frac{1 min}{60s} \right)$$

$$N_{Re} = 44633$$

Como se observa en las figuras No. 3.20 y 3.21 para ambos casos el número de potencia tiene el mismo valor y es igual a:

$$N_p = 5$$

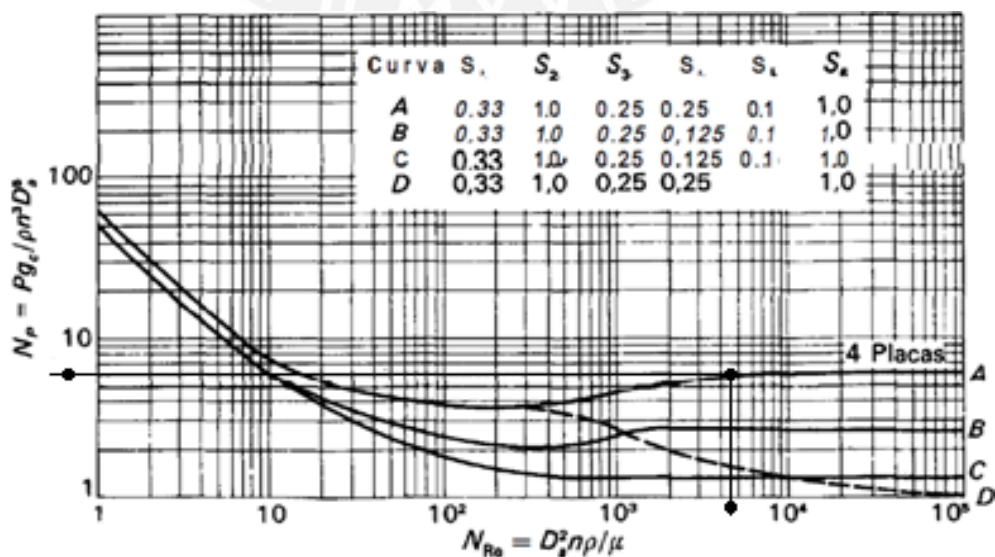


Figura No. 3.20. Número de potencia vs. número de Reynolds para turbinas de seis palas [17]

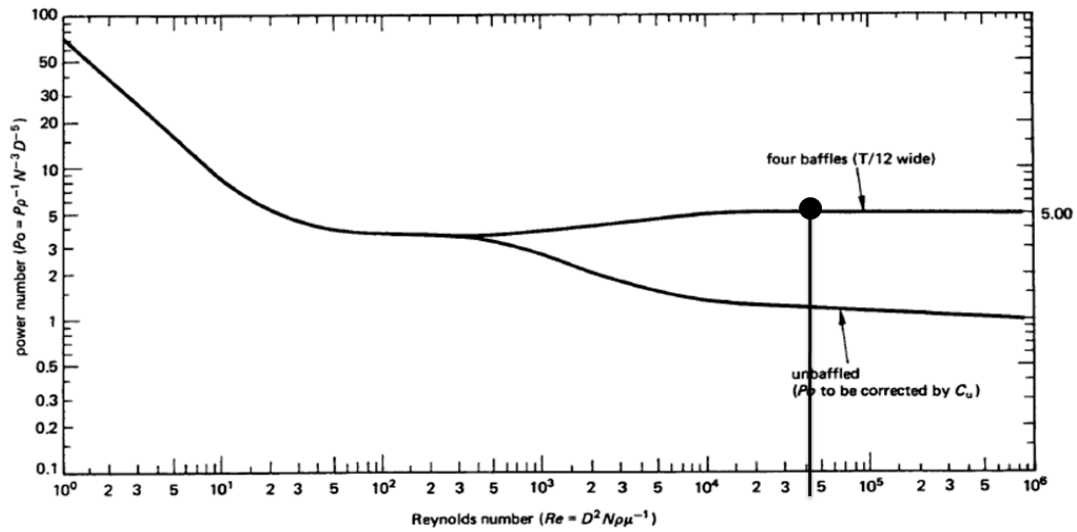


Figura No. 3.21. Número de potencia vs. número de Reynolds para turbinas de 4 palas [21]

El número adimensional " N_p " se calculó para un único agitador plano de una sola pala, si se añaden más palas ocurre un incremento en la potencia que es proporcional al número de paletas " n_b " elevado a potencia " z " en un rango de 0,5 a 0,8.

Y por lo tanto la potencia necesaria " P_{carga} " es:

$$P_{carga} = \frac{N_p n^3 D_a^5 \rho n_b^z}{g}$$

Para el reactor de Transesterificación:

$$P_{carga} = \frac{5 \times 400^3 rpm^3 \times 0,136^5 m^5 \times 898,3 kg/m^3 \times 6^{0,7}}{9,81 m/s^2} \left(\frac{1 min}{60^3 s} \times \frac{9,81 N}{1 kg} \right) \quad (Watts)$$

$$P_{carga} = 217,35 W \approx 0,3 hp$$

Para el reactor de Metóxido:

$$P_{carga} = \frac{5 \times 200^3 rpm^3 \times 0,1^5 m^5 \times 790 kg/m^3 \times 4^{0,8}}{9,81 m/s^2} \left(\frac{1 min}{60^3 s} \times \frac{9,81 N}{1 kg} \right) \quad (Watts)$$

$$P_{carga} = 4,5 W$$

3.5. Selección de motores

Se siguió la metodología para la selección de motores [22]. La característica dinámica de la carga se puede ver en la figura No. 3.22, para realizar el arranque de este tipo de cargas basta con aplicar un torque igual a la mitad del nominal que suele ser superado por casi todos los motores de jaula de ardilla. En nuestro caso, se satisface los requisitos de arranque, con un arrancador estrella-triángulo.

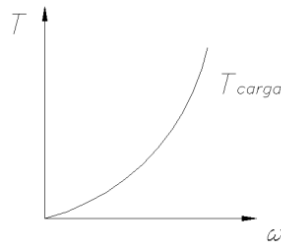


Figura No. 3.22. Curva característica de la carga (mezcladora)

a) Selección del motor que irá en el reactor de Transesterificación:

Siguiendo los procedimientos para la selección del motor eléctrico, se comienza calculando la potencia estática " P_{est} " como se muestra a continuación, siendo:

$\omega = 400 \text{ rpm}$	$\eta_{motor} = 0,85$	$C_s = 1,15$
----------------------------	-----------------------	--------------

$$P_{est} = \frac{P_{carga}}{\eta_{motor}}$$

$$P_{est} = \frac{217,35}{0,85} = 256 \text{ W}$$

Se determina la potencia mecánica real " P_{real} " afectando el valor de la potencia estática por un factor de carga o de servicio " C_s ", el cual es tomado experimentalmente y es recomendable hacerlo en aquellas aplicaciones en las que las necesidades de ciclo de servicio no son bien conocidas (en nuestro caso el servicio es intermitente y su duración es de 60 minutos).

$$P_{real} = C_s P_{est}$$

$$P_{real} = 1,15 \times 256 = 294 \text{ W} \approx 0,4 \text{ hp}$$

Se escogió un motor eléctrico estándar trifásico de 8 polos, 380 V, 60Hz y 0,75 hp, tipo de carcasa NV90LA8; que tendrá un variador de frecuencia para satisfacer la necesidad de disminuir de 870 rpm a la velocidad de giro deseada de 400 rpm. El variador tiene la característica de mantener el torque nominal del motor constante a la velocidad de giro requerida.

Por lo tanto, siguiendo los datos de placa del motor escogido (ver anexo A17):

$$PD^2 = 0.026 \text{ kg.m}^2$$

$$\frac{T_a}{T_n} = 2,2 \quad \frac{T_{min}}{T_n} = 2,1 \quad \frac{T_{max}}{T_n} = 2,3$$

Se sabe que:

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n \frac{\pi}{30}} = \frac{0,75 \times 746}{870 \times \frac{\pi}{30}} = 6,14 \text{ N.m}$$

Por lo tanto:

$$T_a = 13,5 \text{ N.m}$$

$$T_{min} = 12,9 \text{ N.m}$$

$$T_{max} = 14,1 \text{ N.m}$$

El torque resistente de la carga a la salida del motor " T_{carga} " es:

$$T_{carga} = \frac{P_{carga}}{\omega \times \frac{\pi}{30}} = \frac{217,35}{400 \times \frac{\pi}{30}} = 5,2 \text{ N.m}$$

Por lo tanto cumple que:

$$T_n > T_{carga}$$

La verificación del tiempo de puesta en marcha " tpm " se realizó para proteger al motor de un sobrecalentamiento debido a las altas corrientes que se originan en el arranque. Cuando las masas a acelerar en el arranque no son considerables, como es nuestro caso, el " tpm " recomendado para motores de potencia hasta 5 kW es de 6 segundos.

$$T_{motor} = 0,5 \times 0,85^2 \times (T_{min} + T_{max}) = 9,75 \text{ N.m}$$

$$T_{ac} = T_{motor} - T_{carga} = 4,55 \text{ N.m}$$

El momento de inercia del rotor del motor, respecto al eje del motor, es:

$$I_{rotor} = \frac{PD_{rotor}^2}{4} = 0,0065 \text{ kg.m}^2$$

Se asumió que el momento de inercia de masas del sistema de agitación respecto del eje del motor es 10 veces el momento de inercia de masas del rotor del motor:

$$I_{masas} = 10I_{rotor} = 0,065 \text{ kg.m}^2$$

Entonces, el momento de inercia de las masas giratorias respecto al eje del motor, es:

$$I_{total} = I_{rotor} + I_{masas} = 0,0715 \text{ kg.m}^2$$

Por lo tanto, el tiempo de puesta en marcha es:

$$tpm = \frac{I_{total} \times \omega_n \times \frac{\pi}{30}}{T_{ac}}$$

$$tpm = \frac{0,0715 \text{ kg.m}^2 \times 870 \text{ rpm} \times \frac{\pi}{30}}{4,55 \text{ N.m}} = 1,43 \text{ segundos ... Cumple!}$$

b) Selección del motor que irá en el reactor de Metóxido:

Debido a que la potencia requerida es mínima, se seleccionó un motor eléctrico comercial monofásico de 4 polos, 220 V, 60 Hz y $\frac{1}{3}$ hp, con un reductor de 1/10 para disminuir de 1800 rpm a la velocidad de giro deseada de 200 rpm. La ventaja del reductor es que aumenta el momento que entrega el motor en la misma proporción a la que disminuye las rpm. Entonces el valor del torque nominal del motorreductor es:

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n \frac{\pi}{30}} \times \text{reducción} = \frac{0,33 \times 746}{1800 \times \frac{\pi}{30}} \times 10 = 1,3 \text{ N.m}$$

El torque resistente de la carga a la salida del motor es:

$$T_{carga} = \frac{P_{carga}}{\omega \times \frac{\pi}{30}} = \frac{4,5}{200 \times \frac{\pi}{30}} = 0,22 \text{ N.m}$$

Por lo tanto cumple que:

$$T_n > T_{carga}$$

3.6. Cálculo del diámetro del árbol de los agitadores

Se empleó el método conservador EEUA, el cual tiende a sobredimensionar el eje al asumir que el agitador tendrá una obstrucción (la fuerza " F_s ") que causará la flexión del árbol [21].

El torque del motor es:

$$T_n = 6,14 \text{ N.m}$$

Para un servicio de operación no severo, que en nuestro caso es agitar un fluido, se consideró 1,5 como adecuado factor de torque de arranque " M_{pt} ", por tanto:

$$M_{pt} = 1,5T_n$$

$$M_{pt} = 1,5 \times 6,14 = 9,21 \text{ N.m}$$

La fuerza " F_s " que origina la flexión del árbol se asumió estar aplicada a $\frac{3}{4}$ de la longitud de la pala y es igual a:

$$F_s = \frac{8 M_{pt}}{3D_a}$$

$$F_s = \frac{8 \times 9,21}{3 \times 0,136} = 180,6 \text{ N}$$

El momento flector " M_b " originado por esta fuerza es:

$$M_b = F_s l_{sh}$$

$$M_b = 180,6 \times 0,8 = 144,5 \text{ N.m}$$

Por tanto el momento de flexión equivalente " M_{be} " es dado por:

$$M_{be} = \sqrt{M_b^2 + M_{pt}^2}$$

$$M_{be} = \sqrt{144,5^2 + 9,21^2} = 145 \text{ N.m}$$

Aplicando la teoría del máximo esfuerzo cortante (TRESCA), debe cumplir:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_f}{FS} > \sigma = \frac{M_{be} r}{I}$$

Donde:

$$r = \frac{D_{sh}}{2} \quad I = \frac{\pi D_{sh}^4}{64}$$

Se eligió el diámetro del árbol $D_{sh} = 25 \text{ mm}$, por lo tanto:

$$\sigma = \frac{32M_{be}}{\pi D_{sh}^3} = \frac{32 \times 145 \times 10^3}{\pi \times 25^3} = 94,53 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_f}{FS} = \frac{205}{2} = 102,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} > \sigma \dots ok$$

Analizando el árbol bajo una carga torsional pura " τ_t ", entonces:

$$\tau_t = \frac{M_{pt} \times r}{J}$$

$$\tau_t = \frac{M_{pt} \times \frac{D_{sh}}{2}}{\frac{\pi D_{sh}^4}{32}} = \frac{16M_{pt}}{\pi D_{sh}^3}$$

$$\tau_t = \frac{16 \times 9,21 \times 10^3}{\pi \times 25^3} = 3 \text{ N/mm}^2$$

Aplicando la teoría de la máxima energía de distorsión (VON MISSES), debe cumplir:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_f}{FS} > \sqrt{3} \times \tau_t$$

$$\sigma_{adm} = \frac{205}{1,5 \times \sqrt{3}} = 79 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} > \tau_t \dots ok$$

El método FTP [21], basa la selección del diámetro del árbol evadiendo la resonancia a su velocidad de operación (fijando la frecuencia natural del eje " f_n " de tal manera que la velocidad del eje sea el 70% de " f_n "). Siguiendo este método, ver anexo A18, se obtuvo que el diámetro mínimo del eje debía ser:

$$D_{sh} = 23,66 \text{ mm}$$

Ya que:

$$25 > 23,66 \dots \text{No falla por resonancia}$$

Verificando mediante un análisis de fatiga

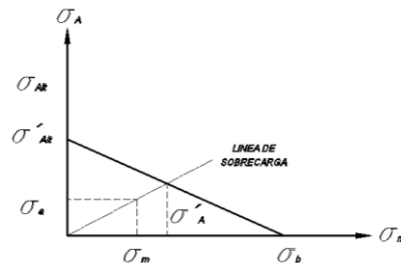


Figura No. 3.23. Diagrama Haigh

Para materiales dúctiles como el AISI304 cumple que para $\sigma_b \leq 1400 \text{ N/mm}^2$, entonces el valor del esfuerzo alternante " σ_{Alt} " es:

$$\sigma_{Alt} = 0,5\sigma_b = 0,5 \times 480 = 240 \text{ N/mm}^2$$

Este valor debe ser modificado por el esfuerzo alternante reducido " σ'_{Alt} " considerando los siguientes factores:

- C_s : Acabado superficial (torneado fino) = 0,8
- C_t : Influencia del diámetro del eje = 25mm sometido a torsión = 0,8
- C_{temp} : Influencia de la temperatura valores $< 250^\circ\text{C}$ = 1
- C_{carga} : Influencia del tipo de carga (torsión) = 1
- C_c : Confiabilidad estadística del 50% = 1
- B_K : Influencia de la concentración de esfuerzos para carga de torsión en canal chavetero fabricado con fresa de disco = 1,4

$$\sigma'_{Alt} = \frac{C_s C_t C_{temp} C_{carga} C_c}{B_K} \sigma_{Alt}$$

$$\sigma'_{Alt} = \frac{0,8 \times 0,8 \times 1 \times 1 \times 240}{1,4} = 110 \text{ N/mm}^2$$

El esfuerzo alternante " σ_a " originado por el momento flector, según Von-Mises será:

$$\sigma_a = \frac{32M_b}{\pi D_{sh}^3}$$

$$\sigma_a = \frac{32 \times 144,5 \times 10^3}{\pi \times 25^3} = 94,2 \text{ N/mm}^2$$

El esfuerzo estático " σ_m " originado por el momento torsor, según Von-Mises será:

$$\sigma_m = \sqrt{3} \left(\frac{16M_{pt}}{\pi D_{sh}^3} \right)$$

$$\sigma_m = \sqrt{3} \left(\frac{16 \times 9,21 \times 10^3}{\pi \times 25^3} \right) = 5,2 \text{ N/mm}^2$$

El límite real a la fatiga " σ'_A " se determina por la intersección de la línea de sobrecarga con la línea de falla por fatiga y es igual a:

$$\sigma'_A = \frac{1}{\frac{1}{\sigma'_{Alt}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_a} \left(\frac{1}{\sigma_b} \right)}$$

Por lo tanto el factor de seguridad a la fatiga será:

$$FS = \frac{\sigma'_A}{\sigma_a} = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma'_{Alt}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_b}}$$

Reemplazando valores:

$$FS = \frac{1}{\frac{94,2}{110} + \frac{5,2}{480}} = 1,15 \dots ok!$$

3.7. Cálculo de chaveta (unión por forma del árbol - agitador)

El material de la chaveta es AISI304, la geometría de la chaveta va acorde con la norma DIN 6885, donde se encuentran normalizadas según el diámetro del árbol. Las consideraciones de cálculo son las siguientes:

- La presión de contacto entre el flanco de la chaveta y el cubo o eje, generada por el torque, debe ser menor que la presión admisible.
- Se realizó el cálculo por resistencia al corte puesto que el AISI304 tiene menor resistencia a la fluencia que el St50.

Donde:

$D_{sh} = 25$	$h^* = 7$	$b^* = 8$	$t_1^* = 4,1$	$t_2^* = 3$
---------------	-----------	-----------	---------------	-------------

Se consideró:

T_a : Torque de arranque = 13,5 N.m (ver acápite 3.5.)

τ_{adm} : Resistencia de fluencia al corte admisible = 79 N/mm² (ver acápite 3.6.)

P_{adm} : Presión admisible = 210 N/mm²

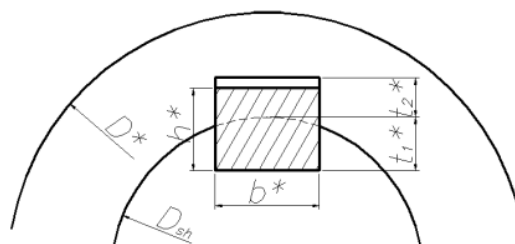


Figura No. 3.24. Dimensiones para chavetas paralelas de extremos redondos

Para el cálculo de la longitud de la chaveta se usó las siguientes expresiones:

Para que no falle por aplastamiento:

$$l \geq \frac{2 \times T_a}{D_{sh} \times (h^* - t_1^*) \times P_{adm}} = \frac{2 \times 13,5 \times 10^3}{25 \times (7 - 4,1) \times 210} = 1,8 \text{ mm}$$

Para que no falle por corte:

$$l \geq \frac{2 \times T_a}{D_{sh} \times b^* \times \tau_{adm}} = \frac{2 \times 13,5 \times 10^3}{25 \times 8 \times 79} = 1,7 \text{ mm}$$

Por tanto el valor longitud teórica de la chaveta " l^* " seleccionada será:

$$l^* = 1,8 \text{ mm}$$

A esta longitud se le suma el ancho " b^* " de la chaveta y luego se aproxima a una longitud estandarizada " l_1^* ", por lo tanto:

$$l_1^* = l^* + b^* = 9,8 \text{ mm}$$

$$l_1^* = 18 \text{ mm} \dots \textit{longitud normalizada}$$

Finalmente las dimensiones de la chaveta son 7x8x18

Por recomendaciones tanto el diámetro exterior " D^* " como la longitud " L^* " del cubo cumplen con las siguientes relaciones:

$$L^* = 1,3 \times D_{sh} = 32,5 \text{ mm}$$

$$D^* = 2 \times D_{sh} = 50 \text{ mm}$$

3.8. Cálculo de prisioneros

Se empleó prisioneros para sujetar el agitador. El prisionero que se encuentra más exigido (que soporta el máximo peso) es el superior; el peso viene dado por los siguientes componentes: el árbol, los acoples, las chavetas y las paletas.

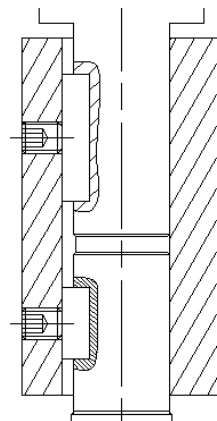


Figura No. 3.25. Sujeción del eje mediante prisioneros

Siendo:

$$W_{\text{árbol}} = \frac{\pi D_{sh}^2}{4} \times l_{sh} \times \rho_{\text{AISI304}}$$

$$W_{\text{árbol}} = \frac{\pi \times 0,025^2}{4} \times 0,8 \times 7850 = 3,1 \text{ kg}$$

El peso de los acoples, chavetas y paletas lo asumimos igual a 1,9 kg. Entonces:

$$W_{\text{total}} = 3,1 + 1,9 = 5 \text{ kg}$$

En la tabla No. 3.3 se muestran valores máximos de la fuerza de sujeción tangencial en la superficie del árbol cuando el par de apriete tiene el valor que se indica. Estos valores tienen validez únicamente si el material del prisionero presenta mayor dureza que el material de la chaveta. En nuestro caso el prisionero es acero al carbono de grado 8 (dureza = 306 - 360 HB) y la chaveta es AISI304 (dureza = 190 HB), lo cual satisface lo requerido.

Tabla No. 3.3. Capacidad de sujeción de los prisioneros de punta en forma de copa [23]

Tamaño del tornillo (mm)	Par de apriete (kg-cm)	Fuerza de sujeción (kg)
6	10,36	113,4
8	23,04	174,6

Aplicando un coeficiente de seguridad, el cual asumiremos igual a 5. Entonces, seleccionando el prisionero con cabeza hueca hexagonal M6x8 – DIN 913, se tiene:

$$\frac{113,4}{5} = 22,7 \geq 5 \dots \text{ok!}$$

3.9. Espesor de paletas

El cubo inferior tiene seis canales en donde se alojarán cada una de las seis paletas de tal manera que estas se posicionen bien y luego se pueda soldar. Para realizar el cálculo del espesor de las paletas y posteriormente calcular su deflexión para asegurar rigidez, se consideró a las paletas como si se trataran de vigas empotradas.

Siguiendo con la simbología del acápite 3.1 de dimensionamiento de los reactores, ver figura No. 3.26, y las consideraciones del acápite 3.6 se tiene:

$F_s = 180,6 \text{ N}$	$T_n = 6,14 \text{ N.m}$	$c = t/2 = 1,6 \text{ mm}$
-------------------------	--------------------------	----------------------------

Por lo tanto la fuerza " F_n " que origina el torque del motor en el extremo de la paleta es:

$$F_n = \frac{T_n}{6(D_a/2)} = \frac{6,14}{3 \times 0,136} = 15,1 \text{ N}$$

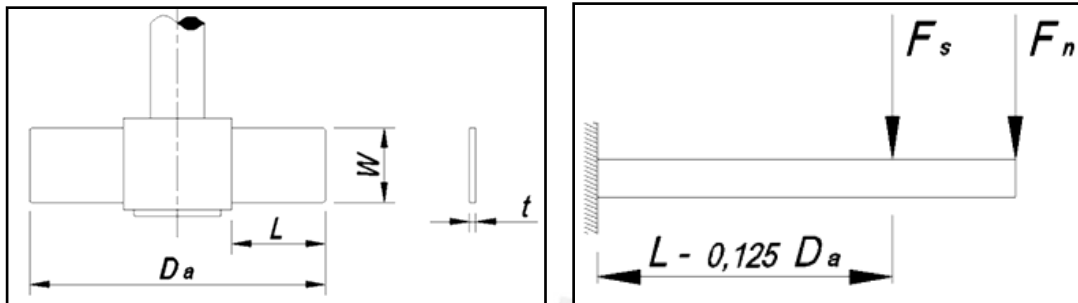


Figura No. 3.26. Izquierda: disposición y dimensiones de las paletas. Derecha: Diagrama de cuerpo libre de una paleta, vista de la parte superior.

Cálculo por resistencia

La sección crítica de la paleta se encuentra en la unión con el cubo (empotramiento) y es donde se encuentra el máximo esfuerzo cuyo valor es:

$$\sigma = \frac{[F_n \times L + F_s \times (L - 0,125D_a)] \times c}{I}$$

Donde el espesor de las paletas seleccionado es $t = 1/8''$ y su inercia viene dada por:

$$I = \frac{Wt^3}{12} = \frac{34 \times 3,175^3}{12} = 90,7 \text{ mm}^4$$

Reemplazando valores:

$$\sigma = \frac{[15,1 \times 43 + 180,6 \times (43 - 0,125 \times 136)] \times 1,6}{90,7} = 94,3 \text{ N/mm}^2$$

Asumiendo un factor de seguridad igual a 2, entonces:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_f}{F.S} = \frac{205}{2} = 102,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} > \sigma \dots \text{cumple}$$

Cálculo por rigidez

Se realizó el cálculo de la deflexión máxima la cual ocurre en el extremo de la paleta y se halla realizando el método de superposición (que consiste en superponer las deflexiones producidas por las mismas cargas al actuar por separado). Entonces:

$$y_{max} = y_{F_n} + y_{F_s}$$

$$y_{max} = \frac{F_n L^3}{3EI} + \frac{F_s (L - 0,125D_a)^2}{6EI} (2L + 0,125D_a)$$

$$y_{max} = \frac{2 \times 15,1 \times 43^3 + 180,6 \times (43 - 0,125 \times 136)^2 \times (2 \times 43 + 0,125 \times 136)}{6 \times 193 \times 10^3 \times 90,7}$$

$$y_{max} = 0,12 \text{ mm} \dots \text{valor aceptable}$$

3.10. Cálculo estructural

La estructura, como se muestra en la figura No. 3.27, se compone de tres partes; la estructura base (sobre la cual van los reactores con todos sus elementos), la estructura superior (que sirve de base del soporte del motorreductor) y el soporte del motorreductor (que va unido a un motorreductor de orientación vertical). La unión entre estos tres elementos estructurales es atornillada.

Los elementos críticos a analizar son el soporte de motorreductor y la estructura base. Para el análisis de estos elementos, se inició realizando el cálculo de las fuerzas externas para posteriormente analizar el estado de esfuerzos de cada elemento.

Las cargas muertas sobre la estructura son las siguientes: el peso total de los reactores con su capacidad máxima de fluido y el motorreductor (ver anexo A12):

$$W_{\text{motorreductor}} = 25 \text{ kg} \approx 246 \text{ N}$$

$$W_{\text{metalóxido}} = 36 \text{ kg} \approx 354 \text{ N}$$

$$W_{\text{transesterificación}} = 123 \text{ kg} \approx 1207 \text{ N}$$

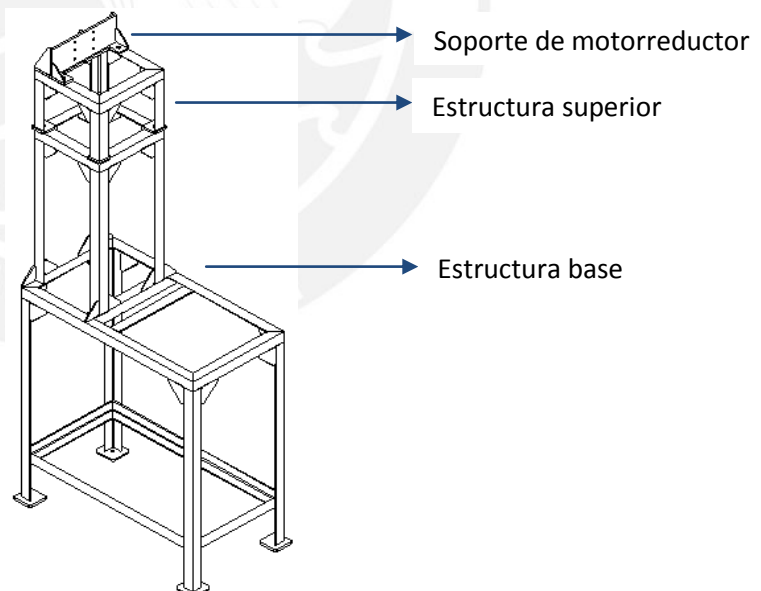


Figura No. 3.27. Estructura del módulo de Transesterificación

3.10.1. Cálculo del soporte del motorreductor

Se realizó el cálculo de resistencia de la plancha considerando a las cargas sobre el soporte como puntuales y a la plancha como empotrada en sus extremos (debido a su unión soldada con las cartelas y la plancha inferior que sirve como base).



Figura No. 3.28. Soporte del motorreductor

El motorreductor origina tres cargas sobre la plancha que servirá como soporte. Las cargas son las siguientes:

- Peso del motorreductor:

$$W_{motorreductor} = 246 \text{ N}$$

- Al trasladar el peso del motorreductor al centro geométrico de la plancha se genera un momento, cuyo valor es:

$$M_w = Distancia \times W_{motorreductor} = 90 \text{ mm} \times 246 \text{ N} = 22,14 \text{ N.m}$$

- El torque nominal del motorreductor:

$$T_n = 1,3 \text{ N.m}$$

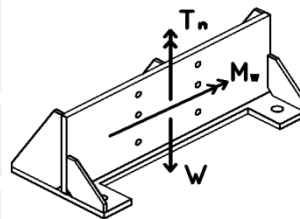


Figura No. 3.29. Estado de cargas en el soporte del motorreductor.

El estado de cargas en la sección transversal de la plancha, como puede verse en la figura No. 3.29, origina esfuerzos normales " σ_{T_n} " (debido al torque nominal), esfuerzos cortantes " τ_w " (debido al peso del motorreductor) y esfuerzos de corte " τ_{M_w} " (debido al momento torsor generado por el peso del motorreductor).

Se calculó los esfuerzos originados mencionados, para así hallar el esfuerzo equivalente según Von Mises cuyo valor debe ser menor que el esfuerzo de fluencia disminuido por un factor de seguridad.

$$\sigma_{T_n} = \frac{T_n \times a/2}{I_y}$$

El esfuerzo cortante tiene su valor máximo en los bordes de la sección transversal, al nivel del eje neutro.

$$\tau_w = \frac{W_{motorreductor} \times Q}{I_x \times a} = \frac{1,5 \times W_{motorreductor}}{A}$$

El esfuerzo cortante máximo se presenta en un punto de la sección transversal que esté menos distante del eje central de la flecha. En el caso particular de una sección rectangular maciza, se presenta en el punto medio de cada lado mayor.

$$\tau_{M_w} = \frac{M_w \times (3a + 1,8b)}{8a^2b^2}$$

Donde:

$$A = ab \quad I_y = \frac{a^3b}{12}$$

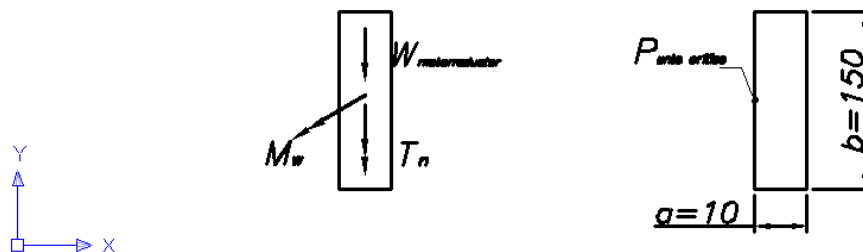


Figura No. 3.30. Izquierda: estado de cargas en la sección transversal de la plancha. Derecha: punto crítico y cotas de la plancha.

Entonces:

$$\sigma_{T_n} = \frac{1,3 \times 10^3 \times (10/2)}{(10^3 \times 150/12)} = 0,52 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_w = \frac{1,5 \times 246}{10 \times 150} = 0,25 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{M_w} = \frac{22,14 \times 10^3 \times (3 \times 10 + 1,8 \times 150)}{8 \times 10^2 \times 150^2} = 0,37 \text{ N/mm}^2$$

Por lo tanto, según Von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{T_n}^2 + 3(\tau_w^2 + \tau_{M_w}^2)}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{0,52^2 + 3(0,25^2 + 0,37^2)} = 0,93 \text{ N/mm}^2$$

Luego, debe cumplir:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{FLUENCIA}}{2} \geq \sigma_{eq}$$

$$125 \geq 0,93 \dots OK!$$

Se realizó el cálculo de la deflexión de la placa (flecha máxima " $y_{m\acute{a}x}$ "), considerando únicamente la deflexión originada por el torque del motorreductor " T_n ", ya que para evitar la deflexión debido a la carga del peso del motorreductor se colocó una cartela

de refuerzo en el centro de la plancha como se puede ver en la figura No. 3.28. La fórmula de la deformación de la plancha debido al torque del motorreductor es [24]:

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{1}{6EI}(3M_1x^2 - R_1x^3)$$

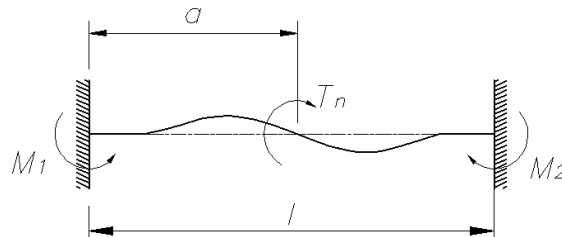


Figura No. 3.31. Modelo para el cálculo de la deflexión de la plancha debido al torque del motorreductor.

Donde:

I : Momento de inercia de la sección transversal.

E : Módulo de elasticidad del acero estructural ASTM A36.

$l = 374 \text{ mm}$	$a = l/2 = 187 \text{ mm}$	$M_0 = T_n = 1,3 \text{ N.m}$
$E = 200000 \text{ N/mm}^2$	$I = \frac{1}{12} \times 150 \times 10^3 = 12500 \text{ mm}^2$	

$$M_1 = -\frac{M_0}{l^2}(4la - 3a^2 - l^2)$$

$$M_1 = -\frac{1,3 \times 10^3}{374^2}(4 \times 374 \times 187 - 3 \times 187^2 - 374^2) = -325 \text{ N.mm}$$

$$M_2 = \frac{M_0}{l^2}(2la - 3a^2)$$

$$M_2 = \frac{1,3 \times 10^3}{374^2}(2 \times 374 \times 187 - 3 \times 187^2) = 325 \text{ N.mm}$$

$$R_1 = -6\frac{M_0}{l^3}(al - a^2)$$

$$R_1 = -\frac{6 \times 1,3 \times 10^3}{374^3}(374 \times 187 - 187^2) = -5,21 \text{ N}$$

$$R_2 = 6\frac{M_0}{l^3}(al - a^2)$$

$$R_2 = \frac{6 \times 1,3 \times 10^3}{374^3}(374 \times 187 - 187^2) = 5,21 \text{ N}$$

$$x = l - \frac{2M_2}{R_2} = 374 - \frac{2 \times 325}{5,21} = 249,24 \text{ mm}$$

Para utilizar esta fórmula se consideró empotrado los extremos de la placa, asimismo que la parte inferior de la placa no está soldada con la plancha horizontal y por lo tanto queda libre en toda su longitud.

Entonces:

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{1}{6 \times 200000 \times 12500} (3 \times 325 \times 249,24^2 - 5,21 \times 249,24^3)$$

$$y_{m\acute{a}x} = 1,34 \times 10^{-3} \text{ mm ... OK!}$$

3.10.2. Cálculo de la estructura base

Para el cálculo de la estructura se define lo siguiente:

- Se utilizó perfiles L 2"x2"x1/4". El material de la estructura es acero estructural calidad ASTM A370, Grado A36 cuyo esfuerzo de fluencia es:

$$\sigma_{FLUENCIA} = 2530 \text{ kg/cm}^2 \approx 250 \text{ N/mm}^2$$

- Para efecto de cálculo, las cargas totales son amplificadas en 25%.

Entonces, el peso total del reactor de Transesterificación, de Metóxido y el motorreductor del reactor de Metóxido, que se transmite en cada uno de sus apoyos tiene un valor amplificado de:

$$\checkmark \text{ Peso amplificado reactor transesterificación} = 123 \times 1,25 = 153,75 \text{ kg}$$

Número de apoyos: 4

$$153,75 \div 4 = 38,44 \text{ kg} \approx 380 \text{ N}$$

$$\checkmark \text{ Peso amplificado reactor metóxido} = 36 \times 1,25 = 45 \text{ kg}$$

Número de apoyos: 4

$$45 \div 4 = 11,25 \text{ kg} \approx 111 \text{ N}$$

$$\checkmark \text{ Peso amplificado del motorreductor} = 25 \times 1,25 = 31,25 \text{ kg}$$

Número de apoyos (se consideró que el peso se transmite a través de las cartelas delanteras y se localizan como fuerzas puntuales en la unión atornillada): 2

$$31,25 \div 2 = 15,6 \text{ kg} \approx 154 \text{ N}$$

- ✓ Fuerza Axial debido al torque de los motores:

Motor de Transesterificación: se realizó el cálculo de la fuerza axial al perfil estructural " F_c " originada por el torque del motor de Transesterificación " T_n " de la siguiente manera:

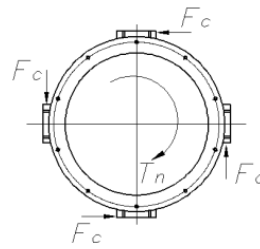


Figura No. 3.32. Fuerza axial al perfil estructural producida por el torque del motor

Siendo:

$D_e = 16" = 406,4 \text{ mm}$	$T_n = 6,14 \text{ N.m}$
--------------------------------	--------------------------

Puesto que son cuatro apoyos, como se ve en la figura, entonces:

$$T_n = 4F_c(D/2)$$

$$F_c = \frac{T_n}{2 D_e} = \frac{6,14}{2 \times 406,4 \times 10^{-3}} = 7,55 \text{ N}$$

Amplificando la fuerza en 25%

$$7,55 \times 1,25 = 9,44 \text{ N}$$

Motor de Metóxido: se realizó el cálculo de las fuerzas axiales al perfil estructural "F_a", "F_b" y "F_c" originadas por el torque del motorreductor de Metóxido "T_n" de la siguiente manera:

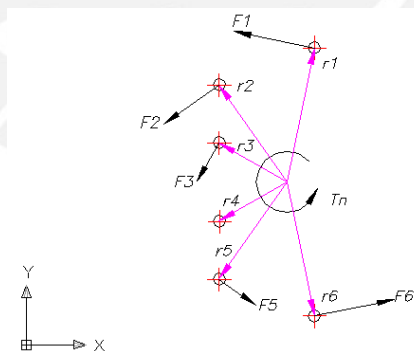


Figura No. 3.33. Fuerzas producidas por el torque del motor

Cumple:

$$\frac{F_1}{r_1} = \frac{F_2}{r_2} = \frac{F_n}{r_n}$$

Entonces:

$$\sum T = 0$$

$$T_n - r_1 \times F_1 - r_2 \times F_2 - r_3 \times F_3 - r_4 \times F_4 - r_5 \times F_5 - r_6 \times F_6 = 0$$

$$T_n - r_1 \times F_1 - \frac{r_2^2}{r_1} \times F_1 - \frac{r_3^2}{r_1} \times F_1 - \frac{r_4^2}{r_1} \times F_1 - \frac{r_5^2}{r_1} \times F_1 - \frac{r_6^2}{r_1} \times F_1 = 0$$

$$T_n - \frac{F_1}{r_1} \times (r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2 + r_5^2 + r_6^2) = 0$$

Se sabe:

$$T_n = 1,3 \text{ N.m}$$

Del gráfico:

$$r_1 = r_6 = 167,8 \text{ mm}$$

$$r_2 = r_5 = 137,4 \text{ mm}$$

$$r_3 = r_4 = 85,9 \text{ mm}$$

Reemplazando:

$$F_1 = F_6 = 2,01 \text{ N}$$

$$F_2 = F_5 = 1,64 \text{ N}$$

$$F_3 = F_4 = 1,02 \text{ N}$$

Descomponiendo las fuerzas en X-Y:

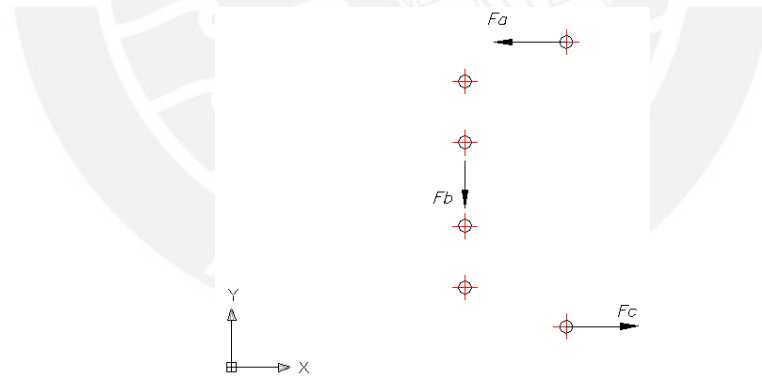


Figura No. 3.34. Fuerzas resultantes en dirección axial a los perfiles.

$$F_a = F_c = F_1 \times \cos 15^\circ + F_2 \times \cos 31^\circ + F_3 \times \cos 57^\circ$$

$$F_a = F_c = 1,94 + 1,4 + 0,56$$

$$F_a = F_c = 3,9 \text{ N}$$

$$F_b = 2 \times (F_2 \times \sin 31^\circ + F_3 \times \sin 57^\circ)$$

$$F_b = 3,4 \text{ N}$$

Amplificando la fuerza en 25%

$$F_a = F_c = 3,9 \times 1,25 = 4,875 \text{ N} \approx 5 \text{ N}$$

$$F_b = 3,4 \times 1,25 = 4,25 \text{ N}$$

Las figuras No. 3.35 y 3.36, muestran la distribución de cargas externas en la estructura:

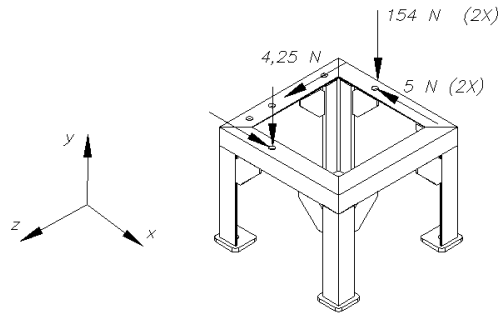


Figura No. 3.35. Estructura superior: distribución de carga externa.

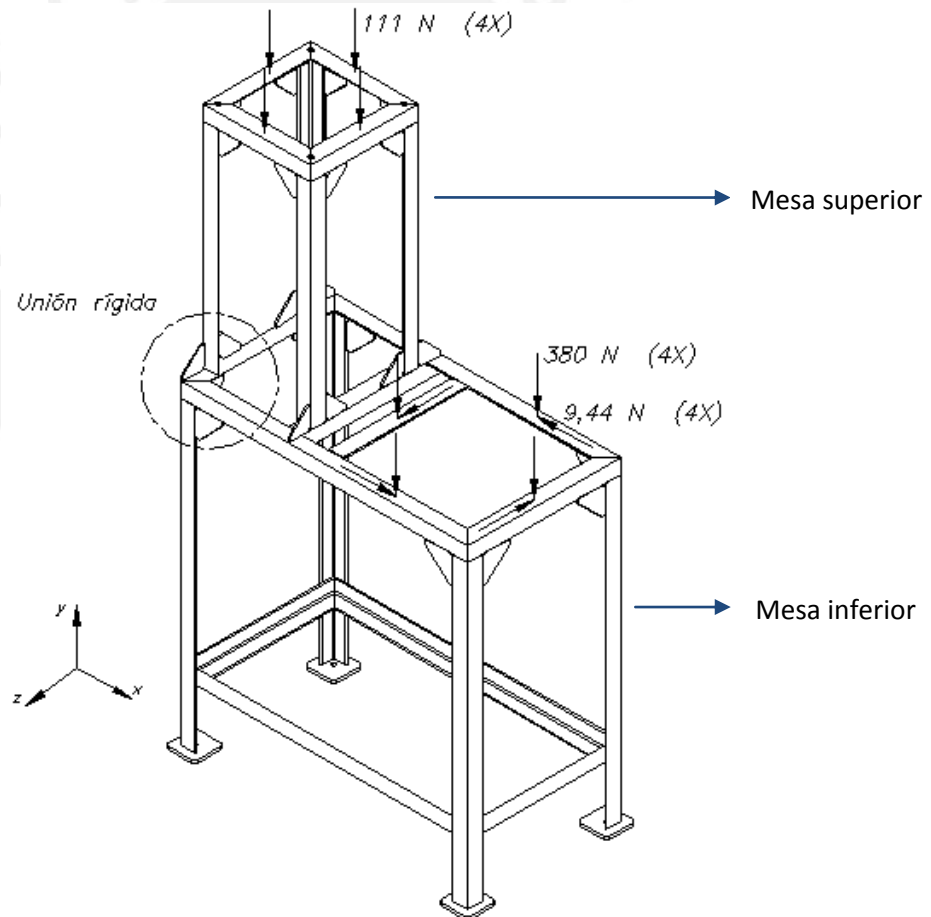


Figura No. 3.36. Estructura base: distribución de carga externa.

Por la distribución de cargas y la forma geométrica de la estructura, los perfiles críticos son las columnas y el perfil horizontal de la mesa inferior. Por lo tanto, para realizar el

cálculo de la estructura base, primero se determinó las reacciones en la base de las columnas de la mesa superior para luego calcular los esfuerzos de los perfiles críticos. Para realizar el cálculo de las reacciones en la base de la mesa superior, se aplicó el principio de la superposición. Las reacciones debido a las fuerzas horizontales se calculó con el análisis aproximado de estructuras estáticamente indeterminadas y las originadas por las fuerzas verticales se realizó con el método de análisis de marcos sin desplazamiento lateral [25].

En el análisis aproximado de estructuras estáticamente indeterminadas, se consideró a la estructura superior como una unidad rígida, articulada en sus puntos de unión con las columnas. Además, la armadura mantiene rectas a las columnas dentro de la región de unión cuando el portal está sometido a un desplazamiento lateral Δ , ver figura 3.37 - centro.

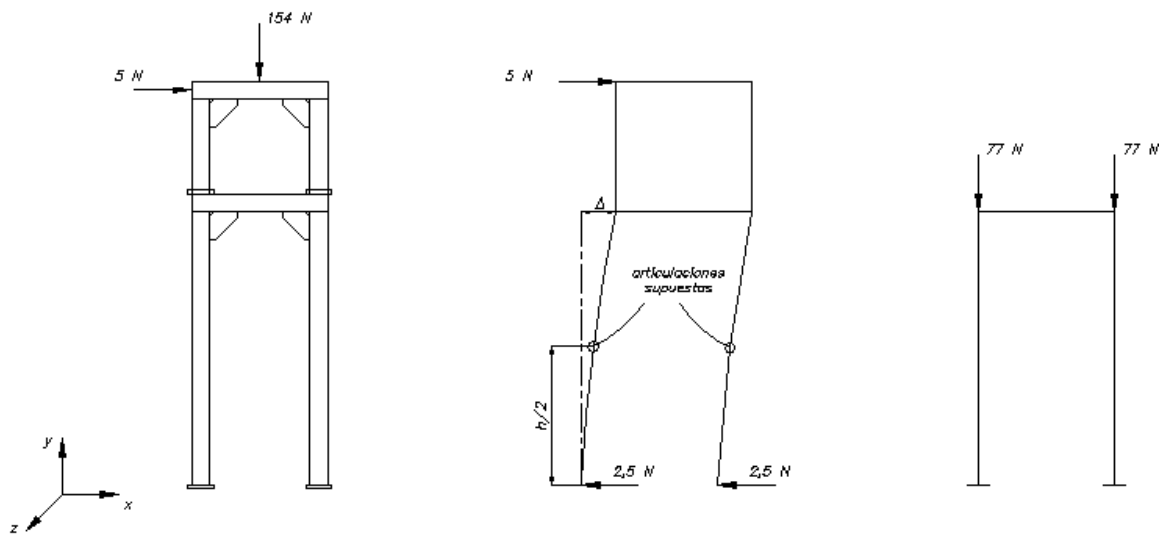


Figura No. 3.37. Izquierda: Distribución de cargas a analizar sobre la estructura superior. Centro: simulación de la estructura ante una carga horizontal. Derecha: efecto de la carga vertical sobre la mesa superior.

El cálculo de las reacciones debido a la fuerza horizontal se determina con las ecuaciones de equilibrio de la siguiente manera:

Sumatoria de fuerzas en dirección al eje x:

$$V_x = -\frac{5}{2} = -2,5 N$$

Sumatoria de momentos (desde el punto "a") de la parte inferior:

$$M_z = V \times \frac{h}{2} = 2,5N \times 375mm \times \frac{1m}{1000mm} = 0,94 N.m$$

Sumatoria de momentos (desde el punto “b”) de la parte superior:

$$F_{normal} = \frac{(250 + 375) \times 5}{374} = 8,36 \text{ N}$$

Debido a la simetría existente en la geometría del marco y de las cargas verticales, mostradas en la figura 3.37 - derecha, estas cargas únicamente originan reacciones verticales en la base de la mesa superior. Siendo su valor:

$$F_{normal} = 77 \text{ N}$$

El diagrama de cuerpo libre de la mesa superior debido a la fuerza horizontal y a las fuerzas verticales, se muestra en la figura 3.38- izquierda y derecha respectivamente.

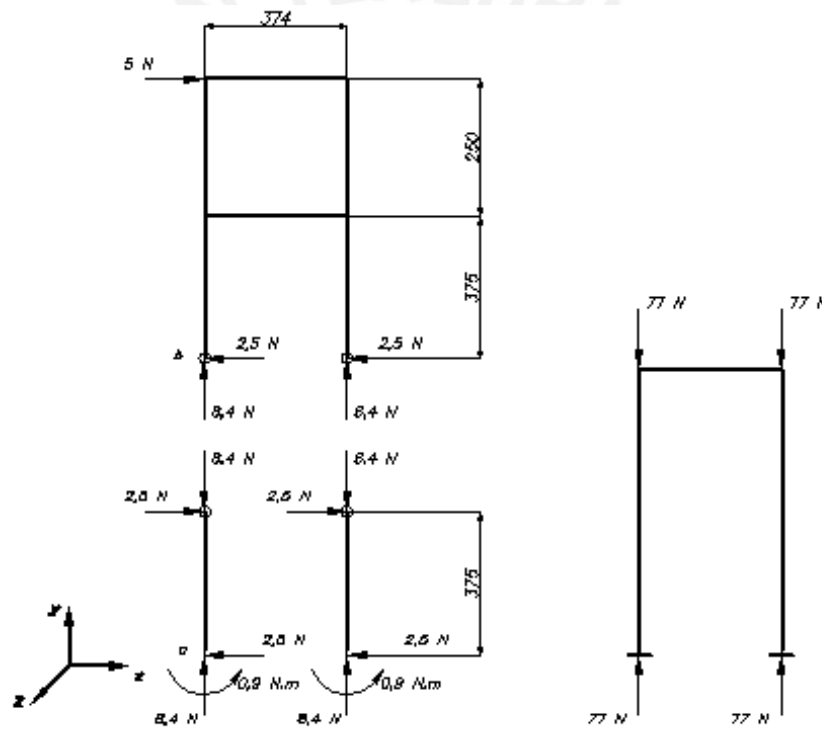


Figura No. 3.38. Diagrama de cuerpo libre de la mesa superior. Izquierda: debido a la fuerza horizontal. Derecha: debido a las fuerzas verticales.

De la misma manera se realizó el cálculo para la siguiente fuerza horizontal en dirección del eje z como se muestra en la figura 3.39. Los resultados son los siguientes:

$$V_z = -\frac{4,25}{2} = -2,125 \text{ N}$$

$$M_x = -V \times \frac{h}{2} = -2,125 \text{ N} \times 375 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = -0,8 \text{ N.m}$$

$$F_{normal} = \frac{(250 + 375) \times 5}{374} = 7,1 \text{ N}$$

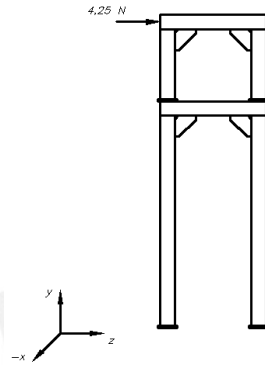


Figura No. 3.39. Diagrama de cuerpo libre de la mesa superior.

Como se muestra en la figura 3.40 el marco es simétrico en carga y geometría, entonces no tendrá desplazamientos laterales. Por ello se empleó el método de análisis de marcos sin desplazamiento lateral [25] para determinar las reacciones originadas por este tipo de carga.

Según la configuración de la carga y de la mesa superior, ver figura 3.36, cumple que existe tres sistemas idénticos a analizar, por lo tanto las reacciones tendrán igual valor pero diferente dirección.

Cabe resaltar que en nuestro análisis se despreció los efectos que puedan ocasionar las cargas sobre el lado opuesto del pórtico que estamos analizando.

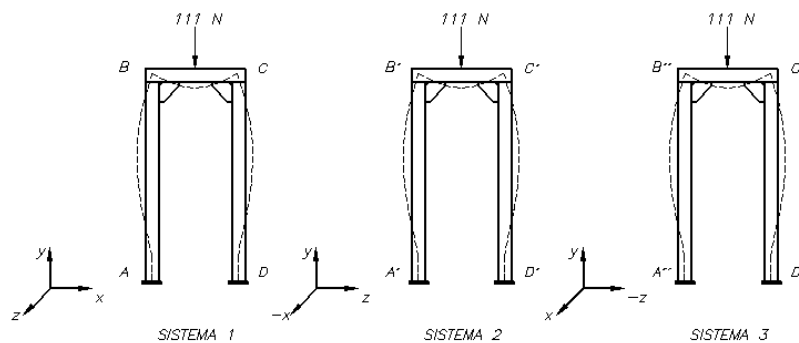


Figura No. 3.40. Diagrama de cuerpo libre de los tres sistemas a analizar, cada uno representado con sus coordenadas y en líneas punteadas se muestra la posible deformación.

Considerando empotramiento en las bases y debido a que no ocurre desplazamiento lateral, entonces $\theta_A = \theta_D = 0$ y $\psi_{AB} = \psi_{BC} = \psi_{CD} = 0$.

En la figura 3.41 se muestra el caso específico para determinar los momentos de empotramiento para BC y son los siguientes (momento en sentido horario es positivo):

$$FEM_{BC} = -PL/8 = -111 \times 0,374/8 = -5,19 \text{ N.m}$$

$$FEM_{CB} = PL/8 = 111 \times 0,374/8 = 5,19 \text{ N.m}$$

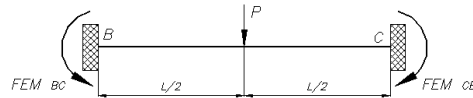


Figura No. 3.41. Momentos de empotramiento (FEM) del perfil horizontal.

Aplicando las ecuaciones pendiente - desviación:

$$M_{AB} = 2E \left(\frac{I}{L_{AB}} \right) [2\theta_A + \theta_B - 3\psi_{AB}] + FEM_{AB}$$

Entonces:

$$M_{AB} = 2E \left(\frac{I}{0,75} \right) [2(0) + \theta_B - 3(0)] + 0 = 2,67 \times EI\theta_B$$

$$M_{BA} = 2E \left(\frac{I}{0,75} \right) [2\theta_B + 0 - 3(0)] + 0 = 5,33 \times EI\theta_B$$

$$M_{BC} = 2E \left(\frac{I}{0,374} \right) [2\theta_B + \theta_C - 3(0)] - 5,19 = 10,7 \times EI\theta_B + 5,35 \times EI\theta_C - 5,19$$

$$M_{CB} = 2E \left(\frac{I}{0,374} \right) [2\theta_C + \theta_B - 3(0)] + 5,19 = 10,7 \times EI\theta_C + 5,35 \times EI\theta_B + 5,19$$

$$M_{CD} = 2E \left(\frac{I}{0,75} \right) [2\theta_C + 0 - 3(0)] + 0 = 5,33 \times EI\theta_C$$

$$M_{DC} = 2E \left(\frac{I}{0,75} \right) [2(0) + \theta_C - 3(0)] + 0 = 2,67 \times EI\theta_C$$

De las ecuaciones de equilibrio:

$$M_{BA} + M_{BC} = 0$$

$$M_{CB} + M_{CD} = 0$$

Despejando:

$$16,03 \times EI\theta_B + 5,35 \times EI\theta_C = 5,19$$

$$16,03 \times EI\theta_C + 5,35 \times EI\theta_B = -5,19$$

Entonces:

$$\theta_B = -\theta_C = 0,486/EI$$

Finalmente:

$$M_{AB} = 2,67 \times EI(0,486/EI) = 1,3 \text{ N.m}$$

$$M_{DC} = 2,67 \times EI(-0,486/EI) = -1,3 \text{ N.m}$$

Las reacciones (influyentes en el pórtico crítico de la mesa inferior a evaluar) de los tres sistemas serán:

Reacciones en los nudos	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
A(izquierda)	$F_{normal} = 55,5 N$ $M_z = -1,3 N.m$	-	-
D(derecha)	$F_{normal} = 55,5 N$ $M_z = 1,3 N.m$	-	-
D'(izquierda)	-	$F_{normal} = 55,5 N$ $M_x = -1,3 N.m$	-
A''(derecha)	-	-	$F_{normal} = 55,5 N$ $M_x = -1,3 N.m$

En resumen, realizando la sumatoria de todas las reacciones (en la base de las columnas de la mesa superior) originadas por la distribución de cargas, se tiene:

Fuerzas verticales (N)		Fuerzas horizontales (N)		Momento flector (N.m)	
Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha
$F_N = 203,5$	$F_N = 203,5$	$V_x = -2,5$	$V_x = -2,5$	$M_x = -2,1$	$M_x = -1,3$
-	-	$V_y = 0$	$V_y = 0$	$M_y = 0$	$M_y = 0$
-	-	$V_z = -2,125$	$V_z = 0$	$M_z = -0,36$	$M_z = 2,24$

También se debe de calcular las reacciones debido al peso del reactor de Transesterificación y a la fuerza horizontal debido al torque del motor que se transmiten en los apoyos del reactor. Se consideró que la fuerza horizontal es soportada en sus extremos en partes iguales. Asimismo, la fuerza vertical debido al peso se transmite en sus extremos en partes iguales generando un momento de empotramiento (FEM) que para este caso en particular, ver figura 3.42, se calcula de la siguiente manera:

$$FEM_A = -PL/8 = -380 \times 0,534/8 = -25,37 N.m$$



Figura No. 3.42. Momentos de empotramiento (FEM) debido al peso del reactor de Transesterificación.

La junta entre la base de las columnas de la mesa superior y el perfil horizontal de la mesa inferior se consideró como un punto de unión rígida (debido a la unión soldada y las cartelas colocadas, considerando que la pequeña longitud de desfase entre las columnas de la mesa inferior y la mesa superior es aminorada por las cartelas colocadas); por lo tanto, las reacciones en la base de la mesa superior originadas por la distribución de cargas sobre esta, se encuentran directamente sobre el perfil horizontal crítico de la mesa inferior.

En la figura 3.43 se muestra de manera separada el estado de cargas externas (magnitud y dirección) sobre el pórtico de la mesa inferior a analizar. Visto de izquierda a derecha se observa lo siguiente: fuerzas horizontales, fuerzas verticales, momentos flectores y momentos torsores; en la cual las unidades de las fuerzas, momentos y distancias están en Newton, Newton por metro y milímetro respectivamente.

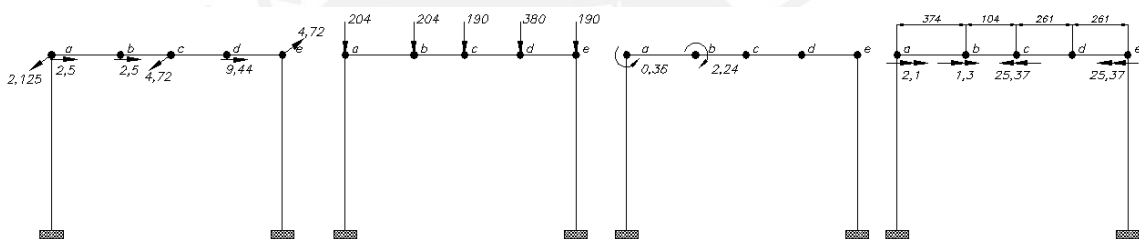


Figura No. 3.43. Estado de cargas sobre el pórtico.

Del estado de cargas sobre el pórtico, se consideró despreciable las fuerzas horizontales y los momentos flectores. Asimismo para facilitar el cálculo, se consideró el efecto del momento torsor únicamente sobre el perfil horizontal.

Entonces, para realizar el cálculo de las reacciones en la base de la mesa inferior debido a las fuerzas verticales, se utilizó el método de análisis de los desplazamientos: distribución de momentos [25].

Cálculo de las reacciones debido a fuerzas verticales:

Debido a que el marco está sometido a cargas verticales no simétricas tiene la tendencia a desplazarse lateralmente. Se utilizó el método de análisis de los desplazamientos: distribución de momentos, para determinar la deflexión “ Δ ” y los momentos internos usando el principio de la superposición, ver figura 3.44.

Donde:

- Δ : Deflexión (desplazamiento del marco)
- R : Fuerza restrictiva (originada por el soporte artificial)

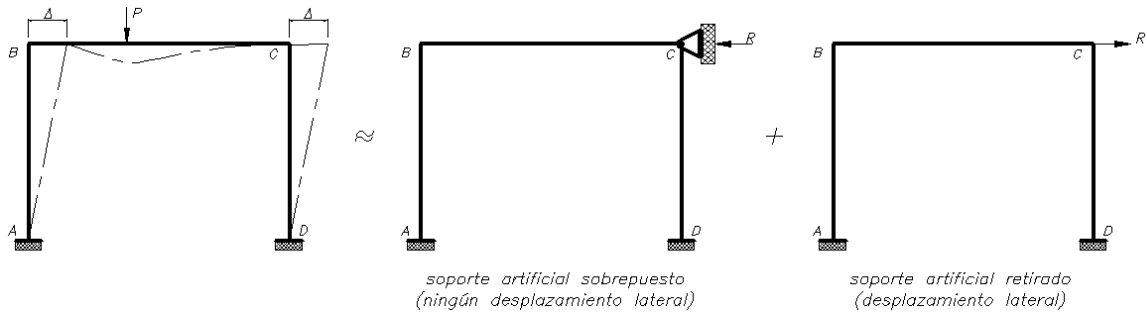


Figura No. 3.44. Superposición empleada en el cálculo

A continuación se mostrará el procedimiento de cálculo para la fuerza ubicada en el punto "b" (el cálculo de las reacciones debido a las fuerzas ubicadas en los puntos "c" y "d" se muestran en el anexo A19 y tiene la misma metodología).

Factores de rigidez "K": definido como el momento requerido para hacer girar el extremo de la viga en un ángulo de 1 radián.

$$K_{AB} = \frac{4EI}{L_{AB}} \quad K_{BC} = \frac{4EI}{L_{BC}} \quad K_{CD} = \frac{4EI}{L_{CD}}$$

Factor de distribución "DF": es la fracción del momento resistente total suministrado por el miembro.

$$DF_i = \frac{K_i}{\sum K_i}$$

$$DF_{AB} = 0 \quad DF_{BA} = 0,488 \quad DF_{BC} = 0,512$$

$$DF_{CB} = 0,512 \quad DF_{CD} = 0,488 \quad DF_{DC} = 0$$

Momentos de empotramiento "FEM": dependen del tipo de carga que soporten.

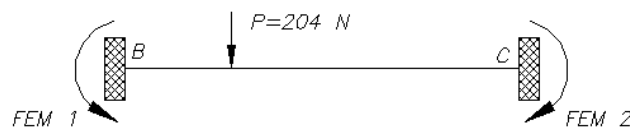


Figura No. 3.45. Momentos de empotramientos en la estructura

$$FEM_{BC} = -\frac{204 \times 626^2 \times 374}{1000^2 \times 10^3} = -29,89 \text{ N.m}$$

$$FEM_{CB} = \frac{204 \times 374^2 \times 626}{1000^2 \times 10^3} = 17,86 \text{ N.m}$$

Entonces, el cálculo de momentos internos debido a la fuerza horizontal se muestra a continuación:

Nudo	A	B		C		D
Miembro	AB	BA	BC	CB	CD	DC
DF	0	0,488	0,512	0,512	0,488	0
FEM Dist.		14,58	-29,89 15,31	17,86 -9,15	-8,71	
CO Dist.	7,29		-4,57 2,34	7,66 -3,92		-4,36
CO Dist.	1,12		-1,96 1,00	1,17 -0,60		-1,87
CO Dist.	0,48		-0,30 0,15	0,50 -0,26		-0,29
ΣM	8,89	17,92	-17,92	13,27	-13,27	-6,51

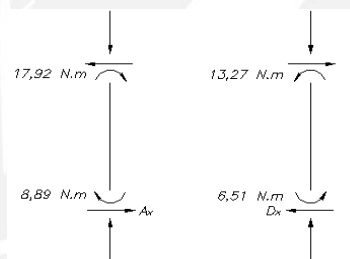


Figura No. 3.46. Diagrama de cuerpo libre de las columnas de la estructura

Aplicando las ecuaciones de equilibrio, entonces:

$$A_x = \frac{8,89 + 17,92}{1,05} = 25,53 \text{ N}$$

$$D_x = \frac{13,27 + 6,51}{1,05} = 18,83 \text{ N}$$

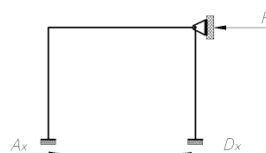


Figura No. 3.47. Diagrama de cuerpo libre del marco

$$R = 25,53 - 18,83 = 6,7 \text{ N}$$

Segunda parte

Ahora debe aplicarse un valor igual pero opuesto $R = 6,7 \text{ N}$ al marco en C y calcularse los momentos internos. Se supuso $M = -100 \text{ N.m}$; fue necesario suponer un momento negativo para que el desplazamiento generado sea hacia la derecha. Como B y C se

desplazan en una misma distancia "Δ" y AB y DC tienen las mismas E, I y L, el momento de empotramiento en AB será el mismo que en DC.

Nudo	A	B		C		D
Miembro	AB	BA	BC	CB	CD	DC
DF	0	0,488	0,512	0,512	0,488	0
FEM	-100	-100	51,22	51,22	-100	-100
Dist.		48,78	51,22	51,22	48,78	
CO	24,39		25,61	25,61		24,39
Dist.		-12,49	-13,12	-13,12	-12,49	
CO	-6,25		-6,56	-6,56		-6,25
Dist.		3,20	3,36	3,36	3,20	
CO	1,60		1,68	1,68		1,60
Dist.		-0,82	-0,86	-0,86	-0,82	
ΣM	-80,26	-61,33	61,33	61,33	-61,33	-80,26

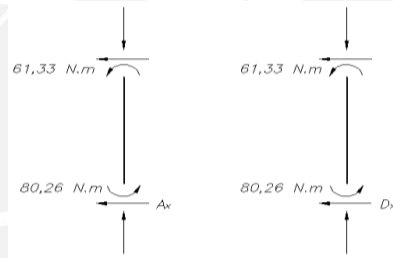


Figura No. 3.48. Diagrama de cuerpo libre de las columnas de la estructura

$$A_x = D_x = \frac{80,26 + 61,33}{1,05} = 134,85 \text{ N}$$

$$R' = A_x + D_x = 269,7 \text{ N}$$

Los momentos determinados por $R = 6,7 \text{ N}$ pueden determinarse por proporción. Por lo tanto, el momento resultante en el marco, es igual a la suma de los calculados en el primer cuadro más la cantidad proporcional del segundo cuadro.

$$\frac{R}{R'} = \frac{6,7}{269,7} = 0,0248$$

$$M_{AB} = 8,89 + 0,0248 \times (-80,26) = 6,89 \text{ N.m}$$

$$M_{BA} = 17,92 + 0,0248 \times (-61,33) = 16,4 \text{ N.m}$$

$$M_{BC} = -16,4 \text{ N.m}$$

$$M_{CB} = 13,27 + 0,0248 \times 61,33 = 14,79 \text{ N.m}$$

$$M_{CD} = -14,79 \text{ N.m}$$

$$M_{DC} = 6,51 + 0,0248 \times (-80,26) = -8,5 \text{ N.m}$$

Aplicando las ecuaciones de equilibrio, entonces:

$$A_y = \frac{204 \times 0.626 + 16,4 - 14,79}{1,05} = 129,31 \text{ N}$$

$$D_y = P - A_y = 204 - 129.31 = 74,69 \text{ N}$$

$$A_x = \frac{6,89 + 16,4}{1,05} = 22,18 \text{ N}$$

$$D_x = \frac{-14,79 - 8,5}{1,05} = -22,18 \text{ N}$$

A continuación se muestra los momentos internos y las reacciones en las columnas y el perfil horizontal, tomando en cuenta el efecto de todas las fuerzas verticales. Asimismo, en la figura 3.49, se muestra el diagrama de cuerpo libre de cada elemento.

$$M_{AB} = 6,89 + 7,5 + 14,16 = 28,55 \text{ N.m}$$

$$M_{BA} = 16,4 + 15,62 + 21,59 = 53,61 \text{ N.m}$$

$$M_{BC} = -53,61 \text{ N.m}$$

$$M_{CB} = 14,79 + 15,34 + 26,27 = 56,4 \text{ N.m}$$

$$M_{CD} = -56,4 \text{ N.m}$$

$$M_{DC} = -8,5 - 7,78 - 9,47 = -25,75 \text{ N.m}$$

Aplicando las ecuaciones de equilibrio, entonces:

$$A_x = 22,18 + 22,02 + 34,04 = 78,24 \text{ N}$$

$$A_y = 129,31 + 99,46 + 94,5 + 204 = 527,27 \text{ N}$$

$$D_x = -22,18 - 22,02 - 34,04 = -78,24 \text{ N}$$

$$D_y = 74,69 + 90,54 + 285,5 + 190 = 640,73 \text{ N}$$

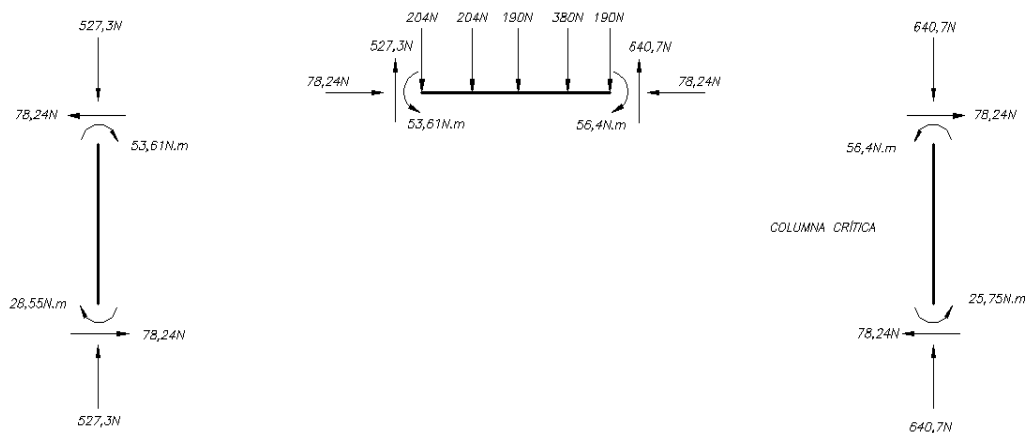


Figura No. 3.49. Diagrama de cuerpo libre.

Con los resultados obtenidos se realizará el análisis de los elementos críticos del pórtico; se comenzó con el perfil horizontal y luego con el perfil vertical más crítico.

Cálculo por resistencia al perfil horizontal

Como se puede ver en la figura No. 3.50, la parte del perfil más exigido es donde actúa la fuerza externa en el punto "c" y es donde se encuentra el esfuerzo máximo cuyo valor es:

$$\sigma_{\text{máximo}} = \frac{Mc}{I}$$

Donde:

- c : distancia perpendicular del eje neutro al punto más alejado de este eje y sobre el cual actúa el momento interno resultante = $0,592 \text{ in} = 15,04 \text{ mm}$
- M : Momento interno resultante = $79,75 \text{ N.m}$
- I : Momento de inercia de la sección transversal, calculado respecto al eje neutro = $0,348 \text{ in}^4 = 144,45 \times 10^3 \text{ mm}^4$ (ver anexo A20).

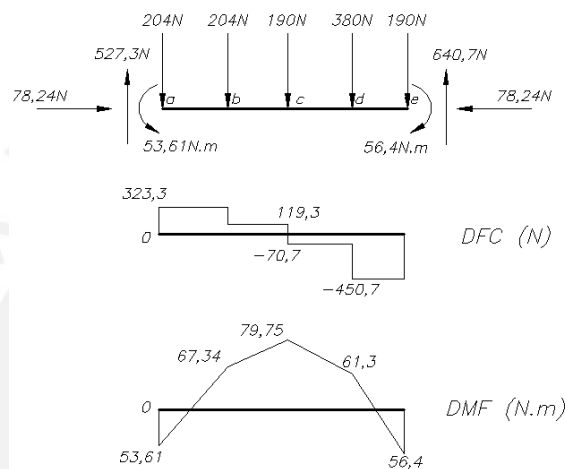


Figura No. 3.50. Diagrama de cuerpo libre, diagrama de fuerza cortante y momento flector del perfil horizontal respectivamente (señalado de arriba para abajo)

Reemplazando valores:

$$\sigma_{\text{máximo}} = \frac{79,75 \times 10^3 \times 15,04}{144,45 \times 10^3} = 8,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{límite}} = 2530 \text{ kg/cm}^2 \approx 248,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{admisible}} = \frac{\sigma_{\text{límite}}}{F.S.} = \frac{248,2}{4} = 62,05 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{admisible}} \geq \sigma_{\text{máximo}} \dots \text{cumple}$$

Cálculo de resistencia y rigidez al torsor del perfil horizontal

Se realizó el cálculo de resistencia y rigidez del perfil horizontal 2"x2"x1/4" cuyo estado de cargas se muestra en la figura No. 3.51. Donde:

T_a, T_e : reacciones en los extremos del perfil.

G : Módulo de rigidez al corte del material = $75 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

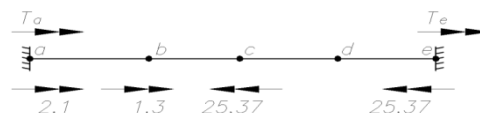


Figura No. 3.51. Diagrama de cuerpo libre del perfil horizontal, sometido a torsión pura.

De las ecuaciones de equilibrio:

$$T_a + T_e + 2,1 + 1,3 - 25,37 - 25,37 = 0$$

Asumiendo que el perfil es empotrado en los extremos, entonces el ángulo de torsión de un extremo de la flecha con respecto al otro debe ser cero; luego, la ecuación de compatibilidad puede escribirse como:

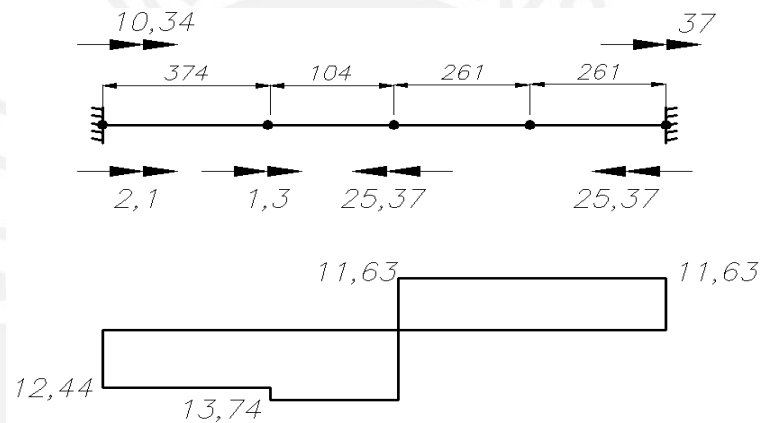
$$\frac{-(T_a + 2,1) \times 0,374}{RG} + \frac{(T_e - 50,74) \times 0,104}{RG} + \frac{(T_e - 25,37) \times 0,522}{RG} = 0$$

Reemplazando valores de las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad:

$$T_a = 10,34 \text{ N.m}$$

$$T_e = 37 \text{ N.m}$$

Entonces el diagrama de momento torsor es:



De donde se aprecia que el máximo momento torsor es:

$$T_{m\acute{a}x} = 13,74 \text{ N.m}$$

La resistencia a la torsión "R" del perfil utilizado es (ver anexo A21):

$$R = 7986,44 \text{ mm}^4$$

Entonces, el máximo ángulo de torsión "θ" es:

$$\theta = \frac{TL}{RG} = \frac{13,74 \times 0,104}{7986,44 \times 10^{-12} \times 75 \times 10^9} = 0,0024 \text{ rad ... ok!}$$

Por último, el máximo esfuerzo cortante "τ" debido al momento torsor es:

$$\tau = \frac{Tt}{R} = \frac{13,74 \times 10^3 \times (25,4/4)}{7986,44} = 10,95 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{adm} \geq \tau \text{ ... ok!}$$

Cálculo por rigidez del perfil horizontal

Se realizó el cálculo de la deflexión máxima considerando que ambos extremos del perfil están empotrados; asimismo para abreviar el cálculo se consideró una fuerza resultante "P" cuyo valor se obtiene de las ecuaciones de equilibrio.

$$\sum F_{x\text{ sistema } 1} = \sum F_{x\text{ sistema } 2}$$

$$P = 204 + 190 + 380 = 774 \text{ N}$$

$$\sum M_{o\text{ sistema } 1} = \sum M_{o\text{ sistema } 2}$$

$$x = 578,7 \text{ mm}$$

$$y_{max} = \frac{2P}{3EI} \frac{x^3(1000 - x)^2}{(3x + (1000 - x))^2}$$

$$y_{max} = \frac{2 \times 774}{3 \times 210000 \times 144,45 \times 10^3} \times \frac{578,7^3(421,3)^2}{(3 \times 578,7 + 421,3)^2}$$

$$y_{max} = 0,13 \text{ mm} \dots \text{valor aceptable}$$

Cálculo por rigidez del perfil crítico vertical

Se analiza la columna crítica con la teoría de “esfuerzo de compresión de columna bajo cargas combinadas” [19]. Siendo:

- L : Longitud del perfil = 1050 mm
- K : Factor de longitud efectiva = 1,2 (ver anexo A22)
- M_1 : Momento flector aplicado sobre el perfil crítico = 56,4 N.m
- P : Fuerza axial aplicada sobre la columna = 640,7 N
- I : Inercia del perfil = 0,348 in⁴ = 144,85 × 10³ mm⁴
- A : Área del perfil = 0,938 in⁴ = 605 mm²
- r : Radio de giro = 0,609 in = 15,47 mm
- $F.S.$: Factor de seguridad según normas AISC = 1,92

El momento aplicado causa una flexión en la columna, lo que da como resultado un desplazamiento o excentricidad que induce un momento secundario por la fuerza axial aplicada. Ver la figura No. 3.52.

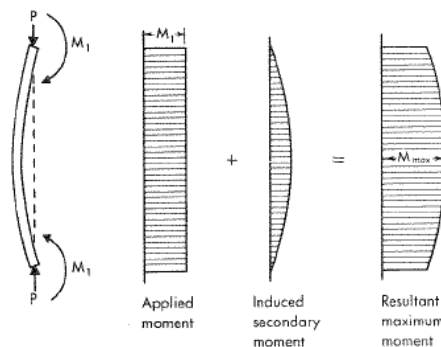


Figura No. 3.52. Flexión debido al momento flector en la columna crítica

Esta suma de momentos da una deflexión máxima cuyo valor es:

$$\Delta_{m\acute{a}ximo} = \frac{M_{m\acute{a}ximo}}{P_e}$$

Donde:

$P_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_b^2 \cdot FS}$	$L_b = K \cdot L$	$M_{m\acute{a}ximo} = \frac{M_1}{1 - \frac{P}{P_e}}$
--	-------------------	--

Entonces:

$$P_e = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 144,85 \times 10^3}{(1,2 \times 1050)^2 \times 1,92} = 98491 \text{ N}$$

$$M_{m\acute{a}ximo} = \frac{56,4}{1 - \frac{640,7}{98219}} = 56,77 \text{ N.m}$$

$$\Delta_{m\acute{a}ximo} = \frac{56,77 \text{ N.m}}{98491 \text{ N}} \times \left(\frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} \right) = 0,57 \text{ mm ... ok!}$$

Cálculo de Pandeo del perfil crítico vertical

Calculamos pandeo teniendo en cuenta que en nuestro caso la columna estaría sometida a flexo compresión; esta flexión origina un incremento del efecto del momento actuante sobre la columna, la cual se toma en cuenta considerando un factor de amplificación “ φ ”:

$$\varphi = \frac{M_{m\acute{a}ximo}}{M_1} = \frac{56,77}{56,4} = 1,01$$

Según las especificaciones de la AISC, para nuestro caso en particular, el valor del esfuerzo de Euler viene dado por la siguiente fórmula:

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\varphi \times \frac{L_b}{r} \right)^2 FS} = \frac{\pi^2 \times 2,1 \times 10^5}{\left(1,01 \times \frac{1,2 \times 1050}{15,47} \right)^2 \times 1,92} = 159 \text{ N/mm}^2$$

Debe cumplir:

$$\sigma_e \geq \sigma$$

Donde:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{640,7}{605} = 1,06 \text{ N/mm}^2$$

Por lo tanto se concluye que soporta las cargas aplicadas.

CAPÍTULO 4 PLANOS

Nº PLANOS	DESCRIPCIÓN
ENS-E1-A0	Ensamble del módulo de Transesterificación
ENS-E2-A2	Detalles del ensamble
DES-D1-A1	Despiece de estructura base
DES-D2-A3	Despiece de estructura superior
DES-D3-A4	Despiece de soporte de motorreductor
DES-D4-A2	Despiece de reactor de Metóxido
DES-D5-A4	Despiece de agitador de Metóxido
DES-D6-A4	Despiece de eje de agitador de Metóxido
DES-D7-A4	Despiece de tornillo M36x3x35 de Metóxido
DES-D8-A4	Despiece de acople motor/árbol de Metóxido
DES-D9-A1	Despiece de reactor de Transesterificación
DES-D10-A4	Despiece de agitador de Transesterificación
DES-D11-A4	Despiece de eje de Transesterificación
DES-D12-A4	Despiece de tornillo M36x3x35 de Transesterificación
DES-D13-A4	Despiece de motor/árbol de Transesterificación
DES-D14-A4	Despiece de cobertor de sello hidráulico y centrador
DES-D15-A4	Despiece de chavetas y arandelas para agitador

CAPÍTULO 5 COSTOS DE FABRICACIÓN

<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Material</i>	<i>Empresa</i>	<i>Precio Unitario US\$</i>	<i>Precio Total US\$</i>
ESTRUCTURA METÁLICA						
4	6 mts	Ángulo estructural 2" x 2" x 1/4	A36	Aceros Arequipa S.A	34,11	136,43
1	pza.	Platina de $\frac{3}{8}$ " x 3" x 32 cm.	A36	-	4,16	4,16
1	pza.	Platina de $\frac{3}{8}$ " x 17,3 cm. x 38 cm.	A36	-	12,48	12,48
1	pza.	Platina de $\frac{3}{16}$ " x 14,3 cm. x 37 cm.	A36	-	4,99	4,99
1	pza.	Platina de $\frac{3}{8}$ " x 15,3 cm. x 38 cm.	A36	-	9,57	9,57
1	pza.	Platina de $\frac{3}{16}$ " x 4" x 80 cm.	A36	-	6,24	6,24
1	pza.	Platina de $\frac{3}{16}$ " x 8 cm. x 80 cm.	A36	-	5,41	5,41
1	pza.	Platina de $\frac{3}{8}$ " x 4" x 43 cm.	A36	-	6,24	6,24
14	unidad	Tornillo hexagonal M12 x 45	8.8	SERFARIN S.R.Ltda.	0,34	4,76
14	unidad	Arandela de presión A12	ZINC	SERFARIN S.R.Ltda.	0,03	0,47
14	unidad	Tuerca hexagonal M12	5.8	SERFARIN S.R.Ltda.	0,10	1,41
6	unidad	Tornillo hexagonal M8 x 35	8.8	SERFARIN S.R.Ltda.	0,11	0,65
6	unidad	Arandela de presión A8	ZINC	SERFARIN S.R.Ltda.	0,02	0,09
6	unidad	Tuerca hexagonal M8	5.8	SERFARIN S.R.Ltda.	0,02	0,15
8	unidad	Tornillo hexagonal M6 x 30	8.8	SERFARIN S.R.Ltda.	0,06	0,45
8	unidad	Arandela de presión A6	ZINC	SERFARIN S.R.Ltda.	0,01	0,05
8	unidad	Tuerca hexagonal M6	5.8	SERFARIN S.R.Ltda.	0,01	0,10

REACTOR DE METÓXIDO						
1	pza.	TUBO 10" SCH 10 x 400 mm longitud	AISI 304		50,00	50,00
1	pza.	Anillo $\frac{3}{16}$ " x $\phi_{in} = 248$ mm x $\phi_{out} = 305$ mm	AISI 304		27,05	27,05
1	pza.	Disco $\frac{3}{16}$ " x $\phi 305$ mm	AISI 304		23,92	23,92
1	pza.	Plancha para rolar = cono	AISI 304		70,00	70,00
2	pza.	Unión Simple $\frac{1}{2}$ "	AISI 316	JAHESA S.A.	1,27	2,54
2	pza.	Platina de $\frac{1}{8}$ " x 1" x 75 cm.			8,00	16,00
1	pza.	Barra $\phi 4$ " x 2" longitud	AISI 304		29,13	29,13
1	pza.	Niple $\frac{3}{4}$ " x $1\frac{1}{2}$ "	AISI 316L	JAHESA S.A.	1,82	1,82
1	pza.	Válvula de bola 1 cuerpo de $\frac{3}{4}$ "	AISI 316	JAHESA S.A.	9,34	9,34
1	unidad	Platina $\frac{5}{16}$ " x 2" x 26 cm.	AISI 304		6,54	6,54
1	unidad	Platina $\frac{5}{16}$ " x 2" x 30 cm.	AISI 304		7,59	7,59
1	pza.	Barra $\phi 2$ " x 140 mm longitud	AISI 304		18,92	18,92
1	pza.	Anillo $\phi_{in} = 248$ mm x $\phi_{out} = 300$ mm x 3 mm	CAUCHO		25,00	25,00
1	unidad	RETEN BA SL 22 x 35 x 7	NBR	BASCO SAC	6,62	6,62
1	unidad	O`RING 2 x 42	NBR	BASCO SAC	2,37	2,37
8	unidad	Tornillo hexagonal M6 x 30	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,20	1,59
8	unidad	Arandela plana A6	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,04	0,33
8	unidad	Tuerca hexagonal M6	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,05	0,43
EQUIPOS Y ELEMENTOS DEL REACTOR DE METÓXIDO						
1	unidad	Reductor coaxial 1/10.1 C112 P10.1 P80 B5 B3 (1-1.5) BONFIGLIOLI		MOTOREX S.A	254,10	254,10
1	unidad	BRIDA 80 SIEMENS		MOTOREX S.A	15,68	15,68
1	unidad	MOTOR MONOFASICO 4 POLOS CE 0.33HP SIEMENS		MOTOREX S.A	107,80	107,80
1	pza.	tubo de vidrio transparente de $\phi \frac{5}{8}$ " x 300 mm longitud	PIREX	PROVASA S.R.L.	201,11	201,11
1	jgo.	Válvulas para control de nivel de $\frac{1}{2}$ "	AISI 316			
2	pza.	Niple $\frac{1}{2}$ " x 3"	AISI 316L	JAHESA S.A.	2,09	4,18
4	pza.	BRIDA $\frac{1}{2}$ " CLASE 150 SLIP ON	AISI 316	JAHESA S.A.	9,24	36,96

2	pza.	Anillo $\phi_{in} = 22 \text{ mm} \times \phi_{out} = 35 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$	CAUCHO		2,50	5,00
2	pza.	Niple $\frac{1}{2}'' \times 1\frac{1}{2}''$	AISI 316L	JAHESA S.A.	1,44	2,88
2	pza.	Unión Universal $\frac{1}{2}''$	AISI 316	JAHESA S.A.	3,71	7,42
8	unidad	Tornillo hexagonal 12 x 50	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	1,12	9,00
8	unidad	Arandela de presión A12	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,14	1,09
8	unidad	Tuerca hexagonal M12	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,36	2,90
AGITADOR DE METÓXIDO						
1	pza.	Barra $\phi 7/8'' \times 800 \text{ mm}$	AISI 304		33,36	33,36
1	pza.	Barra $\phi 2'' \times 150 \text{ mm}$ longitud	AISI 304		20,26	20,26
1	pza.	Disco $\frac{3}{16}'' \times \phi 75 \text{ mm}$	AISI 304		6,29	6,29
1	pza.	Platina de $\frac{1}{8}'' \times 1'' \times 11,5 \text{ cm.}$	AISI 304		1,05	1,05
3	unidad	Prisionero M 6 x 6	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,17	0,50

REACTOR DE TRANSESTERIFICACIÓN						
1	pza.	TUBO 16" Sch10 x 600 mm	AISI 304		143,36	143,36
1	pza.	Anillo $\frac{3}{8}$ " x $\phi_{in} = 16"$ x $\phi_{out} = 500$ mm	AISI 304		50,35	50,35
1	pza.	Anillo $\frac{3}{8}$ " x $\phi_{in} = 16"$ x $\phi_{out} = 500$ mm	AISI 304		79,48	79,48
1	pza.	Disco 5 mm x ϕ 49 cm	AISI 304		41,61	41,61
1	pza.	Plancha para rolar = cono	AISI 304		130,00	130,00
3	pza.	Unión Simple $\frac{1}{2}$ "	AISI 316	JAHESA S.A.	1,27	3,81
1	pza.	Unión Simple $2\frac{1}{2}$ "	AISI 304	JAHESA S.A.	9,51	9,51
1	pza.	Unión Simple $\frac{3}{4}$ "	AISI 304	GAMINOX S.A.C	2,86	2,86
4	pza.	Platina de $\frac{1}{8}$ " x 41 mm x 572 mm.	AISI 304		9,00	36,00
1	pza.	Barra ϕ 4" x 2" longitud	AISI 304		29,13	29,13
2	pza.	Niple $\frac{3}{4}$ " x $1\frac{1}{2}$ "	AISI 316L	JAHESA S.A.	1,82	3,64
2	pza.	Válvula de bola 1 cuerpo de $\frac{3}{4}$ "	AISI 316	JAHESA S.A.	9,34	18,68
1	unidad	Platina $\frac{3}{16}$ " x 4" x 57 cm.	AISI 304		17,83	17,83
1	unidad	Platina $\frac{5}{16}$ " x 2" x 40 cm.	AISI 304		10,45	10,45
1	pza.	Barra ϕ 2" x 120 mm longitud	AISI 304		16,21	16,21
1	pza.	Barra ϕ $2\frac{1}{2}$ " x 60 mm longitud	AISI 304		45,00	45,00
1	pza.	Anillo ϕ 4x425	CAUCHO		20,50	20,50
1	metro	Barra de $\phi = 40$ mm x 10 cm.	TEFLON	IMP. SIMONS S.A.C.	13,48	13,48
1	pza.	Tubo 5" SCH10 x 145 mm	AISI 304		35,00	35,00
4	unidad	Tornillo hexagonal M10 x 35	8.8	SERFARIN S.R.Ltda.	0,20	0,78
4	unidad	Arandela de presión A10	ZINC	SERFARIN S.R.Ltda.	0,02	0,08
4	unidad	Tuerca hexagonal M10	5.8	SERFARIN S.R.Ltda.	0,05	0,20
1	unidad	RETEN AUN 25 x 35 x 8	AUN	BASCO SAC	9,30	9,30
1	unidad	Anillo elástico de seguridad ϕ 35 x 1,5	St60		2,50	2,50
1	unidad	O`RING 2 x 42	NBR	BASCO SAC	2,37	2,37
1	unidad	Racor G1/8	AISI 304		3,50	3,50
16	unidad	Tornillo hexagonal 16 x 50	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	2,61	41,75

16	unidad	Arandela de presión A16	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,32	5,20
16	unidad	Tuerca hexagonal M16	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	1,09	17,45
EQUIPOS Y ELEMENTOS DEL REACTOR DE TRANSESTERIFICACIÓN						
1	unidad	Motor eléctrico trifásico de 8 polos, 380V, 60Hz y 0,75HP		DELCROSA S.A.	197,10	197,10
1	unidad	Escudo brida IEC 90 B5		DELCROSA S.A.	39,00	39,00
1	unidad	Variador de velocidad		DELCROSA S.A.	323,68	323,68
1	unidad	Resistencia eléctrica calefactora sumergible 1500 Watts monofásica 220V	AISI 316	Jara Resistencia SRL	428,57	428,57
1	unidad	Regulador de presión de alta precisión rango 0,4-10 bar	AISI 304	Fluidtek S.R.L.	256,89	256,89
1	pza.	Tubo de vidrio transparente de $\varnothing \frac{3}{8}$ " x 450 mm longitud	PIREX	PROVASA S.R.L.	201,11	201,11
1	jgo.	Válvulas para control de nivel de $\frac{1}{2}$ "	AISI 316			
2	pza.	Niple $\frac{1}{2}$ " x 3"	AISI 316L	JAHESA S.A.	2,09	4,18
4	pza.	BRIDA $\frac{1}{2}$ " CLASE 150 SLIP ON	AISI 316	JAHESA S.A.	9,24	36,96
2	pza.	Anillo $\varnothing_{in} = 22$ mm x $\varnothing_{out} = 35$ mm x 3 mm	CAUCHO		2,50	2,50
2	pza.	Niple $\frac{1}{2}$ " x $1\frac{1}{2}$ "	AISI 316L	JAHESA S.A.	1,44	2,88
2	pza.	Unión Universal $\frac{1}{2}$ "	AISI 316	JAHESA S.A.	3,71	7,42
8	unidad	Tornillo hexagonal 12 x 50	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	1,12	9,00
8	unidad	Arandela de presión A12	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,14	1,09
8	unidad	Tuerca hexagonal M12	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,36	2,90
AGITADOR DE TRANSESTERIFICACIÓN						
1	pza.	Barra $\varnothing 1\frac{1}{2}$ " x 805 mm	AISI 304		49,93	49,93
1	pza.	Barra $\varnothing 2$ " x 160 mm longitud	AISI 304		21,61	21,61
1	pza.	Platina de $\frac{1}{8}$ " x $1\frac{1}{2}$ " x 31 cm.	AISI 304		2,45	2,45
3	unidad	Prisionero M 8 x 10	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,28	0,84
1	unidad	Tornillo Socket M 5 x 25	AISI 304	SERFARIN S.R.Ltda.	0,31	0,31
1	pza.	Disco $\frac{1}{8}$ " x $\varnothing 40$ mm	AISI 304		2,00	2,00

En este cuadro se ve de manera general los procesos de manufactura que se han realizado para obtener cada elemento, asimismo se detalla los costos totales de material y manufactura de cada elemento.

Los precios de manufactura que se consideran en los equipos y elementos de los reactores, son debido al montaje (ensamble) de estos.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL		MANUFACTURA REALIZADA							PRECIO TOTAL US\$	
		Material	Precio US\$	Corte	Torno	Fresado	Soldadura	Taladrado	Rolado	Bombeado y Pestañeado		Precio US\$
1	Estructura Base	A36	151	X	-	-	X	X	-	-	234	385
2	Estructura Superior	A36	32	X	-	-	X	X	-	-	69	101
3	Soporte de Motorreductor	A36	48	X	-	-	X	X	-	-	45	93
4	Reactor de Metóxido	AISI 304	173	X	X	X	X	X	X	-	373	546
5	Agitador de Metóxido	AISI 304	62	X	X	X	X	-	-	-	124	186
6	Equipos y Elementos del Reactor de Metóxido	AISI 304	643	-	-	-	-	-	-	-	60	703
7	Reactor de Transesterificación	AISI 304	500	X	X	X	X	X	X	X	621	1121
8	Agitador de Transesterificación	AISI 304	78	X	X	X	X	-	-	-	157	235
9	Equipos y Elementos del Reactor de Transesterificación	AISI 304	1511	-	-	-	-	-	-	-	77	1588

CONCLUSIONES

Se adoptó el método de Transesterificación alcalina en batch para la producción de biodiésel a partir de aceites usados de cocina pretratado, que presenta los siguientes beneficios:

- Al utilizar aceites usados de cocina pretratados, se aprovecha y a la vez se da valor agregado a un desecho contaminante.
- El tiempo de reacción de 1 ½ horas en comparación con otros procesos es rápido.
- El producto de la reacción es 90% de biodiésel y 10% de glicerina en promedio.

El módulo diseñado para la Transesterificación alcalina en batch tiene una capacidad de 48 litros (40 de aceite pretratado y 8 de metóxido) y se posiciona en la evaluación de valor técnico / económico como la mejor alternativa después del ultrasonido. Consiste en el diseño de una estructura de material ASTM A370, Grado A36 y dos reactores con agitación mediante paletas cuyo material AISI 316 presenta la mejor compatibilidad con los insumos a utilizar. El reactor de Transesterificación opera a presión, temperatura y revoluciones de giro del agitador controladas; lo que permite tener diversos parámetros de operación dentro de los límites establecidos en el diseño. Asimismo, el reactor de Metóxido opera con condiciones de temperatura y presión atmosféricas y revoluciones de giro constante.

Se cumplió con lo planteado en la lista de exigencias. Dentro de ellas se puede mencionar:

- Los requerimientos de energía necesarios para la realización de este método de producción son bajos; los motores eléctricos son de poca potencia 1/3 hp y 3/4 hp (aunque poco eficientes $\approx 60\%$); siendo la resistencia eléctrica el de mayor consumo eléctrico con 1500 Watts.
- Se satisface la exigencia de costos puesto que estamos dentro del presupuesto estimado; es decir tanto el diseño como la fabricación del módulo fue menor de \$5000. En el siguiente cuadro se presenta el resumen de costos de adquisición de materiales y fabricación.

	METÓXIDO		TRANSESTERIFICACIÓN		ESTRUCTURA		
	Material	Manufactura	Material	Manufactura	Material	Manufactura	
REACTOR	\$ 173	\$ 373	\$ 500	\$ 621	\$ 151	\$ 234	ESTRUCTURA BASE
EQUIPOS	\$ 643	\$ 60	\$ 1511	\$ 77	\$ 32	\$ 69	ESTRUCTURA SUPERIOR
AGITADOR	\$ 62	\$ 124	\$ 78	\$ 157	\$ 48	\$ 45	SOPORTE DE MOTORREDUCTOR
COSTO TOTAL	\$ 1435		\$ 2944		\$ 579		COSTO TOTAL

COSTO TOTAL**\$ 4958**

Para finalizar, dada la importancia del consumo energético y de la dependencia de diesel en el Perú, proyectos como el actual de diseño y fabricación de equipos, empleando tecnologías apropiadas en nuestro medio, son los cimientos para la investigación y el desarrollo técnico a corto plazo que introduce a la población peruana al uso de energías amigables con el medio ambiente.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Para minimizar los costos de fabricación y de mantenimiento, en el diseño se tuvo en cuenta la disponibilidad en el mercado tanto de los equipos como de los elementos a emplear en el módulo de Transesterificación; para así facilitar, ante cualquier falla, la adquisición para el elemento a suplantar.

El desarrollo de la tecnología de Transesterificación alcalina por medio de ultrasonido, es una alternativa interesante para realizar comparaciones con el método de agitación más calor y presión desarrollado.

Realizando una comparación entre los costos de fabricación vistos en el capítulo 5, se deduce que los costos del reactor de Transesterificación son mucho más elevados que los del reactor de Metóxido que opera a condiciones normales de presión. Es por ello que se debe corroborar si trabajar con presión justifica la mayor inversión de fabricación en el reactor y compra de maquinaria como una compresora.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MANGESH, G. Kulkarni y AJAY, K. Dalai
2006 Waste Cooking Oils An Economical Source for Biodiesel: A Review.
American Chemical Society, (45): 2901-2913. (Canada).
- [2] VASUDEVAN & BRIGGS
2008 Biodiesel production – current state of the art and challenges. *Society for Industrial Microbiology*. (35) : 421 – 430.
- [3] II Congreso de Energías Renovables y Biocombustibles. [en línea] [Fecha de consulta: 20 de Agosto 2009]. Disponible en:
<http://www.cober.pe/cobers.php>
- [4] IPCC “PANEL INTERGUBERNAMENTAL SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO”
Cambio Climático 2007. [en línea] [Fecha de consulta: 27 de Octubre 2011].
Disponible en:
http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf
- [5] DEFENSORIA DEL PUEBLO – Informe Defensorial No. 116. [en línea] [Fecha de consulta: 27 de Octubre 2011]. Disponible en:
<http://www.ibcperu.org/doc/usus/6640.pdf>
- [6] HERVÉ LAMOUREUX, Jérôme.
2007 Diseño conceptual de una planta de biodiésel. Tesis Ingeniero Civil
Mecánico. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y
Matemáticas. Santiago de Chile. 157 p.
- [7] LECHON, Yolanda et al.
2006 Análisis del Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte.
Fase II. España: Fareso
- [8] INFORME DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA - Biocarburantes Líquidos: Biodiésel y
Bioetanol. [en línea] [Fecha de consulta: 27 de Octubre 2011]. Disponible en:
http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt4_biocarburantes_liquidos_biodiesel_y_bioetanol.pdf
- [9] CASTRO PAREJA, Paula et al.
2007 Opciones para la producción y uso de biodiésel en el Perú. Lima: Forma e
Imagen.

- [10] LIZANA ROJAS, Diego.
2007 Prediseño de una Planta Piloto de Biodiésel a partir de aceites reciclados de cocina con fines I+D. Máster Europeo en Energías Renovables. Universidad de Zaragoza. Zaragoza 75 p.
- [11] Carlos Zapata et al.
2006 Producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma. *Dyna*, (74): 71-82. (Colombia).
- [12] Xiaohu Fan.
2008 Optimization of Biodiesel Production from Crude Cottonseed Oil and Waste Vegetable Oil: Conventional and Ultrasonic Irradiation Methods. Tesis Doctor de Filosofía. Universidad de Clemson. 144 p.
- [13] Van Gerpen.
2005 Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, (86):1097-1107 (USA).
- [14] Hoang et al.
2007 Methanolysis of triolein by low frequency ultrasonic irradiation. *Energy Conversion & Management* 49 (2008) 276-280.
- [15] Yong Wang et al.
2007 Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process. *Energy Conversion and Management*, (48): 184-184. (China).
- [16] BARRIGA, Benjamín.
1985 Métodos de diseño en Ingeniería Mecánica. 1ra ed. Lima, Perú: PUCP. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [17] Mc. CABE Warren.
1991 Operaciones Básicas de Ingeniería Química. 4ta. ed. Madrid: McGraw-Hill.
- [18] MEGYESY, Eugene F.
1992 Manual de recipientes a presión. 1ra ed. México: Limusa.
- [19] BLODGETT, Omer W.
1966 Design of welded structures. 1ra ed. Cleveland, OH: James F. Lincoln Arc welding foundation.
- [20] MIROLIUBOV, Engalichev y Sergueievski.
1981 Problemas de resistencia de materiales. 4ta edición. Rusia: Mir
- [21] HARNBY, Edwards y Nienow
1997 Mixing in the process industries. 2a. ed. Oxford : Butterworth Heinemann

- [22] VARGAS Machuca S. Federico.
1990 Máquinas eléctricas rotativas. 1a ed. Lima, Perú: [s.n.]
- [23] FAIRES, Virgil Moring
1985 Diseño de Elementos de Máquinas. México Uteha pág. 229
- [24] WARREN, C. YOUNG
2002 Roark's Formulas for stress and strain. 7ma. edición. USA.
- [25] HIBBELER, R.C.
1997 Análisis estructural / Russell C. Hibbeler. 3ra edición. México, D.F.
- [26] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION
2001 Manual of steel construction: load & resistance factor design. Chicago, AISC.
- [27] Fernando Acosta, Paula Castro, Elsa Cortijo
2008 Manual de construcción y uso de reactor para producción de biodiésel a pequeña escala. Primera edición. Lima: Forma e Imagen.

