

Universidad de **Cádiz**

Proyectos de fin de carrera de **Ingeniería Química**

Facultad: CIENCIAS

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

Título: DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE
PRETRATAMIENTO DE ACEITES CON ALTO
CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS LIBRES
PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

Autora: M^a de los Milagros GARCÍA CABELLO

Fecha: Septiembre 2007





ÍNDICE GENERAL

Documento	Descripción
1	Memoria Descriptiva
Anexo 1	Memoria Técnica y Cálculos Justificativos
Anexo 2	Influencia de las variables y estudio cinético de la pre-esterificación ácida
Anexo 3	Metodología de análisis para el aceite recepcionado
Anexo 4	Anexo Gráfico
Anexo 5	Seguridad Industrial
2	Planos
3	Pliego de condiciones
4	Estudio económico

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población, la mejora de la calidad de vida, el aumento de la industrialización y el progreso actual y futuro hacen que el consumo de energía experimente un aumento incesante. Como consecuencia de este escenario energético y, teniendo en cuenta la dependencia del petróleo que presentan las economías de los países industrializados, se ha despertado en las últimas décadas un enorme interés en la investigación de nuevas fuentes de energías alternativas y más concretamente en la producción de biodiésel (sustituto del diésel de origen mineral). Es precisamente en esta línea en la que se inserta el presente Proyecto Fin de Carrera.

OBJETIVOS

El principal problema en el procesamiento de los aceites de fritura para producción de biodiésel radica en que éstos a menudo contienen cantidades de ácidos grasos libres que impiden que dichos aceites puedan ser convertidos en biodiésel de manera efectiva, ya que actúan como inhibidores de la reacción principal de producción de biodiésel (transesterificación básica) y dificultan la posterior purificación del mismo.

El objeto del presente proyecto es solucionar este problema mediante el procesado de estos aceites con una esterificación ácida, de manera que se reduzca la cantidad de ácidos grasos libres y se obtenga un aceite vegetal apto para su transformación en biodiésel.

MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS

La materia prima fundamental en el proceso es aceite vegetal de fritura usado, aunque también se emplean en la instalación metanol y ácido sulfúrico.

Es importante destacar que la elección de aceite usado como materia prima constituye una de las opciones con mejores perspectivas, ya que es la materia prima más barata y, además, ya que dicho aceite es un residuo, con su utilización se evitan los costes de su tratamiento como tal.

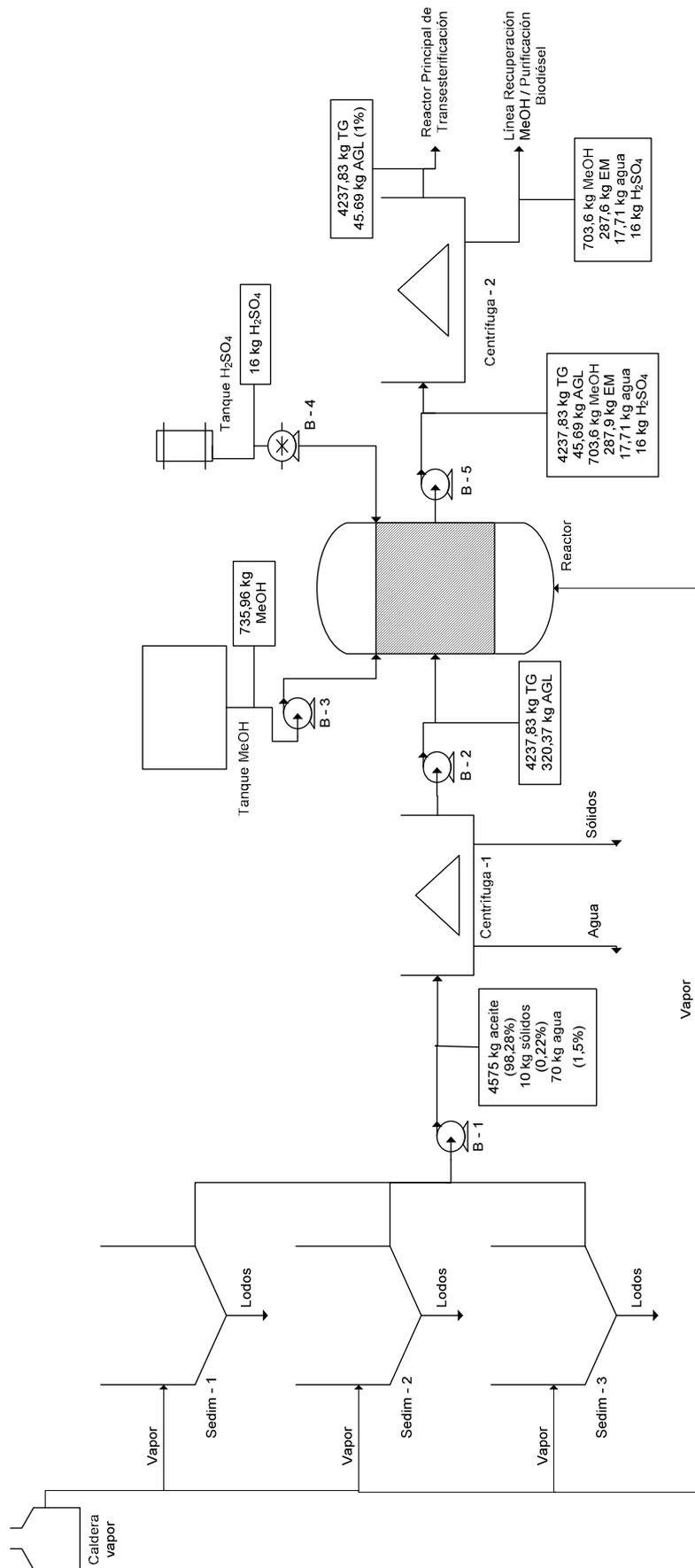
El producto de la instalación de pretratamiento de aceites está constituido por una corriente de aceite, al que se le han eliminado los sólidos y el agua inicialmente presentes, así como disminuido la cantidad de ácidos grasos libres a un valor de un 1%.

PROCESO

La instalación de pretratamiento consta principalmente de un reactor discontinuo, en el que se produce la esterificación ácida de los ácidos grasos libres presentes en el aceite, tres tanques de sedimentación, una centrífuga para aceite, una centrífuga para la mezcla de reacción y dos depósitos de almacenamiento, uno para metanol y otro para ácido sulfúrico. El proceso, así como su balance de materia por lote procesado se muestran en la figura adjunta.

La instalación procesará 20.000 kg/día de aceite vegetal usado, el cual se recepcionará en tanques de sedimentación donde se llevará a cabo la separación de parte de los sólidos y del agua que contiene inicialmente el aceite. Se dispondrá de 3 tanques de sedimentación, y cada tanque tiene capacidad para almacenar el aceite necesario para un día de proceso.

El metanol, reactivo en la reacción de esterificación, se almacena en la instalación en un tanque cilíndrico vertical, el cual cumple con las especificaciones necesarias para el almacenamiento de líquidos inflamables.



Esquema de la instalación de pretratamiento de aceites con balance de materia por lote procesado.

El ácido sulfúrico, catalizador de la reacción de esterificación, se almacena en bidones retornables, dada la pequeña capacidad de almacenamiento necesaria.

Desde el tanque de sedimentación el aceite se transportará a una centrífuga, donde se producirá la separación de los restos de sólidos y agua que contenga el aceite.

Una vez producida la centrifugación, se llevará a cabo la reacción en un reactor discontinuo de tanque agitado. El proceso de reacción consiste en una esterificación ácida, utilizando como reactivo alcohólico el metanol y como catalizador el ácido sulfúrico.

Cuando finaliza el lote de reacción en el reactor, se obtiene una corriente con una determinada composición que, al someterla al proceso de centrifugación, se va a escindir en dos corrientes:

- Una fase orgánica, que esta compuesta por el aceite pretratado con un índice de acidez adecuado para iniciar el proceso de transesterificación.

- Una fase acuosa, compuesta fundamentalmente por éster metílico (biodiésel) y metanol, y agua y ácido sulfúrico en menores proporciones. Esta fase será conducida a la línea de purificación de biodiésel presente en la planta de producción donde se ubicará la instalación de pretratamiento.

CONCLUSIÓN

Como conclusión, destacar que se ha partido de la necesidad de diseñar un proceso que permita disminuir la cantidad de ácidos grasos libres presente en los aceites usados, para que, de este modo, pueda producirse biodiésel a partir de ellos de una forma efectiva y que el biodiésel así producido cumpla con las especificaciones que indica la norma UNE-EN/14214. El proceso se ha diseñado de manera que proporciona una

solución viable tanto tecnológica como económicamente, dando respuesta a la demanda social existente, tanto de fuentes de energía renovables como de una adecuada recuperación de residuos. Dicho proceso presenta como valor añadido la generación de diversos puestos de trabajo, tanto directos en la propia instalación como indirectos.

Puerto Real, a septiembre de 2007

Fdo.: M^a de los Milagros García Cabello

FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE PRETRATAMIENTO DE
ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS
LIBRES PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.**

DOCUMENTO Nº 1: MEMORIA DESCRIPTIVA

M^a DE LOS MILAGROS GARCÍA CABELLO

SEPTIEMBRE, 2007

0. ÍNDICE

0. ÍNDICE	1
1. ANTECEDENTES	5
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	8
2.1. OBJETO	8
2.2. JUSTIFICACIÓN	9
2.3. VIABILIDAD	11
2.3.1. Viabilidad técnica	11
2.3.2. Viabilidad económica	11
2.3.3. Viabilidad legal	11
2.4. UBICACIÓN	12
3. ESTUDIO DEL PRODUCTO Y DE MERCADO	14
3.1. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL EN EL MUNDO	14
3.2. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL EN EUROPA	16
3.3. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL EN ESPAÑA	18
3.4. MARCO REGULATORIO	20
3.5. INCENTIVACIÓN FISCAL	25
3.6. COMPARACIÓN ENTRE EL GASÓLEO MINERAL Y EL BIODIÉSEL	27
3.7. MERCADO DEL BIODIÉSEL	32
4. ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE LA ACIDEZ DEL ACEITE USADO	33
4.1. SAPONIFICACIÓN	33

4.2. MÉTODOS PARA CONVERTIR LOS ÁCIDOS GRASOS LIBRES EN BIODIÉSEL _____	34
4.2.1. Métodos enzimáticos _____	34
4.2.2. Glicerólisis _____	35
4.2.3. Catálisis ácida _____	36
4.2.4. Pre-esterificación ácida _____	36
4.3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA _____	37
4.3.1. Selección del proceso para reducción de la acidez _____	37
4.3.2. Selección del catalizador ácido _____	39
4.3.3. Modo de operación _____	40
5. MATERIAS PRIMAS _____	41
5.1. ACEITES Y GRASAS EMPLEADOS PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL _____	41
5.2. ACEITES VEGETALES DE FRITURA USADOS _____	44
5.2.1. Introducción _____	44
5.2.2. Degradación de los aceites vegetales en el proceso de fritura _____	45
5.2.3. Características del aceite vegetal usado _____	48
5.2.4. Poder contaminante _____	51
5.2.5. Generación de aceites usados _____	52
5.2.6. Recogida y transporte de aceites usados _____	52
5.3. METANOL _____	54
5.4. ÁCIDO SULFÚRICO _____	55
6. PROCESO DE PRETRATAMIENTO DE ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS LIBRES _____	56

6.1. PROCESO GENERAL DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL	56
6.2. PROCESO DE PRETRATAMIENTO DE ACEITES	60
6.3. RECEPCIÓN DE ACEITES	62
6.3.1. Calidad de los aceites	62
6.4. ALMACENAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS	65
6.4.1. Tipos de recipientes de almacenamiento	65
6.4.2. Almacenamiento de aceites no tratados	68
6.4.3. Almacenamiento de metanol	69
6.4.4. Almacenamiento de ácido sulfúrico	69
6.5. DESBASTE	70
6.6. SEDIMENTACIÓN	71
6.6.1. Introducción	71
6.6.2. Bases teóricas de la sedimentación	72
6.7. CENTRIFUGACIÓN	75
6.8 PRE-ESTERIFICACIÓN ÁCIDA	76
6.8.1. Introducción	76
6.8.2. Mecanismo de reacción	79
6.8.3. Elección del reactor	80
6.8.4. Ecuación de diseño del reactor	81
6.8.5. Condiciones de reacción	84
6.8.6. Sistema de agitación	86
6.9. CENTRIFUGACIÓN DE LA CORRIENTE DE SALIDA DEL REACTOR	89
6.10. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	90
7. CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS DE PROCESO	97

7.1. TANQUES DE ALMACENAMIENTO	97
7.2. TANQUES DE SEDIMENTACIÓN	98
7.3. REACTOR	99
7.4. CENTRÍFUGAS	100
7.5. CONDUCCIONES	103
7.6. BOMBAS	104
7.7. INSTRUMENTACIÓN	108
8. DISTRIBUCIÓN DE LOS EQUIPOS EN LA INSTALACIÓN	111
9. PLANIFICACIÓN	116
9.1. DIAGRAMA DE GANTT	116
9.2. MANO DE OBRA	119
10. BIBLIOGRAFÍA	120

1. ANTECEDENTES

Con la actual escalada de los precios del petróleo ha cobrado fuerza el desarrollo de algunas fuentes energéticas renovables, entre las que destacan los biocombustibles.

Los biocombustibles son aquellos combustibles producidos a partir de la biomasa y que son considerados, por tanto, una energía renovable. Se pueden presentar tanto en forma sólida (residuos vegetales, fracción biodegradable de los residuos urbanos o industriales) como líquida (bioalcoholes, biodiésel) o gaseosa (biogás, hidrógeno).

Dentro de los biocombustibles, los biocarburantes abarcan al subgrupo caracterizado por la posibilidad de su aplicación a los actuales motores de combustión interna (motores diésel y Otto).

El biodiésel es un combustible alternativo para motores diésel, que es producido mediante reacción química de un aceite vegetal o grasa animal con un alcohol. Esta reacción requiere un catalizador y da lugar a nuevos compuestos químicos denominados ésteres alquílicos. Son estos ésteres los que se conocen como biodiésel.

El uso por primera vez de aceites vegetales como combustible se remonta al año 1900, siendo Rudolph Diesel quien lo utilizará por primera vez en su motor de ignición-compresión y quien predijera el uso futuro de biocombustibles.

Durante la segunda guerra mundial, y ante la escasez de combustibles fósiles, destacó la investigación realizada por Otto y Vivacqua en Brasil, sobre diésel de origen vegetal, pero no fue hasta el año 1970 cuando el biodiésel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética del momento, y del elevado coste del petróleo.

Las primeras pruebas técnicas con biodiésel se llevaron a cabo en 1982 en Austria y Alemania, pero no fue hasta el año 1985 en Silberberg (Austria) cuando se construyó la primera planta piloto productora de RME (*Rapeseed Methyl Ester*, es decir, ésteres metílicos procedentes de aceite de semilla de colza).

El biodiésel puede producirse a partir de aceites vegetales de diferentes orígenes, como aceite de oliva, girasol, colza, soja... y otros aceites vegetales, tales como el aceite de cocina usado, así como a partir de grasas animales.

Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiésel en automóviles.

La producción de aceites de fritura usados, tanto de uso doméstico como industrial es un problema creciente en todo el mundo, ya que constituyen un residuo contaminante. Este residuo es, en muchos casos, evacuado por el desagüe, dando lugar a problemas en el tratamiento de las aguas residuales y a pérdidas de energía. Hay varios usos finales para este residuo, como la producción de jabones o de energía mediante digestión anaerobia, craqueo térmico y, más recientemente, la producción de biodiésel.

El reciclaje de los aceites usados por recuperación energética es una solución inteligente y práctica; su uso como materia prima para la producción de biodiésel tiene un triple propósito:

- Recuperar un residuo no biodegradable.
- Evitar el riesgo de que los aceites usados retornen a la cadena alimentaria, ya que éstos se usaban para la producción de piensos destinados a la alimentación animal.

- Producir un combustible que sustituye a los combustibles fósiles.

El núcleo del proceso de producción de biodiésel consiste en la transesterificación de las materias primas, aceites vegetales y grasas animales, usando un alcohol de cadena corta. Los aceites vegetales y las grasas animales consisten principalmente en triglicéridos con menores cantidades de mono y diglicéridos. Esta reacción se lleva a cabo con la ayuda de un catalizador, que puede ser ácido o básico. En la industria se usa generalmente un catalizador básico, ya que la reacción es más rápida y nos lleva al mismo rendimiento en la transesterificación.

Sin embargo, para aceites con una alta concentración de ácidos grasos libres (valor de ácido más alto de 2 mg KOH/g), es bastante recomendada una etapa de pretratamiento. Esta etapa consiste en una reacción con un alcohol, catalizada por un ácido, con el objetivo de transformar los ácidos grasos libres en sus correspondientes ésteres.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1. OBJETO

El objeto del presente proyecto es el diseño de una instalación para el pretratamiento de aceites usados procedentes de procesos de fritura, de manera que se disminuya el contenido de ácidos grasos libres, permitiendo de este modo que pueda producirse biodiésel de forma efectiva a partir de estos aceites.

El proyecto se centrará en la etapa de reacción, consistente en una esterificación ácida, que será la que nos permita bajar el nivel de ácidos grasos. Además se hará la descripción y el dimensionamiento de los restantes equipos presentes en la instalación, los cuales nos permitirán obtener un aceite con las características idóneas para llevar a cabo las posteriores etapas del proceso de producción de biodiésel.

2.2. JUSTIFICACIÓN

Se justifica la realización de este proyecto debido a la importante generación de aceites usados en Andalucía y a la importante carga contaminante de éstos; además también se justifica por la necesidad de sustituir los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables, que además nos permitan una mejor conservación del medio ambiente.

En definitiva, puede ser justificado desde tres puntos de vista:

- Medioambiental:

En este proyecto se lleva a cabo la valorización de un residuo mediante la transformación del mismo para que sea apto para la producción de biodiésel.

Además, el uso del biodiésel que se producirá con los aceites tratados es beneficioso para el medio ambiente, ya que reduce las emisiones al ambiente, no es tóxico y es biodegradable. Cada vez es más necesaria la reducción del consumo de energía fósil, con especial incidencia en el transporte, si se quiere responder a las exigencias de un desarrollo sostenible.

- Económico y social:

Esta instalación aumentará la eficacia del proceso de producción de biodiésel, con el consiguiente beneficio económico. Además supondrá el aprovechamiento de un residuo generado en la zona, lo que provoca un beneficio medioambiental que supondrá la aceptación social de este proyecto, ya que cada día toma mayor importancia la conservación del medio ambiente.

Además, cada vez se toma más conciencia de la importancia de diversificar las fuentes de energía para limitar las importaciones de petróleo y así conseguir más independencia de los países productores de petróleo.

- Técnica:

La instalación propuesta en este proyecto es necesaria cuando la cantidad de ácidos grasos libres presentes en el aceite es superior a un 1%, ya que estos ácidos grasos inhiben la posterior reacción de transesterificación, así como dificultan la purificación del biodiésel.

2.3. VIABILIDAD

2.3.1. Viabilidad técnica

La instalación que se desarrolla en este proceso se considera técnicamente viable, ya que investigaciones previas han desarrollado con éxito un proceso para el pretratamiento de aceites con alto nivel de ácidos grasos libres, usando un catalizador ácido. ^[27] ^[28]

Estas experiencias llevadas a cabo por varios investigadores muestran como puede producirse biodiésel a partir de aceites usados con unos requerimientos de calidad adecuados.

Además, ya existen plantas industriales en España que procesan aceites reciclados procedentes del uso en la cocina.

2.3.2. Viabilidad económica

La viabilidad económica de la instalación diseñada radica en que va a posibilitar el procesamiento de aceites vegetales usados para la producción de biodiésel, lo que supondrá un importante beneficio económico para la empresa, debido al reducido coste de esta materia prima.

2.3.3. Viabilidad legal

La instalación diseñada se encuentra dentro de la legalidad en cuanto a medio ambiente, seguridad e higiene industrial y diseño de equipos.

Como aspectos más importantes, reseñar que no se generan efluentes líquidos contaminantes y los residuos del proceso (fangos procedentes de las mermas que acompañan al aceite usado) se gestionan por parte de un gestor autorizado; así mismo, el almacenamiento de sustancias también se hace conforme a la ley.

2.4. UBICACIÓN

La instalación diseñada irá ubicada dentro de una planta de producción de biodiésel que se ha proyectado para su puesta en funcionamiento en la localidad de El Puerto de Santa María, en la provincia de Cádiz.

Esta planta, en fase de proyecto, se ubicará en el Polígono Industrial Las Salinas; inicialmente está diseñada para tratar aceites vegetales crudos, pero la implantación del pretratamiento diseñado permitirá que esta planta procese también aceites vegetales procedentes de procesos de fritura.

Es importante destacar la existencia en el polígono de una empresa de recogida de aceites vegetales usados (Verdegrás S.L.), la cual podrá abastecer a la planta de buena parte de la materia prima a procesar, con el consiguiente ahorro en gastos de transporte.

La ubicación exacta de dicho polígono industrial se detalla a continuación:



Figura 1. Plano de localización.



Figura 2. Mapa satélite situación Polígono Las Salinas.

3. ESTUDIO DEL PRODUCTO Y DE MERCADO

3.1. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL EN EL MUNDO

Los países europeos fueron los primeros en desarrollar la industria del biodiésel, con una producción anual actual que se acerca a los 5 millones de toneladas. Pero en la actualidad se está observando el avance de esta industria en Estados Unidos, Turquía, Canadá, Singapur, Australia y países de Sudamérica como Brasil. A modo de ejemplo, Estados Unidos está construyendo plantas elevando la capacidad de producción a unos 2 millones de toneladas por año. En tanto, Brasil prevé para el 2008 que su capacidad instalada debería alcanzar las 900.000 toneladas y en 2013, superar los 2 millones de toneladas, para abastecer la demanda que generará el uso obligatorio. Malasia e Indonesia están invirtiendo intensivamente en plantaciones de palma con destino a las plantas de biodiésel; sólo en el 2005 el gobierno malayo aprobó la construcción de 32 plantas de biodiésel.

En ese contexto, se proyecta un aumento en la capacidad de producción de biodiésel a nivel mundial para alcanzar los 15 millones de toneladas en 2007 y de 9 millones más para el año siguiente.

A continuación se muestra una gráfica que evidencia este aumento de la producción mundial de biodiésel en los últimos años que, como puede comprobarse, se ha visto quintuplicada en 5 años.

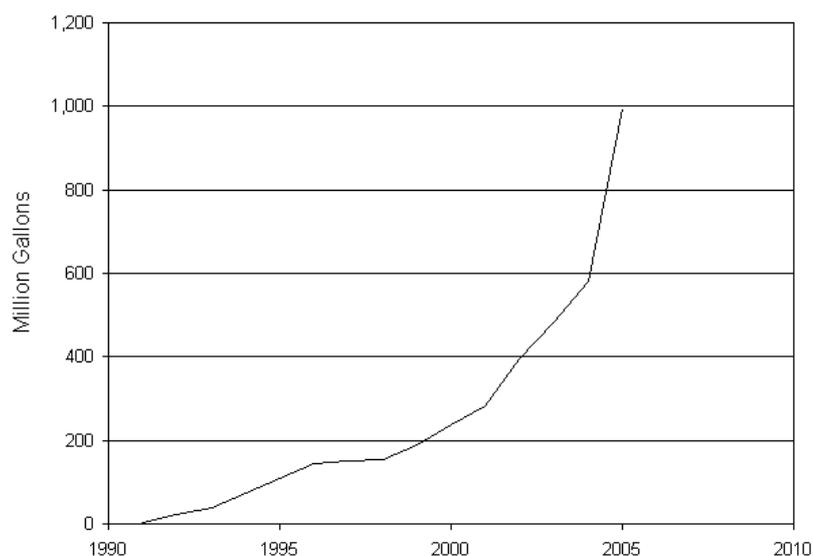


Figura 3. Producción mundial de biodiésel 1991-2005.
Fuente: Earth Policy Institute.

En la siguiente tabla se muestran los principales productores de biodiésel a nivel mundial:

PAÍS	PRODUCCIÓN (millones de litros)
Alemania	1.921
Francia	557
Estados Unidos	284
Italia	227
República Checa	136
Austria	85
España	84
Dinamarca	80
Polonia	80
Reino Unido	74
Brasil	70
Australia	57
Suecia	7
Otros países	102
Producción mundial	3.764

Tabla 1. Producción mundial de biodiésel por país, 2005.
Fuente: Earth Policy Institute.

3.2. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL EN EUROPA

La creación de un mercado europeo para biocarburantes ofrecerá una oportunidad tanto a España como a los nuevos estados miembros. La producción de biocarburantes representa una oportunidad para la economía europea.

De la producción total de biodiésel más del 90% se produce en la Unión Europea (UE). El crecimiento más significativo se ha producido en Alemania donde el biodiésel puro (B100) tiene una exención de impuestos del 100% y existe una red de más de 1.500 estaciones distribuidoras de B100.

Otros productores y consumidores significativos de biodiésel son Francia, Italia, Austria y España.

De acuerdo con el Consejo Europeo de Biodiésel, la producción de biodiésel de la UE se estima que pasó de 1,45 millones de toneladas en 2003 a 1,85 millones de toneladas en 2004. En 2006 la capacidad de producción de la UE excedió los cuatro millones de toneladas. En la siguiente tabla se detallan los principales países productores:

PAÍS	PRODUCCIÓN EN TONELADAS
Alemania	2.100.000
Francia	700.000
Italia	525.000
Reino Unido	250.000
Dinamarca	35.000
Suecia	9.000
Irlanda	5.000

Tabla 2. Producción de biodiésel en Europa en 2006. ^[31]

Muchas acciones de sensibilización se están llevando a cabo por parte de gobiernos y organismos oficiales para la promoción de las energías renovables y, en particular, del biodiésel. La UE está haciendo un esfuerzo por disminuir su dependencia en las importaciones de combustibles fósiles, así como para minimizar la emisión de gases de efecto invernadero.

Cerca del 80% del biodiésel de la UE es elaborado con aceite de semilla de colza y aproximadamente una tercera parte de la cosecha de esta semilla es utilizada en la producción de biocarburantes.

Los biocarburantes líquidos significaron en el año 2004 en la UE un 0,7% del mercado. En la siguiente gráfica se puede comprobar el aumento en la producción que se viene experimentando desde el año 1993 tanto en biodiésel como en bioetanol.

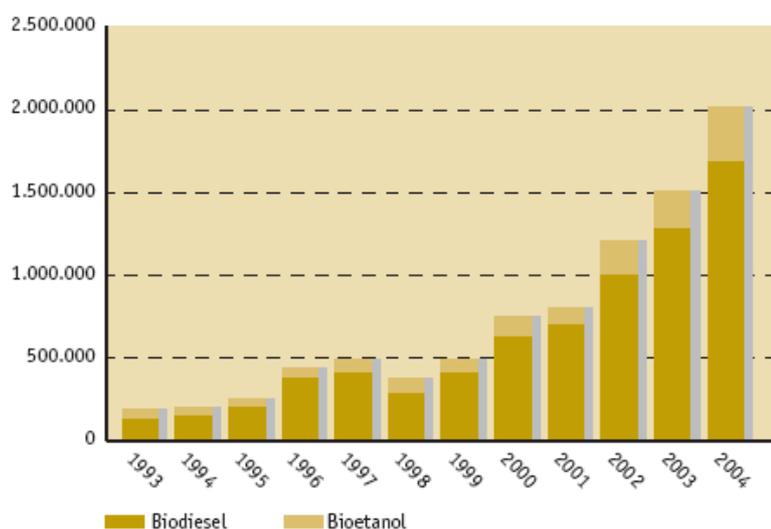


Figura 4. Producción de biocarburantes en la UE desde 1993. ^[31]

3.3. PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL EN ESPAÑA

Actualmente en España existen 14 plantas que producen biodiésel, 20 plantas en construcción y 13 plantas en proyecto. Sin embargo, sólo unas 400 de las más de 8.500 gasolineras que hay en España ofrecen biodiésel.

España experimenta un crecimiento en la producción de biodiésel proporcional a la tendencia europea. En la gráfica se puede observar el crecimiento exponencial experimentado en la producción de biodiésel en España. Es especialmente significativo el crecimiento conseguido entre el año 2004 y 2005.

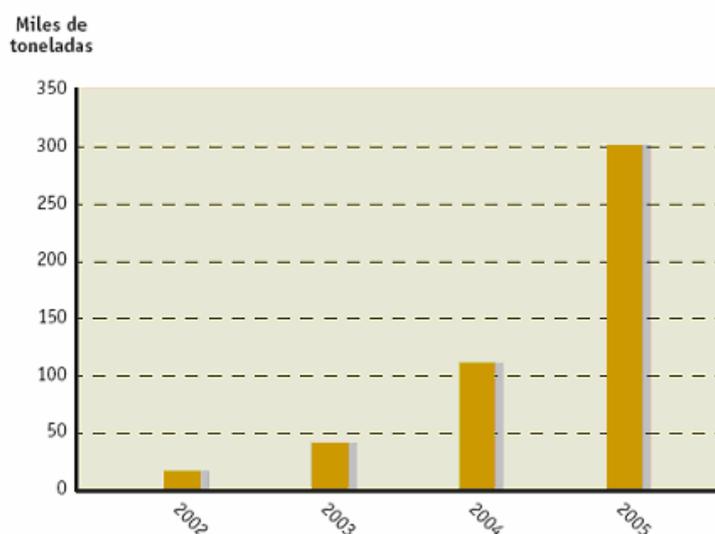


Figura 5. Producción de biodiésel en España. ^[31]

La relevancia de estos datos se encuentra en el hecho de que, hasta el año 2000 no existía ninguna planta de producción de biocarburantes en funcionamiento, mientras que a finales del 2004 nuestro país había experimentado un rápido avance en la producción de biodiésel. Pero más que los valores absolutos, lo importante en este sector es la tendencia de crecimiento continuo en la que se encuentra, que dibuja un escenario de expansión francamente optimista.

La siguiente tabla muestra una relación de las plantas en funcionamiento en España actualmente:

PLANTAS BIODIESEL	PROVINCIA	CAPACIDAD (t/AÑO)
Bercam	Toledo	6.000
Biocarburantes Almadén	Ciudad Real	32.000
Biocarburantes CLM	Toledo	105.000
Biodiésel Caparroso EHN	Navarra	35.000
Biodiésel Castilla La Mancha	Toledo	45.000
Bionet Europa	Tarragona	50.000
Bionor Transformación	Álava	30.000
Bionorte	Asturias	4.000
Combustibles Ecológicos Biotel	Cuenca	72.000
Entabán Biocombustibles	Sevilla	50.000
Grupo Ecológico Natural	Baleares	16.000
Idae	Madrid	5.000
Linares Biodiesel Technologies	Jaén	100.000
Stocks del Vallés BDP	Barcelona	31.000
TOTAL		581.000

Tabla 3. Plantas de producción de biodiésel en España.
Fuente: www.biodieselpain.com.

3.4. MARCO REGULATORIO

De manera cronológica el marco general y regulatorio que afecta a los biocarburantes es el que a continuación se presenta:

- La Comisión Europea, en su **Libro Blanco de 1997**, fija los primeros objetivos claros para las energías renovables y concretamente para los biocarburantes; así, se ha fijado un objetivo del 12% de contribución de las energías renovables para el 2010 (del que el 7% pertenecerá a los biocombustibles).

- En ese mismo año tuvo lugar la 3ª **Conferencia de las Partes del Convenio Marco de las Naciones Unidas en Kyoto**, donde la mayoría de los países industrializados asumieron el compromiso de reducir las emisiones de CO₂. Cabe decir que el sector del transporte en España emite un 25% de todos los gases de efecto invernadero.

- En línea con esta aspiración se promulgó la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico en España. Para dar cumplimiento a estos objetivos, el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía elaboró y presentó en España el **Plan de Fomento de Energías Renovables 2000-2010**, donde se exponen las principales tendencias y aspectos para el desarrollo de un mercado de biocarburantes en España. En dicho Plan se establece como objetivo energético una producción y consumo totales de 500.000 tep para 2010, lo que supondría el 1,8% de las previsiones de consumo de combustible para transporte.

- Como consecuencia de los objetivos citados en el Libro Blanco y del protocolo de Kyoto se promulgó la **Directiva 2003/30/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de mayo de 2003, relativa al fomento del uso de los biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte, que establece que los estados miembros deberán velar para que se comercialice en sus mercados una proporción mínima de

biocarburantes y contempla para ello, entre otros aspectos, una serie de medidas relativas al porcentaje de mezcla de los gasóleos y de las gasolinas con los biocarburantes. Los estados miembros deberán tomar una serie de medidas para conseguir que en el año 2010 un 5,75% de los carburantes fósiles utilizados actualmente (gasolina y gasóleo) haya sido reemplazado por biocarburantes con fecha límite de 31 de diciembre de 2010.

- A la vista de todo ello y para dar cumplimiento a estos objetivos, el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía ha elaborado un **Plan de Energías Renovables de España (PER)** que constituye una revisión del Plan de Fomento de las Energías Renovables en España 2000-2010.

Con esta revisión se trata de mantener el compromiso de producir con fuentes renovables al menos el 12% de la energía consumida en 2010, así como de incorporar los otros dos objetivos indicativos que son un 29,4% de generación eléctrica con renovables y 5,75% de biocarburantes en transporte para ese año. De esta manera, se superarán los objetivos del Plan de Fomento que fijó alcanzar las 500.000 tep a finales del año 2010, elevándose hasta alcanzar 2,2 millones de tep, es decir, multiplicar por cuatro el consumo previsto en el Plan de Fomento 2000-2010. Este Plan señala que en el 2010 el consumo de biocarburantes deberá ser del 5,83% del consumo de gasolina y gasóleo para el transporte, por encima de los objetivos de la Directiva 2003/30/CE de la UE que fija un 5,75% en el 2010.

	Situación en 2004	Objetivo de incremento 2005-2010	Situación objetivo en el año 2010
	Producción (tep)	Producción (tep)	Producción (tep)
Biocarburantes (transporte)			
Total biocarburantes	228.000	1.972.000	2.200.000

Tabla 4. Objetivos del PER en España. ^[31]

Para cumplir con este objetivo es necesario:

- Aumentar la capacidad de producción actual en 2.000.000 tep (750.000 tep para el bioetanol y 1.250.000 tep para el biodiésel).
- La demanda de biocarburantes debe crecer a un ritmo del 48% anual.

Hay que tener en cuenta que de mantenerse la tendencia actual de producción y consumo de biocarburantes, en el 2010 no se alcanzaría ni el 2% (frente al objetivo del 5,83%).

En la siguiente figura se representa la evolución del consumo de biocarburantes:

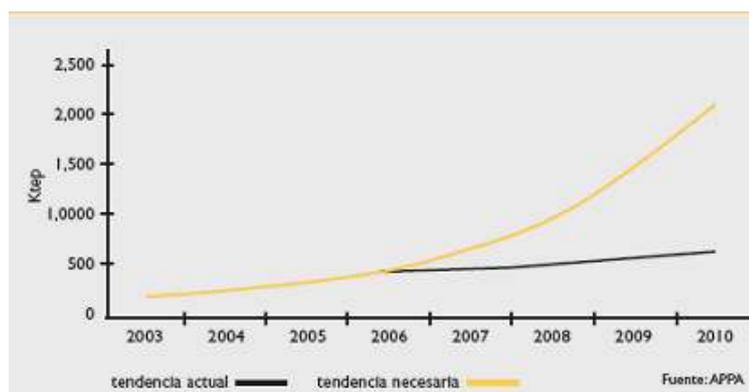


Figura 6. Evolución del consumo de biocombustibles actual y necesaria para el cumplimiento de los objetivos. ^[31]

El PER 2005-2010 estima que si se cumplen sus objetivos las emisiones de CO₂ evitadas hasta 2010 serían las siguientes:

- Bioetanol: 5.529.442 t CO₂
- Biodiésel: 10.443.570 t CO₂
- Total: 15.973.013 t CO₂

El dato objetivo es que, ante la situación regulatoria en la que nos encontramos, que apoya la sustitución de combustibles fósiles por los biocarburantes y, teniendo en cuenta la subida del precio del petróleo, (que en 2006 ha alcanzado cifras de 70 \$ el barril) la situación actual es muy favorable para el desarrollo de los biocarburantes.

Además, el biodiésel producido necesita satisfacer unas especificaciones que enumeren las propiedades y garanticen la calidad del producto. Los requerimientos específicos y los métodos de control para la comercialización y distribución de ésteres metílicos de ácidos grasos para su utilización en motores diésel se encuentran en la norma EN 14214, adoptada actualmente por la mayoría de los países europeos.

Para las mezclas gasóleo/biodiésel se debe cumplir la Norma EN 590. Esta aplicación de los requisitos del gasóleo al biodiésel imposibilita comercializar mezclas con más del 15% de biodiésel. Deberán elaborarse especificaciones concretas para determinados porcentajes de mezclas o aplicar por separado las especificaciones que le son propias a cada uno de los componentes de la mezcla.

En la siguiente tabla se enumeran las especificaciones establecidas para el biodiesel según la norma EN 14214 y el método de ensayo correspondiente:

<i>Propiedad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límites</i>		<i>Método de ensayo</i>
		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	
Contenido en éster ^a	% (m/m)	96,5 ^b		EN 14103
Densidad a 15°C ^c	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidad a 40°C ^d	mm ² /g	3,50	5,00	EN ISO 3104
Punto de inflamación	°C	120	-	prEN ISO 3679 ^e
Contenido de azufre	mg/kg	-	10,0	prEN ISO 20846 prEN ISO 20884
Residuo de carbón (en 10% de residuo destilado) ^f	% (m/m)	-	0,30	EN ISO 10370
Índice de cetano ^g		51,0		EN ISO 5165
Contenido de cenizas sulfatadas	% (m/m)	-	0,02	ISO 3987
Contenido en agua	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
Contaminación total ^h	mg/kg	-	24	EN 12662
Corrosión de la tira de cobre (3h a 50°C)	Clasificación		Clase 1	EN ISO 2160
Estabilidad a la oxidación 110°C	Horas	6,0	-	EN 14112
Índice de ácido	mg KOH/g		0,50	EN 14104
Índice de yodo	g de yodo/100g		120	EN 14111
Éster de metilo de ácido linoléico	% (m/m)		12,0	EN 14103
Ésteres de metilo poli-insaturados ⁱ (> = a 4 dobles enlaces)	% (m/m)		1	
Contenido de metanol	% (m/m)		0,20	EN 14110
Contenido en monoglicéidos	% (m/m)		0,80	EN 14105
Contenido en diglicéidos	% (m/m)		0,20	EN 14105
Contenido en triglicéidos ^j	% (m/m)		0,20	EN 14105
Glicerol libre ^j	% (m/m)		0,02	EN 14105 EN 14106
Glicerol total	% (m/m)		0,25	EN 14105
Metales del grupo I (Na+K) ^k	mg/kg		5,0	EN 14108 EN 14109
Metales del grupo II (Ca+Mg) ^l	mg/kg		5,0	prEN 14538
Contenido de fósforo	mg/kg		10,0	EN 14107

Nota El Índice de Yodo es actualmente 140

**Tabla 5. Requerimientos y métodos de análisis para el biodiésel.
Fuente: CEN (Comité Europeo de Normalización).**

3.5. INCENTIVACIÓN FISCAL

El sector del transporte representó en España el 37,5% del consumo final de energía durante el año 2006, y las estimaciones para el año 2012 son del 47,64%. En la UE representa más del 30% del total de consumo de energía y depende en un 98% de combustibles fósiles.

Los principales compromisos para la reducción del efecto invernadero se adoptaron a través del Protocolo de Kyoto, donde la UE se comprometió a reducir en un 8% los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero en el 2010 respecto a los valores de 1990.

Así, la Comisión Europea ha señalado como objetivo prioritario para los próximos años reducir la dependencia del petróleo mediante la introducción, entre otras tecnologías, de biocombustibles y disminuir las emisiones de gases contaminantes. Los biocarburantes se contemplan como la alternativa más clara y de mayor potencial frente a la utilización de gasolina o gasóleo debido a su carácter renovable y su menor impacto ambiental.

Teniendo en cuenta los problemas de cambio climático, el continuado incremento de los precios del petróleo y sus derivados, así como una preocupación cada vez mayor por garantizar el suministro de fuentes de energía primaria como el petróleo, la utilización de biomasa, y en particular los biocombustibles, para usos energéticos tiene cada vez mayor interés.

Por todo ello, el futuro a corto plazo de los biocarburantes se presenta prometedor, siendo necesario incrementar de manera significativa la producción de biocarburantes mediante el uso de procesos innovadores, tecnologías y materias primas que sean competitivas y respetuosas con el medio ambiente. Para conseguir esto es necesario contar con una estrategia bien coordinada que fomente la producción de biocombustibles.

El desarrollo del biodiésel, en general, ha estado sujeto a decisiones legislativas que permitiesen la adopción de incentivos fiscales para el arranque de las actividades. En España durante mucho tiempo se ha esperado la aplicación de una exención fiscal total del Impuesto Especial de Hidrocarburos, ya que es mucho mayor el coste de producción del biodiésel que el correspondiente al gasóleo mineral.

Mediante el Real Decreto 6/2000 se creó la Comisión para el estudio del uso de biocombustibles, a través de la cual se elaboró un informe donde se recogían una serie de medidas e incentivos necesarios para el desarrollo de los biocombustibles.

La aplicación de la Directiva 2003/96/CE permite anular el Impuesto Especial de Hidrocarburos (30,01 céntimos de euro/litro) hasta el año 2012; esto significa un gran apoyo al desarrollo de la tecnología de estos biocarburantes y a su implantación, pero la incertidumbre sobre el tratamiento fiscal a partir del 2012 no facilita la entrada de capital productivo para la construcción de nuevas plantas y para la investigación y desarrollo. Por otro lado, la comercialización de biocarburantes sí está sometida al Impuesto de Ventas Minoristas de Hidrocarburos.

Por otro lado, las últimas reformas desarrolladas en el marco de la Política Agraria Común (PAC) incluyen la introducción de una ayuda específica para cultivos destinados bajo contrato a la producción de biocombustibles o energía térmica eléctrica a partir de biomasa, medida que entró en vigor en nuestro país en el 2006. El coste de la producción del biocarburante depende, principalmente, del precio de la materia prima. Esta es la barrera principal que ha impedido el desarrollo de la industria de los biocarburantes, ya que al agricultor se le ofrecen precios inferiores a los correspondientes a los destinados a la alimentación y no le resultaba interesante su cultivo.

3.6. COMPARACIÓN ENTRE EL GASÓLEO MINERAL Y EL BIODIÉSEL

El comportamiento de los motores diésel viene dado por el proceso de combustión y, por tanto, vendrá determinado por el tipo de combustible y sus propiedades físicas y químicas. En principio, los motores diésel están diseñados y optimizados para utilizar gasóleo. En consecuencia, la valoración de cualquier combustible sustitutivo requiere una comparación de las propiedades más características.

a) Propiedades:

En la siguiente tabla se presentan y comparan algunas propiedades de un gasóleo típico, de un aceite vegetal (girasol) y de sus ésteres metílicos.

PROPIEDAD	GASÓLEO	ACEITE DE GIRASOL	ÉSTER METÍLICO
Densidad (15 °C) (kg/m ³)	840	920	890
Punto de ignición (°C)	63	215	183
Viscosidad cinemática(37,8 °C) (m ² /s)	3,2·10 ⁻⁶	3,5·10 ⁻⁵	4,2·10 ⁻⁶
Número de cetano	45 - 50	33	47 - 51
Calor de combustión (J/kg)	0,044	0,0395	0,040
Punto de enturbiamiento (°C)	0 – (+3)	- 6,6	3
Azufre (% peso)	0,3	< 0,01	< 0,01
Residuo de carbón (% peso)	0,2	0,42	0,05

Tabla 6. Propiedades como combustible de los ésteres metílicos del aceite en comparación con el gasóleo.
Fuente: www.panoramaenergetico.com.

Estas propiedades justifican que se desestime el uso directo del aceite vegetal, ya sea crudo o refinado, como combustible y se opte por el uso de

los ésteres metílicos; en el aceite, el índice de cetano se observa que es algo inferior en relación al gasóleo, encontrándose fuera de los requerimientos de la norma ASTM D613, que determina un rango de índice de cetano de 40-50 para que un combustible pueda ser utilizado en motores diésel. Por otra parte, se puede observar que los aceites presentan una viscosidad unas diez veces superior a la del combustible fósil.

El problema fundamental que presentan los aceites es la viscosidad, la cual ocasiona una combustión incompleta, obstrucción en las toberas de los inyectores, depósitos carbonosos en el motor, residuos gomosos y ensuciamiento del aceite lubricante del cárter. Esto es ocasionado fundamentalmente por la escasa atomización del combustible en la inyección debido a la elevada viscosidad.

Las propiedades de los ésteres metílicos muestran una significativa reducción de la viscosidad y un incremento del número de cetano en relación a los triglicéridos de los cuales procede.

b) Medio ambiente:

De los numerosos ensayos realizados con vehículos que utilizan motores diésel alimentados con ésteres de aceites vegetales se han obtenido las siguientes conclusiones generales:

SUSTANCIAS CONTAMINANTES	VARIACIÓN DE EMISIONES (%)	
	B20	B100
Partículas (<10 µm)	-14	-68
Hidrocarburos volátiles	-13	-37
CO	-7	-46
NOx		8
SOx	-20	-100

Tabla 7. Reducciones de emisiones en pruebas con biodiésel.

En general, se puede decir que utilizando biodiésel como combustible, se reducen todas las emisiones generadas por los motores de combustión, a excepción de las de óxidos de nitrógeno, que se ven ligeramente aumentadas.

Como conclusión general, desde el punto de vista de emisiones nocivas reguladas (CO, HC, NO,... partículas), el efecto de los ésteres es positivo y puede ayudar a mitigar la contaminación debida a los motores diésel. Hay que recordar que dichos ésteres no contienen aromáticos y prácticamente están exentos de azufre.

Se trata de un combustible renovable, cuya toxicidad oscila entre 16 y 230 veces menor que el gasóleo, es además biodegradable (en 21 días se degradan el 98% de sus moléculas), con un balance de emisión de CO₂ casi neutro, que ayudaría a cumplir los compromisos firmados en el protocolo de Kyoto por España. El CO₂ emitido durante la producción y el consumo de biodiésel es absorbido en su mayoría durante la fotosíntesis de las plantas oleaginosas, sin que suponga un aumento importante de dicho gas en la atmósfera, principal responsable del efecto invernadero.

c) Precio:

La diferencia de precios entre el gasóleo y el biodiésel estriba fundamentalmente en el precio de la materia prima. El desglose de los costes del biodiésel se presenta en la siguiente tabla, donde se aprecia que el 80% del coste proviene del precio del aceite vegetal. Así, la reducción de las diferencias de precios deberá centrarse en el estudio de la disminución del coste de los aceites vegetales. En este sentido, la elección de aceites vegetales usados es la alternativa más acertada debido a su bajo coste.

CONCEPTO	CONTRIBUCIÓN %
Aceite vegetal	80
Costes fabricación	10
Productos químicos y servicios	5
Financiación y amortización	5

Tabla 8. Estructura de los costes del biodiésel.

Los costes de producción del biodiésel han sido siempre muy superiores a los del gasóleo; mientras que para éste los costes de producción están en torno a los 0,18 €/litro, en el caso del biodiésel, suponiendo que se utiliza aceite usado como materia prima, resulta del orden de unos 0,40 €/litro.

Los precios son competitivos con los del gasóleo gracias a la política de subvenciones para combustibles de origen vegetal.

d) Propiedades técnicas:

- Mayor lubricidad, con lo cual se alarga la vida del motor y se reduce su ruido.
- Mayor poder disolvente, que hace que no se produzcan residuos carbonosos ni se obstruyan los conductos, manteniendo limpio el motor.
- Mejor comportamiento que el gasóleo en cuanto al ensuciamiento de inyectores. A mayor proporción de éster mejores resultados, el éster actúa como un aditivo antiensuciamiento.
- Es más seguro de manejar y transportar, ya que su punto de inflamación es tres veces superior al gasóleo.
- Leve incremento del consumo y ligera disminución de potencia con mezclas de hasta el 30% porque el poder calorífico del biodiésel es menor (entre el 4 y 8%). Variaciones mayores con éster al 100% (-7% en potencia y +16% en consumo). Pero esta reducción no es comparable con el resto de ventajas que aporta.

- Problemas en el comportamiento en frío con porcentajes de mezcla superiores al 30%. En climas fríos se suelen formar cristales tanto en el gasóleo como en el biodiésel, produciendo obstrucciones al flujo a través de las líneas de combustible, filtros e inyectores. La temperatura a la cual los cristales empiezan a ser visibles se define como temperatura de enturbiamiento (*Cloud Point*), la cual suele ser en el biodiésel unos 10 °C superior a la del gasóleo. Este problema podría solucionarse con la utilización de aditivos desarrollados para reducir la temperatura de enturbiamiento.

3.7. MERCADO DEL BIODIÉSEL

El empleo del biodiésel en sustitución del gasóleo está ya implantado como realidad industrial y comercial en numerosos países, aunque todavía con un grado de desarrollo alejado del máximo.

El porcentaje en España de biocarburantes utilizados en el sector transporte desde 1994 ha ido aumentando constantemente. Su uso en Europa está totalmente extendido.

El biodiésel se utiliza además de en automoción, para sustituir al gasóleo C de calefacción. Por otra parte, el biodiésel disuelve los hidrocarburos por lo que también se ha utilizado para limpiar vertidos de hidrocarburos.

4. ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE LA ACIDEZ DEL ACEITE

USADO^[28]

4.1. SAPONIFICACIÓN

Una vía para la utilización de materia prima con alto nivel de ácidos grasos libres (AGL) es usar un catalizador básico para formar deliberadamente jabón a partir de ellos. El jabón se recupera y el agua se separa del aceite, de manera que éste ya puede ser utilizado para llevar a cabo la reacción de transesterificación catalizada por una base, que dará lugar a la formación de biodiésel.

Este modo de neutralizar los AGL puede ser viable cuando los niveles de éstos no superen el 2% y la materia prima no contiene agua; en el caso de que estén presentes trazas de agua, el límite está en un 1%.

Pero para aceites con cantidades más altas de AGL esta estrategia no es económicamente rentable, ya que el jabón es desechado y por tanto el precio efectivo de la materia prima (aceites usados) aumenta en proporción inversa al porcentaje de aceite restante; además, la cantidad considerable de jabón que se crea puede gelificar e inhibir la posterior separación glicerina/éster.

4.2. MÉTODOS PARA CONVERTIR LOS ÁCIDOS GRASOS LIBRES EN BIODIÉSEL

La técnica anterior convierte los AGL en un producto residual; sin embargo, éstos pueden ser transformados en biodiésel. Cuando se trabaja con una materia prima cuyo contenido en AGL está entre el 3-30% o incluso mayor, es muy importante transformar éstos en biodiésel o el rendimiento del proceso será bajo. A continuación se citan cuatro técnicas para llevar a cabo este propósito:

4.2.1. Métodos enzimáticos

Las enzimas utilizadas para este fin son lipasas, que pueden mantenerse en suspensión en la mezcla reaccionante o bien estar inmovilizadas.

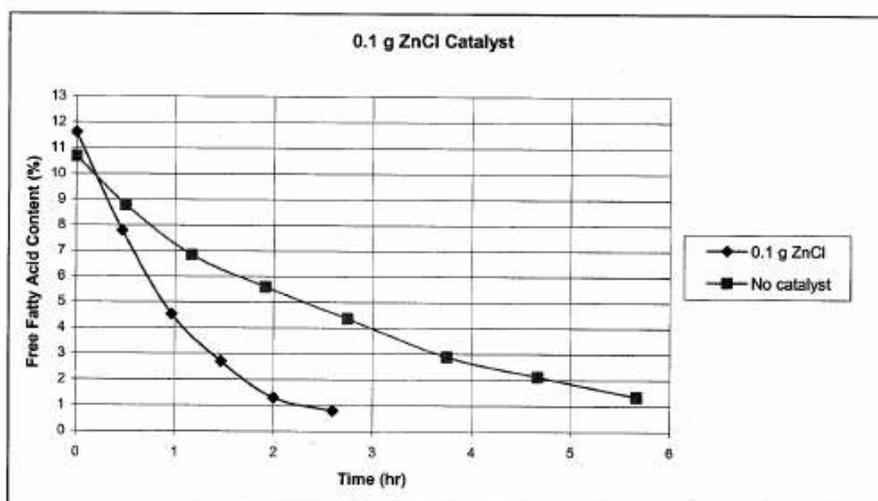
Estas enzimas tienen un interés particular como catalizadores para la producción de ésteres a partir de materias primas con alto contenido en AGL, porque aceptan los AGL y los triglicéridos como sustratos para la síntesis de ésteres en un solo paso; otras ventajas del uso de este método son la producción de una corriente de glicerina con un contenido mínimo en agua y muy poco o ningún material inorgánico, así como la reutilización del catalizador.

Los inconvenientes de usar un catalizador enzimático incluyen el alto coste de las lipasas comparado con los catalizadores inorgánicos (en la ausencia de una estrategia efectiva para multiplicar el uso de las enzimas), la necesidad de purificar previamente las lipasas (este proceso puede llegar a ser demasiado complejo y costoso), la inactivación de la lipasa debido a contaminantes en la materia prima (principalmente fosfolípidos) y la inactivación por alcoholes polares de cadena corta.

En definitiva, estos métodos requieren una importante inversión económica y en la actualidad ningún proceso a escala comercial hace uso de ellos.

4.2.2. Glicerólisis

Esta técnica implica añadir glicerina a la materia prima y calentar hasta una temperatura alta (200 °C), normalmente con un catalizador como el cloruro de zinc. La glicerina reacciona con los AGL para formar mono y diglicéridos. Este procedimiento da lugar a una alimentación con bajo porcentaje en AGL, que puede ser procesada utilizando las técnicas tradicionales de catálisis básica. En la siguiente figura se muestra la tasa de disminución del nivel de AGL en un lote de grasa animal:



Reduction of Fatty Acids by Glycerolysis
 (100 g animal fat, 13 g glycerol, 0.1 g ZnCl, 200°C, 11 psi vacuum)
Figura 7. Reducción de AGL por glicerólisis. [28]

Como ventaja puede citarse que no se utiliza metanol durante el pretratamiento y el agua formada por la siguiente reacción se vaporiza inmediatamente y puede ser retirada de la mezcla:



El inconveniente principal de la glicerólisis es la alta temperatura, lo que supone un alto coste energético, además la reacción es relativamente lenta.

4.2.3. Catálisis ácida

Esta técnica utiliza un ácido fuerte, tal y como el ácido sulfúrico, para catalizar la esterificación de los AGL y la transesterificación de los triglicéridos. La reacción no produce jabones ya que no está presente ningún metal alcalino.

La reacción de esterificación de los AGL a ésteres es relativamente rápida; sin embargo, la transesterificación de los triglicéridos es muy lenta, necesita varios días para completarse. Otro problema con la catálisis ácida es que el agua producida en la siguiente reacción:



permanece en la mezcla de reacción y finalmente para la reacción, normalmente antes de alcanzar la terminación.

4.2.4. Pre-esterificación ácida

Esta alternativa resuelve los problemas anteriores, usando la catálisis ácida seguida de la catálisis básica; es decir, se usa cada técnica para llevar a cabo el proceso para el cual es más apropiada.

Ya que la catálisis ácida es relativamente ligera para convertir los AGL a ésteres metílicos, ésta es usada como un pretratamiento para el aceite. Posteriormente, cuando el nivel de AGL ha sido reducido al 1%, o menos, se lleva a cabo un proceso catalizado por una base con el objetivo de convertir los triglicéridos a ésteres metílicos.

4.3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA

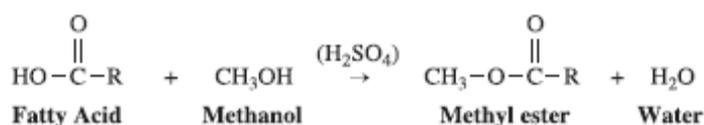
4.3.1. Selección del proceso para reducción de la acidez

A la hora de seleccionar una técnica, el factor más importante a tener en cuenta en el caso de la planta que se proyecta es el nivel de acidez de los aceites que se recepcionarán; en este caso, la materia prima grasa que se va a procesar tiene un contenido en AGL variable entre un 2-7% ya que se trata de aceites de fritura usados procedentes de uso doméstico y de hostelería que han sufrido un proceso de degradación. Por tanto, la técnica de saponificación no es viable en este caso por las razones explicadas anteriormente, así que se seleccionará una de las técnicas de conversión de AGL en biodiésel.

De las cuatro opciones posibles, la seleccionada para llevarla a cabo en la instalación que se diseña es la técnica de pre-esterificación, por las siguientes razones:

- Es la alternativa más extendida cuando las características de acidez son similares a las de los aceites que se tratan en el presente proyecto.
- Su viabilidad operacional está demostrada.
- No se requiere una temperatura excesivamente elevada.
- El proceso requiere tiempos de reacción relativamente cortos.
- Es la vía que presenta mayor viabilidad económica.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el procedimiento de pre-esterificación tiene el inconveniente de que se forma agua en el transcurso de la reacción:



Al tratarse de un reactor discontinuo, el agua tenderá a acumularse en el tanque de reacción, hasta el punto que puede apagar la reacción prematuramente, ya que el ácido sulfúrico tiende a migrar hacia el agua, dejando de catalizar la reacción.

Por tanto, todo sistema de esterificación ácida necesita tener una estrategia para minimizar este efecto; en la instalación que se proyecta se opta por añadir un exceso de metanol durante el pretratamiento (relación molar metanol/AGL 20:1), de manera que el agua producida es diluida a un nivel en el cual no limita la reacción. Es decir, se utiliza el reactivo más económico en exceso para aumentar el rendimiento y desplazar el equilibrio hacia la derecha. El metanol en exceso se recuperará posteriormente en la planta de producción de biodiésel, mediante evaporación y posterior condensación, de modo que podrá ser reutilizado (dicha recuperación no es objeto de diseño en este proyecto, ya que en la planta ya existe una unidad para tal propósito).

Por otro lado se justifica la selección de metanol para llevar a cabo la reacción, ya que los alcoholes con sustituyentes voluminosos reaccionan mal, dificultando el mecanismo de la reacción por impedimento estérico y provocando que la conversión a ésteres sea más lenta. Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, unido a su bajo coste hacen que el metanol sea el alcohol seleccionado en el presente diseño.

En la bibliografía se encuentran estudios^[35] de la evolución de la reacción de esterificación en el tiempo a través de la acidez de la muestra, usando distintos alcoholes de cadena corta. Concretamente en la siguiente gráfica se muestra un estudio comparativo usando metanol, etanol absoluto y etanol al 96%:

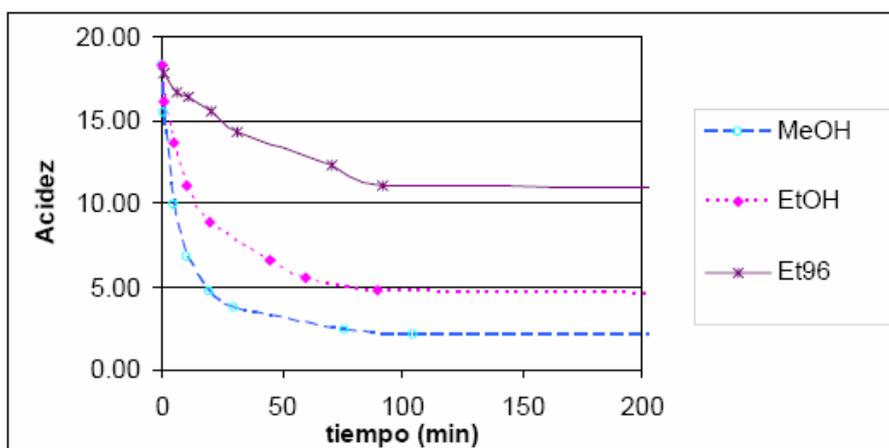


Figura 8. Evolución de la reacción en el tiempo para distintos alcoholes. ^[35]
(acidez: g de ácido oleico / 100 g de muestra).

Se puede observar que los mejores resultados se obtienen para el caso del metanol (mayor conversión de AGL a ésteres, por lo tanto menor acidez), seguido por el etanol absoluto, siendo menos eficiente aún la reacción con etanol al 96%.

4.3.2. Selección del catalizador ácido

Existe la posibilidad de que la catálisis sea homogénea o heterogénea.

La catálisis homogénea se lleva a cabo en todos los casos revisados en la bibliografía con el uso de ácido sulfúrico, ya que cataliza satisfactoriamente la reacción y es el ácido de mayor disponibilidad industrial así como el de menor coste. Ésta es por lo tanto la opción que se elige, ya que se obtienen buenos resultados en los procesos industriales que operan con él como catalizador, y permite una mayor simplicidad a la hora de diseñar el reactor.

La catálisis heterogénea se lleva a cabo habitualmente utilizando una resina polimérica de intercambio iónico, pudiendo usarse distintas configuraciones para el reactor, como un reactor discontinuo de tanque agitado bifásico o bien una torre de pulverización. La primera opción, en la que el catalizador está suspendido en la mezcla de reacción, puede provocar el desgaste

mecánico del catalizador y la segunda opción conlleva una complejidad considerablemente mayor en los equipos de proceso, con el consiguiente aumento en el coste de mantenimiento y operación. Aún así, la catálisis heterogénea es una opción con importantes perspectivas, ya que evita las pérdidas de catalizador en el efluente de salida del reactor. Asimismo minimiza las necesidades de separación del producto final.

4.3.3. Modo de operación

La instalación de pretratamiento que se proyecta se instalará dentro de una planta de producción de biodiésel, en fase de proyecto, que trabaja en discontinuo por las siguientes razones:

- La escala de producción es reducida; en base a estudios económicos, se confirma que para bajas capacidades de producción (hasta 15.000 t/año de biodiésel), es aconsejable que el proceso se lleve a cabo de forma discontinua.
- Versatilidad y facilidad en el control del proceso.
- Reducción de averías.
- Mayor garantía de calidad del producto final.

Por estos motivos dicha planta opera en discontinuo y en ella pueden distinguirse tres etapas diferenciadas:

- Limpieza y acondicionamiento del aceite, etapa que constituye la instalación que se diseña en el presente proyecto.
- Reacción de transesterificación.
- Etapa de separación y purificación del producto.

5. MATERIAS PRIMAS

Las materias primas necesarias en el proceso de reducción de los AGL contenidos en los aceites de fritura para producción de biodiesel son:

- Aceite vegetal de fritura usado (oliva y girasol).
- Metanol.
- Ácido sulfúrico.

Siendo los aceites usados y el metanol las materias primas principales y el ácido sulfúrico el catalizador.

5.1. ACEITES Y GRASAS EMPLEADOS PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

Las materias primas más comunes utilizadas en España para la fabricación de biodiésel son los aceites de fritura usados y el aceite de girasol.

Tanto en España como a nivel internacional, se puede decir que la producción de biodiésel tiende a provenir mayoritariamente de los aceites extraídos de plantas oleaginosas, especialmente girasol (en España e Italia) y colza (en países de Europa central). Cualquier materia que contenga triglicéridos puede utilizarse para la producción de biodiésel (girasol, colza, soja, aceites de fritura usado, sebo de vaca,...).

A continuación se detallan las principales materias primas para la elaboración de biodiésel:

- a) Aceites vegetales:

Las materias primas utilizadas convencionalmente en la producción de biodiésel han sido los aceites de semillas oleaginosas como el girasol y la colza (Europa), la soja (Estados Unidos) y el coco (Filipinas); y los aceites de frutos oleaginosos como la palma (Malasia e Indonesia).

Por razones climatológicas, la colza se produce principalmente en el norte de Europa y el girasol en los países mediterráneos del sur, como España o Italia.

b) Aceites de fritura usados:

El aceite de fritura usado es una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiésel, ya que es la materia prima más barata, lo que ayudará a reducir el coste total del biodiésel, y con su utilización se evitan los costes de su tratamiento como residuo.

España es un gran consumidor de aceites vegetales, centrándose el consumo en aceite de oliva y girasol. Por su parte, los aceites usados presentan un bajo nivel de reutilización, por lo que no sufren grandes alteraciones y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible. La producción de los aceites usados en España se sitúa en torno a las 750.000 t/año, según cifras del año 2004. Además, como valor añadido, la utilización de aceites usados significa la buena gestión y uso del residuo.

Esta alternativa es la que más ventajas tiene porque además de producir combustible elimina un residuo contaminante como es el aceite usado, el cual da problemas al depurar el agua. En el caso español, la Ley 10/98 de Residuos establece la prohibición de verter aceites usados, lo cual es un incentivo más para su utilización en la fabricación de biodiésel.

c) Grasas animales:

Además de los aceites vegetales y los aceites de fritura usados, las grasas animales, y más concretamente el sebo de vaca o búfalo, pueden utilizarse como materia prima de la transesterificación.

La aplicación de grasas animales como materia prima para la producción de biodiésel surgió a raíz de la prohibición de su utilización en la producción de piensos. Sin embargo, actualmente no existe un nivel de aplicación industrial en España.

d) Aceites de otras fuentes:

Por otra parte, es interesante señalar la producción de lípidos de composiciones similares a los aceites vegetales, mediante procesos microbianos, a partir de algas, bacterias y hongos, así como a partir de microalgas.

5.2. ACEITES VEGETALES DE FRITURA USADOS

5.2.1. Introducción

El aceite de fritura usado es una de las alternativas más interesantes en cuanto a su coste. Además al utilizar estos aceites se evitan los costes de su tratamiento como residuo.

Los aceites de oliva y de girasol son los dos aceites consumidos en España, siendo marginal el consumo de otros aceites como soja, maíz, cacahuete, etc. Estos dos aceites son, por tanto, los que se usan para llevar a cabo el proceso de fritura.

La composición media (% en peso) de los ácidos grasos mayoritarios de estos aceites se muestra en la siguiente tabla:

ÁCIDO	Nº ÁTMOS C : Nº INSATURACIONES	ACEITE DE OLIVA	ACEITE DE GIRASOL
Palmítico	C16:0	9,4	3,6
Esteárico	C18:0	2,0	2,9
Oleico	C18:1	80,5	34,0
Linoleico	C18:2	6,9	57,5
Aráquico	C20:0	0,2	0,6

**Tabla 9. Composición de aceites de oliva y girasol.
Fuente: Aceites y Grasas Industriales. Alton E. Bailey.**

Los datos de consumo en España se sitúan en torno al millón de toneladas al año, encontrándose unos valores de aceites usados en torno a las 750.000 t/año. El 70% de estos aceites usados se generan fundamentalmente en el sector del hogar, correspondiendo el resto al sector de hostelería y servicios.

Las diferencias existentes entre el biodiésel producido a partir de los aceites usados de fritura y aceites sin usar, se refieren fundamentalmente al

proceso de producción y no tanto a las propiedades y calidad del biodiésel obtenido, ya que estas diferencias de fabricación son llevadas a cabo con la finalidad de obtener un combustible de acuerdo a la normativa establecida.

Los problemas que supone la recogida de aceites usados debido a la dispersión de las fuentes, han constituido inicialmente una barrera para el uso de los mismos en la obtención de biodiésel; además, sólo podría sustituirse un 1-2% de la demanda de combustible diésel mediante este método. Pero, a pesar de estas dificultades, el escaso coste del aceite usado (coste de recogida y almacenamiento) y la necesidad cada vez mayor del adecuado tratamiento de estos residuos, debido a las exigencias medioambientales, hacen de los mismos un objeto de interés cada vez mayor.

5.2.2. Degradación de los aceites vegetales en el proceso de fritura

La fritura de alimentos es una característica común al conjunto del mundo mediterráneo; en concreto, en España el 95% de la ingesta de grasa total corresponde a los aceites vegetales, debido principalmente al extendido uso del proceso culinario de fritura en baño de aceite.

En el aceite de fritura se producen una gran cantidad de cambios físicos y químicos, como consecuencia de la interacción entre el aceite, el agua y otros componentes del alimento.

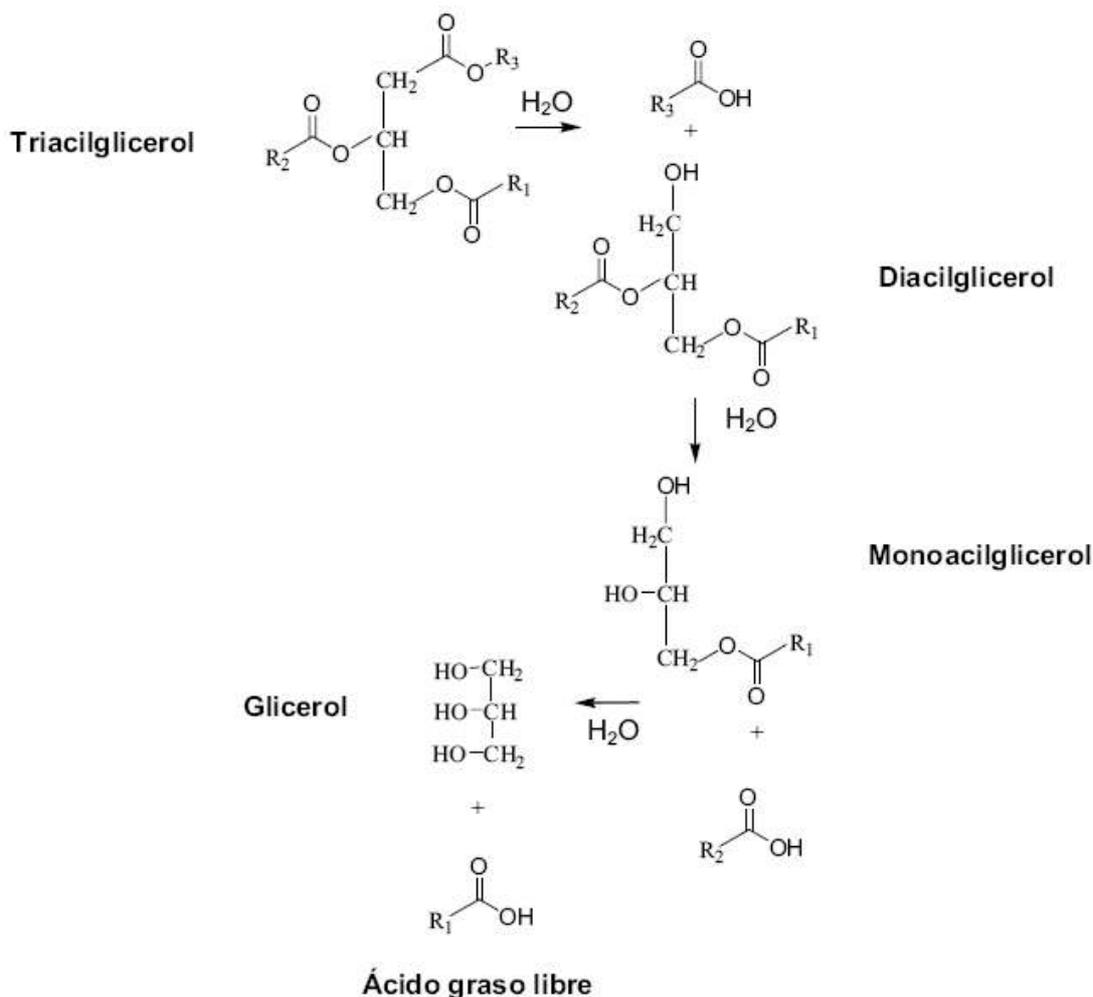
La fritura es un proceso de naturaleza muy compleja, en el que se ven implicadas numerosas reacciones que afectan a los componentes de la materia grasa que se utiliza como medio de fritura. A partir de tres agentes (agua, oxígeno y temperatura elevada) que actúan favoreciendo diversas reacciones, los componentes de los aceites sometidos a fritura experimentan diversas alteraciones tal y como recoge la siguiente tabla:

TIPO DE ALTERACIÓN	AGENTE CAUSANTE	COMPUESTOS NUEVOS RESULTANTES
Hidrolítica	Humedad	Ácidos grasos libres Diacilgliceroles Monoacilgliceroles
Oxidativa	Aire	Monómeros oxidados (TG) Dímeros y polímeros oxidados (TG) Compuestos volátiles (aldehídos, cetonas, hidrocarburos, etc.) Óxidos de esteroides
Térmica	Temperatura	Dímeros y polímeros no polares (TG) Monómeros cíclicos (TG) Isómeros <i>trans</i> (TG) y de posición

Tabla 10. Procesos de degradación del aceite. ^[5]

Los AGL son el producto de alteración que más afecta a la calidad del aceite para la producción de biodiésel.

La reacción del agua con el aceite durante la fritura conduce a la liberación de AGL y ésteres parciales del glicerol, a partir de los triacilgliceroles, tal y como se muestra a continuación:



La intensidad de este proceso de hidrólisis, que puede medirse mediante la acidez libre, depende de diversos factores:

- La cantidad de agua en contacto con el aceite o grasa de fritura. El agua se introduce a través del producto que se sumerge para freír y, por lo tanto, la humedad relativa del alimento es un factor clave, que en el caso de la patata puede llegar a ser del 80%.
- La superficie del alimento sumergido, o mejor dicho, la relación superficie/volumen de producto. A mayor valor de esta relación, mayor contacto entre el aceite y el agua del producto.
- La temperatura de fritura. Una temperatura elevada favorece la formación de AGL.

- La presencia excesiva de partículas sólidas residuales en el aceite de fritura acelera la formación de AGL. En cambio, la formación de espuma en la superficie del aceite minimiza esta reacción hidrolítica.

5.2.3. Características del aceite vegetal usado

Los aceites de fritura presentan una gran heterogeneidad en función de las condiciones a las que han sido sometidos. Estos parámetros son muy diversos, como el tipo de aceite usado, la temperatura a la que ha sido sometido, el número de usos y duración de las frituras, alimentos que han sido fritos, etc. Por tanto, esta gran diversidad implica una muy difícil o casi imposible caracterización de los mismos de manera genérica.

El parámetro analítico contemplado más universalmente por la legislación, para desechar los aceites de fritura, es el porcentaje total de compuestos polares (% CP). Este parámetro intenta realizar una evaluación a través de la diferenciación entre el porcentaje de compuestos apolares presentes en el aceite usado (cifra que corresponderá a los triglicéridos inalterados, mayoritariamente), y el porcentaje de compuestos polares en el mismo, cifra que corresponderá a los componentes con ciertos grupos químicos polares, que son la mayor parte de componentes de alteración: AGL, mono y diglicéridos, polímeros y compuestos oxidados. En España este parámetro debe estar por debajo del 25%.

En la siguiente tabla se observan los resultados de un estudio realizado, donde se muestra el contenido de los compuestos de degradación en los aceites desechados en hogares y comedores colectivos; los procedentes de restaurantes, presentaron los niveles más elevados de alteración y los procedentes de los hogares los más bajos.

	Escuelas	Hospitales	Restaurantes	Hogares
Contenido polar total (g/100 g)	9,6 ± 2,8	10,5 ± 3,0	19,9 ± 12,6	6,6 ± 2,6 ^{ab}
Polímeros de triacilglicerol (%) ^c	5,9 ± 2,4	5,6 ± 1,7	15,8 ± 12,2	3,2 ± 1,4 ^{ab}
Dimeros de triacilglicerol (%)	30,7 ± 4,9	31,4 ± 3,9	31,8 ± 6,3	16,9 ± 6,6 ^{abd}
Triacilgliceroles oxidados (%)	38,8 ± 6,9	41,4 ± 6,0	28,2 ± 6,3 ^{ab}	27,2 ± 4,3 ^{ab}
Diacilgliceroles (%)	17,9 ± 3,4	15,7 ± 4,5	19,5 ± 9,2	40,8 ± 7,2 ^{abd}
Ácidos grasos más insaponificable polar (%)	6,6 ± 1,7	5,8 ± 1,2	4,5 ± 1,9	12,6 ± 5,9 ^{abd}

a: significativamente diferente para las escuelas.

b: significativamente diferente para los hospitales.

c: porcentaje del contenido polar total.

d: significativamente diferente a restaurantes.

Media ± desviación estándar.

Tabla 11. Contenido medio de compuestos polares en aceites fritos desechados. ^[5]

De cara al planteamiento de los balances y a la realización de los diferentes cálculos, se considerará una muestra que contendrá un 50% en peso de aceite de girasol usado y un 50% en peso de aceite de oliva usado, y que poseerá la siguiente composición en ácidos grasos:

ÁCIDO	Nº ÁTMOS C : Nº INSATURACIONES	PORCENTAJE EN PESO (%)
Mirístico	C14:0	No determinado
Palmítico	C16:0	12
Palmitoleico	C16:1	0,8
Estéarico	C18:0	No determinado
Oleico	C18:1	53
Linoleico	C18:2	33
Linolénico	C18:3	1
Aráquico	C20:0	No determinado

Tabla 12. Composición en ácidos grasos de aceite de fritura usado. ^[38]

Como puede observarse, el aceite muestra un alto grado de insaturación (suma de ácido oleico y ácido linoleico mayor al 85%).

Las principales características físicas de la muestra estándar de aceite usado se muestran a continuación:

PROPIEDAD	VALOR
Densidad (25 °C) (kg/m ³)	919
Viscosidad cinemática (25 °C) (m ² /s)	5·10 ⁻⁵ -5,5·10 ⁻⁵
Índice yodo	77,7
Índice saponific.	181,7

Tabla 13. Principales propiedades físicas aceite oliva usado (tras 5 frituras a 180 °C).^[40]

PROPIEDAD	VALOR
Densidad (25 °C) (kg/m ³)	930
Viscosidad cinemática (25 °C) (m ² /s)	4,5·10 ⁻⁵ -5·10 ⁻⁵
Índice yodo	118,7
Índice saponific.	175,8

Tabla 14. Principales propiedades físicas aceite girasol usado (tras 5 frituras a 180 °C).^[40]

La elevada acidez de los aceites usados y la presencia de agua en un porcentaje mayor del 0,5% en peso impiden que la reacción de transesterificación se complete adecuadamente.

Las operaciones de pretratamiento reducen estos valores de acidez y humedad, así como los sólidos en suspensión, haciendo posible alcanzar valores que califican al aceite como apto para su procesado mediante transesterificación; en la siguiente tabla se muestran las especificaciones técnicas relativas a las características que debe presentar un aceite usado para considerarlo apto para su transformación en biodiésel mediante una transesterificación por catálisis básica:

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Acidez máxima	% en peso	2
Humedad máxima	% en peso	0,5
Sólidos en suspensión máx.	mg/kg	24
Contenido máximo en azufre	% en peso	0,2
Contenido máximo en cloro	mg/kg	10
PCBs		exento
Índice de yodo		105-115
Índice de saponificación mín.		190

Tabla 15. Características óptimas del aceite usado para producir biodiésel.^[39]

5.2.4. Poder contaminante

El aceite vegetal usado es un residuo no peligroso, catalogado en el Catálogo Europeo de Residuos (CER) con el código CER 20 01 52.

Los aceites vegetales usados constituyen en sí mismos un elemento contaminante si no son tratados adecuadamente. Éstos suelen acabar en las alcantarillas públicas suponiendo un problema importante en cuanto al tratamiento de los mismos en las estaciones depuradoras de aguas residuales. Los aceites usados han de tratarse adecuadamente en estas plantas para que no lleguen a las aguas de ríos y mares.

Estos aceites suelen producir películas líquidas y depósitos en las orillas de ríos, embalses y playas; en torno a un litro de aceite suele contaminar 100 litros de agua, ya que la película de aceite que cubre la superficie disminuye la disolución del oxígeno en el agua, afectando a los seres vivos del medio.

Las concentraciones de estos aceites y grasas en los efluentes de los restaurantes suelen ser en torno a 1-3 g/l, cuando deberían ser del orden de 0,03 g/l para no ocasionar problemas en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), tales como disminuir la eficacia de los procesos biológicos y entorpecer el funcionamiento de los sedimentadores, lo cual supone un aumento de los costes de tratamiento en torno al 25%.

Todo esto implica que las EDAR dispongan de una cámara de eliminación de aceites o desengrasadores; pero, a pesar de los procesos llevados a cabo, no siempre se pueden eliminar totalmente o son estaciones simples que no permiten recoger o eliminar adecuadamente el aceite o incluso no existe tratamiento de agua alguno en pueblos pequeños.

Por ello, cuantos menos aceites y grasas lleguen a la red de alcantarillado, mejor será la calidad de nuestras aguas.

5.2.5. Generación de aceites usados

En Europa se estima que cada persona produce 5 kg al año de aceites vegetales usados, lo que supone que aproximadamente 1.860.000 toneladas podrían recolectarse, basándonos en una población de 372.131.000 personas.

En el caso de España, el volumen de producción de aceites usados es en torno a las 750.000 toneladas/año, de las cuales actualmente sólo en torno a un 20% son objeto de recogida para su aprovechamiento.

Estos datos pueden extrapolarse a la Comunidad Autónoma de Andalucía, obteniéndose los siguientes datos estimados:

ZONA GEOGRÁFICA	Nº HABITANTES	CANTIDAD GENERADA (t)	CANTIDAD RECOLECTADA (t)
España	44.708.964	750.000	150.000
Andalucía	7.975.672	135.000	27.000

Tabla 16. Generación estimada de aceites usados en 2006.

5.2.6. Recogida y transporte de aceites usados

Las empresas de recogida de aceites vegetales usados retiran gratuitamente los aceites que han cumplido su ciclo de vida como producto y deben ser recuperados para evitar su acción contaminante. El proceso se divide en tres fases: recogida, almacenamiento y transporte. Los productores de aceites vegetales usados no reciben una compensación económica por dichos aceites, aunque sean utilizados posteriormente como materia prima para producción de biodiésel, sino que el tratamiento que se le da al producto es el de gestión de un residuo.

La recogida se hace en:

- Sector de la hostelería:

Se lleva a cabo en hospitales, empresas de catering, residencias de ancianos, bares, restaurantes, etc... La recogida de aceite vegetal usado propiamente dicha se lleva a cabo mediante la colocación de bidones, generalmente de una capacidad de 50 litros, en los establecimientos generadores del residuo. El aceite residual es vertido en dichos bidones por el generador del residuo y con una periodicidad variable en función de las necesidades del establecimiento. Cuando los bidones han alcanzado su máxima capacidad la empresa acude a recogerlos y a sustituirlos por nuevos bidones vacíos y limpios. Los bidones llenos son transportados en un vehículo hasta las instalaciones de la empresa donde se procede a su vaciado. Cada retirada de aceite se documenta mediante la entrega de un albarán numerado, entregándose igualmente a cada establecimiento un certificado acreditativo de que su residuo es retirado por un gestor autorizado.

- Recogida doméstica:

Cuando los residuos se producen en los hogares, el aceite debe ser depositado en los puntos limpios ubicados por los ayuntamientos para facilitar la gestión de ciertos residuos al ciudadano. A partir de aquí, el ayuntamiento será el que encargue la gestión del residuo a un gestor autorizado.

Los aceites recogidos, ya procedan de usos hosteleros o domésticos, se transportarán en los bidones dentro de los camiones al centro de transferencia, como ya se indicó anteriormente, y el aceite finalmente será trasladado en cisternas de capacidad media hasta la planta proyectada, descargándolo en el tanque de recepción correspondiente mediante una bomba de descarga.

5.3. METANOL

El metanol es un hidrocarburo compuesto de carbono, hidrógeno y oxígeno. Su fórmula química es CH₃OH. Se trata de un alcohol, incoloro, y polar. Es miscible con agua, otros alcoholes, ésteres y la mayoría de disolventes orgánicos, pero sólo ligeramente soluble en grasas y aceites. Además de tóxico, es inflamable y altamente volátil, pudiendo su vapor formar mezclas explosivas con el aire. Esto lo clasifica como líquido inflamable de categoría B (productos cuyo punto de inflamación es inferior a 55 °C), debiendo tener en cuenta los aspectos de la normativa en cuanto a equipamiento a utilizar, operación del mismo y seguridad. La ficha de seguridad se incluye en el anexo 5. Destacan sus siguientes características físicas:

PROPIEDAD	VALOR
Estado de agregación	Líquido
Masa molecular	32,04 g/mol
Punto de inflamación	12 °C
Punto de ebullición	64,5 °C
Densidad	792 kg/m ³
Viscosidad (20 °C)	0,0006 Pa·s

Tabla 17. Propiedades del metanol.

Los alcoholes etanol anhidro, isopropanol o butanol pueden sustituir al metanol, pero la reacción se dará más lentamente y los rendimientos pueden ser más bajos, dando como resultado controles de calidad más rigurosos y procesos adicionales. Por otra parte, es más económico que el resto, siendo un 55% más barato que el etanol.

El metanol será recibido por camiones cisterna y se guardarán las medidas de seguridad pertinentes para las labores de descarga.

5.4. ÁCIDO SULFÚRICO

En la instalación que se proyecta, el ácido sulfúrico es utilizado como catalizador en la reacción de esterificación de los AGL del aceite.

Es el compuesto químico que más se produce en el mundo; sus propiedades principales, así como sus riesgos y las medidas de seguridad que hay que considerar para su utilización aparecen en su ficha de seguridad que se adjunta en el anexo 5. Es posible destacar las siguientes propiedades:

PROPIEDAD	VALOR
Estado de agregación	Líquido
Masa molecular	98,1 g/mol
Punto de fusión	10 °C
Punto de ebullición	340 °C
Densidad	1.800 kg/m ³

Tabla 18. Propiedades del ácido sulfúrico.

El ácido sulfúrico es un ácido fuerte, es decir, en disolución acuosa se disocia fácilmente en iones hidrógeno e iones sulfato. Sus disoluciones diluidas muestran todas las características de los ácidos: tienen sabor amargo, conducen la electricidad, neutralizan los álcalis y corroen los metales activos desprendiéndose gas hidrógeno.

Generalmente se obtiene a partir de dióxido de azufre, por oxidación con óxidos de nitrógeno en disolución acuosa. Normalmente después se llevan a cabo procesos para conseguir una mayor concentración del ácido.

6. PROCESO DE PRETRATAMIENTO DE ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS LIBRES

6.1. PROCESO GENERAL DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

A continuación se hará una descripción general del proceso llevado a cabo en la planta productora de biodiésel, para entrar a describir en detalle posteriormente el proceso de pretratamiento de aceites.

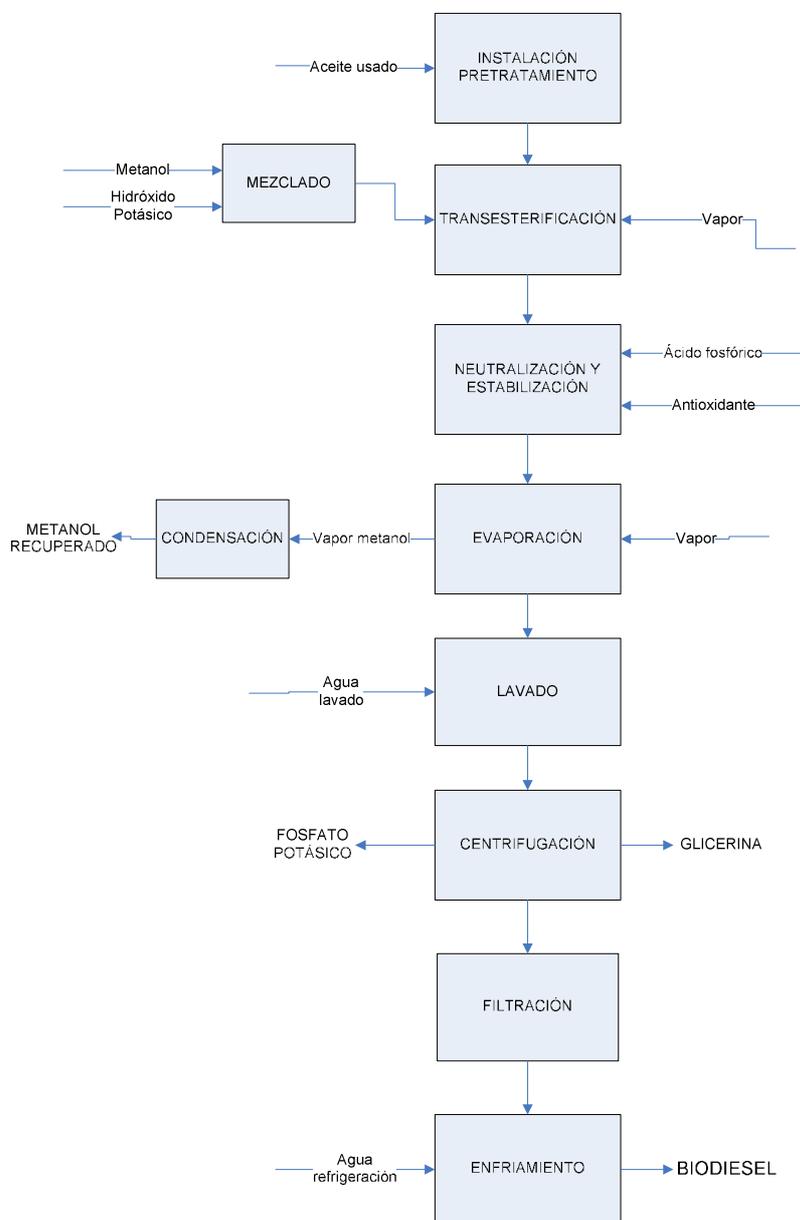


Figura 9. Diagrama de bloques del proceso productivo.

Como puede observarse en el diagrama de bloques del proceso productivo, éste comienza con el pretratamiento de los aceites, apartado que se tratará más adelante.

La planta tendrá una capacidad de producción de 750 kg/h de biodiésel, lo que supone una producción anual de unas 4.500 toneladas; está diseñada para operar las 24 horas del día durante 21 días mensuales (252 días anuales).

Se irán detallando cada una de las etapas señaladas, resaltando cuál es el objetivo principal de cada una de ellas.

a) Reacción principal: transesterificación

Es la etapa central y determinante del proceso, en la que tiene lugar la transesterificación de los glicéridos del aceite utilizando hidróxido potásico como catalizador (catálisis básica), obteniéndose ésteres metílicos y glicerol como productos de la reacción.

b) Neutralización y estabilización

La neutralización se lleva a cabo incorporando ácido fosfórico hasta lograr que toda la masa de reacción tenga un pH neutro igual a 7 unidades.

Además, los ésteres metílicos producidos son muy inestables ante la oxidación, de manera que se procede a su estabilización mediante la adición de un antioxidante específico.

c) Separación de metanol

Se lleva a cabo la evaporación del exceso de metanol sobrante y dichos vapores se condensan y se envían al correspondiente tanque de almacenamiento para ser utilizado en futuras reacciones.

d) Lavado

Esta etapa consiste en una extracción líquido-líquido, en la cual mediante un solvente, en este caso agua de lavado, se va a conseguir separar la fase de ésteres metílicos, de la fase glicerina y algunos de los compuestos que constituyen las impurezas de la mezcla (restos de metanol, trazas de KOH no neutralizado, impurezas no esterificadas y el fosfato potásico formado...).

e) Centrifugación

Mediante esta centrifugación se producen tres corrientes:

- Una corriente que corresponde al biodiésel producido y que será acondicionada antes de su almacenamiento.
- Una corriente de glicerina cruda, con una pureza aproximadamente del 70%, que será enviada al tanque correspondiente.
- El fosfato potásico generado quedará acumulado en el bowl de la centrífuga y será expulsado en descargas programadas para su posterior trasladado a un depósito de recogida.

f) Filtración

El biodiésel pasa antes de ser almacenado por un microfiltro para que las posibles impurezas y partículas que pueda contener de forma casual sean retenidas; el contenido de sólidos es muy bajo en la corriente de

producto, ya que proviene de una operación previa de centrifugación, pero de este modo se garantiza una corriente de biodiésel totalmente clarificada.

g) Enfriamiento

El biodiésel circulará a través de un intercambiador de calor donde se reducirá su temperatura hasta los 30 °C, cumpliendo así con los requisitos de seguridad exigidos para su correcto almacenamiento.

A continuación se muestra un diagrama de flujo de proceso, en el que pueden diferenciarse las etapas detalladas anteriormente.

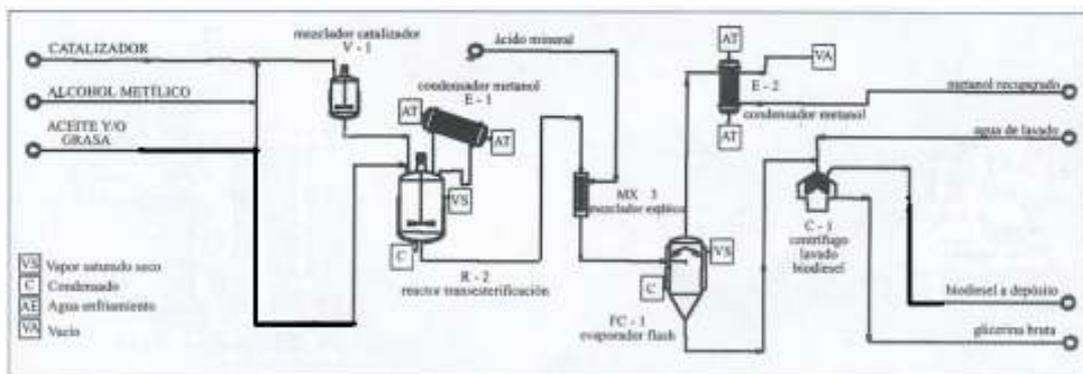


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de obtención de biodiésel.^[40]

6.2. PROCESO DE PRETRATAMIENTO DE ACEITES

En la figura 11 se representa el diagrama de bloques del proceso de pretratamiento de aceites llevado a cabo en la planta; en la figura 12 se muestra un esquema de la instalación con balance de materia por lote procesado.

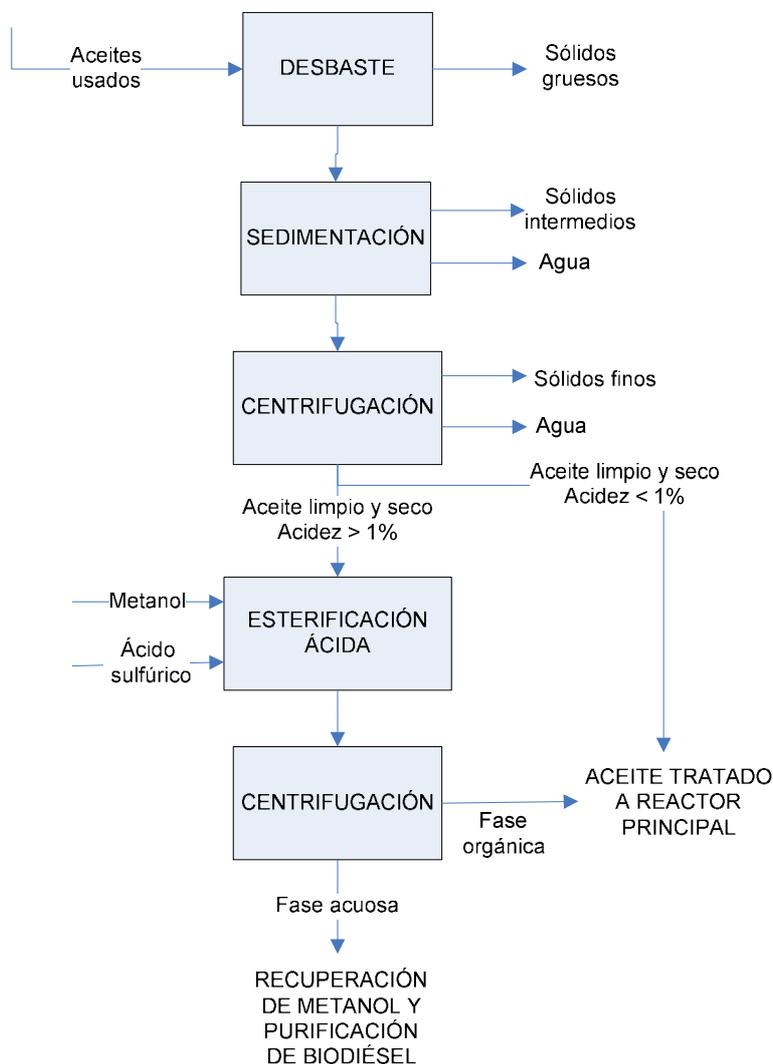


Figura 11. Diagrama de bloques del proceso de pretratamiento.

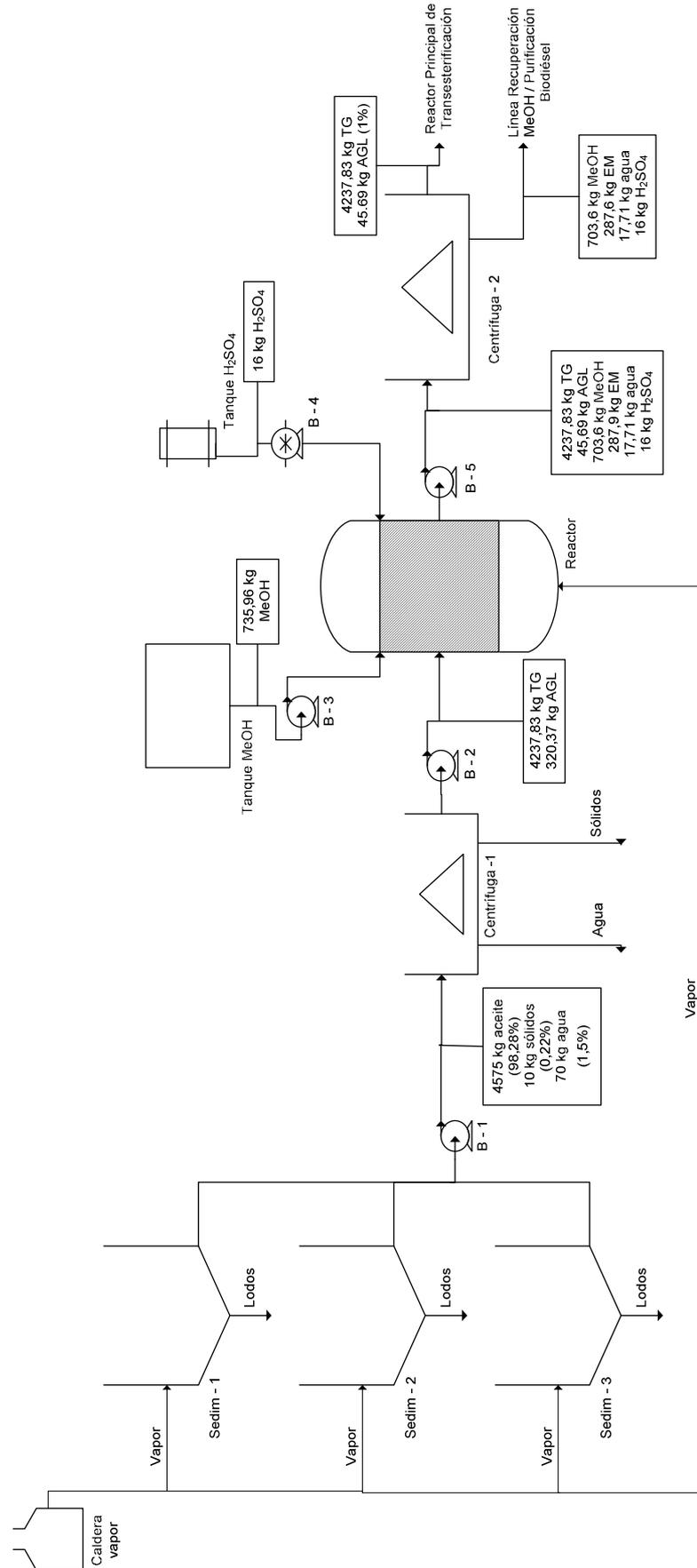


Figura 12. Esquema de la instalación con balance de materia.

6.3. RECEPCIÓN DE ACEITES

El primer paso en la recepción de aceites es el pesaje de los camiones cisterna que llegan a la instalación y posteriormente se procede a la descarga del camión. Los aceites recepcionados quedarán de este modo temporalmente almacenados en los correspondientes tanques.

6.3.1. Calidad de los aceites

Como regla general, cuanto más cercano sea el contenido de la materia prima a los triglicéridos puros, más fácil será convertirla en biodiésel y más alto será su coste. Cuanto más bajo sea el coste de la materia prima habrá más dificultades y será más caro producir biodiésel.

El aceite recepcionado en la instalación para producir biodiésel contendrá posibles contaminantes como agua, AGL, partículas y fosfolípidos. Estos contaminantes pueden deteriorar la calidad del biodiésel producido. Dentro de los distintos parámetros que se comentan a continuación, los que se consideran como importantes a la hora de fabricar biodiésel son el índice de acidez y el agua.

a) Agua:

Es importante mantener el agua fuera del proceso de producción de biodiésel. Un contenido del 1% de agua puede causar importantes problemas, incrementando la producción de jabón y afectando al rendimiento de la reacción. El agua puede ser eliminada por varias técnicas; una opción es calentar con el fin de romper cualquier emulsión entre el agua y el aceite y dejar que el agua sedimente en el fondo del tanque, pudiendo de este modo retirarla; las centrífugas también pueden ser usadas para separar agua y aceite. Ambos procedimientos se llevarán a cabo en la instalación diseñada con el fin de retirar el agua del aceite recepcionado.

b) Sólidos:

Los aceites usados para producir biodiésel deben siempre pasar por una unidad que asegure la retirada de las partículas sólidas que pueda contener el aceite. Esto es especialmente importante en el caso de aceites de fritura usados, ya que es más común que contengan dichos sólidos.

c) Ácidos grasos libres:

Los AGL pueden obstaculizar el proceso de producción de biodiésel mediante la desactivación del catalizador, produciendo jabón, y mediante la liberación de agua cuando son convertidos en ésteres. Los resultados publicados^[31] concluyen que cuando el contenido de AGL de la materia prima inicial está por debajo del 1%, el biodiésel producido usando el proceso de catálisis básica cumple con las especificaciones de la norma EN 14214; en este caso la presencia del catalizador básico provoca la conversión de los AGL en jabón, el cual es eliminado durante el proceso de lavado. Pero si el contenido en AGL supera el 1%, los problemas se incrementan, ya que la excesiva cantidad de jabón producido puede inhibir la posterior purificación de biodiésel; es en estos casos en los que la instalación que se diseña disminuirá el índice de acidez.

d) Fósforo:

El aceite crudo de girasol contiene alrededor de 600-900 ppm de fósforo en forma de fosfolípidos o gomas. Esta materia debe ser retirada porque la norma EN 14214 para el biodiésel limita el contenido de fósforo a 10 ppm. Afortunadamente, los procesos de producción de biodiésel usuales eliminan el fósforo, siendo transferido a la fase de glicerina o eliminado por lavado con agua.

e) Índice de yodo:

El índice de yodo es un indicador comúnmente usado del nivel de saturación de un aceite; dicho nivel no parece tener mucho impacto en el proceso de transesterificación, pero afecta a las propiedades del biodiésel. Las grasas saturadas producen un biodiésel con una estabilidad oxidativa superior, un número de cetano más alto, pero peores propiedades a baja temperatura. El biodiésel procedente de grasas saturadas es más propicio a gelificar a temperatura ambiente que el procedente de aceites vegetales.

6.4. ALMACENAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS

6.4.1. Tipos de recipientes de almacenamiento

Debido a que el régimen de fabricación va a ser en discontinuo los ciclos deberán durar un tiempo uniforme. Para no perder demasiado tiempo entre ciclo y ciclo se necesitará una unidad de almacenamiento previo para almacenar las materias primas hasta su posterior uso. Estas unidades van a permitir no romper la continuidad de la producción, almacenando materias primas para la realización de varios ciclos.

También habrá que considerar que al introducir unidades en planta el diseño de ésta se complica y el costo resulta mayor (coste asociado a la materia prima almacenada y al de la propia instalación) aunque los beneficios superan con creces a los costes.

De forma genérica, un recipiente a presión está constituido por una envolvente, normalmente metálica, capaz de contener un fluido, líquido o gaseoso, cuyas condiciones de temperatura y presión son distintas a las del medio ambiente. Los diferentes tipos de recipientes que se pueden encontrar en una planta industrial, se clasifican de la siguiente manera:

- Por su uso:

- Recipientes de almacenamiento: tienen la finalidad de almacenar sustancias que se dirigen o convergen de algún proceso y de acuerdo con sus servicios son conocidos como tanques de almacenamiento, tanques de día, tanques acumuladores, etc.
- Recipientes de procesos: pueden ser reactores (existen transformaciones químicas); torres (existen transformaciones físicas); recipientes (pueden producirse transformaciones físicas o simplemente acumulan fluido).

- Por su forma:

- Cilíndricos: son horizontales o verticales y pueden tener, en algunos casos, chaquetas para incrementar o decrecer la temperatura de los fluidos según sea el caso.

- Esféricos: se utilizan generalmente como tanques de almacenamiento y se recomiendan para almacenar grandes volúmenes esféricos a altas presiones. Puesto que la forma esférica es la forma natural que toman los cuerpos al ser sometidos a presión interna, ésta sería la forma más económica para almacenar fluidos a presión, sin embargo la fabricación y, sobre todo, el montaje de éstos es mucho más caro en comparación con los recipientes cilíndricos.

Los tipos más comunes de recipientes se clasifican de una forma más general atendiendo a su configuración geométrica, resultando las siguientes modalidades:

a) Recipientes Abiertos.

Los recipientes abiertos son comúnmente utilizados como tanque igualador o de oscilación, como tinajas para dosificar operaciones donde los materiales pueden ser decantados. Se usan para el llenado de líquidos a presión atmosférica que no sean dañados por el agua, el clima o la contaminación atmosférica; la única ventaja que presenta esta unidad es la de su bajo coste y suele emplearse casi exclusivamente para el almacenamiento de agua para uso industrial.

b) Recipientes Cerrados.

Fluidos combustibles o tóxicos o gases finos deben ser almacenados en recipientes cerrados. Sustancias químicas peligrosas, tales como ácidos o

sosa cáustica son menos peligrosas si son almacenadas en recipientes cerrados.

b.1) Tanques cilíndricos verticales, fondo plano. Es el tanque cilíndrico con un techo y un fondo plano descansando directamente en una cimentación compuesta de arena, grava o piedra triturada. En los casos donde se desea usar una alimentación de gravedad, el tanque es levantado arriba del terreno y el fondo plano debe ser incorporado por columnas y vigas de acero.

b.2) Recipientes cilíndricos horizontales y verticales con cabezas formadas.

Son usados cuando la presión de vapor del líquido manejado puede determinar un diseño más resistente. Varios códigos han sido desarrollados, tales como el API y el ASME, para gobernar el diseño de estos recipientes. Una gran variedad de cabezas formadas son usadas para cerrar los extremos de los recipientes cilíndricos. Las cabezas formadas incluyen la semiesférica, elíptica, toriesférica, cónica y toricónica. Para propósitos especiales se usan tapas planas para cerrar un recipiente abierto, sin embargo las cabezas planas son de poco uso en recipientes grandes.

b.3) Recipientes esféricos (descritos anteriormente).

Otra clasificación a tener en cuenta es la que se hace en función del tipo de techo y se muestra a continuación:

- Techo flotante: El techo del depósito asciende o desciende conforme se llena o vacía; se caracteriza por:

a) Durante el llenado no deben ser evacuados los vapores por no existir espacio entre el líquido y el techo donde se hayan formado.

b) Reduce el riesgo de incendio por no existir aire en contacto con el líquido.

c) La falta de espacio entre el líquido y el techo impide la formación de mezclas explosivas.

- Techo fijo, caracterizado por:

a) Menor coste que los de techo flotante.

b) No deben soportar la carga de agua de lluvia.

c) No existe la posibilidad de inundación por agua de lluvia.

d) Las tolerancias de fabricación pueden ser mayores.

e) Más adecuado para pequeñas dimensiones.

- Techo abierto; tal y como se dijo anteriormente, se pueden usar en el caso de que el fluido no se vea dañado por las condiciones ambientales, ya que en caso contrario sería necesario algún tipo de techo.

Los compuestos químicos necesarios en el proceso son metanol y ácido sulfúrico, los cuales se van a almacenar en depósitos que van a permitir su incorporación al proceso. Los aceites se introducirán directamente a los tanques de sedimentación, donde comenzará su pretratamiento.

6.4.2. Almacenamiento de aceites no tratados

El aceite quedará almacenado temporalmente en los tanques de recepción de aceites, los cuales tendrán unas dimensiones apropiadas a la capacidad de la planta y trabajarán a presión atmosférica. Estos tanques son silos de sedimentación, que disponen de un fondo para retirada de purgas.

6.4.3. Almacenamiento de metanol

El metanol será almacenado en un tanque construido según las normas de almacenamiento de productos líquidos inflamables y con una capacidad adecuada a la producción de la planta.

6.4.4. Almacenamiento de ácido sulfúrico

El ácido utilizado será ácido sulfúrico comercial de una pureza del 95%, y será almacenado en un tanque de dimensiones adecuadas a los requerimientos del proceso, el cual estará construido en acero inoxidable para soportar la corrosión ocasionada por la presencia continua de ácido en su interior.

6.5. DESBASTE

El desbaste se lleva a cabo mediante rejas formadas por barras inclinadas, situadas en los tanques de sedimentación, que interceptan el flujo de aceite a su entrada en dichos tanques. Su misión es retener y separar los sólidos más voluminosos, a fin de evitar las obstrucciones en los equipos mecánicos de la planta y facilitar la eficacia de los tratamientos posteriores. Estos sólidos mayores que puedan acompañar al aceite quedarán retenidos en la zona baja de la reja, debido a la inclinación de la misma.

De acuerdo con el tipo de fluido que llega, y el contenido de materiales gruesos que se quieren retener fuera de las instalaciones, las rejas pueden ser de limpieza manual o automática. En este caso, como el proceso de descarga del tanque es discontinuo, se opta por la limpieza manual diaria de la reja, una vez finalizada la operación de descarga del tanque.

La operación de desbaste puede ser más o menos eficaz, según la separación entre los barrotes de la reja:

- desbaste fino, con una separación de los barrotes de 3 a 10 mm.
- desbaste medio, con una separación de 10 a 25 mm entre los barrotes.
- desbaste grueso, con una separación de 50 a 100 mm.

Se llevará a cabo el desbaste con una separación entre los barrotes de 10 mm.

6.6. SEDIMENTACIÓN

6.6.1. Introducción

La sedimentación permite la separación de un sólido presente en un fluido o de dos fluidos inmiscibles por medio de, tan sólo, la acción de la fuerza de la gravedad. La velocidad a la que se produce la sedimentación depende del tamaño de las partículas o de las gotas del fluido, la diferencia de densidades entre la partícula (o gota) y el fluido y la viscosidad de este último. La separación sólo tendrá lugar si las distintas fases difieren en cuanto a su densidad^[14].

Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada.

El equipo más corriente consiste en simples tanques de sedimentación, cuyas dimensiones han de ser adecuadas para permitir la separación de las dos fases. También es necesario controlar el flujo, que no ha de perturbar la sedimentación de la fase más densa.

En la planta diseñada estos tanques tienen la función de recibir el aceite y llevar a cabo la sedimentación; estos tanques de sedimentación almacenan el aceite, y en ellos se va a llevar a cabo la separación de los sólidos de tamaño intermedio, así como una parte del agua presente en el aceite. Esta operación se lleva a cabo en caliente mediante un sistema de serpentines que conducen vapor procedente de la caldera de la planta de producción de biodiésel.

6.6.2. Bases teóricas de la sedimentación

La sedimentación es la separación de una suspensión diluida por la acción de la gravedad con la obtención de un fluido transparente y otra suspensión con mayor proporción de sólidos.

La sedimentación de las partículas sólidas y las gotas de agua presentes en el aceite es una sedimentación libre, es decir, las partículas están a suficiente distancia de las paredes del recipiente y de otras partículas, de manera que no afecten su caída. Esta suposición puede hacerse cuando la relación del diámetro de la partícula con respecto al diámetro del recipiente no sobrepasa 1:200, o cuando la concentración de las partículas en solución no llega al 0.2% en volumen.

Cuando las partículas no son rígidas, puede presentarse una circulación interna dentro de ellas, así como deformaciones de las mismas; ambos efectos producen variaciones en el coeficiente de arrastre y en la velocidad terminal. Las gotas pequeñas en líquidos inmiscibles se comportan como esferas rígidas, hasta un número de Reynolds de aproximadamente 10. Tal y como se justifica en el anexo 1, nos encontramos en la región de flujo laminar, por tanto podremos considerar las gotas de agua presentes en el aceite como partículas esféricas rígidas.

Para que una partícula se mueva a través de un fluido se requiere una diferencia de densidades entre la partícula y el fluido, ya que si esto no ocurre, la fuerza de flotación sobre la partícula contrarrestará a la fuerza externa y la partícula no se moverá con respecto al fluido.

Para el movimiento de una partícula en un fluido existen tres fuerzas que actúan sobre los cuerpos: la gravedad que actúa hacia abajo, la fuerza de flotación que actúa hacia arriba y la resistencia o fuerza de rozamiento que actúa en dirección opuesta al movimiento de la partícula.

Si empezamos desde el momento en que el cuerpo deja de estar en reposo, su caída pasa por dos períodos: el de caída acelerada y el de caída a velocidad constante. El periodo inicial de aceleración suele ser bastante corto, del orden de una décima de segundo más o menos. Por consiguiente, el período de caída a velocidad constante es el más importante. A esta velocidad se le llama velocidad de precipitación libre o velocidad terminal, y se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$v_t = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho)m}{A \rho_p C_D \rho}}$$

Para el caso de partículas esféricas:

$$v_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho)gD_p}{3C_D \rho}}$$

siendo:

- V_t : velocidad terminal (m/s).
- ρ_p : densidad de partícula (kg/m^3).
- ρ : densidad del líquido (kg/m^3).
- g : aceleración de la gravedad (m/s^2).
- D_p : diámetro de partícula (m).
- C_D : coeficiente de rozamiento.

El coeficiente de rozamiento para esferas está en función del número de Reynolds de la partícula, obteniendo distintas expresiones de la velocidad terminal en función del régimen en el que nos encontremos:

- En la región del flujo laminar, llamada región de la ley de Stokes para $Re_p < 2$, el coeficiente de rozamiento es:

$$C_D = \frac{24}{Re_p}$$

Sustituyendo en la ecuación de la velocidad terminal para partículas esféricas:

$$v_t = \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu}$$

- En la región turbulenta o región de la ley de Newton, para $Re_p > 500$, el coeficiente de rozamiento es casi constante con valor de $C_D = 0.44$. La expresión resultante para la velocidad terminal queda de la siguiente manera:

$$v_t = 1,74 \sqrt{gD_p \frac{\rho_p - \rho}{\rho}}$$

- En la región de transición, cuando $2 < Re_p < 500$, el coeficiente C_D se define como:

$$C_D = \frac{18,5}{Re_p^{0,6}}$$

La expresión de la velocidad terminal es entonces:

$$v_t = \left[\frac{4}{55,5} g \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho} D_p^{1,6} \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^{0,6} \right]^{1,4}$$

Pero es posible que no se conozca el Re_p , entonces no es posible conocer en qué régimen de flujo nos encontramos; en estos casos se define el número de Galileo:

$$Ga = K^3 = \frac{D_p^3 g \rho (\rho_p - \rho)}{\mu^2}$$

- Si $K < 3,3$ nos encontramos en la región de flujo laminar.
- Si $43,5 < K < 2.364$ estamos en la región de flujo turbulenta.
- Si $3,3 < K < 43,5$ nos encontramos en la región de transición.

6.7. CENTRIFUGACIÓN

La centrifugación, al igual que la sedimentación, permite separar sólidos de líquidos o líquidos inmiscibles. La diferencia consiste en que en este caso la separación se lleva a cabo por la acción de fuerzas centrífugas que se generan durante la rotación del material. En la práctica, las fuerzas centrífugas son tan grandes que los efectos debidos a la fuerza de la gravedad, aunque presentes, se pueden despreciar^[14].

La intensidad de la fuerza centrífuga generada depende el radio y de la velocidad de rotación, así como de la masa de la partícula a separar. La velocidad de separación dependerá de la velocidad de rotación y de las mismas variables indicadas para la sedimentación.

Una centrífuga consiste, en esencia, en una cámara o recipiente cilíndrico que gira alrededor de su eje vertical. Al introducir una disolución con sólidos o una mezcla de dos líquidos inmiscibles, la fracción más ligera permanecerá cerca del eje de rotación, mientras que la más pesada se dirigirá a la periferia de la cámara por la acción de la fuerza centrífuga.

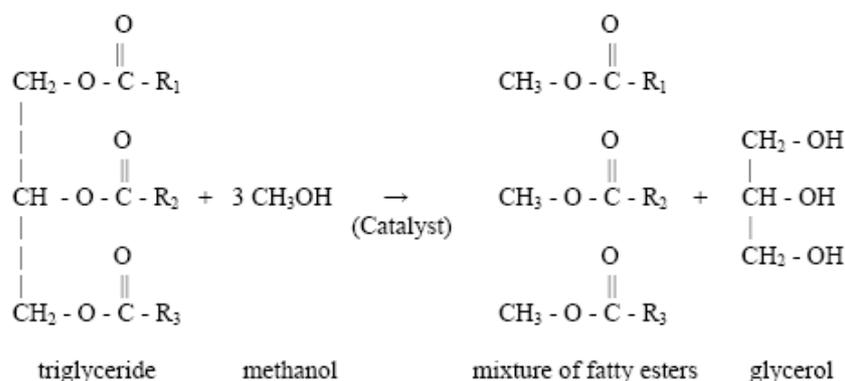
Es posible llevar a cabo la separación de líquidos inmiscibles y la clarificación en el mismo equipo. De hecho, esto es lo que se llevará a cabo en la centrífuga, ya que lo que nos interesa en esta etapa es la separación de las partículas finas por un lado y de la humedad restante por el otro, obteniendo así un aceite adecuado para llevar a cabo la etapa de esterificación ácida.

6.8. PRE-ESTERIFICACIÓN ÁCIDA

6.8.1. Introducción

El principal problema en el procesamiento de los aceites de fritura para producción de biodiésel radica en que éstos a menudo contienen cantidades de AGL que impiden que dichos aceites puedan ser convertidos en biodiésel usando un catalizador alcalino. Este problema se soluciona con esta etapa del proceso en la que se lleva a cabo una reacción de esterificación ácida.

La reacción de transesterificación básica, a través de la cual se obtiene el biodiésel, es la siguiente:



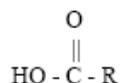
Fuente: [28]

donde R_1 , R_2 y R_3 son cadenas largas de átomos de carbono e hidrógeno.

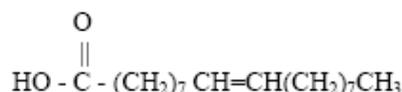
Existen dos componentes en el aceite recepcionado que inhiben esta reacción principal de transesterificación:

- Los AGL, que se eliminarán en esta etapa del proceso.
- El agua, que es eliminada en las etapas de sedimentación y centrifugación anteriores.

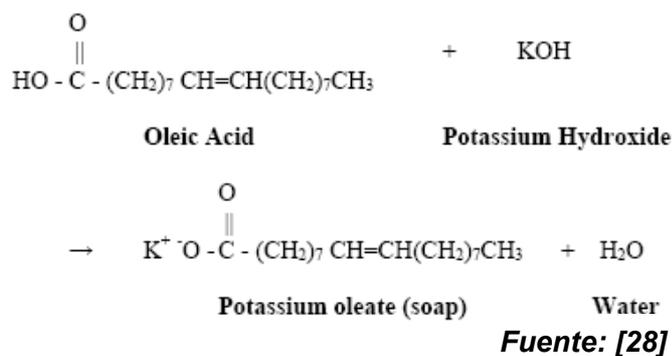
Los AGL o ácidos carboxílicos tienen la siguiente estructura:



Uno de los AGL que se encuentra en mayor proporción en el aceite es el ácido oleico:

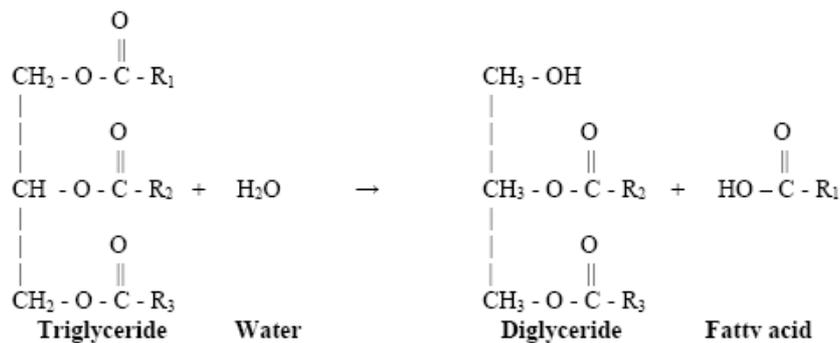


El catalizador básico usado normalmente para llevar a cabo la reacción de transesterificación reaccionará con este ácido para formar jabón. A continuación se muestra esta reacción cuando el catalizador es hidróxido potásico (KOH):



Esta reacción es indeseable, ya que lleva al catalizador a una forma que no contribuye a acelerar la reacción. Además, una cantidad de jabón excesiva en los productos puede inhibir el procesamiento posterior del biodiésel, incluyendo la separación de glicerina y el lavado con agua.

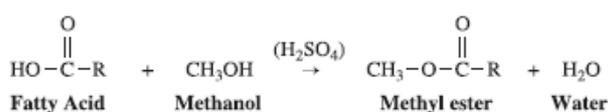
La presencia de agua en el aceite también es un problema. Cuando el agua está presente, particularmente a altas temperaturas, puede hidrolizar los triglicéridos a diglicéridos y formar AGL:



Fuente: [28]

En definitiva, cuando el agua está presente en la reacción se manifiesta a través de una producción excesiva de jabón. Los jabones de ácidos grasos saturados tienden a solidificar a temperatura ambiente, así que una mezcla de reacción con excesivo jabón podría gelificarse y formar una masa semi-sólida que es muy difícil de recuperar.

El procedimiento en esta etapa es el siguiente: se añade el metanol al aceite, al cual se le ha retirado previamente los sólidos y el agua, y se agita la mezcla en el reactor, formándose una emulsión, ya que el metanol es una sustancia polar y el aceite apolar. Posteriormente se añade el ácido sulfúrico. De esta manera se pueden transformar los AGL, generando biodiésel y agua.

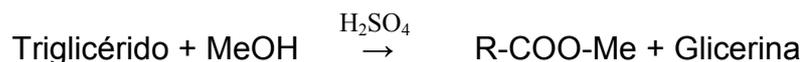


Fuente: [28]

Como se observa, los AGL se convierten directamente a ésteres al calentarlos con un alcohol en presencia de un ácido, generalmente ácido sulfúrico concentrado. Esta reacción es reversible y alcanza el equilibrio cuando aún quedan cantidades apreciables de reactivos. Esta reversibilidad es un inconveniente en la preparación directa de un éster a partir de un ácido; sin embargo, la esterificación directa tiene la ventaja de ser una síntesis de un solo paso. Ya que el alcohol que se usa para llevar a cabo la reacción (metanol) es barato y de fácil adquisición, se utiliza en exceso para

desplazar el equilibrio hacia la formación de los productos y aumentar así el rendimiento en éster. Además, este exceso de metanol será recuperado en la planta de producción y reutilizado posteriormente.

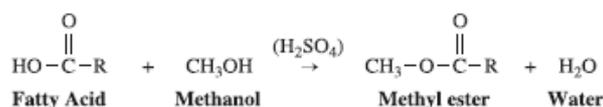
Por otra parte se transesterifica una pequeña proporción de triglicéridos:



pero la transesterificación catalizada por un ácido es muy lenta, por lo que en los balances se considerarán despreciables las cantidades de éster metílico y glicerina que pudieran producirse por esta reacción.

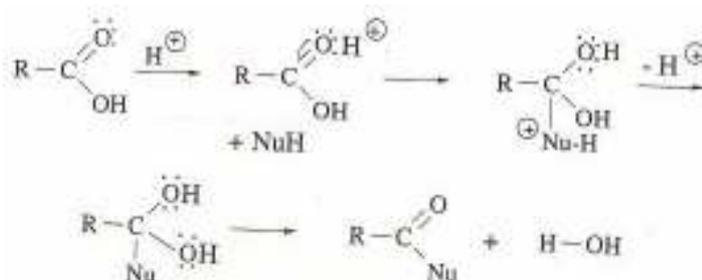
6.8.2. Mecanismo de reacción

La reacción de esterificación es la siguiente:



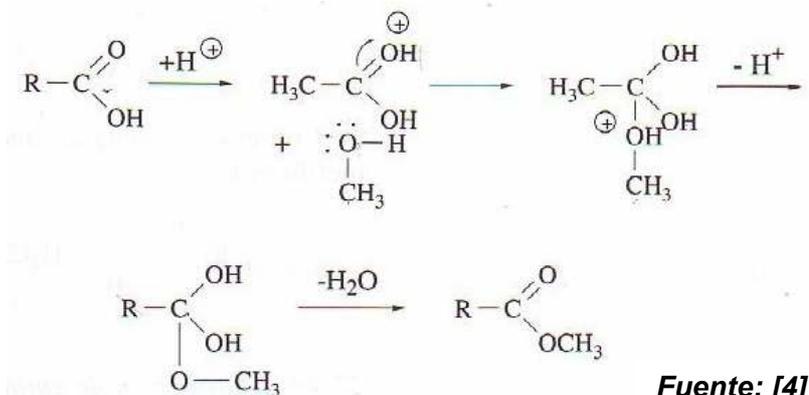
Fuente: [28]

se trata de una reacción de ataque nucleófilo del oxígeno de una molécula del alcohol al carbono del grupo carboxílico; el protón migra al grupo hidroxilo del ácido que luego es eliminado como agua. La función del catalizador es la de aumentar la actividad carbonílica (la carga parcial positiva sobre el átomo de carbono) por protonación de uno de los oxígenos del ácido:



Fuente: [4]

donde Nu es el nucleófilo atacante; en este caso, la reacción se lleva a cabo con metanol, por tanto el mecanismo será:



6.8.3. Elección del reactor

Un reactor químico es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas. Dicha unidad procesadora esta constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas^[10].

Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.
- Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

El reactor seleccionado para llevar a cabo esta reacción homogénea de esterificación es un reactor discontinuo de tanque agitado; el factor determinante para elegir esta opción es la puesta en contacto de los

reactivos, que debe ser íntima para que se lleve a cabo la reacción de forma satisfactoria, por lo que será necesaria una agitación vigorosa de la mezcla.

El reactor discontinuo de mezcla completa ideal está caracterizado por la uniformidad de composición, presión y temperatura a lo largo de todo el reactor en cada instante; el diseño del reactor tratará de que su flujo se aproxime lo más posible al del modelo ideal, por lo que los balances podrán efectuarse referidos a todo el volumen del reactor.

6.8.4. Ecuación de diseño del reactor

En el reactor discontinuo los reactantes se introducen en el reactor, se mezclan, se deja que reaccionen un tiempo determinado, y finalmente se descarga la mezcla resultante. Es ésta una operación no estacionaria en la que la composición va variando con el tiempo, aunque en cada instante es uniforme en todos los puntos del reactor.

Efectuemos un balance de materia referido al componente limitante, que en este caso son los ácidos grasos libres, que representaremos por AGL. Como en un reactor discontinuo la composición es uniforme en cada instante, podemos efectuar un balance macroscópico referido a todo el volumen del reactor. Teniendo en cuenta que durante la reacción no entra ni sale fluido del sistema, la ecuación, referida al reactivo limitante será:

$$\text{entrada} = \text{salida} + \text{desaparición} + \text{acumulación}$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{Velocidad de desaparición de AGL} \\ \text{debido a reacción química} \end{array} \right) = - \left(\begin{array}{l} \text{Velocidad de acumulación} \\ \text{de AGL en el reactor} \end{array} \right)$$

Evaluando los términos de la ecuación tenemos:

$$\left(\text{Desaparición de AGL por reacción, mol / tiempo} \right) = (-r_{\text{AGL}}) V = \left(\frac{\text{moles de AGL que reaccionan}}{(\text{tiempo}) (\text{volumen de fluido})} \right) \left(\text{Volumen de fluido} \right)$$

$$\left(\text{Acumulación de AGL, mol / tiempo} \right) = \frac{dN_{\text{AGL}}}{dt} = \frac{d[N_{\text{AGL}0} (1 - X_{\text{AGL}})]}{dt} = -N_{\text{AGL}0} \frac{dX_{\text{AGL}}}{dt}$$

Sustituyendo:

$$(-r_{\text{AGL}}) V = N_{\text{AGL}0} \frac{dX_{\text{AGL}}}{dt}$$

Efectuando operaciones e integrando, resulta:

$$t = N_{\text{AGL}0} \int_0^{X_{\text{AGL}}} \frac{dX_{\text{AGL}}}{(-r_{\text{AGL}}) V}$$

Ésta es la ecuación general de diseño que nos da el tiempo necesario para que se alcance una conversión X_{AGL} ; el volumen del fluido reaccionante y la velocidad de reacción quedan bajo el signo integral porque, en general, varían durante el transcurso de la reacción. El estudio gráfico de esta expresión sería el siguiente:

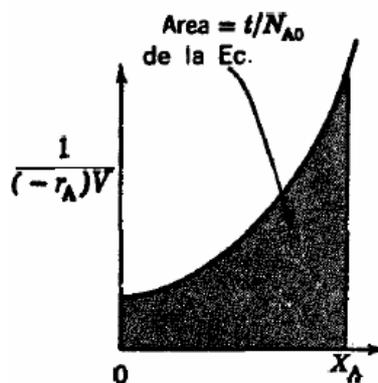


Figura 13. Representación gráfica de la ecuación general de diseño. [10]

Esta ecuación puede simplificarse en muchos casos; la reacción se lleva a cabo en fase líquida, por lo que puede considerarse que la densidad de la mezcla reaccionante permanece constante (es decir, el volumen es constante); en este caso la ecuación quedaría como se muestra a continuación:

$$t = C_{AGL0} \int_0^{X_{AGL}} \frac{dX_{AGL}}{-r_{AGL}} = - \int_{C_{AGL0}}^{C_{AGL}} \frac{dC_{AGL}}{-r_{AGL}}$$

La interpretación gráfica de esta ecuación sería la siguiente:

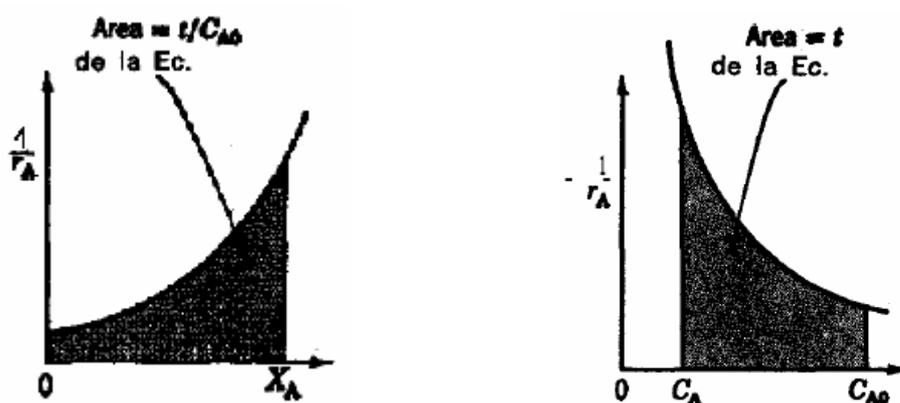


Figura 14. Representación gráfica de la ecuación de diseño para $V = cte$.^[10]

6.8.5. Condiciones de reacción

Las condiciones de reacción establecidas para llevar a cabo la esterificación utilizando como catalizador H_2SO_4 son:

- Relación molar de 20:1 entre metanol y AGL.
- 5% de H_2SO_4 con respecto al peso de AGL.
- Temperatura de reacción 60 °C.
- Presión de 1 atm.

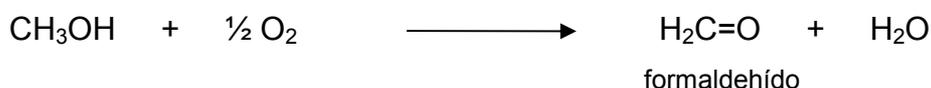
Estas condiciones de operación se justifican a través de diversos estudios publicados^{[27][28][30]}, siendo las que van a proporcionar un mayor rendimiento de la reacción.

Un aspecto importante a destacar en esta fase del proceso es el modo en el que los reactivos se introducen en el reactor. En principio habría dos posibilidades:

- Introducir en un mezclador el metanol y el ácido sulfúrico y posteriormente descargarlos al reactor previamente cargado de aceite.
- Añadir el metanol al aceite depositado ya en el reactor y posteriormente el ácido sulfúrico.

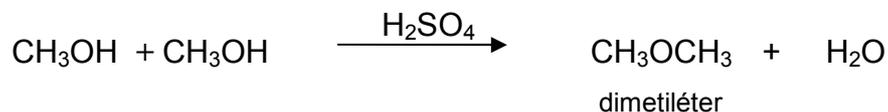
De estas dos opciones, se lleva a cabo la segunda por una razón evidente: al mezclar el metanol con el ácido sulfúrico puede producirse una reacción exotérmica en la que el metanol podría oxidarse hasta formaldehído y posteriormente a dimetiléter, un gas incoloro y muy explosivo. A continuación se explica este hecho más detalladamente.

En condiciones ligeras de oxidación es posible convertir los alcoholes en aldehídos y cetonas, de modo que la reacción que tendría lugar sería la siguiente:



El formaldehído tiene tendencia a polimerizarse, es decir, las moléculas individuales se unen entre sí para formar un compuesto de elevada masa molecular. En esta reacción se desprende mucho calor y a menudo es explosiva.

Por otro lado, mezclar alcoholes con ácido sulfúrico concentrado es también un procedimiento de deshidratación de alcoholes que da lugar a éteres alifáticos simétricos (dialcohol éteres):



Como se observa, por cada par de moléculas de alcohol se pierde una molécula de agua; la formación de éteres por deshidratación es un ejemplo de sustitución nucleofílica que tiene como sustrato al alcohol protonado y, como nucleófilo, una segunda molécula de alcohol.

La mayoría de los éteres alifáticos se convierten lentamente en peróxidos al contacto con el aire; estos peróxidos son muy peligrosos, puesto que son inestables y pueden producir explosiones violentas.

Por estas razones no se lleva a cabo la mezcla de metanol y ácido sulfúrico; ésta opción podría llevarse a cabo a escala de laboratorio sin excesivos problemas, ya que son volúmenes pequeños en condiciones muy controladas y en campanas extractoras. Sin embargo, al pasar a escala industrial se incrementa muchísimo la probabilidad de tener problemas y las dificultades de control de la reacción.

6.8.6. Sistema de agitación

Se denomina agitación al movimiento inducido de un material en una forma específica, dentro de algún tipo de contenedor.

En nuestro caso, el agitador cumple dos finalidades al mismo tiempo: que la mezcla de los líquidos presentes en el reactor sea lo más homogénea y óptima posible y provocar una adecuada transferencia de

calor entre el líquido y el serpentín, para lograr la uniformidad de temperatura en todo el reactor.

En la mayoría de las ocasiones se usa un diseño estandarizado, tal y como se muestra en la figura:

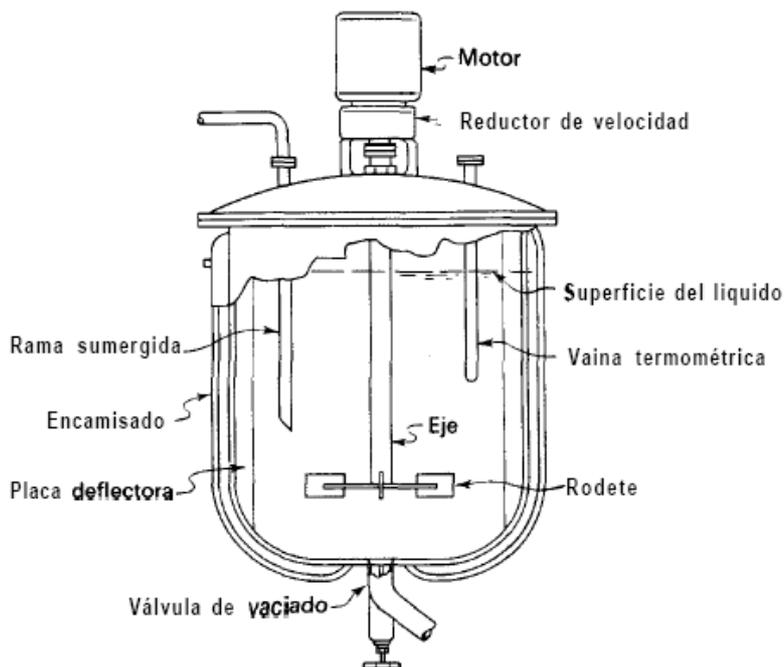


Figura 15. Tanque típico de proceso con agitación. ^[13]

El rodete va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje soportado en la parte superior. El eje está accionado por un motor, a veces directamente conectado al eje, pero más frecuentemente acoplado al eje a través de una caja reductora de velocidad.

Los agitadores se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del rodete (de flujo axial), y aquellos que generan corrientes en dirección tangencial o radial (de flujo radial).

Estos agitadores a su vez pueden ser de hélices, paletas o turbinas. Otros tipos de agitadores resultan útiles en situaciones especiales, pero los

tres tipos principales mencionados resuelven el 95% de todos los problemas de agitación de líquidos.

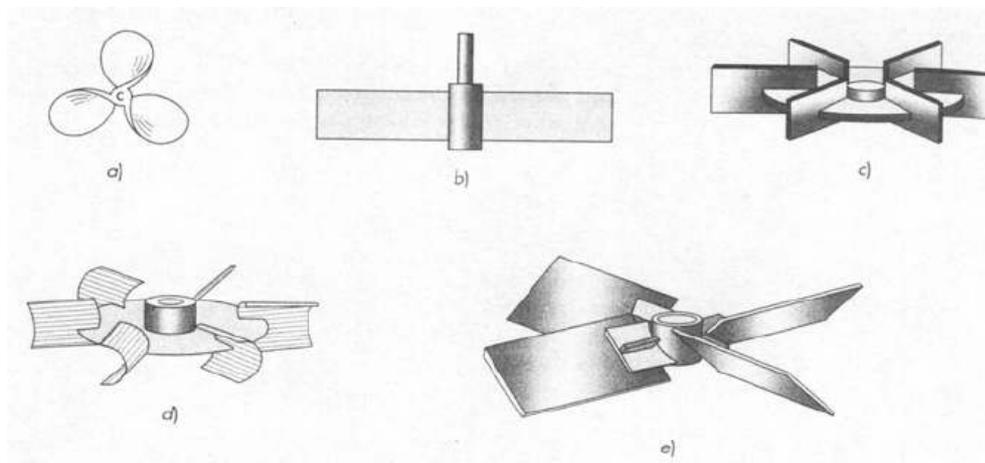


Figura 16. Rodetes de mezcla: (a) hélice marina de tres palas; (b) turbina abierta de palas rectas; (c) turbina de disco con palas; (d) turbina de pala cóncava; (e) turbina de pala inclinada. ^[13]

Se opta por un agitador de turbinas, ya que es el más utilizado industrialmente y es eficaz para un amplio intervalo de viscosidades, ajustándose adecuadamente a nuestro proceso; las palas serán curvas e inclinadas 45°, ya que nos permitirán una agitación más óptima, presentando un consumo de potencia considerablemente menor que una turbina con palas rectas.

Para el caso de un eje vertical, las componentes radial y tangencial están en un plano horizontal y la componente longitudinal es vertical. Las componentes radial y longitudinal son útiles por cuanto dan lugar al flujo necesario para que se produzca la mezcla. Cuando el eje es vertical y está dispuesto en el centro del tanque, la componente tangencial de velocidad es generalmente perjudicial para la mezcla. El flujo tangencial sigue una trayectoria circular alrededor del eje y crea un vórtice en la superficie del líquido que da lugar a una estratificación permanente en diferentes niveles de sustancias sin mezclar, sin que exista flujo longitudinal de un nivel a otro. En un tanque sin placas deflectoras, el flujo circulatorio (vórtices) es inducido por todos los tipos de rodete, tanto si el flujo es axial como radial.

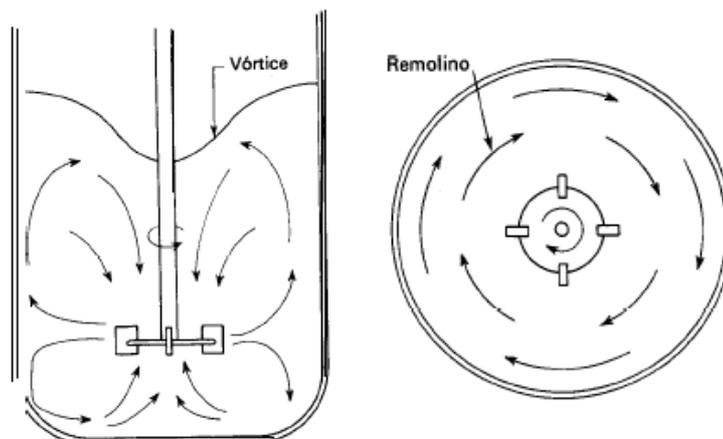


Figura 17. Formación de vórtice en un tanque agitado. ^[13]

En los tanques de gran tamaño con agitadores verticales, tal y como es nuestro caso, el método más conveniente de reducir los remolinos es instalar placas deflectoras, que impiden el flujo rotacional sin afectar al flujo radial y longitudinal. Un método sencillo y eficaz de destruir los remolinos, se consigue instalando placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. Excepto en tanques muy grandes, son suficientes cuatro placas deflectoras, para evitar los remolinos y la formación de vórtice. Para agitadores de turbina, la anchura de la placa defleitora no es preciso que sea mayor de la doceava parte del diámetro del tanque. Cuando se instalan placas deflectoras, aumenta el flujo vertical y se produce una mezcla más rápida del líquido.

6.9. CENTRIFUGACIÓN DE LA CORRIENTE DE SALIDA DEL REACTOR

Cuando finaliza el lote de reacción en el reactor, se obtiene una corriente con una determinada composición que, al someterla al proceso de centrifugación, se va a escindir en dos corrientes:

- Una fase orgánica, que esta compuesta por el aceite tratado con un índice de acidez adecuado para iniciar el proceso de transesterificación, por lo que será conducida al reactor principal.

- Una fase acuosa, compuesta fundamentalmente por éster metílico y metanol, y agua y ácido sulfúrico en menores proporciones. Esta fase será conducida a la línea de purificación de biodiésel, ya existente en la planta donde se ubicará la instalación de pretratamiento; en esta etapa tendrá lugar la evaporación y condensación del metanol, para su posterior reutilización, así como la purificación del biodiésel, de modo que éste sea totalmente apto para su uso. Esta etapa de recuperación de metanol y purificación del biodiésel no será objeto de diseño en el presente proyecto, ya que los equipos necesarios ya están presentes en la planta de producción de biodiésel, y evitamos así tener dos líneas de purificación de biodiésel en la planta (una línea para el biodiésel obtenido en la esterificación y otra para el obtenido en la transesterificación).

6.10. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

Los objetivos de la instrumentación y control de procesos son:

- Conocer los contenidos de materia y energía en cada corriente/equipo de la planta.
- Conseguir una optimización operativa de la planta.
- Aumentar la seguridad en la planta.
- Reducir la mano de obra.

La instrumentación de la instalación es el conjunto de aparatos destinados a medir variables del proceso tales como caudales, temperaturas, niveles de recipientes, etc^[21].

Los instrumentos que se van a instalar son:

- Instrumentos de medida de la temperatura:

- En los tanques de sedimentación.
- En el reactor.

- Instrumentos de medida del nivel:

- En el tanque de ácido sulfúrico.
- En el tanque de metanol.
- En los tanques de sedimentación.
- En el reactor.

- Instrumentos de medida de caudal:

- En la línea de alimentación de ácido sulfúrico al reactor.
- En la línea de alimentación de metanol al reactor.

El objetivo del control es mantener las variables del proceso en el punto de consigna deseado (“*set point*”), empleando controladores destinados a tal fin. Un sistema de control automático de cualquier proceso está constituido por cuatro tipos de elementos básicos:

- *Sensor o medidor*, que es el instrumento que mide la variable que se quiere controlar.
- *Transmisor o transductor*, que recibe la señal del medidor y la transforma en señal eléctrica, neumática o digital que pueda ser procesada por el controlador para calcular la acción de control.
- *Controlador*, aparato que calcula la acción de control de acuerdo con el algoritmo de control que se haya programado en él. Ese cálculo se traduce en un valor determinado de la señal de salida que se envía al elemento final de control.
- *Actuador o elemento final de control*, elemento que manipula la variable de proceso de acuerdo con la acción calculada por el controlador.

En la instalación objeto del presente proyecto resulta esencial controlar una serie de variables:

- Nivel de los tanques de sedimentación: durante el proceso de llenado de aceite de los tanques se controlará el nivel del mismo en el interior de los tanques, de tal manera que cuando se alcance el nivel deseado el controlador ordene la parada de la corriente de entrada.
- Temperatura del aceite en los tanques de sedimentación: se requiere una determinada temperatura para que el proceso de sedimentación se vea favorecido; para alcanzar dicha temperatura se emplea vapor de calefacción procedente de la caldera de la planta, que circulará a través de un serpentín instalado en dichos tanques. Para el mantenimiento de esta temperatura en su punto de consigna, será necesario instalar un lazo de control, de tal manera que la válvula de

entrada de vapor se abra o se cierre en función de la temperatura del aceite, para permitir la entrada de más o menos vapor.

- Nivel del tanque de ácido sulfúrico: un lazo de control permite, a través de una célula de carga instalada en la base del tanque, conocer el momento en el que el nivel baja de un determinado valor, accionando una señal luminosa indicadora de bajo nivel; esto nos permitirá saber el momento en el que es necesario cambiar el bidón de ácido sulfúrico por otro nuevo.

- Flujo de ácido que entra al reactor: se controlará el caudal de ácido que entra en el reactor, de tal manera que cuando se haya introducido todo el volumen requerido dicho control haga que la válvula se cierre.

- Nivel del tanque de metanol: un sensor de nivel envía una señal al controlador cuando el depósito alcanza un nivel determinado, de manera que el controlador ordena la parada de la corriente de entrada. Mediante señal luminosa se conocerá el momento en el que se alcanza el nivel mínimo de consigna.

- Flujo de metanol que entra al reactor: se controlará el caudal de metanol que entra en el reactor, de tal manera que cuando se haya introducido todo el volumen requerido dicho control haga que la válvula se cierre.

- Carga de aceite en el reactor: las células de carga instaladas en los perfiles de apoyo del reactor indican el momento en el que se produce el llenado de aceite del reactor, al alcanzar un peso especificado; en este momento la válvula de la línea de entrada de aceite se cierra por completo.

- Temperatura en el reactor: el reactor trabaja a 60 °C, de manera que para llegar a esa temperatura se emplea vapor de caldera que circulará a través del serpentín. La temperatura es una variable muy importante en este equipo, por ello, para mantenerla en su punto de consigna durante la reacción, se necesitará instalar un lazo de control de tal manera que la válvula de entrada al serpentín se abra o se cierre en función de la temperatura del reactor, para permitir la entrada de más o menos vapor.

En los procesos químicos el elemento final de control más utilizado es la válvula de control; existen numerosos tipos de válvulas para cubrir todas las aplicaciones que pueden presentarse en cualquier planta química.

Una válvula de control tiene básicamente dos componentes: el cuerpo y el actuador^[21].

- En el cuerpo están los elementos que realmente regulan el paso del fluido; es un receptáculo con elementos internos que, al estar en contacto con el fluido, debe satisfacer los requerimientos de resistencia mecánica a la presión, resistencia a la temperatura y a la corrosión, propios de cualquier vasija o recipiente a presión de un proceso. La forma geométrica y constructiva del cuerpo es la que determina realmente el tipo de válvula. Los materiales constructivos del cuerpo de la válvula suelen ser de fundición de hierro, acero al carbono o acero inoxidable en la mayoría de los casos.
- El otro componente básico de una válvula de control es el actuador, cuya misión es producir la fuerza necesaria para mover algunos elementos internos del cuerpo y provocar así un cambio en la abertura de la válvula. Suele ser de acero inoxidable, al ser un material suficientemente resistivo para la mayoría de las aplicaciones.

Las válvulas de bola y las válvulas de retención son los tipos de válvula que se han seleccionado para su uso en la instalación.

- Las válvulas de bola se han seleccionado debido a los pequeños diámetros nominales de las conducciones y debido a que el servicio que se requiere es de apertura o cierre total de la corriente de fluido; estas válvulas no son comunes para tamaños mayores de 6". Sus principales ventajas son su bajo coste y que no necesitan un excesivo mantenimiento. En la mayoría de los casos estas válvulas van a actuar abriendo o cerrando completamente el paso de fluido, y en muy pocas ocasiones regularan el caudal abriendo o cerrando parcialmente (no son adecuadas para este fin).
- Las válvulas de retención se instalan para evitar la inversión del flujo en las líneas conectadas a bombas centrífugas, impidiendo que el fluido pueda regresar hacia las mismas. Estas válvulas son de funcionamiento automático y se mantienen abiertas por la presión del fluido que circula; el cierre se logra mediante el peso del mecanismo de retención o por la contrapresión cuando se invierte el flujo.

Los cuerpos de las válvulas serán de acero inoxidable A-351-CF8 y las partes internas serán de acero inoxidable 316, material más utilizado por su aceptable resistencia a la corrosión y a la erosión, y su fácil mecanizado.

En la siguiente tabla se resumen los lazos de control que se van a establecer en el proceso:

EQUIPO	VARIABLE A CONTROLAR	SET POINT	ELEMENTO FINAL DE CONTROL
Tanques de sedimentación	Nivel superior	80% de su capacidad	Válvula entrada aceite
Tanques de sedimentación	Temperatura	45 °C	Válvula entrada vapor a tanques de sedimentación
Tanque de ácido sulfúrico	Nivel inferior	10% de su capacidad	Alarma luminosa
Tubería de ácido sulfúrico al reactor	Caudal	$1,481 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	Válvula entrada ácido sulfúrico al reactor.
Tanque de metanol	Nivel superior	80% de su capacidad	Válvula de llenado del tanque
Tanque de metanol	Nivel inferior	20% de su capacidad	Alarma luminosa
Tubería de metanol al reactor	Caudal	$1,549 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Válvula entrada metanol al reactor
Reactor	Nivel de aceite cargado	Masa de aceite requerida para la reacción: 4.558,2 kg	Válvula entrada aceite al reactor
Reactor	Temperatura	60 °C	Válvula entrada vapor al reactor

Tabla 19. Resumen de lazos de control en la instalación.

A continuación se muestran, sobre un diagrama, los lazos de control establecidos en la instalación de pretratamiento de aceites:

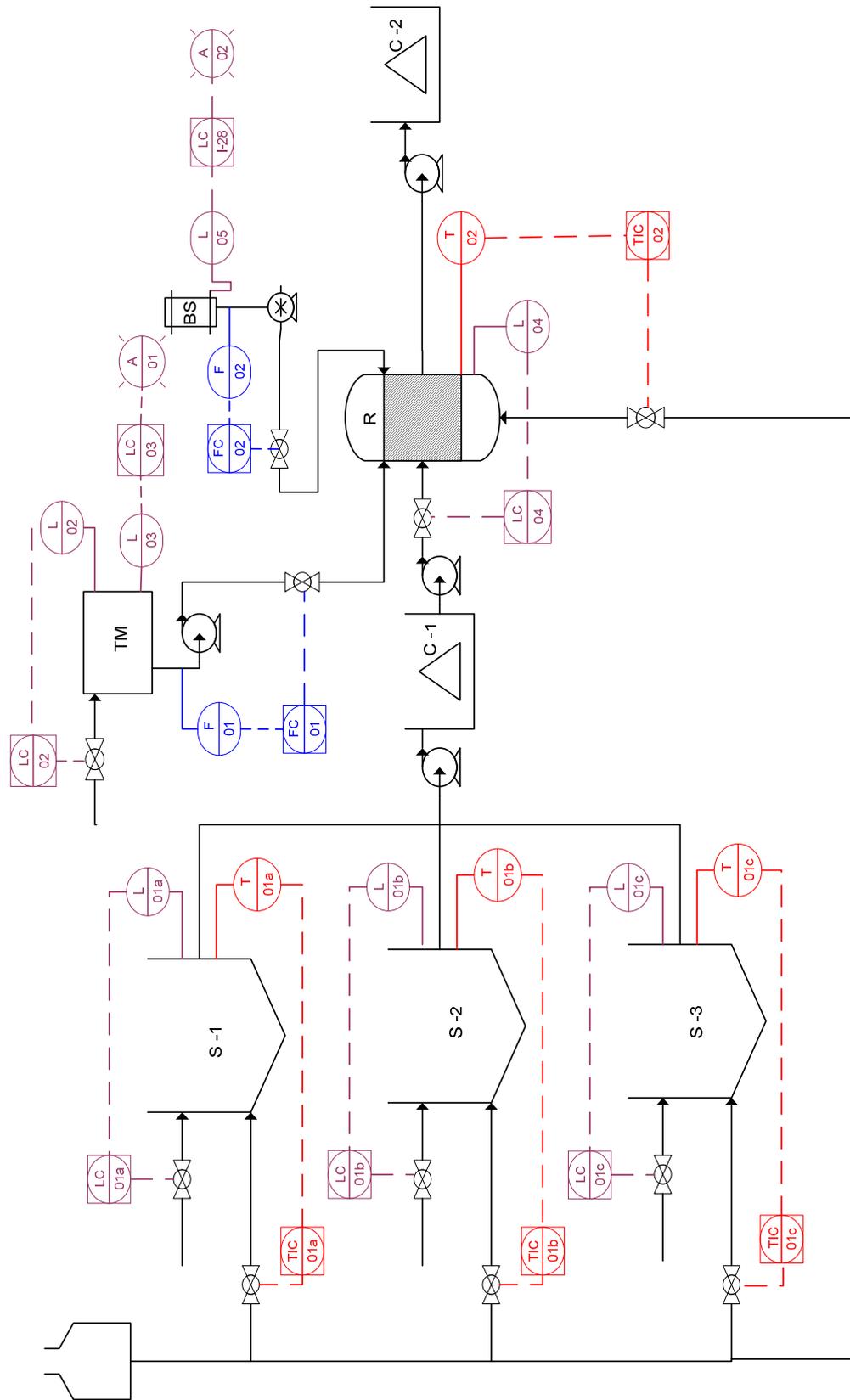


Figura 18. Lazos de control en la instalación.

7. CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS DE PROCESO

7.1. TANQUES DE ALMACENAMIENTO

TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE METANOL	
Descripción	Tanque cilíndrico, vertical, cerrado, de techo fijo semielíptico y fondo plano. Diseño en anexo 1.
Unidades	1
Diámetro interior(m)	2,34
Altura (m)	4,67
Capacidad (m³)	20
Espesor carcasa (mm)	7
Espesor fondos (mm)	7
Material	SA-285-C

Tabla 20. Características del tanque de almacenamiento de metanol.

TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ÁCIDO SULFÚRICO	
Descripción	Bidón retornable cilíndrico, vertical, cerrado. Adquisición por compra a la empresa Panreac
Unidades	1
Diámetro (m)	0,59
Altura (m)	0,94
Capacidad (m³)	0,2
Peso (kg)	30
Material	Acero inoxidable

Tabla 21. Características del tanque de almacenamiento de H₂SO₄.

7.2. TANQUES DE SEDIMENTACIÓN

Descripción	Tanques cilíndricos, verticales, abiertos, con fondo cónico para purgas, soportados por perfiles IPN, con serpentín de espiral simple. Diseño en anexo 1.
Unidades	3
Diámetro interior (m)	2,53
Altura (m)	5,81
Capacidad (m³)	25,57
Espesor carcasa (mm)	7
Espesor fondos (mm)	10
Material	SA-285-C

Tabla 22. Características de los tanques de sedimentación.

7.3. REACTOR

Descripción	Reactor de tanque agitado con fondo y tapa semielípticos, soportado por perfiles IPN, con serpentín de espiral plano. Diseño en anexo 1.
Unidades	1
Diámetro interior (m)	2
Altura (m)	3
Capacidad (m³)	8,36
Espesor carcasa (mm)	3
Espesor fondos (mm)	3
Material	SS-316
Potencia agitación (kW)	6

Tabla 23. Características del reactor.

7.4. CENTRÍFUGAS

Para la selección de las centrífugas se ha tenido en cuenta principalmente el caudal a tratar, las sustancias implicadas en el proceso, que nos van a determinar el tipo de material de construcción y, en el caso de la centrífuga para la limpieza de aceite, el tanto por ciento de sólidos que contiene la corriente.

Para la limpieza de aceite se ha seleccionado una centrífuga de discos, de la marca Westfalia, modelo RSC 25-51-506. La serie de centrífugas RSC es apropiada para la industria del aceite, y posee dos salidas para las fases líquidas y una salida para los sólidos; la descarga de sólidos, que se llevará a cabo periódicamente, se programará previamente.

Para la separación de la mezcla de reacción se ha seleccionado una centrífuga de la misma marca, modelo RSE 200-01-576, con dos salidas para las distintas fases líquidas. Esta serie de centrífugas han sido especialmente diseñadas para su instalación en procesos de producción de biodiésel. Los principales beneficios que aportan estos equipos son un modo de operación silencioso y un bajo coste de operación, servicio y mantenimiento.

Las centrífugas poseen motor antideflagrante; todas las partes de las centrífugas en contacto con la corriente a tratar son de acero inoxidable.

CENTRÍFUGA PARA LIMPIEZA ACEITE	
Descripción	Centrífuga continua de discos Westfalia tipo RSC 25-51-506. Adquisición directa por compra.
Unidades	1
Caudal máximo (l/h)	2.500
Altura (m)	1,4
Longitud (m)	1,8
Ancho (m)	1
Volumen tambor (l)	8
Volumen recinto sólidos (l)	4
Velocidad (r.p.m.)	7.500
Potencia motor (kW)	11



Tabla 24. Características de la centrífuga para limpieza de aceite.

CENTRÍFUGA PARA SEPARACIÓN DE MEZCLA DE REACCIÓN	
Descripción	Centrífuga continua de discos Westfalia tipo RSE 200-01-576. Adquisición directa por compra.
Unidades	1
Caudal máximo (l/h)	40.000
Contenido en sólidos (%)	< 5
Rango de capacidad (ton/día)	400-800
Velocidad (r.p.m.)	4.800

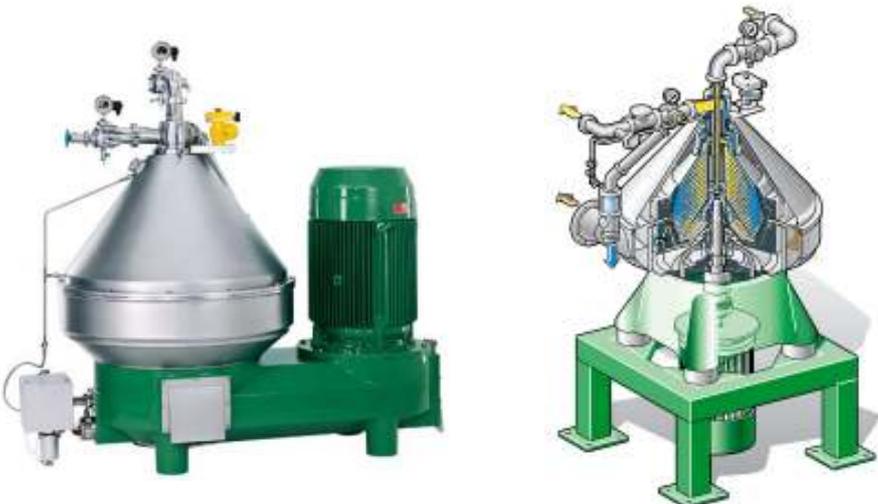


Tabla 25. Características de la centrífuga para separación de la mezcla de reacción.

7.5. CONDUCCIONES

Línea	Material	Longitud (m)	DN	Espesor (mm)	Sch
Tanque sediment.- centrífuga	SA-53-B	10	1	2,77	10S
Centrífuga-reactor	SS-304	25	3	2,11	5S
Depósito metanol-reactor	SA-53-B	15	2	2,77	10S
Depósito sulfúrico- reactor	SS-304	15	1/8	2,41	80S
Reactor-centrífuga final	SS-304	10	4	2,11	5S
Centrífuga final-reactor principal transesterific.	SS-304	16	4	2,11	5S
Centrífuga final-línea recuperación/purific.	SS-304	18	2	1,65	5S

Tabla 26. Características de la red de conducciones.

7.6. BOMBAS

A partir del cálculo de los parámetros característicos de las bombas, realizado en el anexo 1 del presente proyecto, se procede a seleccionar el modelo de bomba más adecuado para cada aplicación.

Se eligen bombas centrífugas de la empresa Bombas Ideal, de la gama GNI; dicha empresa nos proporciona gráficas que nos indican su campo de trabajo, a partir de las cuales podemos elegir la bomba más adecuada para nuestra aplicación, en función de los datos de caudal y altura para cada bomba, calculados en el anexo 1.

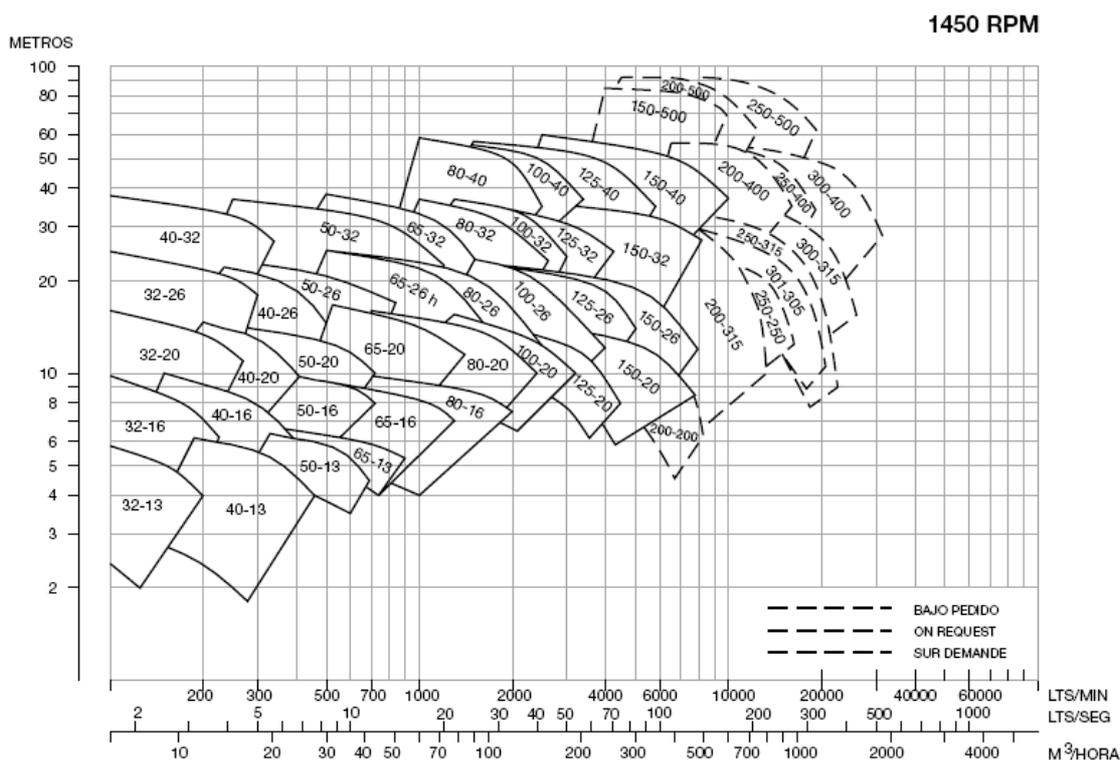


Figura 19. Carta de selección de bombas proporcionada por el fabricante.
Fuente: www.bombas-ideal.com

Bomba	Modelo	Material	Velocidad (rpm)	Caudal (m³/h)	Carga (m)	Potencia (W)
B-1	GNI 32-13	Acero inoxidable	1.450	1 - 12	4 - 6,4	550
B-2	GNI 50-13	Acero inoxidable	1.450	1 - 36	4 - 5,5	550
B-3	GNI 32-13	Acero al carbono	1.450	1 - 12	4 - 6,4	550
B-5	GNI 50-13	Acero inoxidable	1.450	1 - 36	4 - 5,5	550

Tabla 27. Características de bombas centrífugas.

A continuación se muestran las curvas características de los dos modelos de bombas centrífugas seleccionadas:

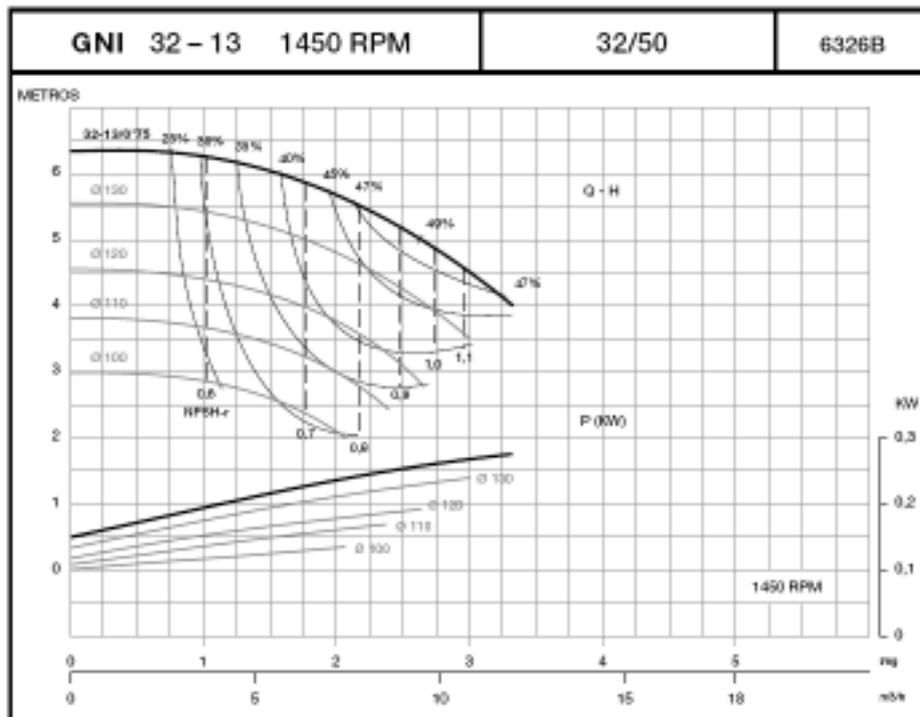


Figura 20. Curva característica de la bomba GNI 32-13.
Fuente: www.bombas-ideal.com

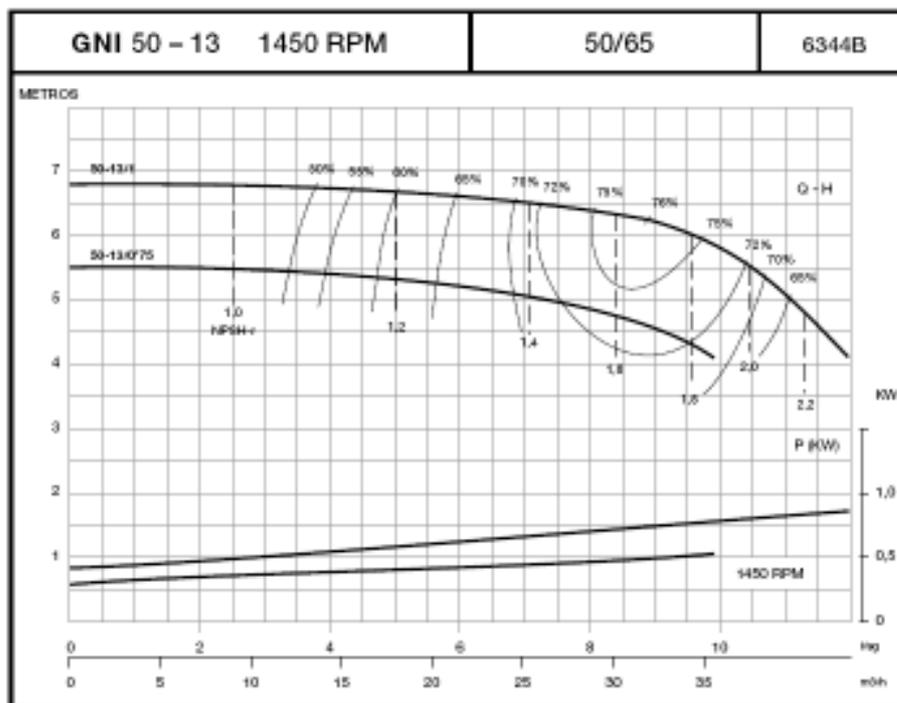
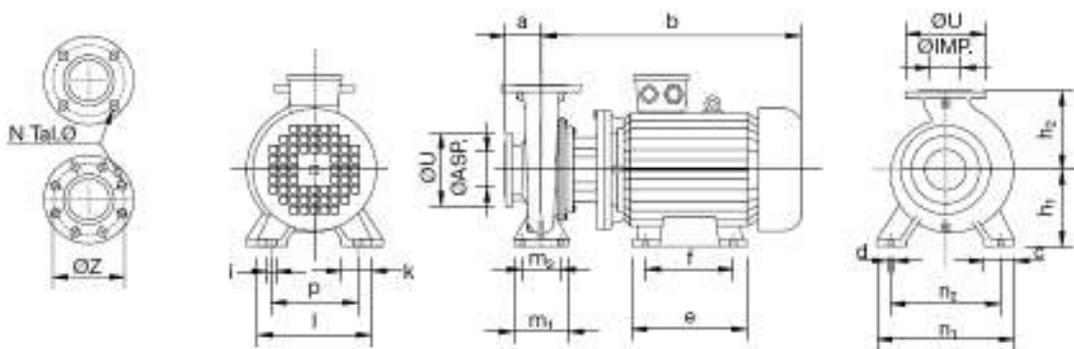


Figura 21. Curva característica de la bomba GNI 50-13.
Fuente: www.bombas-ideal.com



TIPO TYPE	DIMENSIONES - DIMENSIONS														ASPIRACIÓN					IMPULSIÓN					h ₀		
	a	b	h ₁	h ₂	c	m ₁	m ₂	n ₁	n ₂	d	e	f	i	k	l	p	Ø _{asp}	ØZ	ØU	N	Ø	Ø _{imp}	ØZ	ØU		N	Ø
GNI 50-13/75 1450	80	379	112	140	50	100	70	190	140	14	-	-	10	-	-	-	50	125	165	4	18	32	100	140	4	18	36
GNI 50-13/75 1450	100	379	132	160	50	100	70	240	190	14	-	-	10	-	-	-	65	145	185	4	18	50	125	165	4	18	44

Figura 22. Dimensiones de las bombas seleccionadas.
Fuente: www.bombas-ideal.com

La gama GNI son grupos monobloc, formados por la bomba normalizada acoplada a un motor estándar. Esta gama cubre el campo hidráulico de aplicación dado en la norma con las ventajas propias de su construcción compacta, fácil instalación, perfecta alineación bomba-motor, reducidas

dimensiones, etc. Estas bombas son adecuadas para líquidos con temperaturas hasta 100 °C. Existe la posibilidad de incorporar motores especiales para atmósfera explosiva.

Es de especial importancia el carácter antideflagrante de la bomba B-3, ya que es la encargada de bombear el metanol hasta el tanque de reacción, y tanto la bomba como el motor deben estar clasificados para su uso en esta zona.

En cuanto a la bomba B-4 para ácido sulfúrico, se opta por una bomba dosificadora peristáltica de la marca Boyser, de la serie DS-M, construida en acero inoxidable; el tubo flexible puede estar fabricado de diferentes tipos de elastómeros o termoplásticos, eligiéndose en este caso el polipropileno, un material termoplástico conocido por su excelente resistencia a las sales y ácidos minerales.

Las principales características de estas bombas son: aspiración hasta 8 metros, caudales de hasta 90 l/h, silenciosas, resistentes a productos corrosivos, economía y simplicidad de mantenimiento, adecuadas para la dosificación de ácidos. Por todas estas características, esta bomba es apta para su aplicación en la instalación, cumpliendo el rango de trabajo para el que es requerida.



Figura 23. Curva de funcionamiento bomba peristáltica.
Fuente: www.boyser.com



Figura 24. Bomba peristáltica Boyser serie DS-M.
Fuente: www.boyser.com

7.7. INSTRUMENTACIÓN

Instrumento de medida		Unidades	Rango de medición	Tipo de dispositivo	Modelo
Medidor de temperatura		4	-50 – 150 °C	Sonda PT 100	RTF4-2
Medidor de nivel		4	0,1 – 10 m	Medidor por ultrasonido	Shuttle 200660
Célula de carga	Para reactor	4	0 – 1500 kg	Célula de carga	Sensocar CO-1
	Para bidón sulfúrico	1	0 - 40 kg	Célula de carga	Sensocar BL
Medidor de caudal		2	0,3 – 10 m/s	Medidor por ultrasonido	SIGNET 3-3350

Tabla 28. Instrumentación de la instalación.

A continuación se muestran los principales datos técnicos de los instrumentos de medida que se han seleccionado para la instalación:

- Medidor de temperatura:

- Pt100 Class B sensor in a moulded silicone rubber patch
- Dimension L40mm, W13mm, thickness 5mm
- 4 wire connection
- Self-adhesive, aluminium foil backing
- 2m PTFE insulated, twisted pair lead, 4 core, 7/0.2mm
- Temperature range -50 to 150°C
- Resistant to many oils & chemicals

Figura 25. Características técnicas sonda Pt100.

Fuente: www.labfacility.co.uk

- Medidor de nivel:

Sensor ultrasonico Shuttle: 200660	
Rango:	10 m (fluido) 5 m (solidas)
Frecuencia:	50 kHz
Haz:	6 °
Banda muerta:	35 cm
Temperatura:	- 20 to + 60 °C
Materiales:	PP, PVDF
Cable:	Con pantalla, resistente al aceite, aislamiento PVC, longitud 12 m (máx 100 m con cable 600010)
Protección:	IP 68, resistente al agua, máxima profundidad 1 bar de inmersión
Aprobaciones CE:	EN 50081-1, EN 50082-1

Figura 26. Características técnicas medidor de nivel.
Fuente: www.mjk.com

- Células de carga:

Model		TECHNICAL DATA	
CO-1	Clase de precisión	C3	
	Accuracy class		
	Sensibilidad	2 ± 0.1% mV/V	
	Rated output		
	Vmin	E _{max} /10000	
	Vmin		
	Tensión de alimentación	5+15 V	
	Excitation Voltage		
	Resistencia de entrada	350 ± 3 Ω	
	Input Resistance		
	Resistencia de salida	350 ± 3 Ω	
	Output resistance		
	Margen de temperatura compensado	-10° C / +40° C	
	Temperature limits OIML R60		
	Resistencia de aislamiento	> 5000 MΩ	
	Insulation resistance		

Figura 27. Características técnicas células de carga para reactor.
Fuente: www.sensocar.com

TECHNICAL DATA		
Model	Clase de precisión Accuracy class	C3-C6
BL	Sensibilidad Rated output	2 ± 10% mV/V
	Vmin Vmin	E _{max} /18000
	Tensión de alimentación Excitation Voltage	5-15 V
	Resistencia de entrada Input Resistance	390 ± 3 Ω
	Resistencia de salida Output resistance	350 ± 3 Ω
	Margen de temperatura compensado Temperature limits OIML R60	-10° C / +40° C
	Resistencia de aislamiento Insulation resistance	> 5000 MΩ

Figura 28. Características técnicas células de carga para bidón H₂SO₄.
Fuente: www.sensocar.com

- Medidor de caudal:

General

Flow rate range: 0.3 to 10 m/s (1 to 33 ft/s)
 Low flow cut off : 0 to 5 m/s configurable
 Display: LCD w/back light 2x16 characters

- Sensor signal quality indicator LED - Normal: green, Error: red
- User selectable language:
English, French, German, Spanish, Japanese

Display resolution:
 Flow rate: 00.0000 min to 9999999 max
 Totalizer: 00000.00 min to 99999999 max
 Totalizer Error condition:
 Hold last good value or Continue Count
 Error Time delay 0 to 100 s
 Damping: 0 to 100s Averaging function for 4 to 20 mA output and Flow Rate display
 Response time: 200 ms

Weight

- Flowmeter: 0.8 kg
- Sensor: 3-3550-100: 0.3 kg
3-3550-200: 0.4 kg

Process temperature:

- With silicone rubber acoustic couplant
-40°C to +180°C (-40°F to 356°F)
- With silicone-free grease acoustic couplant
0°C to 60°C (32°F to 140°F)

Ambient temperature:

- 3-3350-X: -20° to 50°C (-4° to 122°F)
- 3-3550-XXX: -20° to 60°C (-4° to 140°F)

Figura 29. Características técnicas medidor de caudal.
Fuente: www.gfsignet.com

8. DISTRIBUCIÓN DE LOS EQUIPOS EN LA INSTALACIÓN

En los puntos anteriores se han definido las distintas unidades necesarias en el proceso así como identificado las corrientes, materias primas, etc. Cada una de las unidades previamente calculadas estarán distribuidas de forma que sean accesibles ocupando un espacio óptimo, nunca a voleo, y en un orden definido.

En los planos de planta se detallará la ubicación de las unidades; también será importante el diagrama de flujo ya que en éste se aprecian las líneas de forma general lo que facilitará la comprensión de los planos.

Las unidades se distribuirán de una forma ordenada y lógica en el complejo buscando necesitar el mínimo suelo separando las unidades en función de su participación en el proceso para evitar el cruce de corrientes. También, por motivos de seguridad, ciertas unidades se colocarán a una distancia determinada del resto para evitar así lesiones o riesgos asociados a estas unidades, aislando las posibles fuentes de riesgo en la medida de lo posible.

Es de especial importancia las distancias mínimas exigidas para los tanques de almacenamiento de productos químicos. Para hallar dichas distancias se tendrá en cuenta el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE-APQ-1 “almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles” y MIE-APQ-6 “almacenamiento de líquidos corrosivos”.

- Distancias mínimas entre tanque de metanol y resto de instalaciones:

1	(1)													(1)	No es objeto de este Reglamento
2	(3)	(2)												(2)	Sin requerimiento especial de distancias.
	20													(3)	Pertencientes al parque de almacenamiento
3.1	60	(4)	(6)											(4)	Salvo las bombas para transferencia de productos susceptibles de ser almacenados en el mismo cubeto, en cuyo caso es suficiente que estén situados fuera del cubeto. (En casos especiales, por ejemplo, por reducción del riesgo, y para clase D, las bombas podrían situarse dentro del cubeto.)
3.2	30	(4)	(6)	(6)										(5)	Salvo las bombas de transferencia propias de esta instalación.
3.3	30	(4)	(6)	(6)	(6)									(6)	Aplicar el artículo 18
3.4	10	(4)	(6)	(6)	(6)	(6)								(7)	Salvo los recipientes auxiliares de alimentación o recepción directa del cargadero con capacidad inferior a 25 m ³ que pueden estar a distancias no inferiores a: Clase A = 1.5 m, clase B = 10 m y clases C y D = 2 m.
4.1	60	(5)	(7)	(7)	(7)	(7)	(7)	(2)						(8)	Ver Reglamento de Aparatos a Presión.
4.2	30	(5)	(7)	(7)	(7)	(7)	(12)	(2)						(9)	Si el vallado es de obra de fábrica u hormigón y de altura no inferior a 1,5 m esta distancia no necesita ser superior a 10 m.
4.3	20	(5)	(7)	(7)	(7)	(7)	(2)	(2)	(2)					(10)	Respecto a la vía del ferrocarril de la que se derive un apartadero para carga o descarga de vagones sistema, esta distancia puede reducirse a 15 m con un vallado de muro macizo situado a 12 m del cargadero y altura tal que proteja la instalación.
5	30	(5)	30	20	15	10	30	20	15	(1)				(11)	Las distancias entre tanques de almacenamiento y otras instalaciones se considerarán individualmente en función de la clase del producto almacenado en cada tanque y no de la clasificación global del cubeto.
6	(1)	30	60	30	20	20	60	20	15	30	(1)			(12)	Solamente se requerirá esta distancia cuando se opere simultáneamente en ambos cargaderos con emisión de vapores en alguno de ellos.
7	(1)	20	60	30	20	15	40	20	15	20	(8)				
8	(1)	20	60	30	25	10	30	30	25	20	20				
9	(1)	15	30	20	15	10	30	20	15	(9)	(8)				
10	(1)	20	60	30	25	10	60	(10)	(10)	20	(8)				
11	(1)	30	100	60	40	20	100	60	30	40	(8)				
	1	2	3,1	3,2	3,3	3,4	4,1	4,2	4,3	5	6				

1. Unidades de proceso.
2. Estaciones de bombeo y compresores.
 - 3.1 Recipientes de almacenamiento. Clase A (Paredes del tanque).
 - 3.2 Recipientes de almacenamiento. Clase B (Paredes del tanque).
 - 3.3 Recipientes de almacenamiento. Clase C (Paredes del tanque).
 - 3.4 Recipientes de almacenamiento. Clase D (Paredes del tanque).
- 4.1 Cargaderos. Clase A.
- 4.2 Cargaderos. Clase B.
- 4.3 Cargaderos. Clases C y D.
5. Balsas separadoras.
6. Zonas de fuego abierto.
7. Edificios administrativos y sociales, laboratorios, talleres, almacenes y otros edificios independientes.
8. Estaciones de bombeo de agua contra incendios.
9. Vallado de la planta.
10. Límites de propiedades exteriores en las que pueda edificarse y vías de comunicación públicas.
11. Locales y establecimientos exteriores de pública concurrencia.

**Tabla 29. Distancia en metros entre instalaciones fijas de superficie en almacenamientos con capacidad superior a 50.000 m³.
Fuente: ITC MIE-APQ-1.**

Según esta tabla, las distancias reglamentarias serían:

- Unidades de proceso: 30 m.
- Estaciones de bombeo: 15 m.

- Edificios independientes: 30 m.
- Vallado de la planta: 20 m.
- Otros depósitos (aplicando el artículo 18 de la mencionada ITC): 2,3 m.

Estas distancias, a excepción de la distancia a otros depósitos, serán multiplicadas por los coeficientes de reducción correspondientes de aplicar las siguientes tablas:

Capacidad global de almacenamiento de la instalación m ³ :	Coefficiente para reducción de distancias del cuadro II-1
Q >= 50.000	1
50.000 > Q >= 20.000	0,95
20.000 > Q >= 10.000	0,90
10.000 > Q >= 7.500	0,85
7.500 > Q >= 5.000	0,80
5.000 > Q >= 2.500	0,75
2.500 > Q >= 1.000	0,70
1.000 > Q >= 500	0,65
500 > Q >= 250	0,60
250 > Q >= 100	0,50
100 > Q >= 50	0,40
50 > Q >= 5	0,30
5 > Q	0,20

Tabla 30. Coeficientes de reducción por capacidad.
Fuente: ITC MIE-APQ-1.

Características de los productos y/o de los almacenamientos	Coefficiente	Clases de líquidos a los que es aplicable
Líquidos inestables	2,0	A, B, C y D
Almacenamiento con venteos de emergencia que permitan el desarrollo de presiones superiores a 0,15 bar	1,5	B, C y D

Tabla 31. Coeficientes multiplicadores.
Fuente: ITC MIE-APQ-1.

Medidas o sistemas de protección adoptados		Coefficiente de reducción
Nivel	Cantidad	
0	---	No hay reducción.
1	Una.	0,75
1	Dos o más.	0,50
2	Una.	0,50
2	Dos o más.	0,40

Tabla 32. Reducciones de las distancias por protecciones adicionales a las obligatorias señaladas en el capítulo IV de la ITC.
Fuente: ITC MIE-APQ-1.

Aplicando los coeficientes de reducción obtenemos:

- Unidades de proceso: $30 \cdot 0,3 \cdot 1,5 \cdot 0,5 = 6,75$ m.
- Estaciones de bombeo: $15 \cdot 0,3 \cdot 1,5 \cdot 0,5 = 3,38$ m.
- Edificios independientes: $30 \cdot 0,3 \cdot 1,5 \cdot 0,5 = 6,75$ m.
- Vallado de la planta: $20 \cdot 0,3 \cdot 1,5 \cdot 0,5 = 4,5$ m.
- Otros depósitos: 2,3 m.
- Distancias mínimas entre tanque de ácido sulfúrico y resto de instalaciones:

Para determinar estas distancias se seguirá la ITC MIE-APQ-6 “almacenamiento de líquidos corrosivos”.

No existen requerimientos especiales de distancias entre instalaciones de líquidos corrosivos entre sí, ni respecto a otras instalaciones de la planta o fábrica, excepto los siguientes:

- La pared interior de los cubetos distará, como mínimo, 1,5 metros del vallado exterior de la planta.
- El resto de las instalaciones del almacenamiento distarán al menos 3 metros de dicho vallado.

Las instalaciones de líquidos corrosivos, especialmente los recipientes y tuberías, deberán protegerse de los efectos de siniestros procedentes de otras instalaciones que presenten riesgos de incendio o explosión, en particular recipientes de inflamables y combustibles, cuando dichos efectos puedan afectar gravemente a la estabilidad de los materiales de construcción o a la peligrosidad de los productos contenidos (emisión de vapores tóxicos al calentarse, etc.).

Si los líquidos corrosivos están en cubeto propio, deberán estar separados de los recipientes de líquidos inflamables y combustibles por una

distancia igual o mayor que la que corresponde a los de la clase D de la ITC MIE-APQ-1; teniendo esto en cuenta y observando la siguiente tabla se concluye que la distancia mínima entre el tanque de metanol y el de ácido sulfúrico debe ser 1,5 m.

Clase de producto	Tipos de recipiente sobre los que se aplica la distancia	Distancia mínima (D-Dimensión según notas 1 y 6)
A/A1	Entre recipientes de subclase A1.	1/2 de la suma de los diámetros de los recipientes.
	A recipientes para productos de las clases A2, B, C ó D.	D (mínimo: 15 metros).
A/A2	Entre recipientes a presión para productos de la subclase A2.	1/4 de la suma de los diámetros de los recipientes con un mínimo de 2 metros.
	A recipientes para productos de las clases B, C ó D.	D (mínimo: 15 metros).
B	A recipientes para productos de las clases B, C ó D.	0,5 D (mínimo: 1,5 metros). El valor puede reducirse a 25 metros si es superior.
C	A recipientes para productos de las clases C ó D.	0,3 D (mínimo: 1,5 metros). El valor puede reducirse a 17 metros si es superior.
D	A recipientes para productos de clase D.	0,25 D (mínimo: 1,5 metros).
Líquidos inestables	A recipientes para productos de cualquier clase.	D (mínimos: Los indicados arriba según su clasificación A1, A2, B, C ó D).

Tabla 33. Distancia entre paredes de recipientes.
Fuente: ITC MIE-APQ-1.

9. PLANIFICACIÓN

9.1. DIAGRAMA DE GANTT

El diagrama de Gantt es una herramienta gráfica cuyo objetivo es el de mostrar el tiempo de dedicación previsto para diferentes tareas o actividades a lo largo de un tiempo total determinado. A pesar de que, en principio, el diagrama de Gantt no indica las relaciones existentes entre actividades, la posición de cada tarea a lo largo del tiempo hace que se puedan identificar dichas relaciones e interdependencias.

Desde su introducción, los diagramas de Gantt se han convertido en una herramienta básica en la gestión de proyectos de todo tipo, con la finalidad de representar las diferentes fases, tareas y actividades programadas como parte de un proyecto^[18].

En definitiva, el diagrama de Gantt ilustrará, de forma gráfica, la duración y las relaciones de tiempo entre las etapas del proceso industrial a llevar a cabo, de manera que ayudará a tener una visión más clara de las actividades a realizar y de la duración de las mismas.

Para ilustrar el diagrama de Gantt es muy importante identificar primero las distintas etapas del proceso con las respectivas secuencias y tiempos de cada actividad.

En la página siguiente se muestra el diagrama de Gantt para la etapa de sedimentación y el diagrama correspondiente a la programación de actividades para el resto del proceso de pretratamiento de aceites.

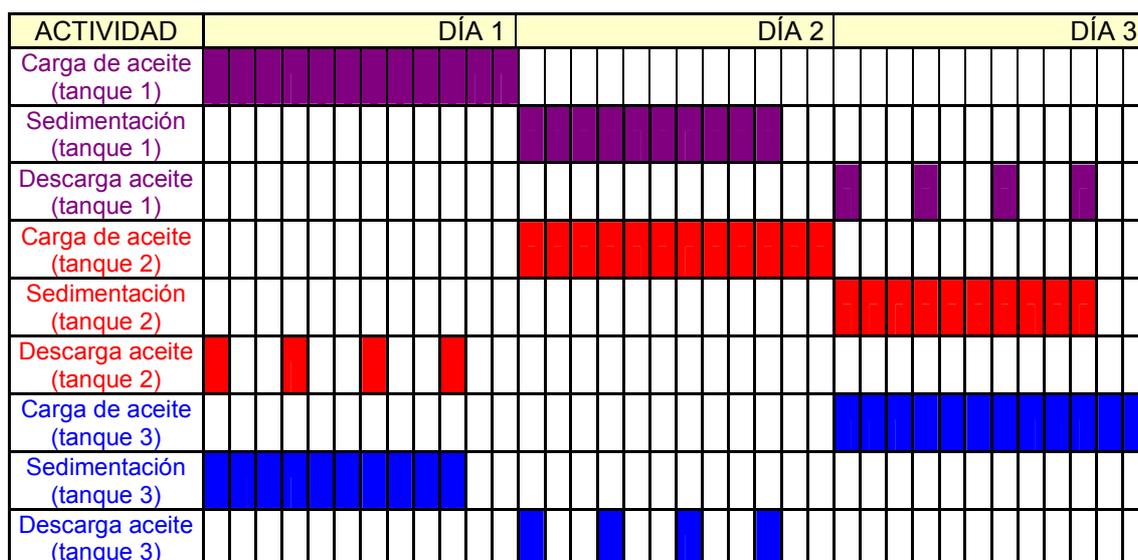


Figura 30. Diagrama de Gantt para la etapa de sedimentación.

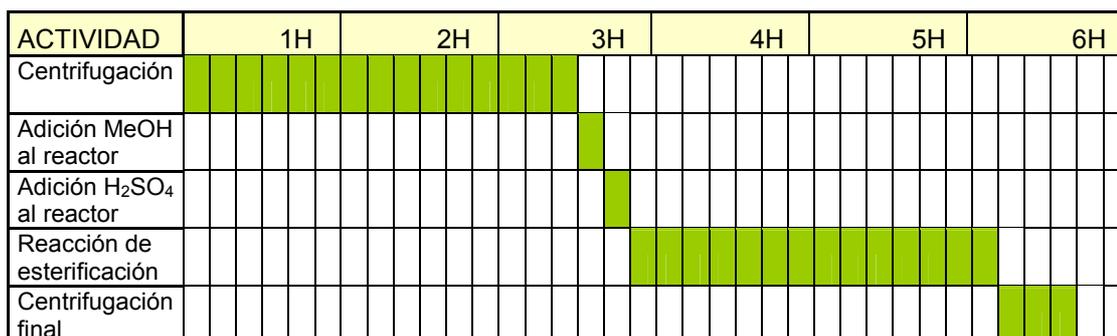


Figura 31. Diagrama de Gantt para el proceso de pretratamiento.

Tal y como puede apreciarse en el diagrama de Gantt para la etapa de sedimentación, los tiempos asignados para esta parte del proceso son:

- Llenado del tanque con aceite: 24 h.
- Proceso de sedimentación del aceite: 20 h.
- Descarga de aceite: 2 h.

La descarga de aceite de un mismo tanque se producirá durante cuatro ciclos, correspondientes a los cuatro ciclos de producción diarios que se dan en la planta; de este modo, un tanque de sedimentación sirve para cubrir las necesidades de aceite usado de la planta durante un día.

Cuando uno de los tanques se encuentra en la etapa de descarga de aceite, otro de ellos está siendo cargado de aceite (operación que dura 24 h) y el otro se encuentra en el proceso de sedimentación, de tal manera que cuando el primer tanque termine sus cuatro etapas de descarga, habrá otro tanque cuyo proceso de sedimentación haya concluido y esté listo para descargar el aceite, permitiendo de esta manera la disponibilidad continua de aceite para el proceso.

Los tiempos asignados para las restantes etapas del proceso son:

- Centrifugación de aceite: 150 min.
- Adición de metanol al reactor: 10 min.
- Adición de sulfúrico al reactor: 10 min.
- Esterificación ácida: 140 min.
- Centrifugación de la mezcla de reacción: 30 min

Por tanto, el tiempo total de un ciclo completo son 340 minutos (5,7 horas).

9.2. MANO DE OBRA

Se establecerán tres turnos diarios de 8 horas cada uno, y en cada turno se requerirá la presencia de dos operarios:

- Un operario encargado del proceso de producción hasta la etapa de reacción: se encargará de la recepción de materias primas, el control de calidad de los aceites recepcionados, purgado de los tanques de sedimentación, supervisión de la centrífuga de aceite.
- Un operario encargado de la supervisión de la unidad de reacción, reposición del bidón de ácido sulfúrico cuando sea necesario, supervisión de la centrifugación de la mezcla de reacción, control de la acidez del aceite una vez realizado el proceso de esterificación.

En definitiva, estos operarios se encargarán del control y la supervisión del funcionamiento de las instalaciones y del estado de los equipos, revisando que los parámetros de operación sean los requeridos.

Además de estos operarios, se requerirá a un técnico mecánico, cuya función será el mantenimiento de los equipos, y otro operario encargado de la limpieza de la instalación. La puesta en funcionamiento de la instalación determinará si es necesario disponer de estas personas a diario o por el contrario resulta más conveniente contratar estos servicios a empresas externas sólo cuando sea necesario (en el caso del técnico mecánico) o periódicamente (en el caso del operario de limpieza).

También es importante destacar que, como en toda instalación industrial, será necesaria la presencia de un director de planta.

10. BIBLIOGRAFÍA

MANUALES:

^[1] ***Tecnología de los Alimentos, Volumen I.***

J. A. Ordóñez, M. I. Cambero, L. Fernández, M. L. García, G. García de Fernando, L. de la Hoz, M. D. Selgas. Editorial Síntesis, 1998.

^[2] ***Química.***

Raymond Chang. Editorial McGraw-Hill, 1999.

^[3] ***Química Orgánica, 5ª ed.***

R. Thornton Morrison, R. Neilson Boyd. Editorial Pearson Educación, 1998.

^[4] ***Química Orgánica Básica y Aplicada. De la molécula a la industria, Tomo I.***

E. Primo Yúfera. Editorial Reverté, 1994.

^[5] ***Manual del Aceite de Oliva.***

R. Aparicio, J. Harwood. AMV Ediciones, 2003.

^[6] ***Aceites y Grasas Industriales.***

Alton E. Bailey. Editorial Reverté.

^[7] ***Métodos Oficiales de Análisis, Tomo I.***

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica, 1993.

^[8] ***Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte, Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel y del Diésel.***

Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría General Técnica, 2006.

^[9] ***Manual de Recipientes a Presión. Diseño y cálculo.***

E. F. Megyesy. Editorial Limusa, 2001.

^[10] ***Ingeniería de las Reacciones Químicas.***

O. Levenspiel. Editorial Reverté, 1986.

^[11] ***Perry's Chemical Engineers' Handbook.***

R. H. Perry, D. W. Green. Editorial McGraw-Hill, 1999.

^[12] ***The Biodiesel Handbook.***

G. Knothe, J. Van Gerpen, J. Krahl. AOCS Press, 2005.

^[13] ***Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 4ª ed.***

W. L. McCabe, J. C. Smith, P. Harriott. Editorial McGraw-Hill, 1998.

- ^[14] ***Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, 3ª ed.***
C. J. Geankoplis. Editorial Cecsca, 1998.
- ^[15] ***Procesos de Transferencia de Calor.***
D. Q. Kern. Editorial Cecsca, 1999.
- ^[16] ***Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor.***
O. Levenspiel. Editorial Reverté, 1993.
- ^[17] ***Chemical Process Equipment. Selection and Design.***
S. M. Walas. Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering, 1990.
- ^[18] ***Preliminary Chemical Engineering Plant Design.***
William D. Baasel. Editorial Elsevier.
- ^[19] ***Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías.***
División de Ingeniería de Crane. Editorial McGraw-Hill.
- ^[20] ***Bombas: Selección, Uso y Mantenimiento.***
J. Kenneth. Editorial McGraw-Hill.
- ^[21] ***Control e Instrumentación de Procesos Químicos.***
P. Ollero, E. Fernández. Editorial Síntesis.
- ^[22] ***Plant Design and Economics for Chemical Engineers.***
M. S. Peters, K. D. Timmerhaus. Editorial McGraw-Hill, 1991.
- ^[23] ***Ingeniería Química.***
J. M. Coulson, J. F. Richardson. Editorial Reverté, 1988.
- ^[24] ***Estrategia en Ingeniería de Procesos.***
D. F. Rudd, C. C. Watson. Editorial Alhambra, 1986.

PUBLICACIONES:

- ^[25] “Biodiesel processing and production”.
J. Van Gerpen. Fuel Processing Technology 86, 1097-1107, de 2005.
- ^[26] “Production of biodiesel from waste frying oils”.
P. Felizardo, M. J. Neiva Correia, I. Raposo, J. F. Mendes, R. Berkemeier, J. Moura Bordado. Waste Management 26, 487-494, de 2006.
- ^[27] “A pilot plant to produce biodiesel from high free fatty acid feedstocks”.
M. Canakci, J. Van Gerpen. American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 2001.

^{128]} “Biodiesel production technology”.

J. Van Gerpen, B. Shanks, R. Pruszko, D. Clements, G. Knothe. National Renewable Energy Laboratory, Julio 2004.

^{129]} “Procesos de producción de biodiésel: uso de materias primas alternativas y de alta acidez”.

Bruno O. Dalla Costa, María L. Pisarello, Carlos A. Querini. Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

^{130]} “Biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil having high free fatty acids”. S. V. Ghadge, H. Reaman. Indian Institute of Technology, Marzo 2005.

^{131]} “Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol”.

J. M. García Camús, J. A. García Laborda. Universidad Rey Juan Carlos, 2006.

^{132]} “The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks”.

Mustafa Canakci. *Bioresource Technology* 98, 183–190, de 2007.

^{133]} “Biodiesel production from tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seed oil with a high content of free fatty acids”.

V.B. Veljkovic, S.H. Lakicevic, O.S. Stamenkovic, Z.B. Todorovic, M.L. Lazic. *Fuel* 85, 2671–2675, de 2006.

^{134]} “Kinetics of free fatty acids esterification with methanol in the production of biodiesel fuel”.

Egle Sendzikiene et al. *European Journal of Lipid Science and Technology* 106, 831-836, de 2004.

^{135]} “Esterificación con etanol para la producción de biodiésel a partir de materias primas de alta acidez”.

M. L. Pisarello, C. A. Querini. Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

^{136]} “Kinetics of oleic acid esterification with methanol in the presence of triglycerides”.

R. Tesser, M. Di Serio, M. Guida, M. Nastasi, E. Santacesaria. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 44, 7978-7982, de 2005.

^{137]} “Comparison of different reactor configurations for the reduction of free acidity in raw materials for biodiesel production”.

E. Santacesaria, R. Tesser, M. Di Serio, M. Guida, D. Gaetano, A. Garcia Agreda, F. Cammarota. American Chemical Society, Marzo 2007.

^{138]} “Catalytic production of biodiesel from soy-bean oil, used frying oil and tallow”.

R. Alcántara. *Biomass and Bioenergy* 18, 515-527, de 2000.

^[39] “Biodiésel: una alternativa real al diésel mineral”.

G. Vicente, M. Martínez, J. Aracil. Ingeniería Química, Marzo de 2001, 135-145.

^[40] Proyecto Fin de Carrera: “Diseño de una planta de producción de biodiésel a partir de aceites de fritura usados procedentes de procesos industriales y de hostelería”.

Tomás Delgado Pérez, Octubre 2005, Universidad de Cádiz.

PÁGINAS WEB:

www.biodiesel-uruguay.com

www.biodiesel.org

www.biodieselspain.com

www.journeytoforever.org

www.earth-policy.org

www.panoramaenergetico.com

www.verdegras.com

www.methanex.com

www.inoxidable.com

www.westfalia-separator.com

www.bombas-ideal.com

www.boyser.com

www.mtas.es

SOFTWARE:

- Software Microsoft Visio.
- Software Microsoft Excel.
- Software AutoCad 2007.

FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE PRETRATAMIENTO DE
ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS
LIBRES PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.**

**ANEXO 1: MEMORIA TÉCNICA Y
CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS**

M^a DE LOS MILAGROS GARCÍA CABELLO

SEPTIEMBRE, 2007

0. ÍNDICE

0. ÍNDICE	1
1. BALANCES DE MATERIA	4
1.1. CONSIDERACIONES PREVIAS	4
1.2. ETAPA DE SEDIMENTACIÓN	7
1.3. ETAPA DE CENTRIFUGACIÓN	9
1.4. ETAPA DE REACCIÓN DE ESTERIFICACIÓN	10
1.5. ETAPA DE CENTRIFUGACIÓN FINAL	14
1.6. RESUMEN DE BALANCES	16
2. DISEÑO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO	18
2.1. BASES DEL DISEÑO Y CÁLCULO MECÁNICO	18
2.2. TANQUE DE METANOL	26
2.2.1. Dimensiones características	26
2.2.2. Espesor mínimo de la envolvente	27
2.2.3. Espesor mínimo de fondo y cabezal	28
2.2.4. Dimensiones corregidas	29
2.2.5. Accesorios	30
2.3. TANQUE DE ÁCIDO SULFÚRICO	32
3. DISEÑO DE TANQUES DE SEDIMENTACIÓN	34
3.1. INTRODUCCIÓN	34
3.2. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES CARACTERÍSTICAS	35
3.3. CÁLCULO DE ESPESORES	38
3.4. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA	41
3.5. DISEÑO DEL SERPENTÍN	44

3.5.1. Introducción	44
3.5.2. Cálculo del vapor requerido para calentamiento	44
3.5.3. Cálculo del área del serpentín	48
3.6. ACCESORIOS	49
4. DISEÑO DEL REACTOR	50
4.1. CÁLCULO DE DIMENSIONES CARACTERÍSTICAS	50
4.2. CÁLCULO DE ESPESORES	54
4.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN	57
4.4. CONSUMO DE POTENCIA	58
4.5. BALANCE DE ENERGÍA	61
4.6. DISEÑO DEL SERPENTÍN PARA EL REACTOR	65
4.6.1. Introducción	65
4.6.2. Cálculo del vapor requerido para calentamiento	65
4.6.3. Cálculo del área del serpentín	67
4.7. ACCESORIOS	69
5. CÁLCULO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS	70
5.1. INTRODUCCIÓN	70
5.2. CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE CADA LÍNEA	72
5.3. CÁLCULO DE ESPESORES DE TUBERÍA	74
5.4. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA	77
6. CÁLCULO DE BOMBAS	81
6.1. INTRODUCCIÓN	81
6.2. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS	83
6.2.1. Cálculo de la altura útil	83
6.2.2. Cálculo de la potencia de bombeo	84

6.2.3. Cálculo de la Altura Neta de Succión Positiva (ANSP) __ 85

6.2.4. Resumen de las características de las bombas _____ 87

1. BALANCES DE MATERIA

1.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

La instalación de pretratamiento de aceites usados para producción de biodiésel se va a diseñar en base a las siguientes consideraciones:

- El aceite de partida está formado por un 50% en peso de aceite de girasol y un 50% en peso de aceite de oliva.
- Los aceites de fritura usados suelen contener cantidades de ácidos grasos libres entre un 3-7%. Para el desarrollo de los cálculos se considerará un contenido en ácidos grasos libres de un 7% en peso.
- El aceite en el momento de su recepción contiene un 1% de sólidos, un 7% de agua y un 0,5% de ceras (constituyen las mermas totales).
- Los compuestos de degradación del aceite son asimilados a los triglicéridos.

Los consumos de materia prima por ciclo se detallan a continuación:

- Aceite usado: 5.000 kg.
- Metanol: 736 kg.
- Ácido sulfúrico: 16 kg.

En cada ciclo productivo se obtienen 4.284 kg de aceite pretratado.

Para el cálculo del peso molecular tanto de los triglicéridos como de los ácidos grasos libres, se consideran únicamente los constituyentes mayoritarios.

ÁCIDO	Nº ÁTMOS C : Nº INSATURACIONES	PORCENTAJE EN PESO (%)
Mirístico	C14:0	No determinado
Palmítico	C16:0	12
Palmitoleico	C16:1	0,8
Estearico	C18:0	No determinado
Oleico	C18:1	53
Linoleico	C18:2	33
Linolénico	C18:3	1
Aráquico	C20:0	No determinado

Tabla 1.1. Composición en ácidos grasos de aceite de fritura usado (mezcla oliva y girasol al 50%). ^[40]

Por tanto, se toman como ácidos principales el ácido oleico, linoleico y palmítico, que constituyen el 98% del total.

ÁCIDO GRASO	PESO MOLECULAR ÁCIDO	PESO MOLECULAR TRIGLICÉRIDO	PESO MOLECULAR ÉSTER
Oleico	282,44	885,4	296,44
Linoleico	280,43	879,3	294,43
Palmítico	256,42	807,3	270,42

Tabla 1.2. Pesos moleculares de ácidos grasos.

Refiriendo los porcentajes de estos ácidos grasos a un 100% tenemos:

$$\% \text{ Oleico} = 53 \cdot 100 / 98 = 54,08$$

$$\% \text{ Linoleico} = 33 \cdot 100 / 98 = 33,67$$

$$\% \text{ Palmítico} = 12 \cdot 100 / 98 = 12,25$$

Se procede entonces a calcular el peso molecular promedio ponderado de los ácidos grasos y de los triglicéridos:

$$PM_{\text{ác.grasos}} = 282,44 \cdot 0,5408 + 280,43 \cdot 0,3367 + 256,42 \cdot 0,1225 = 278,58 \text{ g/mol}$$

$$PM_{\text{triglicéridos}} = 885,4 \cdot 0,5408 + 879,3 \cdot 0,3367 + 807,3 \cdot 0,1225 = 873,78 \text{ g/mol}$$

El peso molecular del aceite será una contribución ponderada de los pesos moleculares promedio de los triglicéridos y de los ácidos grasos libres presentes en el aceite; para un contenido de un 7% en peso de ácidos grasos libres:

$$PM_{\text{aceite}} = PM_t \cdot 0,93 + PM_{ag} \cdot 0,07 = 832,12 \text{ g/mol}$$

El procedimiento para el cálculo del peso molecular de los ésteres metílicos es similar a lo realizado anteriormente, es decir, se realiza un promedio ponderado de los pesos moleculares de los principales ésteres metílicos constituyentes, en base a los principales ácidos grasos constituyentes del aceite:

$$PM_{\text{ésteres metílicos}} = 296,44 \cdot 0,5408 + 294,43 \cdot 0,3367 + 270,42 \cdot 0,1225 = 292,58 \text{ g/mol}$$

1.2. ETAPA DE SEDIMENTACIÓN

A continuación se va a estudiar la separación que se produce en esta fase del proceso, en la cual tiene lugar la reducción de sólidos y humedad en el aceite por medio de una operación física como es la sedimentación.

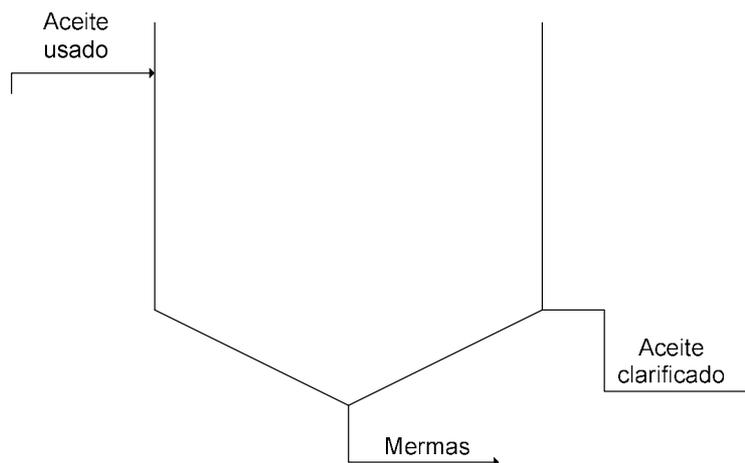


Figura 1.1. Sedimentador.

La separación obtenida en la etapa de sedimentación dependerá de la cantidad de mermas totales presentes en el aceite, que suele estar entre un 7 y un 9% con respecto al peso del aceite.

Como ya se indicó anteriormente, se considerará que el aceite recepcionado contendrá un 1% de sólidos, un 7% de agua y un 0,5% de ceras. La carga máxima de entrada de aceite al día será de 20.000 kg, que servirá para llevar a cabo 4 ciclos en la planta.

Según datos aportados por empresas de recogida de aceites vegetales usados, en esta operación se consigue retirar un 80% aproximadamente de los sólidos y el agua totales, con lo cual, la composición de las corrientes implicadas en esta fase puede resumirse en el siguiente cuadro:

CORRIENTE	ACEITE		SÓLIDOS		AGUA		CERAS	
	%	kg/día	%	kg/día	%	kg/día	%	kg/día
Entrada tanques	91,5	18.300	1	200	7	1.400	0,5	100
Salida fase orgánica	98,28	18.300	0,22	40	1,5	280	0	0
Salida mermas	0	0	11,59	160	81,16	1.120	7,25	100

Tabla 1.3. Composición corrientes etapa sedimentación.

Se considera que todo el aceite sale en la fase orgánica, las trazas de aceite que pudiera contener la corriente de mermas (constituida por sólidos, agua y ceras) se considera despreciable.

1.3. ETAPA DE CENTRIFUGACIÓN

En esta etapa se va a tratar la corriente procedente de la sedimentación y su objetivo es la separación de las partículas de menor tamaño y del resto de humedad presentes en el aceite. Se trata de una operación unitaria también de carácter físico y que se lleva a cabo gracias a la diferencia de densidades.

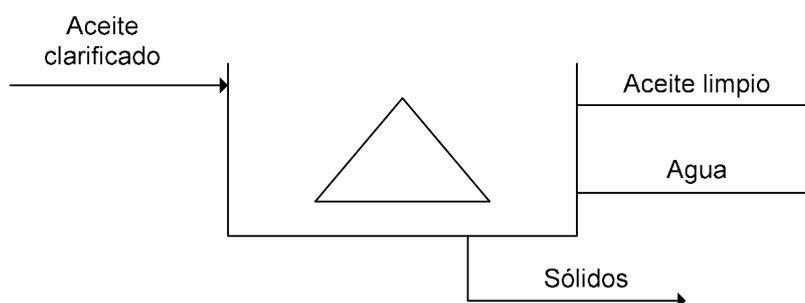


Figura 1.2. Centrifuga para aceite.

CORRIENTE	ACEITE		SÓLIDOS		AGUA	
	%	kg/día	%	kg/día	%	kg/día
Entrada centrífuga	98,28	18.300	0,22	40	1,5	280
Salida fase orgánica	100	18.300	0	0	0	0
Salida fase acuosa	0	0	0	0	100	277,45
Salida sólidos	0	0	94	40	6	2,55

Tabla 1.4. Composición corrientes etapa centrifugación.

En esta etapa también se consideran despreciables las pérdidas de aceite que pudieran producirse, tanto en la fase acuosa como en la salida de sólidos.

1.4. ETAPA DE REACCIÓN DE ESTERIFICACIÓN

El proceso de reacción parte del aceite limpio proveniente de la centrífuga.

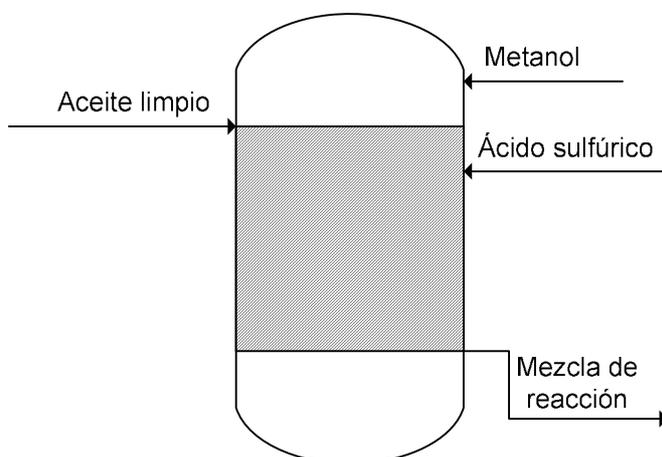


Figura 1.3. Reactor.

A continuación se detallan las consideraciones tenidas en cuenta para esta fase del proceso:

- La cantidad de aceite limpio que se aporta al reactor en cada lote es de 4.575 kg.
- La relación molar entre metanol y ácidos grasos libres es de 20:1.
- La cantidad a añadir de H_2SO_4 es de un 5% con respecto al peso de ácidos grasos libres.
- Los compuestos de degradación del aceite son asimilados a los triglicéridos, por tanto los únicos componentes del aceite son los triglicéridos y los ácidos grasos libres.
- El aceite tiene un porcentaje de ácidos grasos libres de un 7%, por tanto su porcentaje en triglicéridos es de un 93%.
- Se considerará que la esterificación ácida reducirá la acidez del aceite de un 7% a un 1%, lo cual significa que la reacción tendrá una conversión del 85,7%.
- No se considerará la reacción de transesterificación ácida que pudiera tener lugar paralelamente a la esterificación, ya que la conversión a

éster de los triglicéridos debido a esta reacción es muy escasa para los parámetros utilizados y el tiempo de reacción empleados.

Los balances de materia se realizarán en este caso tomando una base de cálculo de 100 kg de aceite y posteriormente se recalcularán los datos para el sistema. Se realizarán los cálculos en unidades molares, y en el cuadro resumen aparecerán reflejadas también las unidades másicas correspondientes. Los pesos moleculares de los diferentes componentes se detallan a continuación:

COMPONENTE	PESO MOLECULAR (kg/kmol)
Triglicéridos	873,78
Ácidos grasos libres	278,58
Metanol	32,04
Ácido sulfúrico	98,1
Ésteres metílicos	292,58
Agua	18

Tabla 1.5. Pesos moleculares de los componentes.

Partiendo de las premisas anteriores, se procede a resolver el balance másico al reactor; la ecuación química que representa la reacción que tiene lugar es la siguiente:



Como se señaló antes, se tomará una base de cálculo de 100 kg de aceite usado, con lo cual, según las consideraciones anteriores, los moles de triglicéridos, ácidos grasos libres, metanol y ácido sulfúrico iniciales serán:

$$n_{\text{triglicéridos}} = 0,93 \cdot 100 = 93 \text{ kg} / 873,78 = 0,106 \text{ kmol}$$

$$n_{\text{ác.grasos}} = 0,07 \cdot 100 = 7 \text{ kg} / 278,58 = 0,0251 \text{ kmol}$$

$$n_{\text{MeOH}} = 20 \cdot N_{\text{ác.grasos}} = 0,502 \text{ kmol}$$

$$n_{\text{ác.sulfúrico}} = 0,05 \cdot 7 = 0,35 \text{ kg} / 98,1 = 0,00357 \text{ kmol}$$

La ecuación general para el balance de materia es:

$$(A) = (E) - (S) + (G) - (C)$$

Teniendo en cuenta que el reactivo limitante en este caso son los ácidos grasos libres, resolvemos la ecuación para cada componente:

$$\text{Triglicéridos: } (S) = (E) = 0,106 \text{ kmol}$$

$$\text{Ác. grasos libres: } (S) = (E) - (C) = 0,0251 - (0,857 \cdot 0,0251) = 0,00359 \text{ kmol}$$

$$\text{Metanol: } (S) = (E) - (C) = 0,502 \text{ kmol} - (0,857 \cdot 0,0251) = 0,480 \text{ kmol}$$

$$\text{Ésteres metílicos: } (S) = (G) = 0,857 \cdot 0,0251 = 0,0215 \text{ kmol}$$

$$\text{Agua: } (S) = (G) = 0,857 \cdot 0,0251 = 0,0215 \text{ kmol}$$

$$\text{Ácido sulfúrico: } (S) = (E) = 0,00357 \text{ kmol}$$

En la siguiente tabla se representan las cantidades iniciales y finales de cada componente, en unidades molares y másicas, por cada lote de aceite que entra en el reactor, que como ya se indicó anteriormente son 4.575 kg.

	ENTRADA		SALIDA	
	kmol/lote	kg/lote	kmol/lote	kg/lote
Triglicéridos	4,85	4.237,83	4,85	4.237,83
Ác. grasos libres	1,15	320,37	0,164	45,69
Metanol	22,97	735,96	21,96	703,6
Ésteres metílicos			0,984	287,9
Agua			0,984	17,71
Ácido sulfúrico	0,163	15,99	0,163	15,99

Tabla 1.6. Balance de materia al reactor.

1.5. ETAPA DE CENTRIFUGACIÓN FINAL

Cuando finaliza la reacción, se dispone de un lote con una determinada composición que será tratado en una centrífuga, donde se va a escindir en dos corrientes:

- Una fase orgánica (FO), que contendrá los triglicéridos y los ácidos grasos libres que no han reaccionado; esta corriente, que constituye el aceite pretratado, será conducida al reactor de transesterificación.
- Una fase acuosa (FA), que contendrá metanol, éster metílico, agua y ácido sulfúrico; esta corriente será conducida a la línea de purificación de biodiésel ya existente en la planta, donde se producirá la separación del metanol y su posterior condensación, de manera que vuelva a almacenarse para poder ser reutilizado. También se producirá la neutralización del ácido sulfúrico y la separación del agua mediante centrifugación, de manera que el biodiésel obtenido cumpla con los requerimientos de la normativa para su uso.

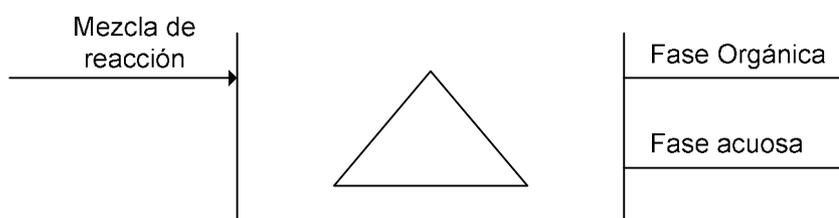


Figura 1.4. Centrífuga para la mezcla de reacción.

La composición que se considera para las distintas corrientes en esta etapa se detalla a continuación:

	ENTRADA	SALIDA 1 (FO)		SALIDA 2 (FA)	
	kg/lote	kg/lote	%	kg/lote	%
Triglicéridos	4.237,83	4.237,83	98,93		
Ác. grasos libres	45,69	45,69	1,07		
Metanol	703,6			703,6	68,63
Ésteres metílicos	287,9			287,9	28,08
Agua	17,71			17,71	1,73
Ácido sulfúrico	15,99			15,99	1,56

Tabla 1.7. Composición corrientes etapa centrifugación final.

1.6. RESUMEN DE BALANCES

A continuación se muestra un diagrama de flujo en el que se especifica la composición de las corrientes principales por lote procesado, resumiendo los resultados de los balances realizados en los apartados anteriores:

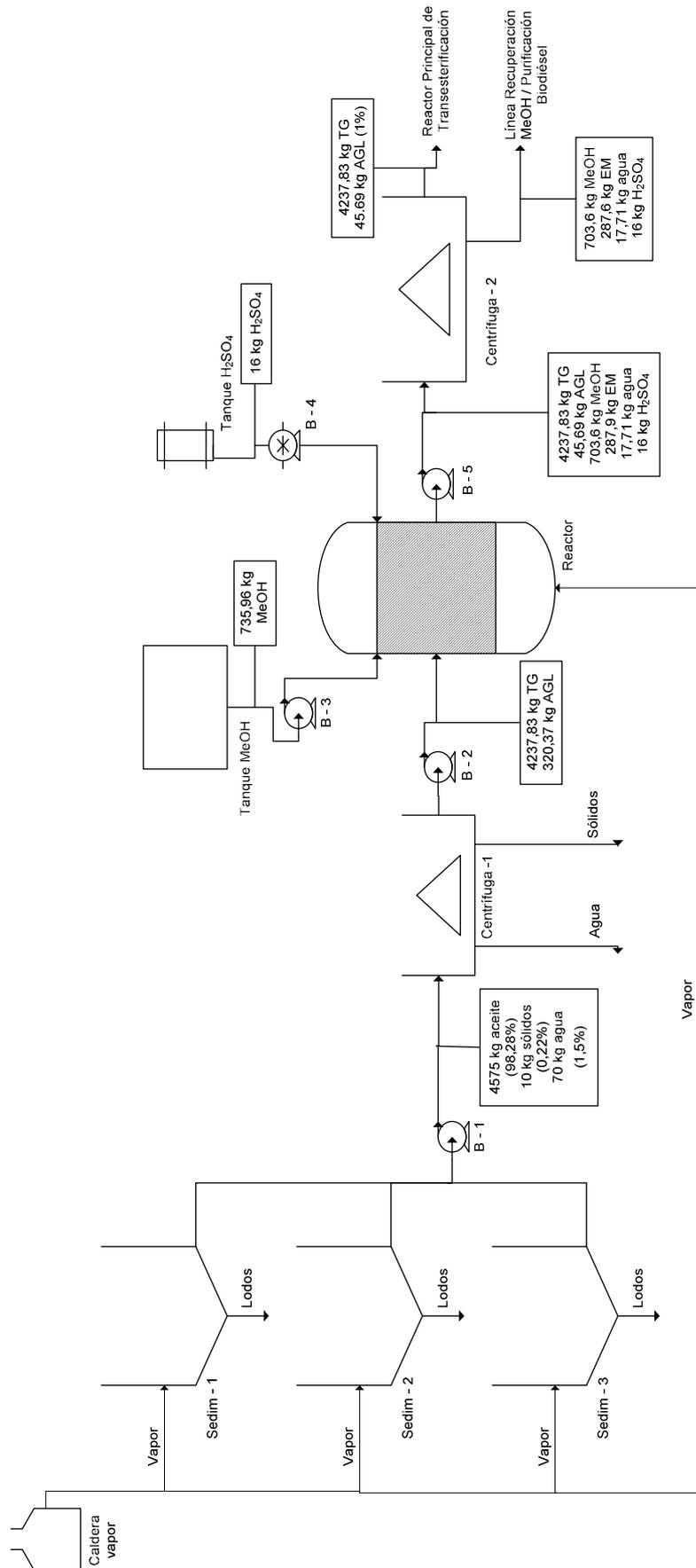


Figura 1.5. Esquema de la instalación con balance de materia.

2. DISEÑO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

2.1. BASES DEL DISEÑO Y CÁLCULO MECÁNICO

El diseño y cálculo mecánico de los elementos que forman parte de un recipiente consiste, básicamente, en la determinación de sus espesores, tomando como datos de partida:

- La forma del equipo y sus dimensiones.
- El material utilizado.
- Las condiciones de presión y temperatura.
- Las cargas debidas al viento.
- El peso específico del fluido.
- La reglamentación, norma o código que debe cumplir el diseño del recipiente.

Sin duda la norma más utilizada, y por tanto la que se utiliza en este proyecto, es el código ASME, que en su sección VIII, división 1, y sección VIII división 2, indica los métodos de diseño y cálculo, así como los requisitos mínimos exigidos a los materiales, detalles constructivos y pruebas que deben satisfacer los equipos a presión. Aún solapándose los campos de aplicación de ambas divisiones, en la práctica la división 1 se utiliza para el diseño y construcción de equipos sometidos a vacío, baja, media y alta presión; la división 2 se reserva a los equipos de alta y muy alta presión.

Para el diseño de un recipiente a presión se tienen que aportar, por lo general, los siguientes datos:

a) Presión de Diseño (P):

Esta presión debe ser en todo caso mayor a la máxima de operación o servicio. Su valor se puede fijar como el mayor de:

$$P \geq 1,1 \times \text{Presión máxima de operación (kg/cm}^2\text{)}$$

$$P \geq \text{Presión máxima de operación} + 2 \text{ kg/cm}^2$$

$$P \geq 3,5 \text{ kg/cm}^2$$

Cuando se desconozca la máxima presión de operación, la presión de diseño vendrá dada por la siguiente tabla:

OPERACIÓN	DISEÑO
0-1,5	3,5 kg/cm ² Manométrico
1,6-13,5	2 kg/cm ² + P.O.
13,6-20	115% de P.O.
20,1-25	3 kg/cm ² + P.O.
≥ 25,1	112% de P.O.

**Tabla 1.8. Presiones de diseño.
P.O. (Presión de Operación normal).**

b) Temperatura de Diseño (T):

Al igual que en el apartado anterior, debe ser superior a la máxima que se produzca durante la operación, y es habitual (a no ser que se especifique otro valor en las hojas de datos del recipiente) adoptar como temperatura de diseño el valor de:

$$T = \text{Máxima temperatura de operación} + 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para los tanques a diseñar la temperatura de diseño es de 45 °C, ya que se considera que trabajan a temperatura ambiente (25 °C).

c) Espesor mínimo de pared:

Bien por norma o código, o por requerimientos de transporte, etc. se debe fijar un valor mínimo del espesor de la envolvente.

Como guía práctica, el espesor mínimo, excluido el sobreespesor por corrosión admisible de las envolventes y fondos, será el mayor de los siguientes valores:

- exigido por el código ASME sección VIII, división 1: $t_{\min} = 2,5 + c$ (mm)

- según la fórmula: $t_{\min} = \frac{D}{1.000} + 2,54 + c$ (mm) D = diámetro interior

$t_{\min} = 5 + c$ (mm) Para aceros al carbono

$t_{\min} = 3$ (mm) Para acero inoxidable

d) Sobreespesor de corrosión:

Este valor está en función del tipo de material elegido para la construcción del recipiente; el sobreespesor de corrosión será añadido a todas las superficies en contacto con el fluido (para el acero inoxidable tendrá un valor igual a 0).

e) Efecto del viento:

Al igual que la presión interna o externa, el viento produce unas tensiones en las paredes del recipiente que pueden producir la inestabilidad mecánica del mismo.

El valor de las cargas uniformes es función del área expuesta y de la presión que el viento ejerce sobre esta área, denominada presión de diseño del viento. La determinación de estas cargas unitarias se lleva a cabo con ayuda de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{D_0}{10^3} P_w$$

siendo:

Q = carga debida al viento por metro lineal de altura, kg/m.

D₀ = diámetro exterior del recipiente, incluido aislamiento, si lo hay, en mm.

P_w = presión de diseño del viento, en kg/m^2 .

La presión de diseño P_w , es función de la presión básica del viento, de la forma del recipiente, de la esbeltez y de los accesorios externos del recipiente, pudiendo concretarse todo ello en la fórmula:

$$P_w = p c K r$$

siendo:

p = presión básica del viento, kg/m^2 .

c = factor de forma.

K = coeficiente de esbeltez.

r = coeficiente de accesorios.

1. Presión básica del viento:

La presión básica del viento es función de la velocidad del viento y de la elevación sobre el suelo, pudiéndose expresar de la siguiente manera:

$$p = p_0 K_a$$

siendo:

p_0 = presión básica del viento a la altura del suelo, kg/m^2 .

K_a = factor de altura.

La presión básica a nivel del suelo a partir de la velocidad del viento se obtiene con la siguiente fórmula:

$$p_0 = \frac{V}{201,4} \quad \text{kg/m}^2$$

siendo V la velocidad del viento en km/h , la cual se determina en función de la velocidad máxima habida en los últimos años incrementada convenientemente o la que marque la reglamentación oficial, si existe, en la zona donde se va a instalar el equipo.

Como valor del factor de altura se adoptan usualmente los siguientes:

ALTURA SOBRE EL SUELO (m)	FACTOR DE ALTURA, K_a
De 0 a 15	1
De 16 a 25	1,15
De 26 a 40	1,3
> 40	1,5

Tabla 1.9. Valores del factor de altura.

2. Factor de forma:

Es función de la forma expuesta al viento (carcasa) y su valor es:

ÁREA EXPUESTA	FACTOR DE FORMA, c
Cilíndrica (superficie lisa)	0,6
Cilíndrica (superficie rugosa)	0,8
Esférica	0,45

Tabla 1.10. Valores del factor de forma.

3. Coeficiente de esbeltez:

El coeficiente de esbeltez es función de la relación entre la altura H y el diámetro exterior D_o expuesto al viento (incluido aislamiento si existiese). Su valor se indica a continuación:

ESBELTEZ H/D_o	FACTOR DE ESBELTEZ, K
De 1 a 5	1
10	1,25
30	1,35
≥ 70	1,5

Tabla 1.11. Valores del factor de esbeltez.

4. Coeficiente de accesorios:

Para tener en cuenta el efecto de suma de área que producen las tuberías soportadas, las plataformas, escaleras y, en general, cualquier accesorio exterior a los recipientes, se introduce un coeficiente que compensa estas acciones y cuyo valor se obtiene a partir del siguiente cuadro:

DIÁMETRO EXTERIOR, D_o, (mm)	COEFICIENTE DE ACCESORIOS, r
< 399	1,4
De 400 a 599	1,3
De 600 a 999	1,2
> 1.000	1,15

Tabla 1.12. Valores del coeficiente de accesorios.

Una vez descrito el procedimiento, es posible calcular la carga debida al viento que soportan los tanques que se van a diseñar:

$$p = p_0 K_a$$

$$p_0 = \frac{V}{201,4}$$

$$K_a = 1$$

$$\text{tomamos } V=120 \text{ km/h}$$

$$p_0 = \frac{V}{201,4} = 0,5958 \text{ kg/m}^2 = p$$

$$P_w = p c K r$$

$$c = 0,6$$

$$K = 1$$

$$r_{\text{MeOH}} = 1,15$$

$$r_{\text{ác.sulf.}} = 1,3$$

$$p_{w\text{MeOH}} = 0,411 \text{ kg/m}^2$$

$$p_{w\text{ác.sulf.}} = 0,465 \text{ kg/m}^2$$

$$Q = \frac{D_0}{10^3} P_w$$

$$\left. \begin{array}{l} D_{0 \text{ MeOH}} = 2.349 \text{ mm} \\ D_{0 \text{ ác.sulf.}} = 590 \text{ mm} \end{array} \right\} \begin{array}{l} Q_{\text{MeOH}} = 0,965 \text{ kg/m} \\ Q_{\text{ác.sulf.}} = 0,274 \text{ kg/m} \end{array}$$

f) Tensión máxima admisible:

Los recipientes a presión se calculan con unos espesores de pared capaces de soportar sin deformación la presión a la que se verán sometidos. Es decir, que la presión a la que trabaja el material será inferior a la máxima tensión admisible del mismo.

Esta tensión máxima admisible depende de las características del material y del coeficiente de seguridad que se adopte, variando con la temperatura de trabajo.

Cada norma o código obtiene el valor de la tensión máxima admisible de forma diferente, aunque en general las variables que se barajan son casi siempre las mismas. Particularmente, para los materiales ASTM-ASME, el código ASME VIII, división 1, contiene unas tablas que muestran las tensiones máximas admisibles para cada material a las diferentes temperaturas.

g) Eficiencia de la soldadura:

La unión entre chapas se realiza, normalmente, por medio de la soldadura, y ésta representa una discontinuidad dentro del trazado de chapa que puede producir una intensificación local de las tensiones a que se encuentra sometido el material. Esta razón, junto con la posibilidad de producirse defectos en la realización de la soldadura y el calentamiento y

rápido enfriamiento al que está sometida la zona próxima a la soldadura, dan pie a considerar la zona de soldadura como debilitada.

Teniendo en cuenta este hecho, en el cálculo de los recipientes se introduce una reducción en la tensión máxima admisible multiplicando ésta por un coeficiente denominado eficiencia de la soldadura (E), cuyo valor varía según las normas o códigos, y de acuerdo a la soldadura y los controles efectuados sobre ella (mirar gráfico 4.3 del anexo 4).

h) Selección de materiales:

En la etapa de diseño de recipientes a presión, la selección de los materiales de construcción es de relevante importancia, para lo cual necesitamos definir una secuencia lógica para la selección de estos, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Vida estimada de la planta.
- Requerimientos de proceso y operación.
- Duración estimada del material.
- Disponibilidad y tiempo de entrega del material.
- Coste del material.
- Coste de mantenimiento e inspección.

2.2. TANQUE DE METANOL

Este tanque almacena el metanol que se administra como reactivo en la reacción de esterificación.

Es un tanque vertical cerrado, de geometría cilíndrica y fondo plano. Está preparado para almacenar líquidos inflamables, ya que el metanol es un alcohol volátil, inflamable y tóxico. Está construido en acero al carbono (tipo SA-285-C) y dispone de un cubeto de retención, capaz de contener la totalidad de la capacidad del depósito, para recoger los posibles derrames, tal y como establece la normativa para el almacenamiento de líquidos inflamables.

2.2.1. Dimensiones características

La capacidad de almacenamiento del tanque se establece de acuerdo a las necesidades de producción y a los ciclos de la planta, de manera que tendrá un volumen de 20 m³.

Para este tipo de depósitos se recomienda que la relación H/D esté entre 1 y 2,5, por lo que tomaremos el valor de 2 para dicha relación. Ya puede entonces calcularse el diámetro del tanque:

$$\left. \begin{array}{l} V = \pi \frac{D^2}{4} H \\ \frac{H}{D} = 2 \end{array} \right\} D = \sqrt[3]{\frac{4V}{2\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 20}{2 \cdot \pi}} = 2,335 \text{ m}$$

El área lateral del cilindro será:

$$A_L = \pi DH = \pi \cdot 2,335 \cdot 2 \cdot 2,335 = 34,257 \text{ m}^2$$

2.2.2. Espesor mínimo de la envolvente

Las ecuaciones que nos permiten el cálculo del espesor mínimo (t) para la carcasa cilíndrica son:

$$\text{Para esfuerzo longitudinal: } t = \frac{PR_{int}}{2SE + 0,4P} + c$$

$$\text{Para esfuerzo circunferencial: } t = \frac{PR_{int}}{SE - 0,6P} + c$$

El material usado es acero al carbono, y se va a tomar un sobreespesor de corrosión de 1,5 mm.

La virola tendrá una costura tipo 1, es decir, juntas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies; si se considera que la junta será examinada por zonas, el valor de la eficiencia de soldadura puede obtenerse del gráfico 4.3 del anexo 4, obteniendo $E = 0,85$.

Se detallan a continuación los valores de los parámetros presentes en las ecuaciones:

P = Presión de diseño mínima = $3,5 \text{ kg/cm}^2 = 49,77 \text{ psi}$

R = Radio interno = 45,96 in

S = Esfuerzo máximo admisible = 13.800 psi (según Tabla UCS-23, que muestra las tensiones máximas admisibles para cada material a las diferentes temperaturas)

E = Eficiencia de soldadura = 0,85

C = Sobreespesor de corrosión = 1,5 mm = 0,0591 in

Por tanto:

Para esfuerzo longitudinal:

$$t = \frac{49,77 \cdot 45,96}{2 \cdot 13.800 \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 49,77} + 0,0591 = 0,1565 \text{ in} = 3,975 \text{ mm}$$

Para esfuerzo circunferencial:

$$t = \frac{49,77 \cdot 45,96}{13.800 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 49,77} + 0,0591 = 0,2546 \text{ in} = 6,467 \text{ mm}$$

El valor obtenido como mínimo para el espesor de la virola será el mayor de los dos (6,467 mm); el espesor de chapa disponible comercialmente que es inmediatamente superior al obtenido es $t = 7 \text{ mm}$.

Comprobamos ahora que este espesor sea mayor al mínimo que indica la norma:

$$t_{\min} = 5 + c \text{ (mm)} = 6,5 \text{ mm}$$

Por tanto, $t = 7 \text{ mm}$ será en espesor final de la envolvente.

2.2.3. Espesor mínimo de fondo y cabezal

El fondo plano consiste en una chapa plana pegada directamente a la carcasa.

En cuanto al cabezal del tanque, se opta por una tapa semielíptica, ya que el espesor que resulta para una tapa toriesférica es relativamente mayor que para la semielíptica, puesto que ésta soporta mayores presiones. El proceso de fabricación de estas tapas es estampación y, dada su enorme facilidad, ha multiplicado su uso. Su silueta, en general, describe una elipse relación 2:1 y es ampliamente utilizada en la industria.

La expresión para el cálculo del espesor de un cabezal semielíptico es:

$$t_f = \frac{PD_{int}}{2SE - 0,2P} + c = \frac{49,77 \cdot 91,93}{2 \cdot 13.800 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 49,77} + 0,0591 = 0,2542 \text{ in} = 6,457 \text{ mm}$$

Se toma el espesor disponible comercialmente inmediatamente superior, por tanto, $t_f = 7\text{mm}$.

Entre el cabezal y la carcasa se realiza la transición de una figura bombeada a otra cilíndrica; esta línea de transición, denominada justamente línea de tangencia, se encuentra sometida a grandes tensiones axiales que se traducen en fuertes tensiones locales, y éste resulta ser el punto más débil de todo el recipiente; por esta razón no es aconsejable realizar la soldadura de unión cabezal-carcasa a lo largo de esta línea. Para evitar esta coincidencia, los cabezales se construyen con una parte cilíndrica, denominada pestaña o faldilla, cuya altura mínima “h” varía según la norma o código de cálculo utilizado, pero en general deberá ser no menor que el mayor de los siguientes valores:

$$h \geq 0,3 \sqrt{D_o t_f}$$

$$h \geq 3 t_f$$

$$h \geq 25 \text{ mm}$$

con un valor máximo de $h = 100 \text{ mm}$ y, siendo $D_o =$ Diámetro exterior de la carcasa (mm) y $t_f =$ espesor de pared del fondo (mm).

Para el caso del tanque de metanol, el valor de la altura de la faldilla es $h = 38,5 \text{ mm}$.

2.2.4. Dimensiones corregidas

Hay que tener en cuenta que el tanque posee un cabezal semielíptico, de manera que su volumen puede obtenerse con la expresión:

$$V_{cab} = 0,13 D_{int}^3 = 0,13 \cdot 2,335^3 = 1,655 \text{ m}^3$$

Corregimos entonces el volumen y la altura del casco cilíndrico:

$$V_{cil} = V_T - V_{cab} = 20 - 1,655 = 18,345 \text{ m}^3$$

$$V_{cil} = \pi R_{cil}^2 H_{cil}; \quad H_{cil} = \frac{V_{cil}}{\pi R_{cil}^2} = \frac{18,345}{\pi \cdot 1,1675^2} = 4,284 \text{ m}$$

En la siguiente tabla se resumen las dimensiones del tanque:

V_{total} (m^3)	V_{trab} (m^3)	V_{cab} (m^3)	V_{cil} (m^3)	D_{int} (m)	D_0 (m)	H_{cil} (m)	H_{cab} (m)	H_{total} (m)	$t_{carcasa}$ (mm)	t_{cab} (mm)
20	16	1,655	18,345	2,335	2,349	4,284	0,386	4,67	7	7

Tabla 1.13. Dimensiones del tanque de almacenamiento de metanol.

2.2.5. Accesorios

El tanque de almacenamiento de metanol dispondrá de los siguientes accesorios:

- Entrada en la parte superior de la carcasa cilíndrica a una altura de 4 m para la conexión roscada de una tubería de llenado.
- Salida en la parte inferior de la carcasa cilíndrica para la descarga de líquido mediante tubería con conexión roscada.
- Bomba para la descarga de las cisternas de metanol, apta para el trasvase de productos inflamables.

- Según la Instrucción Técnica Complementaria MIE-APQ-1 “Almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles” del Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos, deberá disponer de un cubeto de retención de capacidad igual al 100% del depósito; su construcción se hace siguiendo dicha norma.
- Sistema de venteo normal y de emergencia, cuyo objetivo es evitar la deformación del techo o las paredes del tanque como consecuencia de llenados, vaciados o cambios de temperatura. El venteo normal, según la norma, tendrá un diámetro interno igual al mayor diámetro de tubería de llenado o vaciado del tanque.
- Sistema de protección contra incendios: extintores de polvo o CO₂.
- Sensores de nivel superior e inferior.
- Escalera de acceso.
- Boca de hombre de 20 in de diámetro, situada en la zona inferior del depósito.

2.3. TANQUE DE ÁCIDO SULFÚRICO

En este tanque se almacena el ácido sulfúrico, que actúa como catalizador en la reacción de esterificación.

La capacidad de almacenamiento del tanque es de 0,2 m³, de acuerdo con las necesidades de producción. Debido a la reducida capacidad de almacenamiento requerida para este depósito, no se considera necesario diseñar un tanque específico para este propósito y se opta por el uso de un envase retornable que se conectará a la tubería correspondiente.

El bidón seleccionado lo proporciona la empresa Panreac, es apto para uso industrial y está homologado para el transporte; posee las características adecuadas para el almacenamiento de ácido sulfúrico. A continuación se detallan las características que proporciona el fabricante:

Referencia Panreac	Capacidad nominal (L)	Material	Color	Largo (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Peso* (Kg)
BIN200UNM	200	Acero inoxidable	Natural	Ø 590	940	30	

Tabla 1.14. Características del tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico.

Ya que se conoce el ciclo de producción de la planta, es fácil estipular el tiempo en el que se consumirá el contenido del bidón, de manera que el proveedor periódicamente recogerá el envase vacío y dejará otro envase lleno. Se dispondrá en la planta de otro envase lleno, aparte del que está conectado a la tubería, de manera que cuando éste se acabe, se conecte a la tubería el bidón lleno y la empresa pasará a recoger el vacío y dejará otro, que es el que se colocará de reserva. Tras un minucioso proceso de limpieza y control, la empresa distribuidora vuelve a llenar el bidón del mismo producto, estando de nuevo listo para su comercialización.



Figura 1.6. Bidón de ácido sulfúrico.

Esta opción es especialmente ventajosa, por la flexibilidad que supone la posibilidad de comprar un número reducido de envases y la facilidad de acceso gracias a la extensa red de distribuidores de Panreac en todo el territorio nacional. La empresa escoge cuidadosamente estos envases por su aptitud para contener productos químicos, de acuerdo con tres criterios básicos:

- Idoneidad con respecto a las interacciones entre el producto y el recipiente.
- Resistencia durante el transporte.
- Almacenamiento.

En el emplazamiento donde irá situado el bidón de ácido sulfúrico se dispondrá de una célula de carga, de manera que sabremos en todo momento, de modo indirecto en función del peso, el nivel de líquido aproximado que hay en el depósito.

El bidón estará rodeado por un cubeto de retención, de características adecuadas, con el fin de contener el líquido procedente de posibles derrames o escapes.

3. DISEÑO DE TANQUES DE SEDIMENTACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

La instalación va a disponer de tres tanques de sedimentación, cuya función es la recepción y decantación de los aceites; en ellos se va a almacenar el aceite usado y se va a producir la sedimentación de los sólidos gruesos y de la mayor parte de la fase acuosa.

Estos silos están equipados con una reja de desbaste con pendiente, situada en la parte superior, de manera que los sólidos se deslizan hacia la parte más baja de la reja; esta reja deberá ser limpiada periódicamente para un correcto paso del aceite al fondo del tanque.

Son tanques abiertos, verticales y cilíndricos, construidos en acero al carbono SA-285-C, soportados por perfiles IPN del mismo material, con fondo cónico adaptado para purgas y que operan a presión atmosférica.

Para favorecer la operación de sedimentación, estos tanques van a disponer de un serpentín de calentamiento para elevar la temperatura del aceite.

3.2. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES CARACTERÍSTICAS

El aceite recepcionado contendrá un 1% de sólidos, un 7% de agua y un 0,5% de ceras. La carga máxima de entrada de aceite al día será de 20.000 kg, la cual servirá para llevar a cabo 4 ciclos en la planta.

Se considerará que la parte cónica tiene un volumen capaz de albergar toda la cantidad de mermas que puedan sedimentar para la máxima carga posible de aceite.

Consideraremos una relación H/D igual a 2, ya que la teoría afirma que las relaciones H/D más adecuadas para tanques que operan a presión atmosférica están entre 1,5 y 3.

En primer lugar, se estima el volumen necesario que debe tener el tanque, para lo que se consideran los volúmenes de las fases mayoritarias por separado.

De los balances de materia se conoce la cantidad de cada componente que entra a la instalación por día:

$$m_{\text{aceite}} = 18.300 \text{ kg/día}$$

$$\rho_{\text{aceite}} = 925 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{\text{agua}} = 1.400 \text{ kg/día}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{\text{sólidos}} = 200 \text{ kg/día}$$

$$\rho_{\text{sólidos}} = 1.500 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{aceite}} = \frac{m_{\text{aceite}}}{\rho_{\text{aceite}}} = \frac{18.300 \text{ kg/día}}{925 \text{ kg/m}^3} = 19,78 \text{ m}^3 / \text{día}$$

$$V_{\text{agua}} = \frac{m_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{1.400 \text{ kg/día}}{1.000 \text{ kg/m}^3} = 1,40 \text{ m}^3 / \text{día}$$

$$V_{\text{sólidos}} = \frac{m_{\text{sólidos}}}{\rho_{\text{sólidos}}} = \frac{200 \text{ kg/día}}{1.500 \text{ kg/m}^3} = 0,133 \text{ m}^3 / \text{día}$$

$$V_{\text{total}} = V_{\text{aceite}} + V_{\text{sólidos}} + V_{\text{agua}} = 21,31 \text{ m}^3$$

Se sobredimensiona el tanque un 20%, para facilitar la operación y por motivos evidentes de seguridad, de manera que el volumen resultante para cada tanque es de 25,57 m³.

Se parte de un cilindro y para calcular su diámetro se despeja H de la relación H/D, sustituyéndolo posteriormente en el volumen. Esto es:

$$\left. \begin{array}{l} V = \pi \frac{D^2}{4} H \\ \frac{H}{D} = 2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} D = \sqrt[3]{\frac{4V}{2\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 25,57}{2 \cdot \pi}} = 2,534 \text{ m} \\ H = 5,068 \text{ m} \end{array}$$

Pero la altura H no será la altura final del tanque, ya que partimos de un cilindro y hay que tener en cuenta la altura perteneciente a la parte cónica inferior; procedemos a calcular la altura del fondo cónico, sobredimensionándolo también un 20% y teniendo en cuenta que poseerá un volumen capaz de contener toda la cantidad de mermas (sólidos + agua) sedimentadas:

$$V_{\text{cono}} = 1,533 \text{ m}^3 \cdot 1,2 = 1,840 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{cono}} = \frac{1}{3} \pi R^2 h_c = \frac{\pi D^2 h_c}{12}; \quad h_c = \frac{12 V_{\text{cono}}}{\pi D^2} = \frac{12 \cdot 1,840}{\pi \cdot 2,534^2} = 1,095 \text{ m}$$

El ángulo de inclinación α de la parte cónica respecto a la horizontal se puede deducir de la siguiente figura:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h_c}{R} = \frac{2h_c}{D} = \frac{2 \cdot 1,095}{2,534} = 0,8642 ;$$

$$\alpha = 40^\circ$$

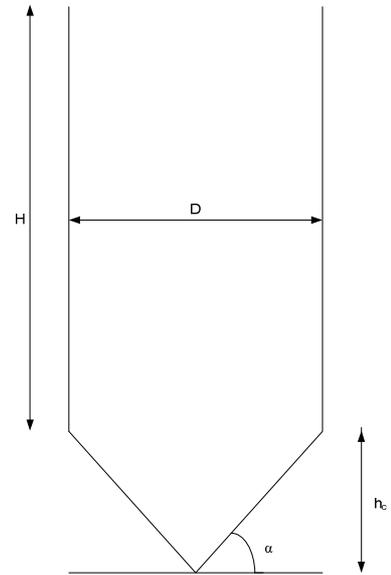


Figura 1.7. Tanque de sedimentación.

Se procede entonces a corregir la altura de la carcasa cilíndrica:

$$V_{\text{total}} = V_{\text{cil}} + V_{\text{cono}} = \frac{\pi D^2 H}{4} + \frac{\pi D^2 h_c}{12} = \frac{3\pi D^2 H + \pi D^2 h_c}{12}$$

$$H = \frac{12V_{\text{total}} - \pi D^2 h_c}{3\pi D^2} = \frac{12 \cdot 25,57 - \pi \cdot 2,534^2 \cdot 1,095}{3 \cdot \pi \cdot 2,534^2} = 4,71 \text{ m}$$

Las dimensiones finales del tanque se resumen en la siguiente tabla:

$V_{\text{total}} (m^3)$	$D (m)$	$H (m)$	$h_c (m)$	$H_T (m)$	α
25,57	2,534	4,71	1,095	5,805	40°

Tabla 1.15. Dimensiones de los tanques de sedimentación.

3.3. CÁLCULO DE ESPESORES

Para el cálculo de espesores se procede del mismo modo en que se hizo para los tanques de almacenamiento.

El material usado es acero al carbono, siendo el sobreespesor de corrosión de 1,5 mm.

La virola tendrá costuras tipo 1, es decir, juntas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies; si se considera que la junta será examinada por zonas, el valor de la eficiencia de soldadura puede obtenerse del gráfico 4.3 del anexo 4, obteniendo $E = 0,85$. El fondo cónico es un cabezal sin costuras, unido a la virola cilíndrica por junta tipo 1, examinada por zonas.

Los datos que nos permiten el cálculo de espesores son los siguientes:

$P =$ Presión de diseño mínima = $3,5 \text{ kg/cm}^2 = 49,77 \text{ psi}$

$R =$ Radio interno = $49,88 \text{ in}$

$S =$ Esfuerzo máximo admisible = 13.800 psi (según Tabla UCS-23, que muestra las tensiones máximas admisibles para cada material a las diferentes temperaturas)

$E =$ Eficiencia de soldadura = $0,85$

$C =$ Sobreespesor de corrosión = $1,5 \text{ mm} = 0,0591 \text{ in}$

$\alpha = 90 - 40 = 50^\circ$

- Casco cilíndrico:

Para esfuerzo longitudinal: $t = \frac{PR_{int}}{2SE + 0,4P} + c$

$$t = \frac{49,77 \cdot 49,88}{2 \cdot 13800 \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 49,77} + 0,0591 = 0,1648 \text{ in} = 4,187 \text{ mm}$$

Para esfuerzo circunferencial: $t = \frac{PR_{int}}{SE - 0,6P} + c$

$$t = \frac{49,77 \cdot 49,88}{13.800 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 49,77} + 0,0591 = 0,2713 \text{ in} = 6,891 \text{ mm}$$

El valor obtenido como mínimo para el espesor de la virola será el mayor de los dos (6,891 mm); el espesor de chapa disponible comercialmente que es inmediatamente superior al obtenido es $t = 7 \text{ mm}$.

Comprobamos ahora que este espesor sea mayor al mínimo que indica la norma:

$$t_{min} = 5 + c \text{ (mm)} = 6,5 \text{ mm}$$

Por tanto, $t = 7 \text{ mm}$ será en espesor final de la envolvente cilíndrica.

- Fondo cónico:

Las expresiones para el cálculo del espesor de un cabezal cónico son:

Para esfuerzo longitudinal: $t = \frac{PD_{int}}{4 \cos \alpha (SE + 0,4P)} + c$

$$t = \frac{49,77 \cdot 99,76}{4 \cdot \cos 50^\circ (13.800 \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 49,77)} + 0,0591 = 0,2234 \text{ in} = 5,674 \text{ mm}$$

Para esfuerzo circunferencial: $t = \frac{PD_{int}}{2 \cos \alpha (SE - 0,6P)} + c$

$$t = \frac{49,77 \cdot 99,76}{2 \cdot \cos 50^\circ (13.800 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 49,77)} + 0,0591 = 0,3892 \text{ in} = 9,886 \text{ mm}$$

El valor obtenido como mínimo para el espesor de la virola será el mayor de los dos (9,886 mm); el espesor de chapa disponible comercialmente que es inmediatamente superior al obtenido es $t = 10 \text{ mm}$.

Comprobamos ahora que este espesor sea mayor al mínimo que indica la norma:

$$t_{\min} = 5 + c \text{ (mm)} = 6,5 \text{ mm}$$

Por tanto, $t = 10 \text{ mm}$ será en espesor final del fondo cónico.

La pestaña o faldilla, deberá tener una altura mínima “h” que deberá ser no menor que el mayor de los siguientes valores:

$$h \geq 0,3 \sqrt{D_o t_f}$$

$$h \geq 3 t_f$$

$$h \geq 25 \text{ mm}$$

con un valor máximo de $h = 100 \text{ mm}$ y, siendo $D_o =$ Diámetro exterior de la carcasa (mm) y $t_f =$ espesor de pared del fondo (mm).

Para los tanques de sedimentación el valor de la altura de la faldilla es $h = 48 \text{ mm}$.

3.4. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA

Para llevar a cabo este cálculo es necesario conocer las propiedades del aceite usado, de las gotas de agua y de las partículas sólidas que se muestran a continuación:

ACEITE USADO (45° C)		GOTAS DE AGUA		PARTÍCULAS SÓLIDAS	
Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (Pa·s)	Densidad (kg/m ³)	Diámetro (m)	Densidad (kg/m ³)	Diámetro (m)
898	0,02	998	2·10 ⁻⁴	1.500	10 ⁻⁴

Tabla 1.16. Propiedades para el cálculo del tiempo de residencia. ^[40]

Se considerará tanto a las gotas de agua como a las partículas sólidas como partículas esféricas rígidas.

El primer paso es conocer en qué régimen de flujo se opera, lo que va a permitir calcular el valor de la velocidad terminal. Para ello se utiliza el número de Galileo:

$$Ga = K^3 = \frac{D_p^3 g \rho (\rho_p - \rho)}{\mu^2}$$

- Si $K < 3,3$ nos encontramos en la región de flujo laminar.
- Si $43,5 < K < 2.364$ estamos en la región de flujo turbulenta.
- Si $3,3 < K < 43,5$ nos encontramos en la región de transición.

- Para las gotas de agua:

$$K = \sqrt[3]{\frac{(2 \cdot 10^{-4})^3 \cdot 9,81 \cdot 898 (998 - 898)}{0,02^2}} = 0,26$$

- Para las partículas sólidas:

$$K = \sqrt[3]{\frac{(10^{-4})^3 \cdot 9,81 \cdot 898(1.500 - 898)}{0,02^2}} = 0,24$$

Estamos, por tanto, en la región de flujo laminar o región de la ley de Stokes, donde la expresión que define la velocidad terminal es:

$$v_t = \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu}$$

- Para las gotas de agua:

$$v_t = \frac{9,81 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2 (998 - 898)}{18 \cdot 0,02} = 1,09 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

- Para las partículas sólidas:

$$v_t = \frac{9,81 \cdot (10^{-4})^2 (1.500 - 898)}{18 \cdot 0,02} = 1,64 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Para conocer el tiempo de residencia necesario para que se produzca la sedimentación de las partículas necesitamos conocer la distancia que deben recorrer dichas partículas, que en este caso será la altura total del tanque de sedimentación (5,805 m):

- Para las gotas de agua:

$$t = \frac{H_T}{v_t} = \frac{5,805}{1,09 \cdot 10^{-4}} = 14,79 \text{ h}$$

- Para las partículas sólidas:

$$t = \frac{H_T}{v_t} = \frac{5,805}{1,64 \cdot 10^{-4}} = 9,83 \text{ h}$$

Los aceites recepcionados permanecen en los tanques de sedimentación unas 20 horas, por lo que se supera el tiempo mínimo calculado para que se produzca la sedimentación tanto de las gotas de agua como de las partículas sólidas.

3.5. DISEÑO DEL SERPENTÍN

3.5.1. Introducción

El serpentín de tubos proporciona uno de los medios más baratos de obtener superficie para transferencia de calor. Generalmente se construyen doblando longitudes variables de tubería para darles forma de espiral; los serpentines que se colocarán en los tanques de sedimentación serán del tipo espiral simple, tal y como el que se muestra en la siguiente figura:

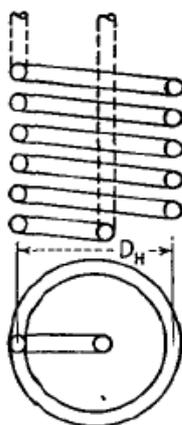


Figura 1.8. Serpentín de espiral simple. ^[15]

Con esta configuración se consigue que el serpentín ocupe el menor espacio posible a lo largo de la sección horizontal del tanque, para no dificultar la sedimentación de las partículas. Dicho serpentín irá colocado en un lateral del casco cilíndrico, a una altura de dos metros aproximadamente de la transición troncocónica.

Por el interior del serpentín circulará vapor saturado a 2,4 bar y una temperatura de 399,09 K.

3.5.2. Cálculo del vapor requerido para calentamiento

Podemos dividir el proceso de calentamiento en dos fases:

- Inicialmente se parte de aceite que se encuentra a temperatura ambiente (25 °C) y para facilitar el proceso de sedimentación, es necesario alcanzar 45 °C, para lo cual se dispone de un aporte de vapor durante un determinado período de tiempo para alcanzar dicha temperatura.
- Una vez alcanzada la temperatura es necesario mantenerla, ya que como consecuencia de las pérdidas de calor dicha temperatura va a tender a disminuir; para lograr mantener la temperatura, será necesario otro aporte de calor mediante vapor a través del serpentín.

a) Cálculo del requerimiento de vapor para alcanzar la temperatura deseada:

Para determinar el calor requerido para alcanzar la temperatura deseada y, como consecuencia, el requerimiento de vapor a través del serpentín, es necesario distinguir:

- Calor requerido para llevar el contenido del tanque a la temperatura deseada (Q_1).
- Calor disipado a los alrededores (Q_2).

Por tanto el calor cedido por el vapor será la suma de estos dos:

$$Q_c = Q_1 + Q_2$$

- Calor requerido para llevar el contenido del tanque a la temperatura deseada (Q_1):

$$Q_1 = \frac{m c_p \Delta T}{t}$$

m: es la masa del contenido del tanque (20.000 kg).

C_p : es la capacidad calorífica del aceite (1.964,6 J/kg·K).

ΔT : es el incremento de temperatura que va a sufrir el contenido del tanque (20 K).

t: es el tiempo durante el cual se va a producir dicho incremento de temperatura; en el apartado anterior se calculó que el tiempo necesario para que sedimenten las partículas sólidas y las gotas de agua es aproximadamente 15 horas; el aceite permanecerá en los tanques de sedimentación durante unas 20 horas, con lo cual puede considerarse que las 5 horas restantes se emplearán para alcanzar la temperatura deseada. Con lo cual este tiempo será igual a 18.000 s (5 horas).

$$Q_1 = \frac{20.000 \cdot 1.964,6 \cdot 20}{18.000} = 43.657,78 \text{ J/s}$$

- Calor disipado a los alrededores (Q_2):

Debido a que el tanque está en contacto con el aire, que se encuentra a temperatura ambiente, es necesario calcular el calor que se pierde durante el proceso de aumento de temperatura hasta el valor deseado. Para ello utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_2 = U A \Delta T$$

U: es el coeficiente global de transmisión de calor desde el tanque al exterior; su valor se ha obtenido del gráfico 4.7 del anexo 4:

$$U = 3,7 \text{ BTU}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}) = 21 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

A: es el área de intercambio de calor, obtenida también del gráfico 4.7:

$$A = 0,22 \cdot A_t + A_b + A_s = 45,19 \text{ m}^2$$

$$A_t = \text{área de la parte superior} = \pi \cdot 1,267^2 = 5,04 \text{ m}^2$$

$$A_b = \text{área del fondo} = \pi \cdot R \cdot \text{generatriz} = \pi \cdot 1,267 \cdot 1,6540 = 6,58 \text{ m}^2$$

$$A_s = \text{área de las paredes} = 2 \cdot \pi \cdot 1,267 \cdot 4,71 = 37,50 \text{ m}^2$$

ΔT : es la diferencia de temperatura entre en aceite y el aire exterior:

$$\bar{T}_{\text{aceite}} = \frac{25 + 45}{2} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} = 308 \text{ K}$$

$$T_{\text{aire}} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C} = 295 \text{ K}$$

$$Q_2 = 21 \cdot 45,19 \cdot (308-295) = 12336,87 \text{ J/s}$$

Por tanto, el calor necesario para alcanzar los 45 °C será:

$$Q_c = Q_1 + Q_2 = 55.994,65 \text{ J/s}$$

Este calor debe ser aportado por el vapor, por tanto el caudal necesario de vapor será:

$$m_v = \frac{Q_c}{\lambda} = \frac{55,99465}{2.185,4} = 0,0256 \text{ kg/s} = 92,16 \text{ kg/h}$$

λ : es el calor latente de vaporización (kJ/kg); haciendo uso del gráfico 4.6 del anexo 4 y teniendo en cuenta que el vapor de agua saturado tiene una presión de 2,4 bar, es posible obtener dicho valor.

b) Cálculo del requerimiento de vapor para el mantenimiento de la temperatura:

El objetivo es mantener la temperatura del tanque en 45 °C, ya que esta temperatura favorecerá el proceso de sedimentación; esto se conseguirá a través del aporte de vapor a través del serpentín, que contrarrestará las pérdidas de calor que se produzcan a través de las paredes del tanque:

$$Q_p = U A \Delta T$$

$$U = 21 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$A = 45,19 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = T_{\text{aceite}} - T_{\text{aire}} = 318 - 295 = 23 \text{ K}$$

$$Q_p = 21 \cdot 45,19 \cdot 23 = 21.826,77 \text{ J/s}$$

Por tanto, el vapor que habrá que aportar continuamente durante la operación de sedimentación será:

$$m_v = \frac{Q_p}{\lambda} = \frac{21,82677}{2.185,4} = 9,988 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 35,96 \text{ kg/h}$$

3.5.3. Cálculo del área del serpentín

Para el cálculo del área de intercambio necesaria para el serpentín se hará uso de la expresión:

$$Q = U A \Delta T_{ML}$$

donde:

Q: es el calor máximo que tiene que aportar el serpentín, que en este caso tendrá lugar durante la fase de calentamiento de la alimentación hasta los 45 °C: $Q = 55.994,65 \text{ J/s}$.

U: es el coeficiente global de transmisión de calor, que se obtiene de la figura 4.8 del anexo gráfico, tomando el valor medio del intervalo correspondiente: $U = 26 \text{ BTU}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}) = 147,64 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

ΔT_{ML} = incremento de temperatura medio logarítmico:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{\text{cal},f} - T_{\text{frío},f}) - (T_{\text{cal},o} - T_{\text{frío},o})}{\text{Ln} \frac{(T_{\text{cal},f} - T_{\text{frío},f})}{(T_{\text{cal},o} - T_{\text{frío},o})}} = \frac{(399,09 - 318) - (399,09 - 298)}{\text{Ln} \frac{(399,09 - 318)}{(399,09 - 298)}} = 90,72 \text{ K}$$

$$A = \frac{Q}{U \Delta T_{ML}} = \frac{55.994,65}{147,64 \cdot 90,72} = 4,18 \text{ m}^2$$

3.6. ACCESORIOS

- Entrada en la parte superior de la carcasa cilíndrica para la conexión roscada con tubería de descarga de aceite.
- Conexión para la salida de aceite, situada a la altura de la unión entre la sección cilíndrica y la sección cónica. Esta salida sirve para evacuar de una manera eficaz el aceite, evitando la presencia de agua y sólidos sedimentados, que quedan en la parte cónica del tanque.
- Salida en el fondo del tanque para evacuar los sedimentos.
- Bomba para la descarga de cisternas de aceite.
- Sensor de temperatura para seguir en todo momento la temperatura del proceso de sedimentación.
- Sensor de nivel.
- 4 soportes constituidos por perfiles IPN.
- Escalera de acceso.
- Boca de hombre de 20 in de diámetro, situada en la zona inferior del tanque.

4. DISEÑO DEL REACTOR

El reactor es la unidad principal de la instalación de pretratamiento y en él se llevará a cabo la esterificación de los ácidos grasos libres presentes en el aceite, hecho que va a provocar que la acidez de dicho aceite disminuya. Como ya se estableció en la memoria descriptiva, se trata de un reactor tipo tanque agitado que opera en discontinuo, es decir, con un régimen de flujo no estacionario.

4.1. CÁLCULO DE DIMENSIONES CARACTERÍSTICAS

El tamaño del reactor será aquel que permita operar con lotes cuyo volumen se ajuste a las cantidades necesarias de reactivos y al tiempo exigido para la conversión requerida de la reacción de esterificación.

Para obtener el tiempo necesario para alcanzar una determinada conversión (tiempo de residencia), se hace uso de la ecuación de diseño deducida en la memoria descriptiva, así como de los parámetros cinéticos del proceso, los cuales han sido analizados en el anexo 2 del presente proyecto. En el citado anexo se concluye que la reacción es de orden 1, con lo cual puede sustituirse la expresión cinética en la ecuación de diseño, quedando de la siguiente manera:

$$(-r_{AGL}) = k \cdot C_{AGL} = k \cdot C_{AGL0} \cdot (1 - X_{AGL})$$

$$t = C_{AGL0} \int_0^{X_{AGL}} \frac{dX_{AGL}}{-r_{AGL}} = C_{AGL0} \int_0^{X_{AGL}} \frac{dX_{AGL}}{k C_{AGL0} (1 - X_{AGL})} = \frac{1}{k} \int_0^{X_{AGL}} \frac{dX_{AGL}}{1 - X_{AGL}}$$

Integrando obtenemos la expresión del tiempo de residencia:

$$t = \frac{1}{k} [-\ln(1 - X_{AGL})]_0^{X_{AGL}} = \frac{1}{k} [-\ln(1 - X_{AGL}) + \ln 1]$$

$$t = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{(1 - X_{AGL})}$$

Conociendo la conversión que se alcanza en el proceso de esterificación (85,7%) y la constante cinética $K = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$, se obtiene el tiempo de reacción:

$$t = \frac{1}{0,014} \ln \frac{1}{(1 - 0,857)} = 138,92 \text{ min}$$

Este tiempo calculado, el cual se aproxima a 140 min, corresponde al tiempo necesario para el tratamiento de un lote.

El volumen del reactor se calculará teniendo en cuenta las cantidades de reactivos que son necesarias para cada lote, las cuales se muestran a continuación:

REACTIVO	kg/lote
Triglicéridos	4.237,83
Ác. grasos libres	320,37
Metanol	735,96
Ácido sulfúrico	15,99

Tabla 1.17. Cantidades iniciales de reactivos.

El volumen ocupado por estas cantidades se calcula a través de sus respectivas densidades:

REACTIVO	DENSIDAD kg/l (25 °C)
Aceite usado (50% oliva,50% girasol)	0,925
Metanol	0,792
Ácido sulfúrico	1,8

Tabla 1.18. Densidades de reactivos.

REACTIVO	VOLUMEN (l)
Aceite usado (50% oliva,50% girasol)	4.927,78
Metanol	929,24
Ácido sulfúrico	8,88
Volumen total	5.865,9

Tabla 1.19. Volumen de reactivos y volumen total por lote.

Tomamos el criterio de diseño según el cual el volumen del reactor V_r se calcula en función del volumen de trabajo V_w (volumen ocupado por la fase líquida); según dicho criterio V_w es el 80% de V_r :

$$V_w = 0,8 \cdot V_r; \quad V_r = \frac{V_w}{0,8} = \frac{5.865,9}{0,8} = 7.332,38 \text{ l} = 7,3324 \text{ m}^3$$

Las restantes dimensiones que se van a calcular son D_r (diámetro del reactor), H_L (altura del líquido dentro del reactor) y H_r (altura del reactor). Para ello se va a hacer uso de los datos de volumen calculados anteriormente y se va a considerar que se cumple la relación $H_L/D_r = 1$, es decir, que la altura de la fase líquida es aproximadamente igual al diámetro del tanque.

$$V_r = \pi R_r^2 H_r \quad V_{\text{líquido}} = \pi \frac{D_r^2}{4} H_L = \pi \frac{D_r^3}{4}$$

$$H_L = D_r = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{líquido}}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 5,8659}{\pi}} = 1,9547 \text{ m}$$

$$H_r = \frac{V_r}{\pi R_r^2} = \frac{7,3324}{\pi \cdot 0,9774^2} = 2,4432 \text{ m}$$

Por otro lado, el fondo del reactor no debe ser plano, para eliminar esquinas o regiones en las que no circularía el fluido. Por tanto, el reactor contará con cabezales semielípticos de fondo y tapa, por lo que la altura del

casco cilíndrico deberá ser recalculada; para los cabezales semielípticos puede calcularse su volumen con la siguiente fórmula:

$$V_{cab} = 0,13 D_{int}^3 = 0,13 \cdot 1,9547^3 = 0,9709 \text{ m}^3$$

Corregimos entonces el volumen y la altura del casco cilíndrico:

$$V_{cil} = V_r - 2 V_{cab} = 7,3324 - 2 \cdot 0,9709 = 5,3906 \text{ m}^3$$

$$V_{cil} = \pi R_{cil}^2 H_{cil} ; \quad H_{cil} = \frac{V_{cil}}{\pi R_{cil}^2} = \frac{5,3906}{\pi \cdot 0,9774^2} = 1,7961 \text{ m}$$

En la siguiente tabla se resumen las dimensiones del reactor:

$H_{cil}(m)$	$D_r(m)$	$H_{cab}(m)$	$H_r(m)$	$V_{cab}(m^3)$	$V_{cil}(m^3)$	$V_r(m^3)$
1,796	1,955	0,489	2,774	0,971	5,391	7,333

Tabla 1.20. Dimensiones características del reactor.

4.2. CÁLCULO DE ESPESORES

Para el cálculo de espesores se va a seguir el código ASME sección VIII división 1, en el que se indican los métodos de diseño y cálculo, así como los requisitos mínimos exigidos a los materiales, detalles constructivos y pruebas que deben satisfacer los recipientes a presión.

a) Espesor mínimo de la carcasa

Las ecuaciones que permiten el cálculo del espesor mínimo (t) para la carcasa cilíndrica son:

$$\text{Para esfuerzo longitudinal: } t = \frac{PR_{int}}{2SE - 0,4P} + c$$

$$\text{Para esfuerzo circunferencial: } t = \frac{PR_{int}}{SE - 0,6P} + c$$

El material usado tanto para el tanque como para sus accesorios es acero inoxidable SS-316, material con alta resistencia a la corrosión, por lo que el sobreespesor de corrosión en este caso será 0. Además se trata de una carcasa fabricada de una sola pieza, sin juntas, por lo que la eficiencia de soldadura será igual a 1.

Se detallan a continuación los valores de los parámetros presentes en las ecuaciones:

P = Presión de diseño mínima = 3,5 kg/cm² = 49,77 psi

R = Radio interno = 38,48 in

S = Esfuerzo máximo admisible = 18.800 psi (según Tabla UCS-23, que muestra las tensiones máximas admisibles para cada material a las diferentes temperaturas)

E = Eficiencia de soldadura = 1

C = Sobreespesor de corrosión = 0 in

Por tanto:

Para esfuerzo longitudinal:

$$t = \frac{49,77 \cdot 38,48}{2 \cdot 18.800 - 0,4 \cdot 49,77} = 0,0510 \text{ in} = 1,294 \text{ mm}$$

Para esfuerzo circunferencial:

$$t = \frac{49,77 \cdot 38,48}{18.800 - 0,6 \cdot 49,77} = 0,1020 \text{ in} = 2,591 \text{ mm}$$

El valor obtenido como mínimo para el espesor de la virola será el mayor de los dos (2,591 mm); el espesor de chapa disponible comercialmente que es inmediatamente superior al obtenido es $t = 3 \text{ mm}$, que a su vez es el menor espesor que indica la norma para este tipo de material.

b) Espesor mínimo de cabezales:

El fondo y la tapa son cabezales semielípticos, construidos con el mismo material que el casco y soldados a tope con la carcasa cilíndrica mediante doble cordón de soldadura.

La ecuación que nos permite el cálculo del espesor mínimo (t) para los cabezales es:

$$t_f = \frac{PD_{int}}{2SE - 0,2P} + c = \frac{49,77 \cdot 76,97}{2 \cdot 18.800 - 0,2 \cdot 49,77} = 0,1019 \text{ in} = 2,588 \text{ mm}$$

Se toma, por tanto, el espesor $t = 3 \text{ mm}$, que es el inmediatamente superior disponible comercialmente.

La pestaña o faldilla, deberá tener una altura mínima “h” que deberá ser no menor que el mayor de los siguientes valores:

$$h \geq 0,3 \sqrt{D_o} t_f$$

$$h \geq 3 t_f$$

$$h \geq 25 \text{ mm}$$

con un valor máximo de $h = 100 \text{ mm}$; siendo $D_o =$ Diámetro exterior de la carcasa (mm) y $t_f =$ espesor de pared del fondo (mm).

Para este caso la altura de la pestaña es $h = 25 \text{ mm}$, ya que constituye el mayor de los valores.

4.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN

Para el diseño de un agitador de turbina, tal y como el que se muestra en la Figura 1.9, las proporciones típicas son:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{10} \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$$

$$\frac{E}{D_a} = 1$$

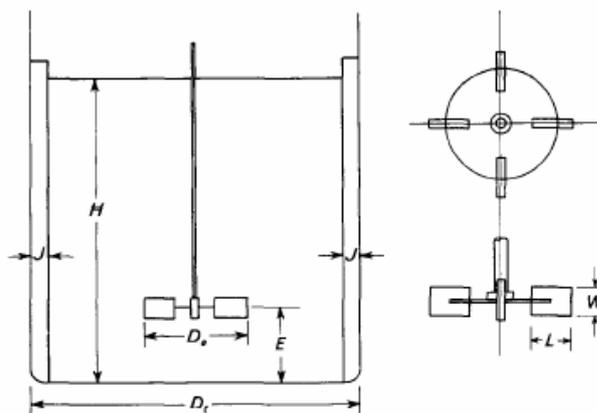


Figura 1.9. Medidas de un agitador de turbina. [13]

El número de placas deflectoras es generalmente de 4; el número de palas del agitador varía entre 4 y 16, pero generalmente es de 6 u 8. Situaciones especiales pueden, por supuesto, aconsejar proporciones diferentes de las que se acaban de indicar, pero las proporciones estándar antes relacionadas son ampliamente aceptadas y en ellas se basan muchas de las correlaciones publicadas sobre el funcionamiento de agitadores.

A continuación se indican las variables estándar que se han elegido para el sistema de agitación, así como sus dimensiones características:

Número de placas deflectoras = 4

Número de palas de la turbina = 6

D_a = diámetro del rodete = $1/3 \cdot D_t = 1/3 \cdot 1,955 = 0,652$ m

J = anchura de las placas deflectoras = $1/10 \cdot D_t = 1/10 \cdot 1,955 = 0,196$ m

E = altura del rodete sobre el fondo del tanque = $D_a = 0,652$ m

L = longitud de las espas del rodete = $1/4 \cdot D_a = 1/4 \cdot 0,652 = 0,163$ m

W = anchura de las espas del rodete = $1/5 \cdot D_a = 1/5 \cdot 0,652 = 0,130$ m

4.4. CONSUMO DE POTENCIA

Un importante factor en el diseño de un tanque agitado es la potencia que se requiere para mover el rodete, y en este apartado se procederá a su cálculo.

Para estimar la potencia que se requiere para hacer girar un rodete dado con una velocidad determinada, es preciso disponer de correlaciones empíricas de la potencia (o del número de potencia) en función de otras variables del sistema. La forma de tales correlaciones puede encontrarse por análisis dimensional, en función de las medidas importantes del tanque y del rodete, la distancia del rodete al fondo del tanque, la profundidad del líquido, así como las dimensiones de las placas deflectoras cuando se utilizan. También deben de estar fijados el número y disposición de las placas deflectoras, así como el número de palas del rodete.

Las variables que intervienen en el análisis son las medidas importantes del tanque y del rodete, la viscosidad (μ) y la densidad (ρ) del líquido y la velocidad de giro (n). Por otra parte, salvo que se tomen precauciones para evitarlo, se formará un vórtice en la superficie del líquido; algo de líquido se elevará por encima del nivel medio de la superficie del líquido, correspondiente al tanque no agitado, y esta elevación tiene que vencer la fuerza de la gravedad. Por tanto, hay que introducir la aceleración de la gravedad (g) como un factor en el análisis.

Cuando se supone que el líquido es newtoniano, la potencia (P) es una función de las restantes variables, o sea:

$$P = \psi (n, D_a, \mu, g, \rho)$$

Aplicando el método del análisis dimensional se obtiene:

$$\frac{P g_c}{n^3 D_a^5 \rho} = \psi \left(\frac{n D_a^2 \rho}{\mu}, \frac{n^2 D_a}{g} \right)$$

donde:

$$\frac{P g_c}{n^3 D_a^5 \rho} = N_p = \text{Número de potencia}$$

$$\frac{n D_a^2 \rho}{\mu} = N_{Re} = \text{Número de Reynolds}$$

$$\frac{n^2 D_a}{g} = N_{Fr} = \text{Número de Froude}$$

El número de potencia, N_p , es análogo a un factor de fricción o a un coeficiente de rozamiento. Es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del rodete y la fuerza inercial. La fuerza inercial, a su vez, está relacionada con el flujo de cantidad de movimiento correspondiente al movimiento global del fluido.

El número de Froude, N_{Fr} , es una medida de la relación entre la fuerza inercial y la fuerza gravitacional por unidad de área que actúa sobre el fluido. Interviene en situaciones fluidodinámicas donde hay un movimiento de olas significativo sobre la superficie del líquido. Por tanto, el número de Froude no intervendrá cuando se usen placas deflectoras o cuando $N_{Re} < 300$.

Cuando el número de Froude no interviene, la potencia comunicada al líquido se calcula con la ecuación:

$$P = N_p n^3 D_a^5 \rho$$

En tanques con placas deflectoras, para números de Reynolds superiores a aproximadamente 10.000, el número de potencia es independiente del número de Reynolds y la viscosidad ya no influye. En

este intervalo el flujo es totalmente turbulento y resulta que $N_p = K_T$, por tanto:

$$P = K_T n^3 D_a^5 \rho$$

siendo K_T una constante característica para cada tipo de impulsor.

Procedemos entonces al cálculo de la potencia requerida; en primer lugar se calcula el número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{n D_a^2 \rho}{\mu} = 68.135$$

$$n = 200 \text{ rpm} = 3,33 \text{ s}^{-1}$$

$$D_a = 0,652 \text{ m}$$

$$\rho = 880,81 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,0183 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

La viscosidad y la densidad del fluido están calculadas a partir de una media ponderada de las viscosidades y densidades de cada reactante a la temperatura de operación.

Se cumple que el número de Reynolds es mayor a 10.000 y se usan placas deflectoras, por lo que $N_p = K_T$. El gráfico 4.4 que se muestra en el anexo gráfico, permite conocer el valor del número de potencia, que para el tipo de impulsor elegido está entre 1,30-1,40 (turbina de palas inclinadas con 4 placas deflectoras).

La potencia suministrada al líquido se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P = K_T n^3 D_a^5 \rho = 1,35 \cdot 3,33^3 \cdot 0,652^5 \cdot 880,81 = 5.173,53 \text{ W} = 7,03 \text{ CV}$$

4.5. BALANCE DE ENERGÍA

La resolución del balance de energía en el reactor permite conocer el calor que es necesario aportar o retirar del sistema para mantener el régimen isotérmico en el mismo.

El balance general de energía en un reactor se expresa de la siguiente manera:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Entrada de} \\ \text{energía} \\ \text{calorífica} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Salida de} \\ \text{energía} \\ \text{calorífica} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{acumulada} \end{array} \right) \pm \left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{calorífica} \\ \text{genera / desap.} \\ \text{por reacción} \end{array} \right) \pm \left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{intercambiada} \\ \text{con alrededores} \end{array} \right)$$

Al tratarse de un reactor discontinuo se eliminan los términos de entrada y salida, quedando:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{acumulada} \end{array} \right) = \pm \left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{calorífica} \\ \text{genera / desap.} \\ \text{por reacción} \end{array} \right) \pm \left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{intercambiada} \\ \text{con alrededores} \end{array} \right)$$

$$m_T \overline{C_P} \frac{dT}{dt} = (-\Delta H_r)(-r_{AGL})V + U A_{TC} (T_{mf} - T)$$

En el caso de un reactor discontinuo isotérmico la temperatura se mantiene constante a lo largo del tiempo, quedando la ecuación general del balance de la siguiente forma:

$$(-\Delta H_r)(-r_{AGL})V = U A_{TC} (T - T_{mf})$$

donde:

- ΔH_r : entalpía de reacción (kJ/mol)
- U : coeficiente global de transmisión de calor (W/m² K)

- A_{TC} : área de transmisión de calor (m^2)
- T : temperatura de reacción (K)
- T_{mf} : temperatura del fluido refrigerante (K)

Del balance de materia se obtuvo que: $(-r_{AGL})V = N_{AGL0} \frac{dX_{AGL}}{dt}$

Sustituyendo esta ecuación en la expresión anterior se obtiene la secuencia temporal del fluido de intercambio para llevar a cabo la operación isoterma.

$$T_{mf} = T - \frac{(-\Delta H_r) N_{AGL0}}{U A_{TC}} \frac{dX_{AGL}}{dt}$$

La cantidad total de calor que es necesario intercambiar se calculará como:

$$\frac{dQ}{dt} = U A_{TC} (T_{mf} - T)$$

$$Q = \int_0^t U A_{TC} (T_{mf} - T) dt = - \int_0^{X_{AGL}} (-\Delta H_r) N_{AGL0} dX_{AGL} = -(-\Delta H_r) N_{AGL0} X_{AGL}$$

El cálculo de la entalpía de reacción se hace a partir de las entalpías de formación; cabe destacar que para los ácidos grasos libres se toma como referencia el ácido oleico y para los ésteres metílicos el oleato de metilo.

COMPUESTO	ΔH_f^0 (kJ/mol)
Ácido oleico	- 815,21
Metanol	-238,7
Oleato de metilo	-727,64
Agua	-285,83

Tabla 1.21. Entalpías de formación estándar.

La entalpía estándar de reacción depende de las entalpías de formación de los reactivos y productos que intervienen en la reacción, así como de sus coeficientes estequiométricos:

$$\Delta H_r^0 = \sum_{\text{prod}} \nu_i (\Delta H_f^0)_i - \sum_{\text{react}} \nu_i (\Delta H_f^0)_i$$

Sustituyendo los valores de las entalpías de formación, se comprueba que la reacción de esterificación es ligeramente endotérmica:

$$\Delta H_r^0 = (-727,64) + (-285,83) - (-815,21) - (-238,7) = 40,44 \text{ kJ/mol}$$

$$Q = -(-\Delta H_r) N_{\text{AGL0}} X_{\text{AGL}} = 40,44 \cdot 1.150 \cdot 0,857 = 39.855,64 \text{ kJ/lote}$$

Para conocer el calor total puesto en juego en la reacción, al valor anterior habrá que sumarle los calores sensibles por lote procesado, para lo cual se hará uso de los calores específicos:

COMPUESTO	ESTADO DE REFERENCIA	C_p (J/mol·K)	ENTRADA kmol/lote	SALIDA kmol/lote
Ácido oleico	25 °C, 1 atm	533,26	1,15	0,164
Metanol	25 °C, 1 atm	80,814	22,97	21,96
Oleato de metilo	25 °C, 1 atm	612,2		0,984
Agua	25 °C, 1 atm	75,24		0,984

Tabla 1.22. Calores específicos y kmol/lote procesado.

Reactivos (25 °C → 60 °C):

$$\Delta H_r^i = \Delta T \sum n_i C_{p_i} = (333 - 298) [(1.150 \cdot 533,26) + (22.970 \cdot 80,814)] = 86.434,13 \text{ kJ/lote}$$

Productos (25 °C → 60 °C):

$$\Delta H_p = \Delta T \sum n_i C_{p_i} = (333 - 298) [(164 \cdot 533,26) + (21.960 \cdot 80,814) + (984 \cdot 612,2) + (984 \cdot 75,24)] = 88.849,986 \text{ kJ/lote}$$

El balance global queda por tanto de la siguiente manera:

$$Q_T = \Delta H_p - \Delta H_r + Q = 42.271,496 \text{ kJ/lote}$$

Las pérdidas de calor durante el período de operación se consideran despreciables, ya que las paredes del reactor están rodeadas por un material aislante.

Es necesario aportar 42.272 kJ aproximadamente durante el tiempo en el que transcurre la reacción, que son 140 min, por lo que el flujo de calor deberá ser igual a 5.032,38 J/s.

4.6. DISEÑO DEL SERPENTÍN PARA EL REACTOR

4.6.1. Introducción

El serpentín que se colocará el reactor será del tipo espiral plano, tal y como el que se muestra en la siguiente figura:

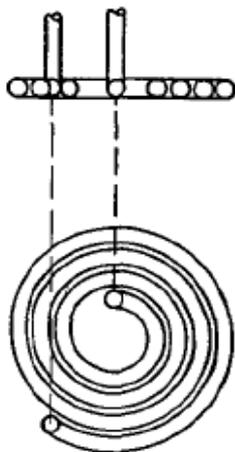


Figura 1.11. Serpentín de espiral plano. ^[15]

Puesto que dicho serpentín irá situado entre el fondo del reactor y el agitador, con esta configuración se consigue que el serpentín ocupe el menor espacio posible verticalmente.

Por el interior del serpentín circulará vapor saturado a 2,4 bar y una temperatura de 399,09 K.

4.6.2. Cálculo del vapor requerido para calentamiento

Podemos dividir el proceso de calentamiento en dos fases:

- Inicialmente se parte de aceite que se encuentra a una temperatura de 30 °C y el objetivo es alcanzar la temperatura de reacción (60 °C), para lo cual se dispone de un aporte de vapor durante un determinado período de tiempo para alcanzar dicha temperatura.

- Una vez alcanzada la temperatura es necesario mantenerla, ya que como consecuencia de la absorción de calor por parte de la mezcla de reacción, dicha temperatura va a tender a disminuir; para lograr mantener la temperatura, será necesario otro aporte de calor mediante vapor a través del serpentín.

a) Cálculo del requerimiento de vapor para alcanzar la temperatura de reacción:

Las pérdidas de calor a través de las paredes del reactor se consideran despreciables.

Por tanto, el calor requerido para llevar el contenido del tanque a la temperatura deseada (Q_1) es:

$$Q_1 = \frac{m c_p \Delta T}{t}$$

m: es la masa de la mezcla de reacción (5.310,15 kg).

C_p : es la capacidad calorífica media de la mezcla de reacción (2.040,20 J/kg·K).

ΔT : es el incremento de temperatura que va a sufrir el contenido del reactor (30 K).

t: es el tiempo durante el cual se va a producir dicho incremento de temperatura; tomaremos un tiempo para el calentamiento de 40 minutos.

$$Q_1 = \frac{5.310,15 \cdot 2.040,2 \cdot 30}{2.400} = 135.422,10 \text{ J/s}$$

Este calor debe ser aportado por el vapor, por tanto el caudal necesario de vapor será:

$$m_v = \frac{Q_1}{\lambda} = \frac{135,4221}{2.185,4} = 0,0620 \text{ kg/s} = 223,2 \text{ kg/h}$$

λ : es el calor latente de vaporización (kJ/kg); haciendo uso del gráfico 4.6 del anexo 4 y teniendo en cuenta que el vapor de agua saturado tiene una presión de 2,4 bar, podemos obtener dicho valor.

b) Cálculo del requerimiento de vapor para el mantenimiento de la temperatura:

Del balance de energía que se realizó en el apartado anterior al reactor se obtuvo que es necesario aportar 5.032,38 J/s para mantener la operación isotérmica.

Por tanto, el caudal de vapor que habrá que aportar será:

$$m_v = \frac{Q_p}{\lambda} = \frac{5,03238}{2.185,4} = 2,3027 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 8,29 \text{ kg/h}$$

4.6.3. Cálculo del área del serpentín

Para el cálculo del área de intercambio necesaria para el serpentín se hará uso de la expresión:

$$Q = U A \Delta T_{ML}$$

donde:

Q: es el calor máximo que tiene que aportar el serpentín, que en este caso tendrá lugar durante la fase de calentamiento de la mezcla de reacción hasta los 60 °C: $Q = 135.422,10 \text{ J/s}$.

U: es el coeficiente global de transmisión de calor, que se obtiene de la figura 4.8 del anexo gráfico, tomando el valor medio del intervalo correspondiente: $U = 55,5 \text{ BTU}/(\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}) = 315,15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

ΔT_{ML} = incremento de temperatura medio logarítmico:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{cal,f} - T_{frio,f}) - (T_{cal,o} - T_{frio,o})}{\ln \frac{(T_{cal,f} - T_{frio,f})}{(T_{cal,o} - T_{frio,o})}} = \frac{(399,09 - 333) - (399,09 - 303)}{\ln \frac{(399,09 - 333)}{(399,09 - 303)}} = 80,15 \text{ K}$$

$$A = \frac{Q}{U \Delta T_{ML}} = \frac{135.422,10}{315,15 \cdot 80,15} = 5,36 \text{ m}^2$$

4.7. ACCESORIOS

Tal y como se ha indicado anteriormente, el reactor será de acero inoxidable, con un espesor de 3 mm, tanto en la carcasa cilíndrica como en tapa y fondo.

A continuación se citan los principales elementos y accesorios:

- Entrada superior para tubería de acero inoxidable, a través de la cual se alimentará el aceite al reactor.
- Entrada lateral para tubería de acero al carbono, que viene directamente del tanque de metanol y permitirá el suministro de éste para llevar a cabo la esterificación.
- Entrada lateral para tubería de acero inoxidable, para la entrada de ácido sulfúrico, catalizador de la reacción.
- Boca de descarga de productos mediante una tubería de acero inoxidable.
- Recubrimiento de material aislante.
- Células de carga que permiten medir el peso de aceite que se adiciona al reactor.
- Sonda PT 100.
- Unidad de venteo.
- Boca de hombre superior de 20 in de diámetro.
- Escalera de acceso.
- 4 patas de apoyos constituidas por perfiles IPN.

5. CÁLCULO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este punto del proyecto se va a realizar el diseño de las tuberías, el cual consistirá en la selección del material de construcción, el diámetro y el espesor de las mismas, así como la caída de presión que va a experimentar el fluido a lo largo de éstas. Para ello seguiremos el código para tuberías a presión ANSI B31.

La adecuada elección del tipo de tuberías a utilizar depende de los siguientes factores:

- Esfuerzo a las temperaturas de trabajo.
- Tiempo de vida útil.
- Períodos de mantenimiento.
- Facilidad de instalación y reparación.
- Adecuada resistencia a la corrosión y erosión.
- Coste de los equipos.

La instalación consta de las siguientes líneas principales de conducción de fluidos:

- Tubería de descarga de aceite de los tanques de sedimentación hasta la centrífuga, de acero al carbono SA-53 grado B.
- Tubería de alimentación de aceite al reactor de esterificación, de acero inoxidable SS-304.
- Tubería de alimentación de metanol al reactor de esterificación, de acero al carbono SA-53 grado B.
- Tubería de alimentación de ácido sulfúrico al reactor de esterificación, de acero inoxidable SS-304, con recubrimiento interno contra la corrosión.

- Tubería de descarga del reactor de esterificación hasta la centrífuga, de acero inoxidable SS-304.
- Tubería para el trasiego de la fase orgánica hasta el reactor principal de transesterificación, de acero inoxidable SS-304.
- Tubería para el trasiego de la fase acuosa hasta la unidad de recuperación de metanol y posterior purificación de biodiésel, de acero inoxidable SS-304.

5.2. CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE CADA LÍNEA

La sistemática seguida de una manera práctica para la determinación del diámetro de una tubería es establecer dicho diámetro inicialmente en función del caudal del fluido que por ella ha de circular y de la elección de una velocidad del fluido, que se estima, generalmente, en base a valores que aparecen tabulados en la bibliografía (gráfico 4.9 del anexo gráfico). No obstante, una vez establecido el diámetro será necesario comprobar la aceptabilidad del mismo estudiando que la pérdida de carga que se producirá en el sistema es aceptable y que no se presentarán problemas mecánicos debido a ello.

La ecuación básica para el cálculo del diámetro es:

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = v(\text{m/s}) \cdot S(\text{m}^2) = v \cdot \pi \frac{D^2}{4}$$

de donde:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

Naturalmente, éste es el diámetro teórico calculado, que normalmente no coincidirá con un diámetro comercial (nominal) y será necesario elegir, desde un punto de vista práctico, el diámetro comercial inmediatamente superior (gráfico 4.10 del anexo gráfico).

LÍNEA	Q (m³/s)	D_{calc}		DN (in)
		(m)	(in)	
Tanque sedimentación-centrífuga	5,577·10 ⁻⁴	0,0218	0,857	1
Centrífuga-reactor	8,243·10 ⁻³	0,0836	3,291	3
Depósito metanol-reactor	1,549·10 ⁻³	0,0444	1,748	2
Depósito sulfúrico-reactor	1,481·10 ⁻⁵	3,96·10 ⁻³	0,156	1/8
Reactor-centrífuga final	9,858·10 ⁻³	0,1120	4,409	4
Centrífuga final-reactor ppal transesterificación	7,718·10 ⁻³	0,0991	3,902	4
Centrífuga final-línea recuperación/purificación	2,044·10 ⁻³	0,0510	2,008	2

Tabla 1.23. Diámetros calculados para tuberías.

5.3. CÁLCULO DE ESPEORES DE TUBERÍA

El cálculo del espesor de pared se realiza como se indica a continuación; la fórmula que debe ser utilizada para todos los cálculos de diseño es:

$$t = \frac{PD_0}{2(SE + PY)}$$

Teniendo en cuenta el sobreespesor de corrosión y la tolerancia de fabricación, el espesor mínimo resulta:

$$t_m = \left(\frac{PD_0}{2(SE + PY)} + C \right) M$$

siendo:

t_m : espesor mínimo de la tubería (in).

P: presión interna de diseño (psi).

D_0 : diámetro externo de la tubería (in).

S: tensión máxima admisible del material a la temperatura de diseño (psi).

E: es el factor de eficiencia de la soldadura; para tubo sin costura se toma $E = 1$.

Y: es un coeficiente que depende del material de la tubería y de la temperatura; para aceros su valor es de 0,4 hasta temperaturas de 900 °F.

M: tolerancia de fabricación; para el caso de tuberías de acero el valor usualmente admitido es 12,5%.

C: sobreespesor de corrosión; en general, el sobreespesor para corrosión normal se estimará de la siguiente manera:

- Acero al carbono: 1,5 - 3 mm.

- Acero inoxidable 0,8 – 1,5 mm.

De los dos valores posibles que se indican para el sobreespesor de corrosión, el menor corresponde al caso usual de condiciones poco severas y el mayor corresponde al caso en que se está cerca de la velocidad de corrosión máxima admisible para el material.

LÍNEA	P (psi)	DN (in)	D_o (in)	SE (psi)^[11]
Tanque sedimentación-centrífuga	50	1	1,315	17.100
Centrífuga-reactor	50	3	3,5	18.800
Depósito metanol-reactor	50	2	2,375	17.100
Depósito sulfúrico-reactor	50	1/8	0,405	18.800
Reactor-centrífuga final	50	4	4,5	16.100
Centrífuga final-reactor principal transesterificac.	50	4	4,5	18.800
Centrífuga final-línea recuperación/purificación	50	2	2,375	18.800

Tabla 1.24. Datos para el cálculo del espesor mínimo de tubería.

Una vez calculado el espesor mínimo se consulta la tabla (gráfico 4.10 del anexo gráfico) y se estima el *schedule* para cada tubería, el cual nos va a aportar el espesor final; el *schedule* es una denominación comercial del espesor con el objeto de unificar las dimensiones de tuberías; a partir de este último queda designado el diámetro interior, pudiendo calcular de este modo la velocidad real que tendrá el fluido en el interior del tubo.

LÍNEA	t_m		Sch	t_{final}		d_{int}		v (m/s)
	(in)	(mm)		(in)	(mm)	(in)	(m)	
Tanque sediment.-centrífuga	0,069	1,75	10S	0,109	2,77	1,097	0,0279	0,91
Centrífuga-reactor	0,041	1,04	5S	0,083	2,11	3,334	0,0847	1,46
Depósito metanol-reactor	0,070	1,78	10S	0,109	2,77	2,157	0,0548	0,66
Depósito sulfúrico-reactor	0,067	1,70	80S	0,095	2,41	0,215	$5,5 \cdot 10^{-3}$	0,63
Reactor-centrífuga final	0,043	1,09	5S	0,083	2,11	4,334	0,1101	1,04
Centrífuga final-react. ppal transest.	0,042	1,07	5S	0,083	2,11	4,334	0,1101	0,81
Centrífuga final-línea recuperac./purific.	0,039	0,99	5S	0,065	1,65	2,245	0,0570	0,80

Tabla 1.25. Características de cada línea de tubería.

5.4. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA

Las pérdidas de energía mecánica debidas a la fricción del fluido a su paso a través de la tubería se calculan mediante la ecuación de Fanning:

$$h_f = (4f) \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} =$$

donde:

- 4f: es el factor de fricción de Darcy.
- L: es la longitud de la tubería (m).
- D: es el diámetro interior de la tubería (m).
- v: es la velocidad del fluido (m/s).
- g: es la aceleración de la gravedad (m/s²).

El factor de fricción de Darcy se calcula mediante el gráfico 4.11 del anexo 4, en función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la tubería, que depende del material de construcción y se estima empleando el gráfico 4.12 del anexo citado anteriormente.

Para poder determinar la caída de presión debida a la presencia de accesorios en la tubería tales como válvulas, codos, ensanchamientos bruscos, reducciones bruscas, etc... se emplea el concepto de longitud equivalente. Dicha longitud equivalente hace referencia a la longitud de tubería recta de igual diámetro que el accesorio, que produciría una pérdida de carga igual a la del accesorio. De esta manera se considera al accesorio como si fuera un tramo de tubería, siendo la expresión a utilizar la siguiente:

$$h_f = (4f) \frac{L_{eq}}{D} \frac{v^2}{2g}$$

La longitud equivalente se calcula mediante el nomograma del gráfico 4.13 del anexo gráfico, a partir del diámetro interior de la tubería.

Por tanto, en un sistema con distintos accesorios las pérdidas globales vendrán dadas por la siguiente expresión:

$$h_f = h_{f,\text{conducción}} + \sum h_{f,\text{accesorios}} = (4f) \frac{L + \sum L_{\text{eq}}}{D} \frac{v^2}{2g}$$

El procedimiento para calcular la pérdida de carga en cada línea de tubería de la instalación es el siguiente:

- A partir del nomograma (Gráfico 4.13), conocido el diámetro interior, el número y tipo de accesorios de cada tramo de tubería se determina la longitud equivalente de cada accesorio.
- Se determina la longitud total, que será la suma de la longitud de la tubería y de la longitud equivalente de todos los accesorios.
- Determinación del número de Reynolds.
- Conocidos el material y el diámetro de la tubería y haciendo uso del gráfico 4.12 se determina la rugosidad relativa.
- Haciendo uso de la gráfica de Moody (gráfico 4.11) se estimará el factor de fricción de Darcy (4f).
- Al disponer del valor del factor de fricción y de la longitud total, se calcula la pérdida de presión por fricción debido al paso del fluido por la tubería.

TANQUE SEDIMENTACIÓN-CENTRÍFUGA		LONGITUD EQUIVALENTE (m)	
Accesorio	Unidades	Unidad	Total
Codo 90° curvatura media	2	2	4
Codo 90° curvatura pequeña	2	3	6
Válvula de bola	1	2,5·d	0,2
Válvula de retención	1	7	7
Tubería (m)		10	
Total (m)		27,2	

CENTRÍFUGA-REACTOR		LONGITUD EQUIVALENTE (m)	
Accesorio	Unidades	Unidad	Total
Codo 90° curvatura media	4	2	8
Codo 90° curvatura pequeña	1	3	3
Válvula de bola	1	2,5·d	0,2
Válvula de retención	1	7	7
Conexión en T	1	6	6
Tubería (m)		25	
Total (m)		49,2	

DEPÓSITO METANOL-REACTOR		LONGITUD EQUIVALENTE (m)	
Accesorio	Unidades	Unidad	Total
Codo 90° curvatura pequeña	4	1,8	7,2
Válvula de bola	1	2,5·d	0,1
Válvula de retención	1	4,2	4,2
Tubería (m)		15	
Total (m)		26,5	

DEPÓSITO SULFÚRICO-REACTOR		LONGITUD EQUIVALENTE (m)	
Accesorio	Unidades	Unidad	Total
Codo 90° curvatura pequeña	4	0,4	1,6
Válvula de bola	1	2,5·d	0,01
Tubería (m)		15	
Total (m)		16,6	

REACTOR-CENTRÍFUGA FINAL		LONGITUD EQUIVALENTE (m)	
Accesorio	Unidades	Unidad	Total
Codo 90° curvatura media	1	3	3
Codo 90° curvatura pequeña	3	3,7	11,1
Válvula de bola	1	2,5·d	0,3
Válvula de retención	1	8	8
Tubería (m)		10	
Total (m)		32,4	

CENTRÍFUGA FINAL-REACTOR PRINCIPAL TRANSESTERIFICACIÓN		LONGITUD EQUIVALENTE (m)	
Accesorio	Unidades	Unidad	Total
Codo 90° curvatura media	4	3	12
Válvula de bola	1	2,5·d	0,3
Válvula de retención	1	8	8
Tubería (m)		16	
Total (m)		36,3	

CENTRÍFUGA FINAL-LÍNEA RECUPERACIÓN/PURIFICACIÓN		LONGITUD EQUIVALENTE (m)	
Accesorio	Unidades	Unidad	Total
Codo 90° curvatura media	5	1,5	7,5
Válvula de bola	1	2,5·d	0,1
Válvula de retención	1	4,8	4,8
Tubería (m)		18	
Total (m)		30,4	

Tabla 1.26. Longitudes equivalentes de los accesorios de cada tramo de tubería.

Línea	DN (in)	D_{int} (m)	v (m/s)	L_{total} (m)	Re	ϵ/D	4f	h_f (m)
Tanque sedimen.- centrífuga	1	0,0279	0,91	27,2	589		0,08	3,29
Centrífuga-reactor	3	0,0847	1,46	49,2	5.719	0,00053	0,036	2,27
Depósito metanol- reactor	2	0,0548	0,66	26,5	47.742	0,0008	0,024	0,26
Depósito sulfúrico-reactor	1/8	$5,5 \cdot 10^{-3}$	0,63	16,6	312		0,09	5,50
Reactor- centrífuga final	4	0,1101	1,04	32,4	6.423	0,00042	0,034	0,55
Centrif.final-react. ppal transest.	4	0,1101	0,81	36,3	4.125	0,00042	0,04	0,44
Centrif. final-línea recuperac./purific.	2	0,0570	0,80	30,4	14.659	0,0008	0,028	0,49

Tabla 1.27. Pérdidas de carga totales en cada tramo de tubería.

6. CÁLCULO DE BOMBAS

6.1. INTRODUCCIÓN

La acción de bombeo es la adición de energía cinética y potencial a un líquido con el fin de moverlo de un punto a otro. Esta energía hará que el líquido efectúe trabajo, tal como circular por una tubería o subir a una mayor altura.

Las bombas pueden clasificarse de manera general y de acuerdo con su principio de funcionamiento en dos grandes grupos:

- Bombas centrífugas: son las más utilizadas en la industria y están formadas por un disco rotatorio denominado rodete, provisto de unos álabes que giran a gran velocidad dentro de una carcasa.

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas: cuando el líquido entra en la unidad es confinado en un espacio interno de la bomba donde se le comunica la energía necesaria para ser desplazado en el paso de expulsión.

Las características generales de ambas bombas se resumen en la siguiente tabla:

	BOMBAS CENTRÍFUGAS	BOMBAS VOLUMÉTRICAS
Presiones de trabajo	Bajas	Altas
Caudales	Grandes	Pequeños
Válvula de retención	La necesitan en la línea de aspiración, ya que evita que el líquido vuelva al depósito en caso de detener la bomba	No necesitan válvulas de retención
Consumos eléctricos	Tanto mayor cuanto menor sea la presión de trabajo	Tanto mayor cuanto mayor sea la presión de trabajo
Pulsaciones	Muy uniformes	Muy pulsantes
Tamaño	Todas las potencias: 0,5-1000 CV	Potencias pequeñas: 0,5-100 CV

Tabla 1.28. Características generales de los tipos de bombas. ^[20]

Las bombas centrífugas son las más utilizadas a nivel industrial; éstas transforman la energía mecánica de un impulsor rotatorio en las energías cinética y potencial requeridas. En la instalación diseñada se opta mayoritariamente por el uso de este tipo de bombas, ya que son apropiadas para el rango en el que se opera, además de por su sencillez y su bajo coste inicial y de mantenimiento. El material del que están construidas es acero inoxidable, a excepción de la bomba para el trasiego de metanol, que es de acero al carbono.

Para el caso de la impulsión de ácido sulfúrico se opta por una bomba volumétrica de tipo peristáltico, dado el pequeño caudal con el que se trabaja.

6.2. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

6.2.1. Cálculo de la altura útil

La altura útil es la energía neta que la bomba transmite al fluido. El cálculo se realiza aplicando un balance de energía entre dos puntos, uno en la parte de aspiración (punto 1) y otro en la parte de descarga de la bomba (punto 2):

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

Despejando la altura útil H:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_f$$

Cada uno de los términos expresados en unidades del S.I. y siendo:

$\frac{P_2 - P_1}{\rho g}$: Diferencia de presiones entre los puntos considerados.

$(z_2 - z_1)$: Diferencia de altura de los puntos considerados.

$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$: Diferencia de velocidad entre los puntos considerados.

h_f : Pérdidas de carga totales externas a la bomba.

En la siguiente tabla se resumen los datos necesarios y el cálculo de la altura útil para las principales bombas de la instalación:

BOMBA	$P_2 - P_1$ (Pa)	ρ (kg/m ³)	$z_2 - z_1$ (m)	v_2 (m/s)	v_1 (m/s)	h_f (m)	H (m)
B-1	0	927,39	0,4	0,91	0	3,29	3,73
B-2	0	925	1,9	1,46	0	2,27	4,28
B-3	0	792	1,7	0,66	0	0,26	1,98
B-4	0	1800	1,8	0,63	0	5,50	7,32
B-5	0	897,57	1,5	1,04	0	0,55	2,11

Tabla 1.29. Cálculo de la altura útil.

B-1: trasvase de aceite desde tanque de sedimentación hasta centrífuga.

B-2: carga de aceite al reactor.

B-3: carga de metanol al reactor.

B-4: carga de sulfúrico al reactor.

B-5: trasvase de la mezcla de reacción hasta la centrífuga final.

6.2.2. Cálculo de la potencia de bombeo

La potencia de bombeo (W) es la potencia neta que comunica la bomba al fluido, es decir, es la potencia necesaria para impulsar el caudal requerido a la altura útil. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W = HQ\rho g$$

Siendo:

H: altura útil (m).

Q: caudal que suministra la bomba (m³/s).

ρ : densidad del fluido (kg/m³).

g: aceleración de la gravedad (m/s²).

En la siguiente tabla se resumen los datos necesarios y el cálculo de la potencia de bombeo para cada una de las bombas:

BOMBA	H (m)	Q (m³/s)	ρ (kg/m³)	W (W)
B-1	3,73	5,577·10 ⁻⁴	927,39	18,93
B-2	4,28	8,243·10 ⁻³	925	320,14
B-3	1,98	1,549·10 ⁻³	792	23,83
B-4	7,32	1,481·10 ⁻⁵	1800	1,91
B-5	2,11	9,858·10 ⁻³	897,57	183,15

Tabla 1.30. Cálculo de la potencia de bombeo.

Si se consideran las pérdidas de potencia que se producen en la propia bomba, resulta necesario disponer de bombas con una potencia superior a la calculada (dependiendo del rendimiento total de la bomba).

6.2.3. Cálculo de la Altura Neta de Succión Positiva (ANSP)

La cavitación es el fenómeno por el cual la presión total a la entrada de la bomba (lugar de más baja presión en el sistema) alcanza la presión de vapor del líquido bombeado, a la temperatura de trabajo; el líquido hervirá y formará burbujas.

Conforme las burbujas se mueven del área de baja presión de la bomba hacia el área de alta presión, el vapor regresa nuevamente a la fase líquida. Esta condensación genera una poderosa onda de choque en el líquido que, incluso, puede llegar a retirar partículas en las superficies sólidas circundantes (la carcasa de la bomba) creando cavidades. Con el paso del tiempo, este fenómeno puede causar daños irreparables en los equipos.

La altura neta de succión positiva disponible (ANSP_d) es la carga total, medida en la succión de la bomba, menos la presión de vapor del líquido. En palabras simples, es un análisis de las condiciones energéticas en el lado de succión de la bomba, para determinar si el líquido se evaporará en el punto de presión más bajo de la bomba. La expresión que permite el cálculo de la ANSP_d es la siguiente:

$$ANSP_d = \frac{P_a - P_v}{\rho g} - \frac{v_e^2}{2g} - h_{fa-e}$$

Donde:

P_a : presión en el punto de aspiración (superficie del líquido en el tanque) (Pa).

P_v : presión de vapor del líquido (Pa).

v_e : velocidad en la entrada a la bomba (m/s).

h_{fa-e} : pérdidas de carga entre la superficie de aspiración y la entrada a la bomba (m).

La altura neta de succión positiva requerida ($ANSP_r$) es la presión de succión mínima que necesita la bomba para mantener un funcionamiento estable sin que aparezca la cavitación. Su valor se define de forma experimental y es proporcionado por el fabricante de la bomba.

La única manera de impedir los efectos no deseados de la cavitación es asegurar que la $ANSP$ disponible sea mayor que la $ANSP$ requerida por la bomba.

En la siguiente tabla se resumen los datos necesarios y el cálculo de la $ANSP_d$ para cada una de las bombas:

BOMBA	P_a (Pa)	P_v (Pa)	ρ (kg/m ³)	v_e (m/s)	h_{fa-e} (m)	$ANSP_d$ (m)
B-1	101.325	9.522,6	927,39	0,91	0,77	9,28
B-2	101.325	4.213,387	925	1,46	0,75	9,84
B-3	101.325	16.711,8	792	0,66	0,12	10,75
B-4	101.325	3.130,8	1.800	0,63	1,92	3,62
B-5	101.325	19.810,9	897,57	1,04	0,24	8,96

Tabla 1.31. Cálculo de la $ANSP_d$.

Las pérdidas de carga entre la superficie de aspiración y la entrada de la bomba han sido calculadas con el mismo procedimiento utilizado en el apartado 5.4. del presente anexo para el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías; lógicamente estas pérdidas de carga serán menores que las calculadas anteriormente para toda la conducción, ya que el número de accesorios y la longitud de tubería considerados son menores.

6.2.4. Resumen de las características de las bombas

En la siguiente tabla se muestran, a modo de resumen, los resultados calculados para cada una de las bombas, los cuales serán útiles a la hora de seleccionar las bombas comerciales:

BOMBA	Fluido	Q (m³/s)	H (m)	W (W)	ANSP_d (m)
B-1	Aceite	5,577·10 ⁻⁴	3,73	18,93	9,28
B-2	Aceite	8,243·10 ⁻³	4,28	320,14	9,84
B-3	Metanol	1,549·10 ⁻³	1,98	23,83	10,75
B-4	Sulfúrico	1,481·10 ⁻⁵	7,32	1,91	3,62
B-5	Mezcla de reacción	9,858·10 ⁻³	2,11	183,15	8,96

Tabla 1.32. Resultados obtenidos para cada una de las bombas.

FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE PRETRATAMIENTO DE
ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS
LIBRES PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.**

**ANEXO 2: INFLUENCIA DE LAS VARIABLES Y ESTUDIO
CINÉTICO DE LA PRE-ESTERIFICACIÓN ÁCIDA**

M^a DE LOS MILAGROS GARCÍA CABELLO

SEPTIEMBRE, 2007

0. ÍNDICE

0. ÍNDICE	1
1. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DEL PROCESO	2
1.1. RELACIÓN MOLAR	2
1.2. CANTIDAD DE CATALIZADOR Y ACIDEZ INICIAL	3
1.3. TEMPERATURA DE REACCIÓN	6
2. ESTUDIO CINÉTICO	7

1. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

Los factores principales que afectan a la esterificación con metanol de los ácidos grasos libres (AGL) en medio ácido son:

- Relación molar entre alcohol y aceite
- Cantidad de catalizador
- Acidez inicial
- Temperatura de reacción

Teniendo en cuenta los estudios publicados al respecto, puede concluirse cuáles son las mejores condiciones para la reacción objeto de estudio.

En dichos estudios se establecen los parámetros mencionados y se comprueba su efecto sobre la velocidad de reacción.

1.1. RELACIÓN MOLAR

En un estudio publicado^[33] se realizan experiencias con las siguientes condiciones:

- Temperatura de reacción 60 °C.
- Relación molar entre metanol y aceite entre 4,5:1 y 18:1.
- 1 y 2% de catalizador ácido basado en el peso de aceite.

Los cambios en el índice de acidez de la mezcla de reacción durante la esterificación se muestran en la figura 2.1:

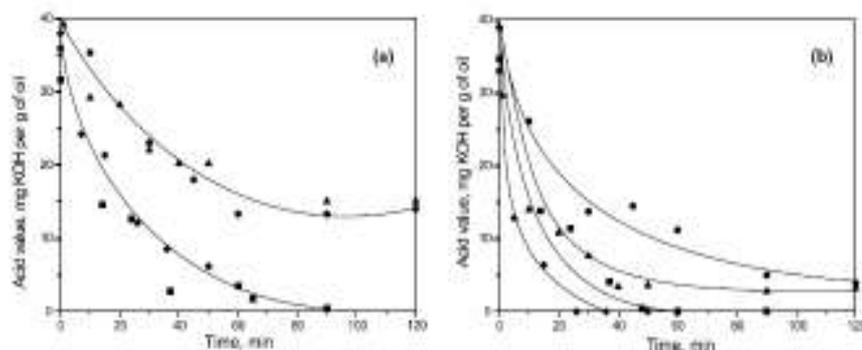


Fig. 1. Variation of the acid value during the progress of the ACM of the crude TSO at two catalyst (H_2SO_4) amounts (based on the oil amount): (a) 1.0% and (b) 2.0% (molar ratio of methanol to free fatty acids: 4.5:1 - ●; 9:1 - ▲; 13:1 - ■, and 18:1 - ◆).

Figura 2.1. Variación del índice de acidez durante el progreso de la reacción. ^[33]

Como puede observarse, la reacción progresa rápidamente al principio y se hace cada vez más lenta. Con un incremento de la relación molar y de la cantidad de catalizador, la velocidad inicial de la reacción se incrementa.

En nuestro caso, nos interesa llevar a cabo la reacción con el menor exceso de metanol posible que impida la reversibilidad de la reacción, ya que de este modo serán menores los gastos energéticos para su posterior recuperación. En varias publicaciones revisadas^{[27][28][30]}, se confirma que con una relación molar de 20:1 entre metanol y AGL (que equivale a una relación molar de 4,5:1 metanol/aceite, suponiendo un contenido en AGL del 7%), puede llevarse a cabo el proceso de esterificación de una manera efectiva, con lo cual es éste el valor de relación molar que tendremos en cuenta.

1.2. CANTIDAD DE CATALIZADOR Y ACIDEZ INICIAL

En la siguiente figura se muestran los cambios en el contenido de ácido oleico no reaccionado (acidez) en función del tiempo, a una temperatura de proceso de 60 °C, una velocidad de agitación de 850 min⁻¹ y un 1% de catalizador (H_2SO_4). Como puede observarse, la mayor disminución de acidez tiene lugar durante los primeros 30 minutos.

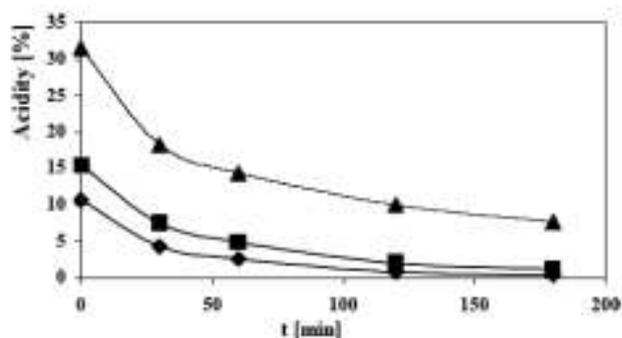


Figura 2.2. Acidez de la mezcla de reacción en función del tiempo y de la acidez inicial. ^[34]

En las siguientes gráficas se muestra la influencia conjunta de las dos variables (cantidad de catalizador y acidez inicial):

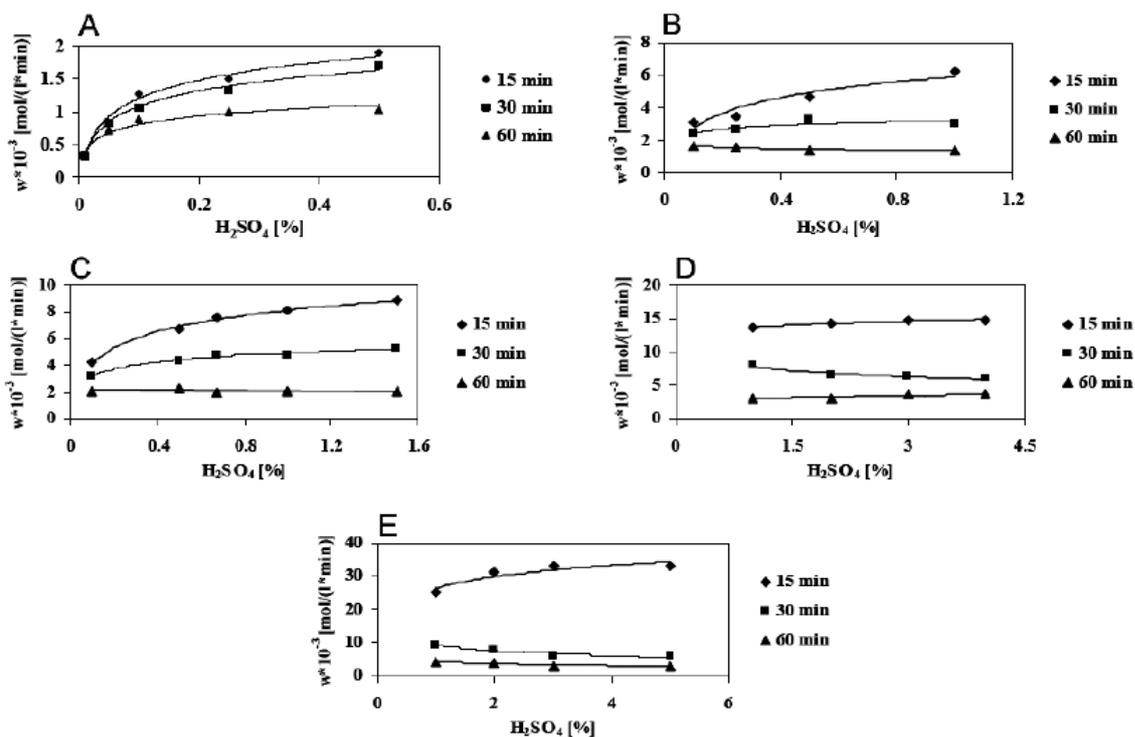


Figura 2.3. Velocidad de reacción en función de la cantidad de catalizador a diferentes tiempos de reacción. Las concentraciones iniciales de ácido oleico fueron: A. 0,162 mol/l, B. 0,346 mol/l, C. 0,501 mol/l, D. 1,017 mol/l, E. 1,948 mol/l. ^[34]

Los resultados indican que con un incremento de la cantidad de catalizador la velocidad de reacción aumenta. Sin embargo, esto es sólo válido hasta un cierto límite, por encima del cual no es conveniente incrementar la cantidad de catalizador.

En la gráfica A se muestra la velocidad de reacción en función de la concentración inicial de ácido oleico (0,162 mol/L). Los datos muestran que un incremento del porcentaje de catalizador por encima del 0,4% no tiene casi influencia sobre la velocidad de reacción.

La concentración inicial de AGL de los aceites tratados en la instalación proyectada es similar a este caso en estudio, con lo cual consideraremos utilizar como máximo un 0,4% de ácido sulfúrico con respecto al peso de aceite. Además, esto concuerda con otros estudios revisados en la bibliografía, en los cuales se usa un 5% de catalizador con respecto al peso de AGL y ésta es la opción que se llevará a cabo (ambos estudios son coincidentes, ya que este 5% de H₂SO₄ en base al peso de AGL supone un 0,35% en base al peso de aceite, suponiendo un 7% de AGL).

En definitiva, la figura muestra que el efecto del catalizador en la velocidad de reacción se hace más débil al aumentar las concentraciones iniciales de ácido oleico.

El análisis de la velocidad de reacción en función del tiempo de reacción revela que cuanto más alta es la concentración inicial de ácido oleico, más alta es la velocidad de reacción. Este efecto puede verse en la figura 2.4., donde se observa una relación lineal entre las dos variables:

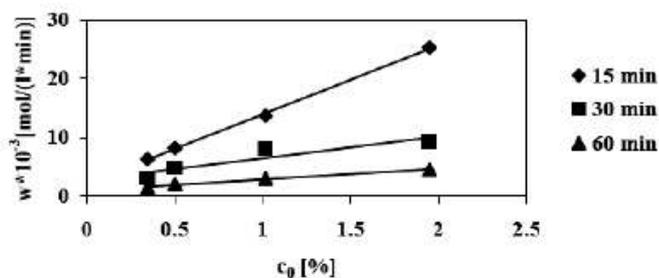


Figura 2.4. Velocidad de reacción en función de la concentración inicial de ácido oleico.^[34]

1.3. TEMPERATURA DE REACCIÓN

En cuanto a la optimización de la temperatura de reacción, las temperaturas inferiores a 50 °C dan lugar a problemas en el bombeo y agitación de la mezcla de reacción, debido a la elevada viscosidad; por otra parte, la temperatura no puede ser mayor a 65 °C, ya que éste es el punto de ebullición del metanol.

La temperatura óptima estará entre los 50 y los 60 °C, según los resultados de diversas investigaciones. A mayor temperatura, menor tiempo de reacción, ya que aumentan las constantes cinéticas, aumentando la velocidad del proceso. Pero por otro lado, también hay que considerar que se deben evitar temperaturas superiores a los 60 °C para no acercarnos demasiado al punto de ebullición del metanol.

Por tanto, se selecciona para el proceso a diseñar una temperatura de reacción de 60 °C, que va a ser mantenida mediante un sistema isotérmico de intercambio de calor en el reactor.

2. ESTUDIO CINÉTICO

Para el estudio cinético de la reacción se ha tenido en cuenta investigaciones publicadas, en las que ha sido estudiada la cinética de la esterificación del ácido oleico con metanol en presencia de ácido sulfúrico como catalizador. La realización de las experiencias se ha llevado a cabo en discontinuo, a diferentes temperaturas y en presencia de una cierta cantidad de triglicéridos, para simular un aceite con un alto contenido de AGL. El rendimiento de la esterificación fue evaluado de acuerdo con la reducción del contenido de ácido oleico en la mezcla de reacción.

Las curvas cinéticas del proceso de esterificación muestran que la velocidad de reacción más alta tiene lugar durante la primera hora de reacción. Se confirma que la velocidad de reacción incrementa con el aumento de temperatura (el mayor rendimiento tiene lugar a 60 °C) y la concentración inicial de ácido oleico.

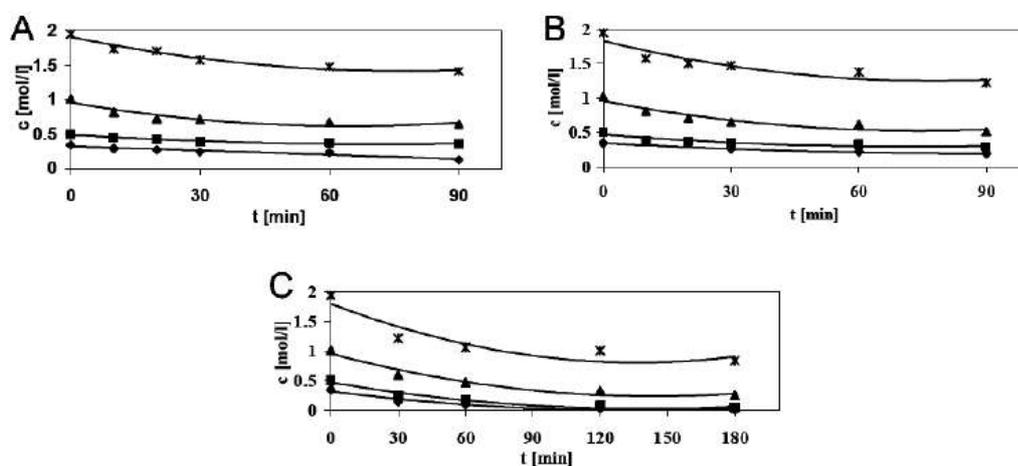


Figura 2.5. Cambios en la concentración de ácido oleico no reaccionado en función del tiempo, a las temperaturas: A. 20 °C, B. 34 °C, C. 60 °C. ^[34]

Los parámetros cinéticos calculados (constante de velocidad de reacción k_t y orden de reacción n_t) se muestran a continuación:

τ [min]	n_t	k_t [min^{-1}]
11.25	0.69	1.54×10^{-2}
30	1.2	0.85×10^{-2}
60	1.5	0.45×10^{-2}

Tabla 2.1. Parámetros cinéticos a 60 °C y diferentes tiempos de reacción. ^[34]

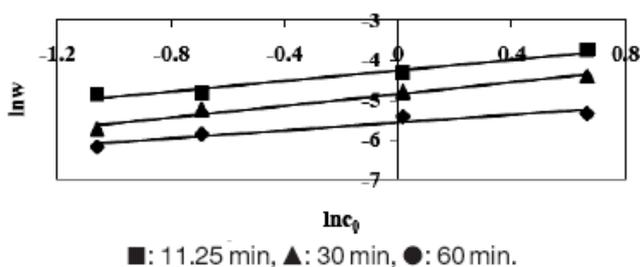


Figura 2.6. Velocidad de reacción en coordenadas logarítmicas a 60 °C para diferentes tiempos de reacción. ^[34]

Los datos indican que los parámetros cinéticos observados cambiaron durante el transcurso de la reacción. Al comienzo del proceso el orden de reacción fue 0,69, mientras que después de una hora de reacción fue 1,5. La constante de reacción disminuyó de $1,54 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ a $0,45 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$. Se cree que este hecho es debido a la influencia de la difusión durante el tiempo de reacción. Los datos sugieren que excluyendo el efecto de la difusión, el orden de reacción es cercano a 1.

El factor A y la energía de activación, E_t , han sido calculados teniendo en cuenta los parámetros del proceso a diferentes temperaturas y se muestran a continuación:

[°C]	n_t	k_t [min ⁻¹]	A_t	E_t [kJ/mol]
+20	0.787	0.76×10^{-2}	1.27	13.3
+34	0.714	0.98×10^{-2}		
+60	0.595	1.4×10^{-2}		

Tabla 2.2. Parámetros cinéticos a diferentes temperaturas. ^[34]

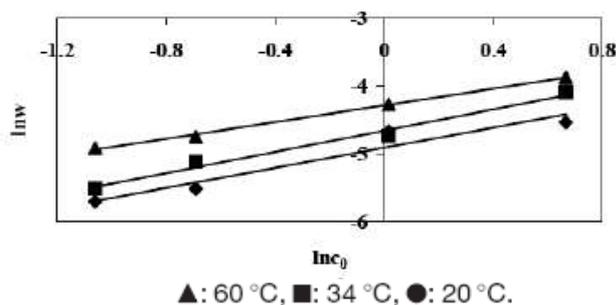


Figura 2.7. Velocidad de reacción en coordenadas logarítmicas a diferentes temperaturas. ^[34]

Tal y como se observa, la velocidad de reacción aumenta ligeramente con el aumento de temperatura.

La dependencia de la constante de reacción K_t con la temperatura según la expresión de Arrhenius permite calcular la energía de activación. Los datos indican, tal y como se muestra en la figura 2.8, que bajo las condiciones estudiadas la energía de activación es aproximadamente 13,3 kJ/mol y el factor A es igual a 1,27.

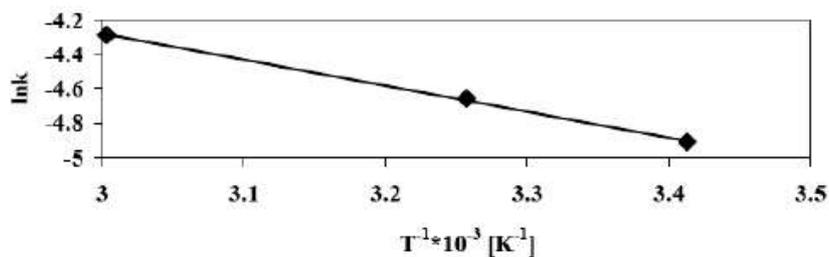


Figura 2.8. Constante de reacción en coordenadas de Arrhenius. ^[34]

Podemos concluir que la reacción de esterificación de los ácidos grasos libres presentes en el aceite es de orden 1, con lo cual su expresión cinética será la siguiente:

$$(-r_{AGL}) = k \cdot C_{AGL} = k \cdot C_{AGL0} \cdot (1 - X_{AGL})$$

Tal y como se ha justificado anteriormente, la reacción se llevará a cabo a 60 °C; para esta temperatura, según el estudio anteriormente citado, la constante cinética tiene un valor de $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$, quedando la expresión cinética de la siguiente forma:

$$(-r_{AGL}) = 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot C_{AGL} = 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot C_{AGL0} \cdot (1 - X_{AGL})$$

FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE PRETRATAMIENTO DE
ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS
LIBRES PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.**

**ANEXO 3: METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PARA EL ACEITE
RECEPCIONADO.**

M^a DE LOS MILAGROS GARCÍA CABELLO

SEPTIEMBRE, 2007

0. ÍNDICE

0. ÍNDICE	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ACIDEZ	3
3. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD	7
4. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE YODO	9
5. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN	13

1. INTRODUCCIÓN

En el presente anexo se detallan los protocolos de realización de los análisis más relevantes que sirven para establecer las características de los aceites de fritura usados, conforme a la Orden de 9 de Octubre de 1985, por la que se establecen los métodos oficiales de análisis de aceites y grasas^[7].

Estos análisis se realizarán a muestras de aceite que serán tomadas una vez que el lote ha pasado por las unidades de sedimentación y centrifugación. De este modo se asegura que se hayan retirado las partículas sólidas y la humedad necesarias para que se lleve a cabo correctamente la etapa de reacción. Además, el análisis del índice de acidez nos va a proporcionar información sobre si es necesario o no pasar el lote de aceite por la unidad de pre-esterificación.

En definitiva, los resultados de los análisis deben estar dentro de los intervalos que se indican a continuación, para que el proceso de producción de biodiésel se lleve a cabo de forma satisfactoria:

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Acidez máxima	% en peso	1*
Humedad máxima	% en peso	0,5
Índice de yodo		105-115
Índice de saponificación mín.		190

Tabla 3.1. Características óptimas del aceite usado para producir biodiésel. ^[39]

*Si la acidez está por encima de un 1%, el aceite será tratado en la unidad de pre-esterificación para reducir dicha acidez.

2. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ACIDEZ

Se tomará una muestra de cada lote de aceite a procesar y se determinará su grado de acidez. Si éste es menor del 1% no es necesario llevar a cabo la esterificación ácida, por lo que después de las operaciones de desbaste, sedimentación y centrifugación dispondremos de un aceite limpio y seco que podrá ser transferido directamente a la unidad de transesterificación básica. En el caso de que el contenido en ácidos grasos libres sea superior al 1% el lote será conducido a la unidad de pre-esterificación ácida para reducir dicho contenido.

Existen diferentes procedimientos normalizados (ISO 660:1996, UNE 55.011 y 55.063, IUPAC 2.201) para la determinación del grado de acidez, que difieren únicamente en algunos detalles.

La valoración debe realizarse siempre con una solución etanólica de hidróxido potásico (KOH), mientras que la materia grasa a valorar debe disolverse en un disolvente adecuado. Existen dos tipos de procedimientos propuestos, los que utilizan el etanol como disolvente y los que utilizan una mezcla de un alcohol con un disolvente orgánico como puede ser la mezcla etanol/éter etílico (50:50, v/v). La elección del disolvente parece tener pocas repercusiones en el resultado, pero éste depende de forma crítica de la naturaleza de la muestra, así como de una agitación continua y efectiva.

En cuanto a los sistemas indicadores el más recomendado es la fenolftaleína. Estos métodos tienen la dificultad de que, aunque los AGL son solubles en etanol, los triglicéridos no, lo que provoca un sistema bifásico que requiere muchas precauciones para una buena reproducibilidad y exactitud en la determinación, ya que la observación del punto final es compleja.

A continuación se detalla el procedimiento para la determinación del índice de acidez, que aparece en la Orden de 9 de Octubre de 1985 por la que se establecen los métodos oficiales de análisis de aceites y grasas:

- Principio:

El grado de acidez es una expresión convencional del contenido en tanto por ciento de los AGL.

El índice de acidez expresa el peso, en mg de hidróxido potásico necesario para neutralizar un gramo de materia grasa.

- Reactivos:

a) Mezcla de éter etílico y etanol de 95% v/v, en proporción de volumen 1:1. Debe neutralizarse exactamente con la disolución (b), con fenolftaleína (c) como indicador.

b) Disolución etanólica valorada de hidróxido potásico, 0,1 N, o en caso necesario 0,5 N (Si la cantidad necesaria de la disolución de hidróxido potásico de 0,1 N supera los 10 ml, debe utilizarse una disolución de 0,5 N).

c) Solución al 1% de fenolftaleína en metanol de 95% v/v.

- Material:

Balanza analítica. Matraz erlenmeyer de 250 ml y bureta de 10 ml con graduación de 0,05 ml.

- Determinación:

La determinación se efectuará en una muestra a la que se le han retirado previamente los sólidos y el agua, el contenido global de humedad e impurezas debe ser inferior al 1 %.

Tomar la muestra, según el grado de acidez previsto, de acuerdo con el cuadro siguiente:

GRADO DE ACIDEZ PREVISTO	PESO DE LA MUESTRA (g)	PRECISIÓN DE LA PESADA DE LA MUESTRA (g)
<1	20	0,05
1 a 4	10	0,02
4 a 15	2,5	0,01
15 a 75	0,5	0,001
>75	0,1	0,0002

Tabla 3.2. Peso de la muestra según el grado de acidez previsto. ^[7]

Se prevé un grado de acidez entre 4-15%, por lo que se tomarán 2,5 g de muestra, pesándola en el matraz erlenmeyer.

Disolver la muestra en 50 a 150 ml de la mezcla de éter etílico y etanol, previamente neutralizada. Valorar, agitando continuamente, con la disolución de hidróxido potásico de 0,1 N hasta el viraje del indicador (la coloración rosa de la fenolftaleína debe permanecer al menos durante 10 segundos).

- Cálculo:

La acidez puede calcularse como grado de acidez expresado en porcentaje de ácido oleico o como índice de acidez expresado en mg KOH:

$$\text{Grado de acidez (\%)} = V c \frac{M}{1000} \frac{100}{P} = \frac{V c M}{10 P}$$

siendo:

- V: volumen en ml de la solución etanólica de KOH utilizada.
- c: concentración exacta, en moles por litro, de la solución de KOH utilizada.

- M: peso molecular del ácido en que se expresa el resultado (ácido oleico = 282 g/mol).
- P: peso en gramos de la muestra utilizada.

$$\text{Índice de acidez (mg KOH/g)} = \frac{M_{\text{KOH}} V c}{P}$$

donde M_{KOH} es el peso molecular del hidróxido potásico (56,1 g/mol) y las restantes variables tienen el mismo significado que en la fórmula anterior.

3. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

- Principio:

Este método determina la cantidad total de agua no combinada que se encuentra en la materia grasa.

- Material y aparatos:

Matraz de vidrio de cuello corto, de 300 a 500 ml de capacidad, sobre el cual se adapta el aparato especial representado en la figura 3.1:

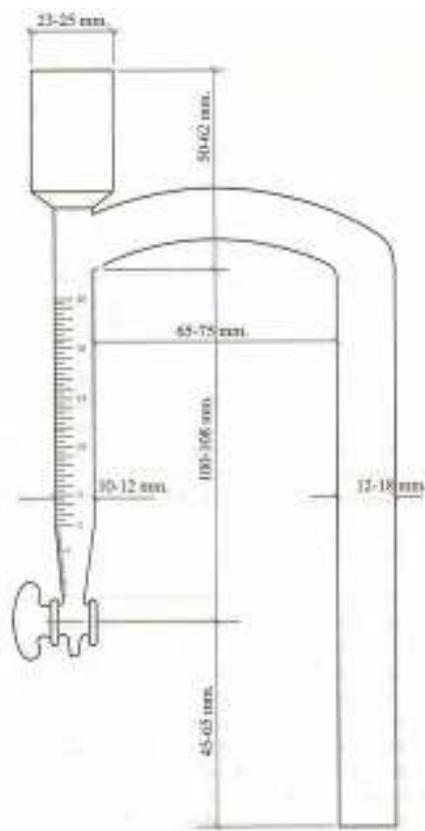


Figura 3.1. Aparato para la determinación de la humedad. ^[7]

Consta de un tubo cilíndrico graduado en ml, provisto de llave de descarga en el extremo inferior; en el superior se adapta un refrigerante de reflujo. Entre éste y la terminación de la graduación, lleva el tubo cilíndrico otro tubo comunicante y paralelo a él, a cuyo extremo se adapta el matraz.

- Reactivos:

Xileno.

- Procedimiento:

Eliminar todo vestigio de grasa del tubo graduado y del tubo interior del refrigerante, lavando sucesivamente con mezcla crómica, agua destilada y acetona. Secar.

Pesar de 20 a 50 g de materia grasa, en el matraz seco, con una aproximación de 0,1 g. Agregar de 100 a 300 ml de xileno y algunos trozos de piedra pómez. Calentar progresivamente hasta la ebullición y mantenerla hasta que el xileno destilado resulte limpio y no separe más agua. Dejar en reposo hasta perfecta separación de las capas de xileno y agua. Leer el volumen de agua.

- Cálculo:

Calcular el contenido de agua expresado en porcentaje:

$$\text{Agua} = \frac{100 V}{P} \%$$

siendo:

- P: peso en g de la muestra.
- V: volumen en ml de agua.

- Observaciones:

Si las gotas de agua quedan adheridas a la pared del tubo, desprenderlas calentando con precaución con una llama pequeña.

4. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE YODO

- Principio:

El índice de yodo de un cuerpo graso es función de su grado de insaturación. Se determina añadiendo a la muestra un exceso de reactivo halogenado, valorando el reactivo que no reacciona.

Se expresa convencionalmente por el peso de yodo absorbido por cien partes en peso de la materia grasa.

- Material y aparatos:

a) Navecillas de vidrio de 2 a 3 ml de capacidad.

b) Matraces erlenmeyer de vidrio, de boca ancha, con tapón esmerilado, de aproximadamente 300 ml.

Todo el material debe estar perfectamente limpio y seco.

- Reactivos:

a) Solución acuosa de yoduro potásico al 10% p/v. Esta solución debe estar exenta de yodo y de yodato potásico.

b) Solución acuosa de tiosulfato sódico, 0,1 N.

c) Tetracloruro de carbono puro. Comprobar que está exento de materias oxidables. Agitando 10 ml con 1 ml de solución acuosa saturada de dicromato potásico y 2 ml de ácido sulfúrico concentrado, no debe aparecer coloración verde.

d) Engrudo de almidón.

e) Reactivo de Wijs:

Pesar 9 g de tricloruro de yodo en un matraz de vidrio topacio de 1.500 ml; disolver en un litro de una muestra compuesta de 700 ml de ácido acético y 300 ml de tetracloruro de carbono.

Determinar el contenido en halógeno de la forma siguiente: tomar 5 ml y agregar 5 ml de la solución acuosa de yoduro potásico y 30 ml de agua.

Valorar con solución de tiosulfato sódico, 0,1 N en presencia de engrudo de almidón como indicador.

Agregar al reactivo 10 g de yodo pulverizado, y disolver agitando.

Determinar el contenido en halógeno como anteriormente; deber ser igual a vez y media de la primera determinación. Agregar todavía una pequeña cantidad de yodo, de forma que sobrepase ligeramente el límite de vez y media, por ser necesario que no quede ninguna traza de tricloruro de yodo, cuya presencia provocaría reacciones secundarias.

Dejar decantar después de verter el líquido claro en un matraz o frasco de color topacio. La solución, bien conservada al abrigo de la luz, puede ser utilizada durante varios meses.

- Procedimiento:

Según el índice de yodo previsto, la toma de muestra variará de la forma siguiente:

ÍNDICE DE YODO PREVISTO	TOMA DE MUESTRA (g)
< 5	3,00
5 a 20	1,00
21 a 50	0,60
51 a 100	0,30
101 a 150	0,20
151 a 200	0,15

Tabla 3.3. Peso de la muestra según el índice de yodo previsto.^[7]

En una pequeña navecilla de vidrio, pesar exactamente la cantidad necesaria con una aproximación de 1 mg. Introducir la navecilla y su contenido en un erlenmeyer con tapón esmerilado de aproximadamente 300 ml. Agregar 15 ml de tetracloruro de carbono y disolver. Agregar exactamente 25 ml del reactivo. Tapar el matraz, agitar ligeramente, y protegerlo de la luz.

Dejar estar 1 hora para grasas cuyo índice sea inferior a 150, y 2 horas para las de índice superior a 150, y los aceites polimerizados u oxidados.

Agregar 20 ml de la solución de yoduro potásico y 150 ml de agua.

Valorar con solución de tiosulfato sódico 0,1 N, con engrudo de almidón como indicador, hasta desaparición justa del color azul después de agitación intensa.

Hacer un ensayo en blanco sin materia grasa en las mismas condiciones.

- Cálculo:

$$\text{Índice de yodo} = \frac{12,69N(V - V')}{P}$$

siendo:

- P: peso en g de la muestra.
- V: volumen en ml la solución de tiosulfato sódico 0,1 N utilizado para el ensayo en blanco.
- V': volumen en ml la solución de tiosulfato sódico 0,1 N utilizado para la materia grasa.
- N: normalidad de la solución de tiosulfato sódico utilizada.

5. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN

- Principio:

El índice de saponificación expresa el peso en mg de hidróxido potásico necesario para saponificar 1 g de materia grasa.

Este método es aplicable a aceites y grasas con un contenido de ceras inferior al 5%.

- Material y aparatos:

Matraz de vidrio, inatacable por los ácidos, de 200 ml aproximadamente, adaptable a un refrigerante de reflujo.

- Reactivos:

- a) Solución etanólica de hidróxido potásico 0,5 N.
- b) Solución acuosa de ácido clorhídrico 0,5 N.
- c) Solución de fenolftaleína al 1% en etanol de 95°.

- Procedimiento:

Pesar con una precisión de 1 mg, en el matraz de vidrio, 2 g aproximadamente de grasa. Agregar 25 ml exactamente medidos de solución etanólica de KOH 0,5 N. Adaptar el refrigerante de reflujo, llevar a ebullición, y mantener durante 60 minutos, agitando por rotación de cuando en cuando. Retirar de la fuente de calor. Agregar 4 ó 5 gotas de fenolftaleína, y valorar la solución jabonosa, todavía caliente, con la solución de ácido clorhídrico 0,5 N.

Realizar en las mismas condiciones un ensayo en blanco.

- Cálculo:

Calcular el índice de saponificación expresado en mg de KOH por g de grasa.

$$\text{Índice de saponificación} = \frac{56,1 \text{ N} (V - V')}{P}$$

siendo:

- V: volumen en ml la solución de HCl 0,5 N utilizado para la prueba en blanco
- V': volumen en ml la solución de HCl 0,5 N utilizado en el ensayo.
- N: normalidad exacta de la solución de HCl utilizada.
- P: peso en g de la muestra grasa.

- Observaciones:

Para ciertas materias grasas difíciles de saponificar es necesario calentar durante más de 60 minutos.

FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE PRETRATAMIENTO DE
ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS
LIBRES PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.**

ANEXO 4: ANEXO GRÁFICO

M^a DE LOS MILAGROS GARCÍA CABELLO

SEPTIEMBRE, 2007

- Gráfico 4.1: Fórmulas generales para recipientes.

Fórmulas generales para recipientes

Parte	Fórmula del esfuerzo	Espesor, t		Presión, P		Esfuerzo, S	
		Diámetro interior	Diámetro exterior	Diámetro interior	Diámetro exterior	Diámetro interior	Diámetro exterior
Casco							
Longitudinal [Sección UG-27(c)(2)]*	$\sigma_s = \frac{PR_m}{2t}$	$\frac{PR_i}{2SE + .4P}$	$\frac{PR_o}{2SE + 1.4P}$	$\frac{2SEt}{R_i - .4t}$	$\frac{2SEt}{R_o - 1.4t}$	$\frac{P(R_i - .4t)}{2Et}$	$\frac{P(R_o - 1.4t)}{2Et}$
Circunferencial [Sección UG-27(c)(1); Sección 1-1 (a)(1)]*	$\sigma_s = \frac{PR_m}{t}$	$\frac{PR_i}{SE - .6P}$	$\frac{PR_o}{SE + .4P}$	$\frac{SEt}{R_i + .8t}$	$\frac{SEt}{R_o - .4t}$	$\frac{P(R_i + .8t)}{Et}$	$\frac{P(R_o - .4t)}{Et}$
Cabezales							
Semi esférico [Sección 1-1(a)(2); Sección UG-27(d)]*	$\sigma_s = \sigma_s = \frac{PR_m}{2t}$	$\frac{PR_i}{2SE - .2P}$	$\frac{PR_o}{2SE + .6P}$	$\frac{2SEt}{R_i + .2t}$	$\frac{2SEt}{R_o - .8t}$	$\frac{P(R_i + .2t)}{2Et}$	$\frac{P(R_o - .8t)}{2Et}$
Elipsoidal [Sección 1-4(c)]*	Véase PROCEDIMIENTO 2	$\frac{PD_i K}{2SE - .2P}$	$\frac{PD_o K}{2SE + 2P(K - .1)}$	$\frac{2SEt}{KD_i + .2t}$	$\frac{2SEt}{KD_o - 2t(K - .1)}$	Véase PROCEDIMIENTO 2	
2:1 SE [Sección UG-32(d)]*	*	$\frac{PD_i}{2SE - .2P}$	$\frac{PD_o}{2SE + 1.8P}$	$\frac{2SEt}{D_i + .2t}$	$\frac{2SEt}{D_o - 1.8t}$	*	
100% - 6% Toriástica [Sección UG-32(e)]*	*	$\frac{.885PL_o}{SE - .1P}$	$\frac{.885PL_o}{SE + .8P}$	$\frac{SEt}{.885L_o + .1t}$	$\frac{SEt}{.885L_o - .8t}$	*	
Toriástica 1/2-16.66 [Sección 1-4(d)]*	*	$\frac{PL_o M}{2SE - .2P}$	$\frac{PL_o M}{2SE + P(M - .2)}$	$\frac{2SEt}{LM + .2t}$	$\frac{2SEt}{L_o M - t(M - .2)}$	*	
Cone							
Longitudinal	$\sigma_s = \frac{PR_o}{2t \cos \alpha}$	$\frac{PD_i}{4 \cos \alpha (SE + .4P)}$	$\frac{PD_o}{4 \cos \alpha (SE + 1.4P)}$	$\frac{4SEt \cos \alpha}{D_i - .8t \cos \alpha}$	$\frac{4SEt \cos \alpha}{D_o - 2.8t \cos \alpha}$	$\frac{P(D_i - .8t \cos \alpha)}{4Et \cos \alpha}$	$\frac{P(D_o - 2.8t \cos \alpha)}{4Et \cos \alpha}$
Circunferencial [Sección 1-4(e); Sección UG-32(g)]*	$\sigma_s = \frac{PR_o}{t \cos \alpha}$	$\frac{PD_i}{2 \cos \alpha (SE - .6P)}$	$\frac{PD_o}{2 \cos \alpha (SE + .4P)}$	$\frac{2SEt \cos \alpha}{D_i + 1.2t \cos \alpha}$	$\frac{2SEt \cos \alpha}{D_o - .8t \cos \alpha}$	$\frac{P(D_i + 1.2t \cos \alpha)}{2Et \cos \alpha}$	$\frac{P(D_o - .8t \cos \alpha)}{2Et \cos \alpha}$

* ASME Boiler and Pressure Vessel Code, sección VIII, división 1, edición de 1983, American Society of Mechanical Engineers.

- Gráfico 4.2: Tabla de compatibilidad de aceros inoxidables.

SUSTANCIA	CONC. %	°F	°C	316	302/304	430	410
Aceites vegetales y minerales		70	20	A	A	A	A
Aceites vegetales y minerales		caliente	caliente	A	A	A	A
Agua aceitosa		70	20	A	A	A	A
Agua aceitosa		caliente	caliente	A	A	A	A
Alcohol - metílico		70	20	A	A	A	A
Alcohol - metílico		150	65	B	B	B	-
Fuel oil (aceite combustible)		70	20	A	A	A	B
Fuel oil (aceite combustible)		caliente	caliente	A	A	-	-
Fuel oil (con ácido sulfúrico)		70	20	A	B	-	-
Ácido sulfúrico	concentrado	70	20	A	A	A	A
Ácido sulfúrico	concentrado	140	60	B	B	C	C
Vapor				A	A	A	A

A: completamente resistente. B: bastante resistente. C: no resistente.

- Gráfico 4.3: Valores del coeficiente de soldadura ^[9].

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

- Gráfico 4.4: Valores del número de potencia para distintos tipos de impulsores [17].

Type	No. baffles	N_p
Propeller	0	0.3
Propeller	3-8	0.33-0.37
Turbine, vertical blade	0	0.93-1.08
Turbine, vertical blade	4	3-5
Pitched turbine, 45"	0	0.7
Pitched turbine, 45"	4	1.30-1.40
Anchor	0	0.28

- Gráfico 4.5: Valores de capacidad calorífica de aceites [11].

TABLE 2-219a Oils (Animal, Vegetable, Mineral Oils)

$$C_p[\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})] = A/\sqrt{d_4^{15}} + B(t - 15)$$

where d = density, g/cm^3 .

$^\circ\text{F} = \frac{9}{5} ^\circ\text{C} + 32$; to convert calories per gram-degree Celsius to British thermal units per pound-degree Fahrenheit, multiply by 1.0; to convert grams per cubic centimeter to pounds per cubic foot, multiply by 62.43.

Oils	A	B
Castor	0.500	0.0007
Citron	(0.438 at 54°C)	
Fatty drying	0.440	0.0007
non-drying	0.450	0.0007
semidrying	0.445	0.0007
oils (except castor)	0.450	0.0007
Naphthene base	0.405	0.0009
Olive	(0.47 at 7°C)	
Paraffin base	0.425	0.0009
Petroleum oils	0.415	0.0009

- Gráfico 4.6: Constantes termodinámicas del vapor de agua saturado.

Presión sat	Temp. sat.	Volumen	Volumen	Entalpia	Entalpia	Entalpia	Entropia	Entropia	Entropia
bars	°C	v' (dm ³ /Kg)	v'' (dm ³ /Kg)	i' (kJ/Kg)	i'' (kJ/Kg)	i' _(1-v) (kJ/Kg)	s' (kJ/Kg.°K)	s'' (kJ/Kg.°K)	Δs (kJ/Kg.°K)
0.6011	86.00	1.0331	2726.60	360.1	2653.2	2293.0	1.146	7.531	6.385
0.6495	88.00	1.0345	2536.00	368.5	2656.5	2287.9	1.169	7.504	6.335
0.7000	89.96	1.0359	2364.30	376.8	2659.7	2282.9	1.192	7.478	6.287
0.7011	90.00	1.0359	2360.90	376.9	2659.7	2282.8	1.192	7.478	6.286
0.7561	92.00	1.0374	2199.90	385.4	2663.0	2277.6	1.216	7.453	6.237
0.8000	93.51	1.0385	2086.80	391.7	2665.4	2273.7	1.233	7.434	6.201
0.8146	94.00	1.0388	2051.80	393.8	2666.2	2272.4	1.239	7.428	6.189
0.8769	96.00	1.0404	1915.20	402.2	2669.4	2267.2	1.262	7.403	6.142
0.9000	96.71	1.0409	1869.10	405.2	2670.6	2265.4	1.270	7.394	6.125
0.9430	98.00	1.0419	1789.30	410.6	2672.6	2262.0	1.284	7.379	6.095
1.0000	99.63	1.0432	1693.70	417.5	2675.2	2257.7	1.303	7.359	6.056
1.0132	100.00	1.0435	1673.00	419.1	2675.8	2256.7	1.308	7.355	6.048
1.2000	104.81	1.0472	1428.20	439.4	2683.3	2244.0	1.361	7.298	5.937
1.2080	105.00	1.0474	1419.40	440.2	2683.6	2243.5	1.363	7.296	5.933
1.4000	109.32	1.0509	1236.50	458.4	2690.3	2231.9	1.411	7.246	5.835
1.4326	110.00	1.0515	1210.10	461.3	2691.3	2230.0	1.419	7.239	5.820
1.6000	113.32	1.0543	1091.30	475.4	2696.4	2221.0	1.455	7.202	5.747
1.6905	115.00	1.0558	1036.50	482.5	2698.9	2216.4	1.473	7.183	5.710
1.8000	116.93	1.0575	977.39	490.7	2701.8	2211.1	1.494	7.163	5.668
1.9853	120.00	1.0603	891.71	503.7	2706.3	2202.5	1.528	7.130	5.602
2.0000	120.23	1.0605	885.59	504.7	2706.6	2201.9	1.530	7.127	5.597
2.2000	123.27	1.0633	809.99	517.6	2711.0	2193.4	1.563	7.096	5.533
2.3209	125.00	1.0649	770.43	525.0	2713.5	2188.5	1.581	7.078	5.497
2.4000	126.09	1.0659	746.60	529.6	2715.0	2185.4	1.593	7.067	5.474
2.6000	128.73	1.0685	692.66	540.9	2718.7	2177.8	1.621	7.040	5.419
2.7012	130.00	1.0697	668.32	546.3	2720.5	2174.2	1.634	7.027	5.393
2.8000	131.21	1.0709	646.19	551.5	2722.2	2170.7	1.647	7.015	5.368
3.0000	133.54	1.0732	605.72	561.4	2725.4	2163.9	1.672	6.992	5.321

- Gráfico 4.7: Valores del coeficiente global de transferencia de calor y del área equivalente para distintas configuraciones de tanques ^[11].

Application	Fluid	U_e	A_e
Tanks on legs, outdoors, not insulated	Oil	3.7	0.22 $A_1 + A_2 + A_3$
	Water at 150°F	5.1	0.16 $A_1 + A_2 + A_3$
Tanks on legs, outdoors, insulated 1 in.	Oil	0.45	0.7 $A_1 + A_2 + A_3$
	Water	0.43	0.67 $A_1 + A_2 + A_3$
Tanks on legs, indoors, not insulated	Oil	1.5	0.53 $A_1 + A_2 + A_3$
	Water	1.8	0.35 $A_1 + A_2 + A_3$
Tanks on legs, indoors, insulated 1 in.	Oil	0.36	0.8 $A_1 + A_2 + A_3$
	Water	0.37	0.73 $A_1 + A_2 + A_3$
Flat-bottom tanks, f outdoors, not insulated	Oil	3.7	0.22 $A_1 + A_2 + 0.43 D_1$
	Water	5.1	0.16 $A_1 + A_2 + 0.31 D_1$
Flat-bottom tanks, f outdoors, insulated 1 in.	Oil	0.36	0.7 $A_1 + A_2 + 3.9 D_1$
	Water	0.37	0.16 $A_1 + A_2 + 3.7 D_1$
Flat-bottom tanks, indoors, not insulated	Oil	1.5	0.53 $A_1 + A_2 + 1.1 D_1$
	Water	1.8	0.35 $A_1 + A_2 + 0.9 D_1$
Flat-bottom tanks, indoors, insulated 1 in.	Oil	0.36	0.8 $A_1 + A_2 + 4.4 D_1$
	Water	0.37	0.73 $A_1 + A_2 + 4.5 D_1$

- Gráfico 4.8: Coeficientes globales de transmisión de calor para serpentines sumergidos en líquidos [11].

U Expressed in Btu/(k · h² · °F)

Substance inside coil	Substance outside coil	Coil material	Agitation	U
Steam	Water	Lead	Agitated	70
Steam	Sugar and molasses solution	Copper	None	50-240
Steam	Boiling aqueous solution			600
Cold water	Dilute organic dye intermediates	Lead	Turbogitator at 85 r.p.m.	300
Cold water	Warm water	Wrought iron	Air bubbled into water surrounding coil	150-300
Cold water	Hot water	Lead	0.40 r.p.m. paddle stirrer	90-360
Brine	Amino acids		30 r.p.m.	100
Cold water	25% oleum at 60°C.	Wrought iron	Agitated	20
Water	Aqueous solution	Lead	500 r.p.m. sleeve propeller	250
Water	8% NaOH		22 r.p.m.	155
Steam	Fatty acid	Copper (pancake)	None	96-100
Milk	Water		Agitation	300
Cold water	Hot water	Copper	None	105-180
60°F. water	50% aqueous sugar solution	Lead	Mild	50-90
Steam and hydrogen at 1500 lb./sq. in.	60°F. water	Steel		100-165
Steam 110-146 lb./sq. in. @60°	Vegetable oil	Steel	None	23-20
Steam	Vegetable oil	Steel	Various	30-72
Cold water	Vegetable oil	Steel	Various	20-72

- Gráfico 4.9: Tabla de velocidades medias de circulación de fluidos.

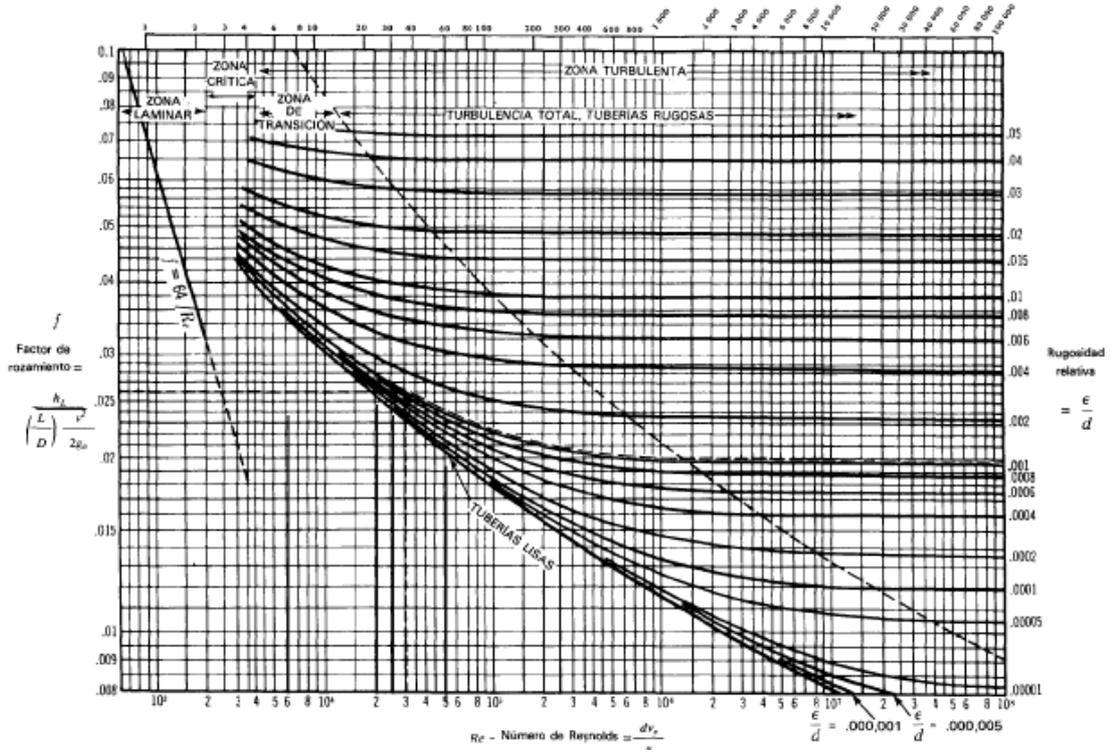
- Vapor de agua saturado o ligeramente recalentado a presión de 0 a 2 Kg/cm ²	20 m/seg
- Vapor de agua saturado o ligeramente recalentado a presión de > 2 Kg/cm ²	30 m/seg
- Vapor de agua recalentado a presión < 14 Kg/cm ²	50 m/seg
- Vapor de agua recalentado a presión > 14 Kg/cm ²	50-70 m/seg
- Agua, en servicios normales	1,2 + 1,8 m/seg
- Amoníaco líquido	1,8 m/seg
- Amoníaco gas	30 m/seg
- Aceites	1,5 m/seg
- Cloro líquido	1,5 m/seg
- Gas natural	30 m/seg
- Hidrógeno	20 m/seg
- Aire (0-2 Kg/cm ²)	20 m/seg
- Oxígeno (temp. ambiente)	10 m/seg
- Acido sulfurico	1,2 m/seg
- Agua de mar (en tubería recubierta de goma) ...	1,5 + 2,4 m/seg
- Agua de mar (en tubería recubierta de cemento).	1,5 + 3,5 m/seg

- Gráfico 4.10: Dimensiones, capacidades y pesos de tuberías de acero normalizadas [11].

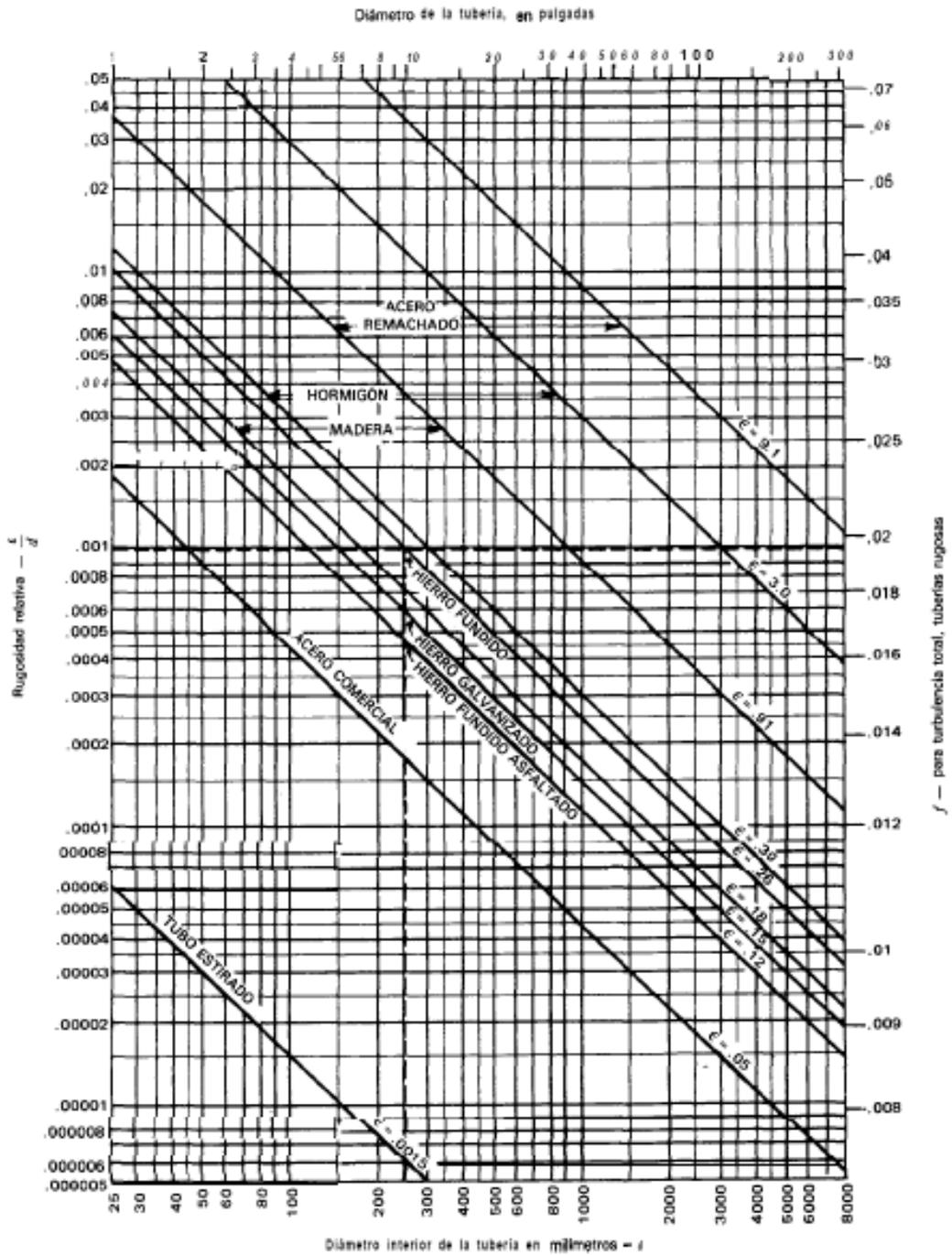
TABLE 10-18 Properties of Steel Pipe

Nominal pipe size, in	Outside diameter, in	Schedule no.	Wall thickness, in	Inside diameter, in	Cross-sectional area		Circumference, ft, or surface, ft ² /ft of length		Capacity at 1-ft/s velocity		Weight of plain-end pipe, lb/ft
					Metal, in ²	Flow, ft ²	Outside	Inside	U.S. gal/min	lbh water	
1/8	0.405	10S	0.049	0.307	0.055	0.00051	0.106	0.0804	0.231	115.5	0.19
		40ST, 40S	.068	.269	.072	.00040	.106	.0705	.179	89.5	.24
		80XS, 80S	.095	.215	.093	.00025	.106	.0663	.113	56.5	.31
1/4	0.540	10S	.065	.410	.097	.00092	.141	.107	.412	206.5	.33
		40ST, 40S	.088	.364	.125	.00072	.141	.085	.323	161.5	.42
		80XS, 80S	.119	.302	.157	.00050	.141	.079	.224	112.0	.54
3/8	0.675	10S	.065	.545	.125	.00162	.177	.143	.727	363.5	.42
		40ST, 40S	.091	.493	.167	.00133	.177	.129	.596	298.0	.57
		80XS, 80S	.126	.423	.217	.00098	.177	.111	.440	220.0	.74
1/2	0.840	5S	.065	.710	.158	.00275	.220	.186	1.234	617.0	.54
		10S	.083	.674	.197	.00248	.220	.176	1.112	556.0	.67
		40ST, 40S	.109	.622	.250	.00211	.220	.163	0.945	472.0	.85
		80XS, 80S	.147	.546	.320	.00163	.220	.143	0.730	365.0	1.09
		160	.188	.464	.385	.00117	.220	.122	0.527	263.5	1.31
		XX	.294	.252	.504	.00035	.220	.066	0.155	77.5	1.71
3/4	1.050	5S	.065	.920	.201	.00461	.275	.241	2.072	1036.0	0.69
		10S	.083	.884	.252	.00426	.275	.231	1.903	951.5	0.86
		40ST, 40S	.113	.824	.333	.00371	.275	.216	1.665	832.5	1.13
		80XS, 80S	.154	.742	.433	.00300	.275	.194	1.345	672.5	1.47
		160	.219	.612	.572	.00204	.275	.160	0.917	458.5	1.94
		XX	.308	.434	.718	.00103	.275	.114	0.461	230.5	2.44
1	1.315	5S	.065	1.185	.255	.00768	.344	.310	3.449	1725	0.87
		10S	.109	1.097	.413	.00656	.344	.287	2.946	1473	1.40
		40ST, 40S	.133	1.049	.494	.00600	.344	.275	2.690	1345	1.68
		80XS, 80S	.179	0.957	.639	.00499	.344	.250	2.240	1120	2.17
		160	.250	0.815	.836	.00362	.344	.213	1.625	812.5	2.84
		XX	.358	0.599	1.076	.00196	.344	.157	0.878	439.0	3.66
1 1/4	1.660	5S	.065	1.530	0.326	.01277	.435	.401	5.73	2965	1.11
		10S	.109	1.442	0.531	.01134	.435	.378	5.09	2545	1.81
		40ST, 40S	.140	1.390	0.668	.01040	.435	.361	4.57	2285	2.27
		80XS, 80S	.191	1.278	0.881	.00891	.435	.335	3.99	1995	3.00
		160	.250	1.160	1.107	.00734	.435	.304	3.29	1645	3.76
		XX	.382	0.896	1.534	.00438	.435	.235	1.97	985	5.21
1 1/2	1.900	5S	.065	1.770	0.375	.01709	.497	.463	7.67	3935	1.28
		10S	.109	1.682	0.614	.01543	.497	.440	6.94	3465	2.09
		40ST, 40S	.145	1.610	0.800	.01414	.497	.421	6.34	3170	2.72
		80XS, 80S	.200	1.500	1.059	.01225	.497	.393	5.49	2745	3.63
		160	.281	1.338	1.429	.00976	.497	.350	4.38	2190	4.86
		XX	.400	1.100	1.855	.00660	.497	.288	2.96	1480	6.41
2	2.375	5S	.065	2.245	0.472	.02749	.622	.588	12.34	6170	1.61
		10S	.109	2.157	0.776	.02538	.622	.565	11.39	5695	2.64
		40ST, 40S	.154	2.067	1.075	.02330	.622	.541	10.45	5225	3.65
		80ST, 80S	.218	1.939	1.477	.02050	.622	.508	9.20	4600	5.02
		160	.344	1.687	2.195	.01552	.622	.436	6.97	3485	7.46
		XX	.436	1.503	2.656	.01232	.622	.393	5.53	2765	9.03
2 1/2	2.875	5S	.083	2.709	0.728	.04003	.753	.709	17.97	8985	2.48
		10S	.120	2.635	1.039	.03757	.753	.690	17.00	8500	3.53
		40ST, 40S	.203	2.469	1.704	.03322	.753	.647	14.92	7460	5.79
		80XS, 80S	.276	2.323	2.254	.02942	.753	.608	13.20	6600	7.66
		160	.375	2.125	2.945	.02463	.753	.556	11.07	5535	10.01
		XX	.552	1.771	4.028	.01711	.753	.464	7.68	3840	13.69
3	3.500	5S	.083	3.334	0.891	.06063	.916	.873	27.21	13,605	3.03
		10S	.120	3.260	1.274	.05796	.916	.853	26.02	13,010	4.33
		40ST, 40S	.216	3.068	2.228	.05130	.916	.803	23.00	11,500	7.58
		80XS, 80S	.300	2.900	3.016	.04587	.916	.759	20.55	10,275	10.25
		160	.438	2.624	4.213	.03755	.916	.687	16.95	8430	14.32
		XX	.600	2.300	5.466	.02885	.916	.602	12.95	6475	18.58
3 1/2	4.0	5S	.083	3.834	1.021	.08017	1.047	1.004	35.98	17,990	3.48
		10S	.120	3.760	1.463	.07711	1.047	0.984	34.61	17,305	4.97
		40ST, 40S	.226	3.545	2.690	.06870	1.047	0.929	30.80	15,400	9.11
		80XS, 80S	.318	3.364	3.678	.06170	1.047	0.881	27.70	13,550	12.50
4	4.5	5S	.083	4.334	1.152	.10245	1.178	1.135	46.0	23,000	3.92
		10S	.120	4.260	1.651	.09838	1.178	1.115	44.4	22,200	5.61
		40ST, 40S	.237	4.025	3.17	.08840	1.178	1.054	39.6	19,500	10.79
		80XS, 80S	.337	3.826	4.41	.07996	1.178	1.002	35.8	17,900	14.98

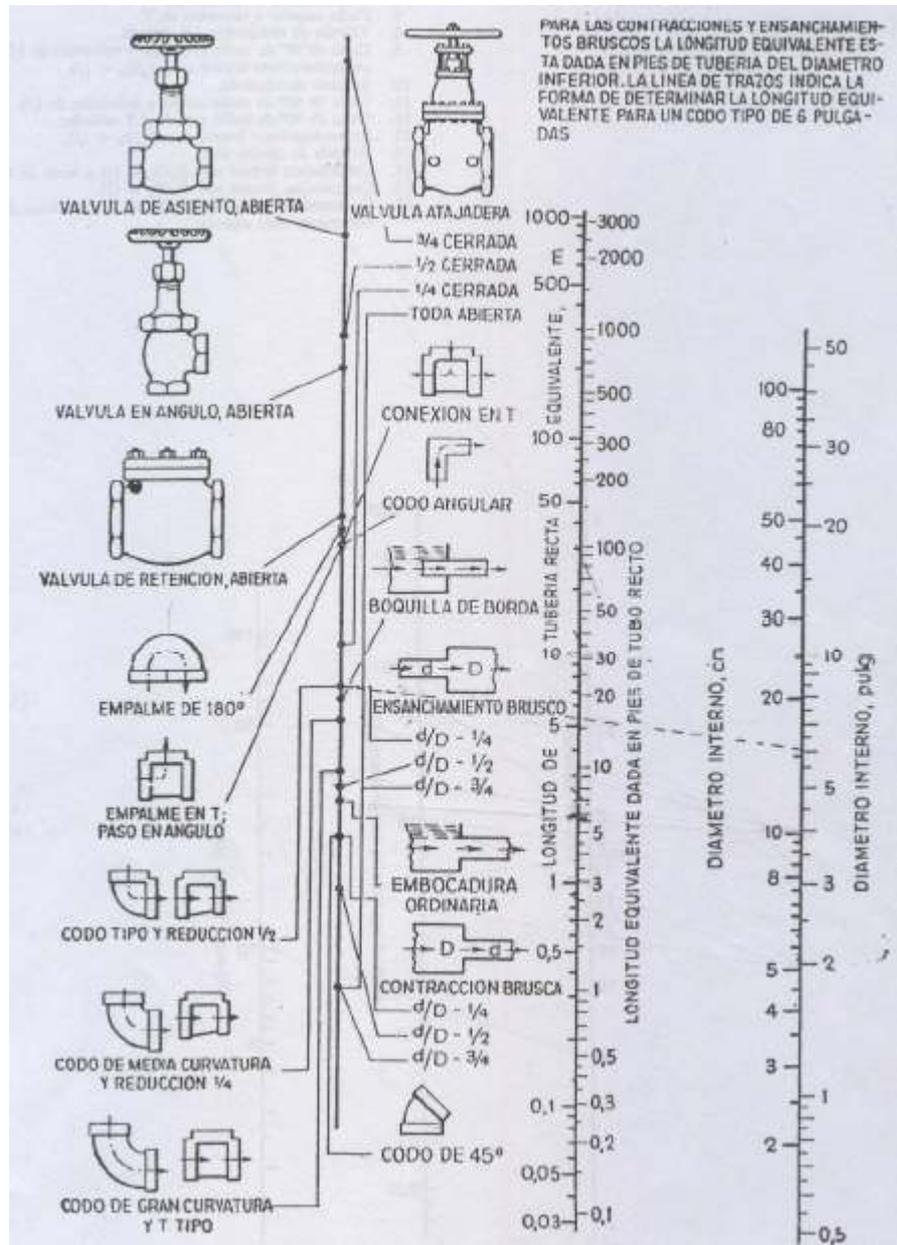
- Gráfico 4.11: Gráfica de Moody para el cálculo del factor de fricción de Darcy [19].



- Gráfico 4.12: Rugosidad relativa de los materiales de las tuberías [19].



- Gráfico 4.13: Nomograma para cálculo de longitudes equivalentes.



FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE PRETRATAMIENTO DE
ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS
LIBRES PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.**

ANEXO 5: SEGURIDAD INDUSTRIAL

M^a DE LOS MILAGROS GARCÍA CABELLO

SEPTIEMBRE, 2007

0. ÍNDICE

0. ÍNDICE	1
1. LEGISLACIÓN APLICABLE	2
2. CONDICIONES GENERALES DE SEGURIDAD EN LOS LUGARES DE TRABAJO	3
3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS	6
3.1. SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS	7
3.2. SEGURIDAD ANTE RIESGOS DE TIPO ELÉCTRICO	10
3.3. SEGURIDAD ANTE CAÍDAS Y GOLPES	13
3.4. SEGURIDAD ANTE EL RUIDO	14
4. SEGURIDAD EN EL ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS QUÍMICOS	16
5. PROTECCIONES PERSONALES	19
6. SEÑALIZACIÓN	21
7. PLAN DE EMERGENCIA	23
8. FICHAS DE SEGURIDAD DE COMPUESTOS QUÍMICOS	25
6.1. METANOL	25
6.2. ÁCIDO SULFÚRICO	28
6.3. BIODIÉSEL	31

1. LEGISLACIÓN APLICABLE

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 486/1997, de 14 de abril. Disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Real Decreto 485/1997, de 14 de abril. Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.
- Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo. Disposiciones mínimas sobre utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias.
- Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.
- Real Decreto 1942/1993, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones de Protección contra Incendios.
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.
- Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.

2. CONDICIONES GENERALES DE SEGURIDAD EN LOS LUGARES DE TRABAJO

- Seguridad estructural:

Los edificios y locales de los lugares de trabajo poseen la estructura y solidez apropiadas a su tipo de utilización. Para las condiciones de uso previstas, todos los elementos, estructurales o de servicio, tienen la solidez y resistencia necesarias para soportar las cargas o esfuerzos a que sean sometidos; disponen de un sistema de sujeción o apoyo que asegure su estabilidad.

- Espacios de trabajo y zonas peligrosas:

a) Las dimensiones de los locales de trabajo permiten que los trabajadores realicen su trabajo sin riesgos para su seguridad y salud y en condiciones ergonómicas aceptables.

b) Se han tomado las medidas adecuadas para la protección de los trabajadores que tengan que acceder a zonas de trabajo donde puedan verse afectados por riesgos de caída, caída de objetos y contacto o exposición a elementos agresivos.

c) Las zonas en las que exista riesgo de caída, de caída de objetos o de contacto o exposición a elementos agresivos, deben estar claramente señalizadas.

- Suelos, aberturas y desniveles, y barandillas:

a) Los suelos son fijos, estables y no resbaladizos, sin irregularidades ni pendientes peligrosas.

b) Las aberturas o desniveles que supongan un riesgo de caída de personas se protegen mediante barandillas u otros sistemas de protección

de seguridad equivalente, que tienen partes móviles cuando es necesario disponer de acceso a la abertura.

c) Las barandillas son de materiales rígidos, tienen una altura mínima de 90 cm y disponen de una protección que impide el paso o deslizamiento por debajo de las mismas.

- Vías de circulación:

Las vías de circulación de los lugares de trabajo, tanto las situadas en el exterior de edificios y naves como en el interior de los mismos, incluidos los pasillos, escaleras, rampas, etc, se utilizan conforme a su uso previsto, de forma fácil y con total seguridad para los peatones o vehículos que circulan por ellas y para el personal que trabaja en sus proximidades.

Las vías de circulación destinadas a vehículos pasan a una distancia suficiente de las puertas, zonas de circulación de peatones, pasillos y escaleras.

- Vías y salidas de evacuación:

Las disposiciones en materia de evacuación en los establecimientos industriales serán conformes a lo dispuesto en el Real Decreto 486/1997, de 14 de abril.

Las vías y salidas de evacuación desembocan lo más directamente posible en el exterior o en una zona de seguridad.

En caso de avería de iluminación, las vías y salidas de evacuación que requieran iluminación deberán de estar equipadas con iluminación de seguridad de suficiente intensidad.

- Detección de atmósferas explosivas o con presencia de vapores tóxicos:

Hay que detectar los recintos donde existan gases tóxicos; una vez detectada la presencia del gas, hemos de tomar las medidas oportunas para evitar las intoxicaciones.

Las medidas a adoptar para prevenir la falta de oxígeno son:

- Las galerías y locales donde sea posible la acumulación de gases, deberán estar ventiladas.
- Para airear rápidamente las zonas donde se ha detectado una atmósfera peligrosa, se dispondrá de ventiladores portátiles.

Los riesgos de explosión pueden producirse ante eventuales escapes, producto de un mal estado de los equipos involucrados en la producción y almacenamiento de productos peligrosos. Por ello, cada año se controlarán los espesores de paredes metálicas y los accesorios para el flujo, tanto de metanol como de ácido sulfúrico, a los puntos de uso, a fin de detectar cualquier fuga que se hubiese producido.

3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Se entiende por análisis de riesgos el proceso de valoración del riesgo que entraña para la salud y la seguridad de los trabajadores la posibilidad de que se verifique un determinado peligro en el lugar de trabajo.

Los objetivos del análisis de riesgos son la prevención de la ocurrencia y la mitigación de los efectos de accidentes en instalaciones industriales potencialmente peligrosas.

El riesgo cero es imposible, siempre existe el riesgo de que se actualice un determinado accidente, pero vamos a intentar disminuir la probabilidad de que se produzcan, disminuir las consecuencias de estos accidentes y, en caso de que se produzcan, estar preparados para la correcta actuación.

Se le dará prioridad a la disminución de la probabilidad de que se materialice un determinado accidente; en caso de no ser posible, se buscará tener el medio para que, una vez producido el accidente, tomar las medidas adecuadas para minimizar el daño producido.

Durante el proceso que tiene lugar en la instalación proyectada se identifican como causa de posibles fuentes de accidentes:

- Fuego.
- Aparato eléctrico.
- Caídas y golpes.
- Ruido.

3.1. SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS

Para que se produzca un fuego deben darse simultáneamente los tres componentes del triángulo del fuego:

- a) El combustible (gas, vapores, nieblas o polvos).
- b) El comburente (el oxígeno, siempre presente).
- c) El foco de ignición (aparatos/instalaciones eléctricas o cualquier fuente de calor).

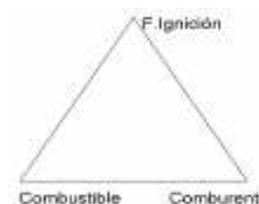


Figura S.1. Triángulo del fuego.

Las medidas de prevención nos llevan a buscar los medios para que no se de uno de los componentes del triángulo del fuego, ya que la ausencia de uno de los tres componentes haría que no se produjese un fuego.

- Actuación sobre el combustible:

En la actuación sobre el combustible es donde la prevención de incendios tiene su más amplio campo de posibilidades de actuación. Entre otras medidas existentes, destacamos las de:

- Fugas y derrames: se adoptarán las medidas o proveerán los medios necesarios para que, en caso de escape o fuga de líquido o gas, se recoja y conduzca a lugar seguro; en caso de necesidad, se dispondrán instalaciones especiales de detección de fugas y alarma consiguiente.
- Aparatos: en general, todos los aparatos que impliquen el riesgo de desprendimiento de gas, polvo o vapor combustible, estarán instalados en recintos adecuados; además, existirán medios de extracción local de las posibles emanaciones y se controlará la inexistencia de focos de ignición por fricción mecánica, para lo cual se les someterá a un cuidadoso programa de mantenimiento preventivo.

- Actuación sobre el comburente:

Son medidas encaminadas a la eliminación del comburente; generalmente, son de difícil aplicación en la práctica, ya que el aire es la principal fuente de oxígeno, por lo que es muy difícil eliminarlo en zonas amplias. No se suelen aplicar estas medidas, salvo casos excepcionales.

- Actuación sobre los focos de ignición:

Consiste en la eliminación de la energía de activación necesaria para que se inicie una reacción de combustión, mediante la eliminación de los posibles focos de ignición o fuentes de calor existentes:

- Herramientas y prendas de trabajo: tanto las herramientas que se utilicen como las prendas de trabajo, en particular el calzado, estarán desprovistas de elementos metálicos férricos que puedan dar lugar a chispas.

- Todos los motores y equipos eléctricos de la planta serán antideflagrantes, los cierres de las válvulas, bombas, etc., han de tener garantía de estanqueidad.

- Prohibición de fumar: se prohibirá de forma expresa y se señalizará con letreros de fácil visibilidad y clara expresión.

- Electricidad estática: hay que evitar la acumulación de cargas estáticas sobre cuerpos aislados en los que se produce una fricción. La forma más frecuente de lograrlo es mediante la interconexión eléctrica de los cuerpos entre sí y con tierra. De esta forma se produce una descarga de la electricidad generada, de forma que la intensidad circulante es muy baja.

Es de destacar que para vapores de líquidos inflamables, cualquier mínimo foco de ignición es suficiente, ya que la energía mínima de activación presenta valores muy bajos, del orden de milijulios.

Llegados al punto en el cual el incendio no ha podido ser evitado, es necesario disponer de sistemas de extinción de incendios. Debido a las

características de la planta, es decir, a su configuración y ubicación con relación a su entorno, éstos van a ser extintores, tal y como establece el R.D. 2267/2004, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.

Los extintores son aparatos autónomos que contienen un agente de extinción, que puede ser proyectado y dirigido sobre un fuego por la acción de una presión interior.

Se instalarán extintores de incendio portátiles en todos los sectores de incendio. El agente extintor utilizado debe ser el adecuado para el fuego previsible, siendo preferentemente polvo o espuma, de acuerdo con el Reglamento de Instalaciones de protección contra incendios, aprobado por el Real Decreto 1942/1993, de 5 de noviembre.

El emplazamiento de los extintores portátiles de incendio permitirá que sean fácilmente visibles y accesibles, estarán situados próximos a los puntos donde se estime mayor probabilidad de iniciarse el incendio y su distribución será tal que el recorrido máximo horizontal, desde cualquier punto del sector de incendio hasta el extintor, no supere 15 m. La altura máxima de colocación de los mismos es de 1,70 m. Todo trabajador de la instalación debe recibir formación sobre extinción de incendios.

Se instalarán sistemas manuales de alarma de incendio, situándose un pulsador junto a cada salida de evacuación del sector de incendio, y la distancia máxima a recorrer desde cualquier punto hasta alcanzar un pulsador no debe superar los 25 m.

3.2. SEGURIDAD ANTE RIESGOS DE TIPO ELÉCTRICO

Este riesgo estará siempre presente ya que todas las unidades consumen energía, por lo que estarán conectadas a la red y una mala conexión o un mal contacto podrá ser una fuente que materialice un accidente. Se define el riesgo eléctrico como la posibilidad de que la corriente eléctrica circule a través del cuerpo humano. Para que exista este riesgo debe darse:

- Que exista un circuito eléctrico formado por elementos conductores.
- Que el cuerpo humano sea parte del circuito.
- Que en el circuito exista una diferencia de potencial.

Las consecuencias sobre el cuerpo humano son muy diversas, dependiendo de la intensidad circulante, aunque también tendremos que tener en cuenta el tiempo que funcione el circuito y el tipo de corriente:

valor de intensidad (mA)	Efectos sobre el cuerpo humano
1 a 3 mA	Leve hormigueo
3 a 25 mA	Contracciones musculares involuntarias Aumento de la tensión sanguínea
25 a 75 mA	Dificultades en la función respiratoria Fibrilación ventricular
75 a 3000 mA	Paralización de la función respiratoria (asfixia)
Más de 3000 mA	Fibrilación ventricular irreversible Graves quemaduras

Tabla S.1. Efectos de la intensidad sobre el cuerpo humano.

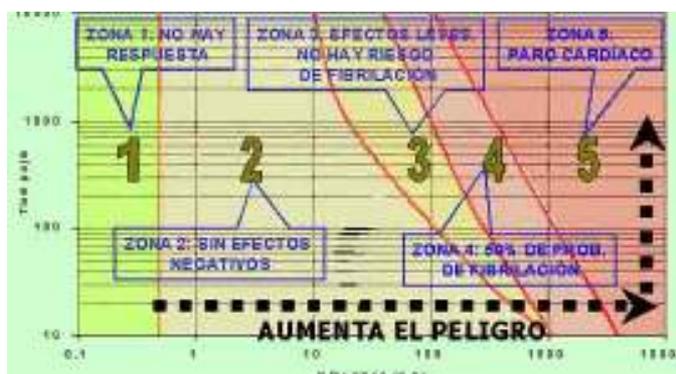


Figura S.2. Zonas de riesgo eléctrico.

El peligro aumenta de las zonas 1 a 5, siendo las zonas 1 y 2 las más favorables para trabajar. El grado de humedad de la persona y el ambiente también van a influir.

Las consecuencias de un accidente de tipo eléctrico dependen del tiempo, circuito (partes por las que circule la corriente) y de los tres factores siguientes que son sobre los que se actúa para disminuir este riesgo, así como sus consecuencias:

- Tensión aplicada.
- Intensidad circulante.
- Resistencia eléctrica.

Las medidas utilizadas más frecuentemente son las siguientes:

- Toma de tierra: el aparato a proteger se conecta a tierra mediante una conexión de muy baja resistencia eléctrica; en caso de que haya un fallo en el aparato, la mayor parte de la intensidad derivará a tierra mediante esta conexión, ya que tiene mucha menor resistencia que el cuerpo humano.
- Aislamientos de protección: todo el equipo se recubre con un aislamiento eléctrico suplementario; en caso de fallo eléctrico, la carcasa del mismo queda sin tensión.
- Uso de tensiones de seguridad: se emplean voltajes pequeños, de forma que si hay un fallo eléctrico, la intensidad que circula por el cuerpo es muy pequeña y no causa daños; por ello limitan la corriente que puede circular por el cuerpo a valores seguros. Las tensiones de seguridad prescritas por el Reglamento Electrotécnico de Baja tensión son:
 - 12 voltios, para condiciones de inmersión.
 - 24 voltios, para locales o emplazamientos mojados.
 - 50 voltios, para locales o emplazamientos húmedos.
 - 75 voltios para locales o emplazamientos secos.

- Diferenciales: estos dispositivos chequean permanentemente la intensidad que entra y sale en un circuito eléctrico; si son iguales, el aparato no actúa y la corriente circula normalmente; si son distintas, es porque hay un defecto en la instalación y el diferencial corta el paso de corriente.

- Magnetotérmicos: se trata de un fusible que corta el paso de corriente cuando es muy elevado; limitan el consumo de corriente que puede tener una instalación si éste es muy elevado porque estaría relacionado con un fallo en la misma teniendo en cuenta que:

-Si soportan muy baja intensidad de corriente, estarán cortando continuamente el paso de la misma y no sería práctico trabajar en esas condiciones.

- Si soportan una intensidad muy alta, habrá defectos que no le afecten y por lo tanto no cortarán la corriente, con el consiguiente peligro de electrocución.

3.3. SEGURIDAD ANTE CAÍDAS Y GOLPES

Se trata de otro factor de riesgo que provoca múltiples accidentes laborales así como lesiones de muy distinta seriedad que pueden llegar incluso a la muerte. Hemos dividido este punto en los distintos accidentes de esta naturaleza y procedemos a describir las medidas para disminuir las fuentes de riesgos:

- Caídas.
- Atropellos.
- Golpes de distinta clase.

Para disminuir el riesgo de caídas se pondrán barandillas así como escaleras.

El hecho de que se produzca la entrada de camiones en la instalación es una fuente de posibles atropellos; se ha establecido un recorrido obligatorio para circular en torno a la planta.

En cuanto a los golpes de distinta clase, el uso de casco, que será obligatorio en la planta, disminuirá las consecuencias de distintos impactos sobre la cabeza del operario. No se podrán tomar más opciones ya que no se pueden predecir choques, resbalones, etc., tan sólo para corregir las consecuencias habrá un botiquín perfectamente equipado y actualizado periódicamente, con vendas y gasas, pomadas para quemaduras y golpes, pastillas para el dolor de cabeza, termómetro, manuales en los que se indique qué hacer en caso de quemaduras, golpes y caídas.

3.4. SEGURIDAD ANTE EL RUIDO

Todas las máquinas: motores, bombas, alarmas, sirenas, etc., son fuentes de ruido que, a parte de definirse como un sonido molesto, se considera como una clase de contaminación. El ruido se define como un sonido no deseado, inarticulado, confuso, cuya intensidad varía con el tiempo.

El oído humano es capaz de detectar desde un sonido asociado a una onda de presión de tan solo 20 μPa hasta 10 millones de veces este valor (20 Pa), valor correspondiente al umbral de dolor (120 dB).

Los efectos patológicos del ruido son:

- Trauma acústico: lesión del oído interno. Irreversible.
- Hipertensión arterial.
- Alteración del ritmo cardiaco.
- Trastornos de tipo respiratorio.
- Perturbación en la secreción hormonal (adrenalina).
- Trastornos nerviosos.

Para la medición de ruidos, se utilizan sonómetros, dosímetros y analizadores de frecuencia:

- Sonómetro: mide variaciones en la presión de sonido por un micrófono.
- Dosímetro: mide la energía sónica recibida durante un periodo de tiempo, expresándola como porcentaje de la dosis máxima permitida.
- Analizador de frecuencia: identifica las frecuencias principales de un ruido.

Según el R.D. 286/2006, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al

ruido, en ningún caso la exposición del trabajador deberá superar los valores límite de exposición establecidos en dicho reglamento.

Los problemas se pueden atacar en tres frentes:

- Sobre la fuente:

- Disminuyendo la energía del ruido por medio de sistemas conductores de la vibración.
- Cambiando el acoplamiento entre el sistema productor del ruido y el sistema propagador.
- Sustitución por otro equipo menos sonoro.

- Sobre el medio de transmisión:

- Aumentando la distancia entre la fuente y el receptor.
- Tratamiento acústico del suelo, techo y paredes para absorber el sonido y reducir la resonancia.
- Aislar acústicamente la fuente de ruido.

- Sobre el receptor:

- Utilización de protecciones personales: tapones (reducen 10-20 dB), auriculares (reducen 50 dB).
- Aislando al trabajador.
- Realizando una rotación del personal para reducir el tiempo de exposición.

Se calcularán los niveles de ruido en cada parte de la planta y se comparará con los valores permitidos. Basándonos en que siempre es mejor usar medidas colectivas que equipos de protección individual (EPI's), en la medida de lo posible intentaremos utilizar unidades de menor nivel sonoro ó espaciarlas; en caso de no ser suficiente se optará por usar EPI's.

4. SEGURIDAD EN EL ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS QUÍMICOS

La reglamentación española sobre almacenamiento de productos químicos está recogida en el Real Decreto 379/2001 y sus instrucciones técnicas complementarias.

En la instalación objeto del presente proyecto se trabaja con dos sustancias peligrosas, metanol y ácido sulfúrico; el metanol está catalogado como inflamable y el ácido sulfúrico como corrosivo (en el último apartado del presente anexo se muestran las fichas de seguridad de cada una de estas sustancias).

Los recipientes que contengan estas sustancias deben poseer las características adecuadas para dicha función; tanto para el transporte como para el almacenamiento final, toda sustancia debe ir correctamente etiquetada para su perfecta identificación en todo momento; en caso de derrames o fugas se debe actuar según las indicaciones de la ficha de seguridad.

Los tanques de almacenamiento deberán disponer de un cubeto de retención. La distancia en proyección horizontal entre la pared del recipiente y el borde interior inferior del cubeto será, como mínimo, de 1 metro. La capacidad útil del cubeto será igual a la capacidad del recipiente. Las paredes y fondos de los cubetos deberán ser de un material que asegure la estanqueidad de los productos almacenados durante el tiempo necesario previsto para su evacuación, con un tiempo mínimo de cuarenta y ocho horas, debiendo ser diseñados para poder resistir la presión hidrostática debida a la altura total del líquido a cubeto lleno.

- Tanque de almacenamiento de metanol:

Según la instrucción técnica complementaria MIE-APQ 1, «Almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles», el metanol está

clasificado como producto de la subclase B1, ya que su punto de inflamación es inferior a 38 °C.

El tanque de almacenamiento de metanol deberá disponer de un sistema de venteo para prevenir la deformación del mismo como consecuencia de llenados, vaciados o cambios de temperatura ambiente. En el caso de recipientes con capacidad superior a 5 m³ que almacenen líquidos con punto de ebullición igual o inferior a 38 °C, el venteo estará normalmente cerrado, excepto cuando se ventee a la atmósfera en condiciones de presión interna o vacío.

En el caso de tanques con fondo plano, la superficie sobre la que descansa el fondo del tanque deberá quedar a 30 centímetros, como mínimo, por encima del suelo y deberá ser impermeable al producto a contener, de forma que las posibles fugas por el fondo salgan al exterior.

Para la protección de ciertos riesgos específicos o de las instalaciones conexas del almacenamiento, deberán utilizarse sistemas de protección contra incendios y agentes extintores de clase adecuada al riesgo, tales como polvo o CO₂.

En las zonas donde puedan existir conexiones de mangueras, válvulas de uso frecuente o análogos, estos extintores se encontrarán distribuidos de manera que no haya que recorrer más de 15 m desde el área protegida para alcanzar el extintor. Generalmente serán de polvo, portátiles o sobre ruedas. En las zonas de riesgo eléctrico se utilizarán, preferiblemente, extintores de CO₂.

La instalación eléctrica estará de acuerdo con las exigencias establecidas en el Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión y sus instrucciones técnicas complementarias, en especial con la ITC-BT-29, «Prescripciones particulares para las instalaciones de locales con riesgo de incendio o explosión».

- Tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico:

Para el almacenamiento de ácido sulfúrico se opta por el uso de bidones retornables, dada la escasa capacidad de almacenamiento requerida.

En este tanque cualquier posible corrosión del acero generaría hidrógeno, que es altamente inflamable, con lo cual toda la instalación eléctrica estará de acuerdo con las exigencias establecidas en el Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión y sus instrucciones técnicas complementarias, en especial con la ITC-BT-29, «Prescripciones particulares para las instalaciones de locales con riesgo de incendio o explosión».

Otro riesgo importante es el relacionado con fugas de ácido sulfúrico a través de juntas en válvulas, bombas, etc. Por ello, el mantenimiento de los equipos que operan con ácido es un factor primordial también desde el punto de vista de la seguridad.

5. PROTECCIONES PERSONALES

Se atenderá a lo dispuesto en el Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, donde se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual, en lo que se refiere a la elección, disposición y mantenimiento de los equipos de protección individual de que deberán estar provistos los trabajadores, cuando existan riesgos que no han podido evitarse o limitarse suficientemente.

Se entiende por equipo de protección personal (EPI) cualquier equipo destinado a ser llevado o sujeto por el trabajador para que le proteja de uno o varios riesgos que puedan amenazar a su seguridad o salud en el trabajo, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin.

Toda persona que se encuentre en la planta deberá llevar:

- Casco de protección.
- Gafas de seguridad.
- Calzado de seguridad.

Los operarios de la planta, además de las anteriores, deberán llevar:

- Protectores de oídos.
- Ropa de seguridad.

Los trabajadores que operen en las zonas en las que se encuentran almacenadas o en proceso las sustancias peligrosas, deberán llevar:

- Gafas de seguridad o pantallas.
- Chalecos, chaquetas y mandiles de protección contra agresiones

químicas.

En el caso de producirse fugas de dichas sustancias químicas, a todos los EPI's anteriores habrá que añadir:

- Un equipo respiratorio autónomo.
- Guantes.
- Ropa de protección contra agresiones químicas.

6. SEÑALIZACIÓN

En el Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, se establecen las disposiciones mínimas de carácter general relativas a la señalización de seguridad y salud a fin de:

- Llamar la atención de los trabajadores sobre la existencia de determinados riesgos, prohibiciones u obligaciones.
- Alertar a los trabajadores cuando se produzca una determinada situación de emergencia que requiera medidas de protección o evacuación.
- Orientar y guiar a los trabajadores que realicen determinadas maniobras peligrosas.

Tipos de señales:

a) En forma de panel:

- Las señales de advertencia poseen forma triangular con pictograma negro sobre fondo amarillo, excepto la señal de materias nocivas que lleva fondo naranja. Se colocarán señales de advertencia de: riesgo de tropezar, caídas a distinto nivel, materiales tóxicos, materiales corrosivos en la zona de almacenamiento de ácido y en las zonas de operación con el mismo, debido a la posibilidad de fugas.
- Las señales de prohibición tienen forma redonda, pictograma negro sobre fondo blanco y bordes y bandas rojos. Estará prohibido fumar en toda la planta química; se prohibirá la entrada a las instalaciones a toda persona no autorizada.
- Las señales de obligación tienen forma redonda y pictograma blanco sobre fondo azul. Principalmente son las relacionadas con las protecciones personales.

- Las señales relativas a la lucha contra incendios tienen forma rectangular o cuadrada, con pictograma blanco sobre fondo rojo. Los extintores deberán tener señales indicativas de su presencia en lugares visibles; también se indicará la dirección que deberá seguirse en caso de evacuación.

- Las señales de salvamento o socorro tienen forma rectangular o cuadrada con pictograma blanco sobre fondo verde. Se dispondrá de señalización de salida de socorro y teléfono de salvamento; las duchas de seguridad así como los lavajos dispondrán de su señal en un lugar visible; se indicará con la señal correspondiente la ubicación del botiquín y/o servicio médico.

b) Cintas de señalización: para señalar obstáculos, zonas de caídas de objetos, etc., se señalizan con los paneles anteriores o bien se delimita la zona de exposición al riesgo con cintas de tela o materiales plásticos con franjas alternadas oblicuas en color amarillo y negro, inclinadas 45°.

c) Señales acústicas de emergencia, que deberán conocer todos los operarios de la planta química.

7. PLAN DE EMERGENCIA

Cuando se produce un accidente, es necesario disponer de un plan de emergencia, cuyo objetivo es coordinar los esfuerzos de todas las personas que se puedan ver afectadas por el accidente.

Los accidentes generan una situación de emergencia, la cual se puede clasificar según los recursos necesarios para su supresión en los niveles siguientes:

- Nivel de emergencia 1: la supresión de la emergencia se consigue con los medios internos de la empresa.
- Nivel de emergencia 2: para conseguir la supresión de la emergencia es necesario además de los medios de la empresa la presencia de los bomberos.
- Nivel de emergencia 3: son necesarios los medios internos de la empresa, bomberos y otras ayudas externas. Sería la situación más grave.

Una vez que se han clasificado las emergencias se debe determinar las acciones a emprender en cada caso: alerta, alarma, intervención o apoyo. En los planes de emergencia es muy importante que cada persona de la organización tenga claro cuál es su papel. Existen varios equipos de emergencia, cada uno de los cuales tiene asignada una función:

- Equipos de alarma y evacuación.
- Equipos de primeros auxilios.
- Equipos de primera y segunda intervención.
- Jefe de intervención.
- Jefe de emergencia.

Todo plan debe disponer también de un esquema de operaciones para

el desarrollo del mismo. Una vez que el plan de emergencia está elaborado es necesario implantarlo, para ello se nombra:

- Un responsable del plan.
- Un comité de autoprotección, en el que se deben implicar el mayor número de personas.

Dentro de la implantación se debe realizar:

- El mantenimiento y mejora de factores técnicos.
- Adiestramiento de los medios humanos.
- Simulacros de emergencia.
- Programa de mantenimiento.
- Investigación de siniestros.

8. FICHAS DE SEGURIDAD DE COMPUESTOS QUÍMICOS

8.1. METANOL

Fichas Internacionales de Seguridad Química

METANOL

ICSC: 0057






METANOL
 Alcohol metílico
 Carbinol
 Monohidroximetano
 CH_3OH
 Masa molecular: 32.0

N° CAS 67-56-1
 N° RTECS PC1400000
 N° ICSC 0057
 N° NU 1230
 N° CE 603-001-00-X

TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable. Arde con una llama invisible. Explosivo.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes.	Polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones (véanse Notas).	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICION		¡EVITAR LA EXPOSICION DE ADOLESCENTES Y NIÑOS!	
• INHALACION	Tos, vértigo, dolor de cabeza, náuseas.	Ventilación. Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo y proporcionar asistencia médica.

• PIEL	¡PUEDE ABSORBERSE! Piel seca, enrojecimiento.	Guantes protectores y traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica.
• OJOS	Enrojecimiento, dolor.	Gafas ajustadas de seguridad o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
• INGESTION	Dolor abdominal, jadeo, pérdida del conocimiento, vómitos (para mayor información véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Provocar el vómito (¡UNICAMENTE EN PERSONAS CONSCIENTES!) y proporcionar asistencia médica.
DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO	
Evacuar la zona de peligro. Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes herméticos, eliminar el líquido derramado con agua abundante y el vapor con agua pulverizada. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).	A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar fresco.	 <p>No transportar con alimentos y piensos.</p> <p>símbolo F símbolo T R: 11-23/24/25-39-23/24/25 S: (1/2)-7-16-36/37-45 Clasificación de Peligros NU: 3 Riesgos Subsidiarios NU: 6.1 Grupo de Envasado NU: II CE:</p>	
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE			
ICSC: 0057		Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994	

Fichas Internacionales de Seguridad Química

METANOL

ICSC: 0057

D A T O S I	<p>ESTADO FISICO; ASPECTO Líquido incoloro, de olor característico.</p> <p>PELIGROS FISICOS El vapor se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas.</p> <p>PELIGROS QUIMICOS La sustancia se descompone al calentarla intensamente, produciendo monóxido de carbono y formaldehído. Reacciona violentamente con oxidantes,</p>	<p>VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACION Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION CORTA</p>
--	--	--

M P O R T A N T E S	<p>originando peligro de incendio y explosión. Ataca al plomo y al aluminio.</p> <p>LIMITES DE EXPOSICION TLV (como TWA): 200 ppm; 262 mg/m³ (piel) (ACGIH 1993-1994). TLV (como STEL): 250 ppm; 328 mg/m³ (piel) (ACGIH 1993-1994).</p>	<p>La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central, dando lugar a una pérdida del conocimiento. La exposición por ingestión puede producir ceguera y sordera. Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. Se recomienda vigilancia médica.</p> <p>EFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central, dando lugar a dolores de cabeza persistentes y alteraciones de la visión.</p>
PROPIEDADES FISICAS	<p>Punto de ebullición: 65°C Punto de fusión: -94°C Densidad relativa (agua = 1): 0.79 Solubilidad en agua: Miscible Presión de vapor, kPa a 20°C: 12.3 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.1</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.01 Punto de inflamación: (c.c.) 12°C Temperatura de autoignición: 385°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 6-35.6 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.82/-0.66</p>
DATOS AMBIENTALES	 <p>La sustancia presenta una baja toxicidad para los organismos acuáticos y terrestres.</p>	
NOTAS		
<p>EXPLOSION/PREVENCIÓN: Utilícese herramientas manuales no generadoras de chispas. Está indicado un examen médico periódico dependiendo del grado de exposición.</p> <p style="text-align: right;">Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-36 Código NFPA: H 1; F 3; R 0;</p>		
INFORMACION ADICIONAL		
FISQ: 3-138 METANOL		
ICSC: 0057		METANOL
© CCE, IPCS, 1994		
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	<p>Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).</p>	

8.2. ÁCIDO SULFÚRICO

Fichas Internacionales de Seguridad Química

ACIDO SULFURICO

ICSC: 0362






ACIDO SULFURICO
 Aceite de vitriolo
 H_2SO_4
 Masa molecular: 98.1

N° CAS 7664-93-9
 N° RTECS WS5600000
 N° ICSC 0362
 N° NU 1830
 N° CE 016-020-00-8

TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión. Desprende humos (o gases) tóxicos o irritantes en caso de incendio.	NO poner en contacto con sustancias inflamables. NO poner en contacto con combustibles.	NO utilizar agua. En caso de incendio en el entorno: polvo, AFFF, espuma, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Riesgo de incendio y explosión en contacto con bases, sustancias combustibles, oxidantes, agentes reductores, agua.		En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua pero NO en contacto directo con agua.
EXPOSICION		¡EVITAR LA FORMACION DE NIEBLA DEL PRODUCTO! ¡EVITAR TODO CONTACTO!	¡CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS!
• INHALACION	Corrosivo. Sensación de quemazón, tos, dificultad respiratoria, dolor de garganta.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semiincorporado, respiración artificial si estuviera indicada y

			proporcionar asistencia médica.
• PIEL	Corrosivo. Dolor, enrojecimiento, quemaduras cutáneas graves.	Guantes protectores y traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica.
• OJOS	Corrosivo. Dolor, enrojecimiento, quemaduras profundas graves.	Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
• INGESTION	Corrosivo. Dolor abdominal, sensación de quemazón, vómitos, colapso.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca, dar a beber agua abundante, NO provocar el vómito y proporcionar asistencia médica.
DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO	
Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes herméticos, NO absorber en serrín u otros absorbentes combustibles. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).	Separado de sustancias combustibles y reductoras, oxidantes fuertes, bases fuertes y alimentos y piensos (véanse Notas). Puede ser almacenado en contenedores de acero inoxidable (véanse Notas).		Envase irrompible; colocar el envase frágil dentro de un recipiente irrompible cerrado. No transportar con alimentos y piensos. símbolo C R: 35 S: (1/2-)26-30-45 Clasificación de Peligros NU: 8 Grupo de Envasado NU: II CE:
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE			
ICSC: 0362	Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994		

Fichas Internacionales de Seguridad Química

ACIDO SULFURICO

ICSC: 0362

D A T O S	ESTADO FISICO; ASPECTO Líquido higroscópico, incoloro, aceitoso e inodoro.	VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación del aerosol y por ingestión.
	PELIGROS FISICOS	RIESGO DE INHALACION La evaporación a 20°C es despreciable; sin embargo, se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva de partículas en el aire por pulverización.
	PELIGROS QUIMICOS Por combustión, formación de humos	

I M P O R T A N T E S	<p>tóxicos de óxidos de azufre. La sustancia es un oxidante fuerte y reacciona violentamente con materiales combustibles y reductores. La sustancia es un ácido fuerte, reacciona violentamente con bases y es corrosiva para la mayoría de metales más comunes, originando hidrógeno (gas inflamable y explosivo). Reacciona violentamente con agua y compuestos orgánicos con desprendimiento de calor (véanse Notas). Al calentar se forman humos (o gases) irritantes o tóxicos (óxido de azufre).</p> <p>LIMITES DE EXPOSICION TLV (como TWA): 1 mg/m³ (ACGIH 1993-1994). TLV (como STEL): 3 mg/m³ (ACGIH 1993-1994).</p>	<p>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia es corrosiva de los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Corrosiva por ingestión. La inhalación del aerosol de la sustancia puede originar edema pulmonar (véanse Notas).</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA Los pulmones pueden resultar afectados por la exposición prolongada o repetida al aerosol de esta sustancia. Si las exposiciones al aerosol de esta sustancia son repetidas o prolongadas existe el riesgo de presentar erosiones dentales.</p>
PROPIEDADES FISICAS	<p>Punto de ebullición (se descompone): 340°C Punto de fusión: 10°C Densidad relativa (agua = 1): 1.8</p>	<p>Solubilidad en agua: Miscible Presión de vapor, kPa a 146°C: 0.13 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3.4</p>
DATOS AMBIENTALES	 <p>Esta sustancia puede ser peligrosa para el ambiente; debería prestarse atención especial a los organismos acuáticos.</p>	
NOTAS		
<p>Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son por ello, imprescindibles. NO verter NUNCA agua sobre esta sustancia; cuando se deba disolver o diluir, añadirla al agua siempre lentamente. Almacenar en un área con suelo de hormigón resistente a la corrosión.</p> <p style="text-align: right;">Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-10B Código NFPA: H 3; F 0; R 2; W</p>		
INFORMACION ADICIONAL		
FISQ: 3-011 ACIDO SULFURICO		
ICSC: 0362	ACIDO SULFURICO	
© CCE, IPCS, 1994		
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	<p>Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).</p>	

8.3. BIODIÉSEL

SECCION I: IDENTIFICACION

PRODUCTO: Biodiesel
CAS: 67784-80-9/ 67762-38-3

SECCION II: COMPOSICION E IDENTIFICACION DE PELIGROS

Esteres metilicos de ácidos grasos
Este producto no contiene componentes peligrosos.

SECCION III: INFORMACION SANITARIA

INHALACION: Despreciable
INGESTION: Id < 50 ml/ng (ratas albinas)
CONTACTO CON LOS OJOS: Productos similares no están clasificados como irritantes
CONTACTO CON LA PIEL: No clasificado como irritante de la piel o corrosivo

SECCION IV: MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

INGESTION: Aclarar la boca con agua. No provocar el vómito. Buscar atención médica.. No dejar ingerir nada a una persona inconsciente. Puede provocar irritación gastrointestinal.
INHALACION:Llevar a la persona fuera de la zona contaminada y a un lugar fresco. Buscar atención médica.
CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar los ojos con agua abundante durante 15 minutos.No dejar que la persona se frote los ojos. Si la víctima lleva lentillas quitarlas. Si la irritació persiste buscar atención médica

SECCION V: DATOS FISICOS

PUNTO DE EBULLICIÓN: Superior a 204°C a 1760 mm Hg
PUNTO DE FUSIÓN: - 1°C
PRESION DE VAPOR: inferior a 1mmmm Hg a 72°C
DENSIDAD RELATIVA: 0,88 a 15°C
SOLUBILIDAD EN AGUA: despreciable a temperatura ambiente
OLOR Y APARIENCIA: Líquido amarillo- anaranjado a temperatura ambiente. Ligero olor a aceite de fritura
RATIO DE EVAPORACION: (n-butil acetato=U) no determinado

SECCION VI: PELIGROS DE IGNICION Y EXPLOSION

FLASH POINT: > 150°C (ISO 3679)
LIMITE DE INFLAMABILIDAD INFERIOR EN AIRE: no aplicable
LIMITE DE INFLAMABILIDAD SUPERIOR EN AIRE: no aplicable

RATIO NFRA: No aplicable

RATIO MNTS: Salud (0)

Fuego (1)

Reactividad (0)

PROCEDIMIENTOS ESPECIALES EN CASO DE IGNICION: Utilizar agua, productos químicos secos, espuma o CO₂. El agua puede ser no efectiva pero debe emplearse para mantener frescos los recipientes expuestos al fuego. Si un derrame no se ha inflamado, utilizar agua para dispersar los vapores.

PELIGROS USUALES DE IGNICION/ EXPLOSION: El personal especializado debe llevar un equipo de respiración autónomo NIOSH/MSHA y gafas protectoras cuando haya posibilidad de exposición al humo, vapores o productos de exposición peligrosos.

SECCION VII REACTIVIDAD

ESTABILIDAD: Estable en condiciones normales

POLIMERIZACIÓN PELIGROSA: No aplicable

MATERIALES A EVITAR: Evitar el contacto con oxidantes fuertes, ácidos y bases fuertes

PRODUCTOS DE DESCOMPOSICIÓN PELIGROSOS: CO, CO₂

CONDICIONES A EVITAR: Calor, chispas, llamas o fuego

SECCION VIII PROTECCIÓN PERSONAL

MEDIDAS DE CONTROL: Ventilación adecuada

PROTECCIÓN RESPIRATORIA: No aplicable

ROPA PROTECTORA: No aplicable

PROTECCIÓN DE LOS OJOS: Gafas de seguridad

PROTECCIÓN DE LAS MANOS: Guantes de seguridad

OTRAS PROTECCIONES PERSONALES: Lavar la ropa impregnada. Lavarse las manos con agua y jabón tras su manipulación

SECCION IX PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL

PRECAUCIONES MEDIOAMBIENTALES: Evitar fugas incontroladas

DERRAMES: Transferir el material derramado a contenedores de seguridad. Donde sea necesario, recoger utilizando medios absorbentes. En el caso de derrame incontrolado de este producto se deberá determinar si se debe poner en conocimiento a las autoridades competentes siguiendo las leyes aplicables

SECCION X: INFORMACION SOBRE EL TRANSPORTE

Seguir la legislación vigente en el país

SECCION XI: PRECAUCIONES EN EL MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Almacenar el producto en contenedores cerrados en un área fresca, seca, aislada y bien ventilada, lejos de fuentes de ignición y materiales incompatibles. Este producto puede soportar elevadas temperaturas y/o presiones

Esta información se refiere únicamente al producto específicamente designado y no tiene por qué ser válida para su utilización combinado con otros productos, en otros materiales o en otros procesos. Esta información se basa en los conocimientos de la compañía y es precisa y fiable. Sin embargo, no existe garantía o representación, expresa o implícita, para su fiabilidad fuera de las condiciones establecidas y la empresa no asume ninguna responsabilidad por pérdida, daño o gasto directo o indirecto. Es responsabilidad del usuario utilizar esta información para su uso particular.

FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE PRETRATAMIENTO DE
ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS
LIBRES PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.**

DOCUMENTO Nº 2: PLANOS

M^a DE LOS MILAGROS GARCÍA CABELLO

SEPTIEMBRE, 2007

ÍNDICE

PLANO N° 1: PLANO DE IMPLANTACIÓN

PLANO N° 2: DIAGRAMA DE CORRIENTES DE PROCESO

PLANO N° 3: DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

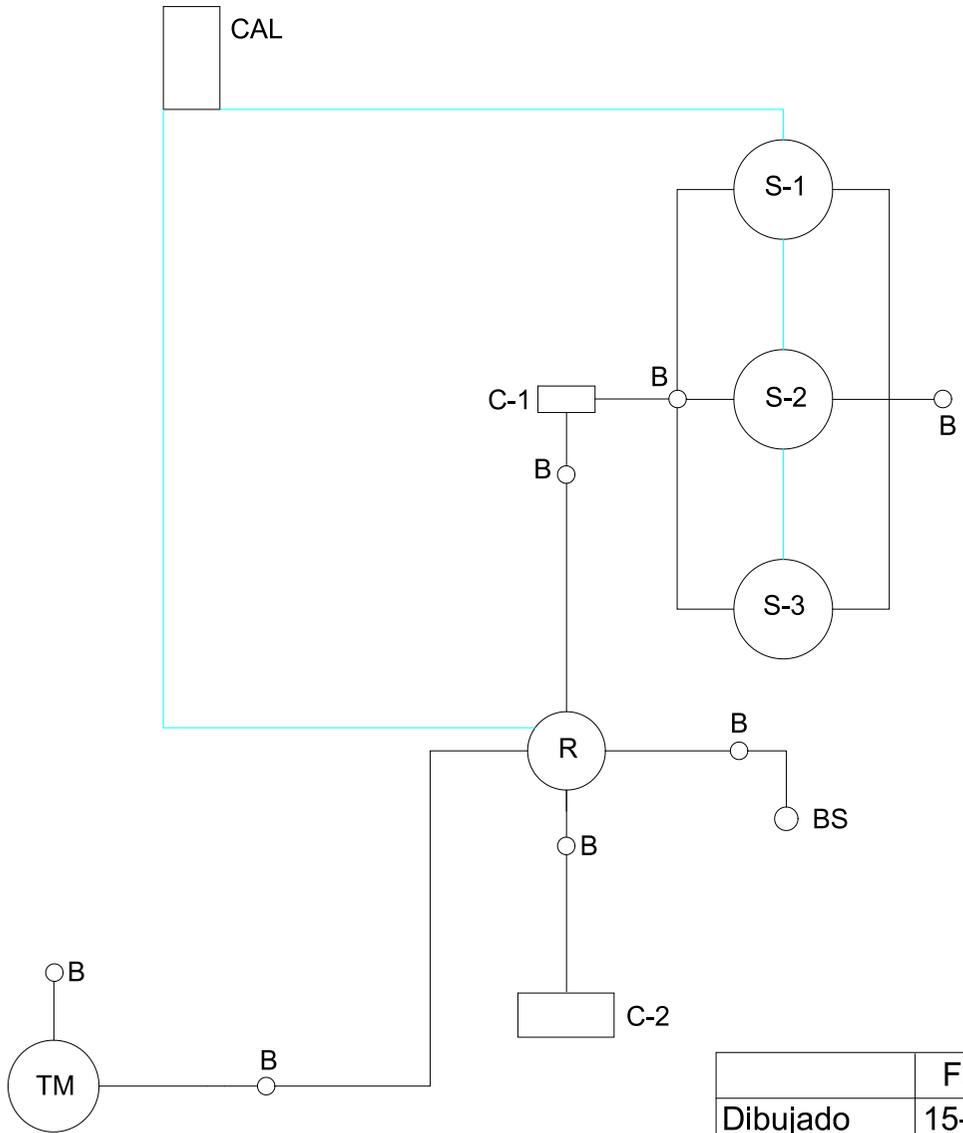
PLANO N° 4: TANQUES DE SEDIMENTACIÓN 1, 2 Y 3

PLANO N° 5: TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE METANOL

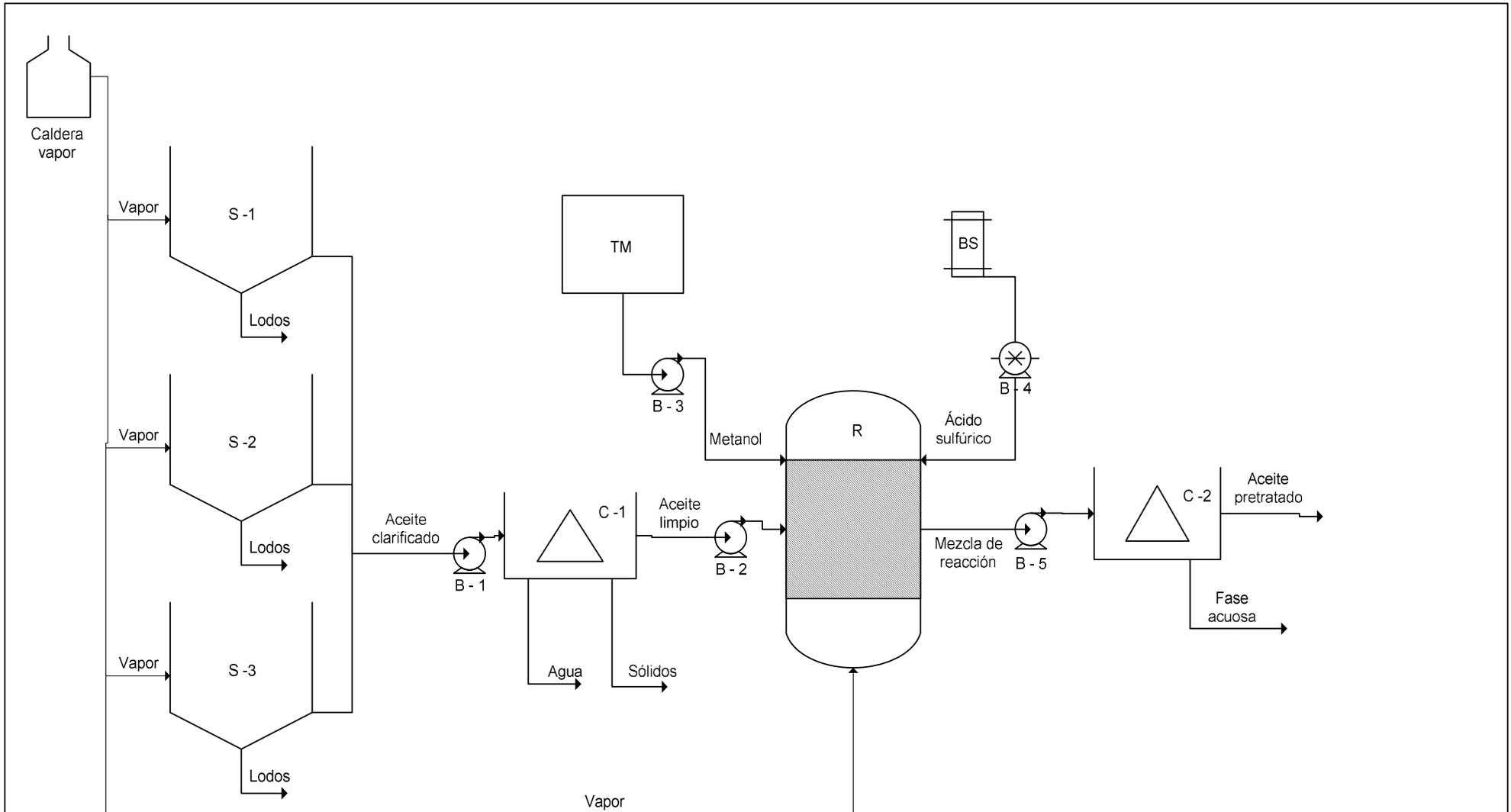
PLANO N° 6: REACTOR

LEYENDA

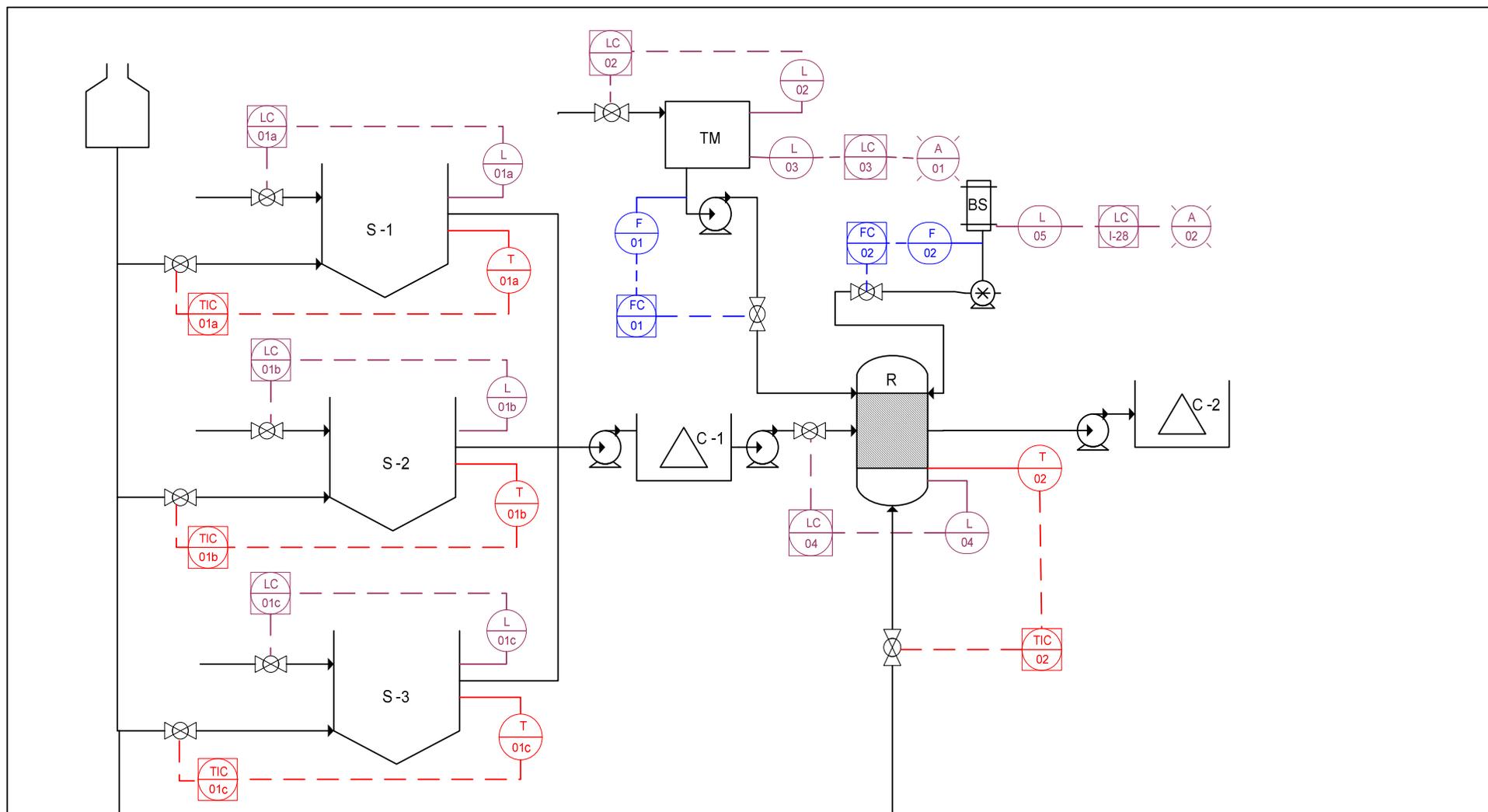
- S-1: tanque de sedimentación 1
- S-2: tanque de sedimentación 2
- S-3: tanque de sedimentación 3
- C-1: centrífuga para aceite
- C-2: centrífuga para mezcla de reacción
- R: reactor
- TM: tanque de almacenamiento de metanol
- BS: bidón de ácido sulfúrico
- B: bomba
- CAL: caldera



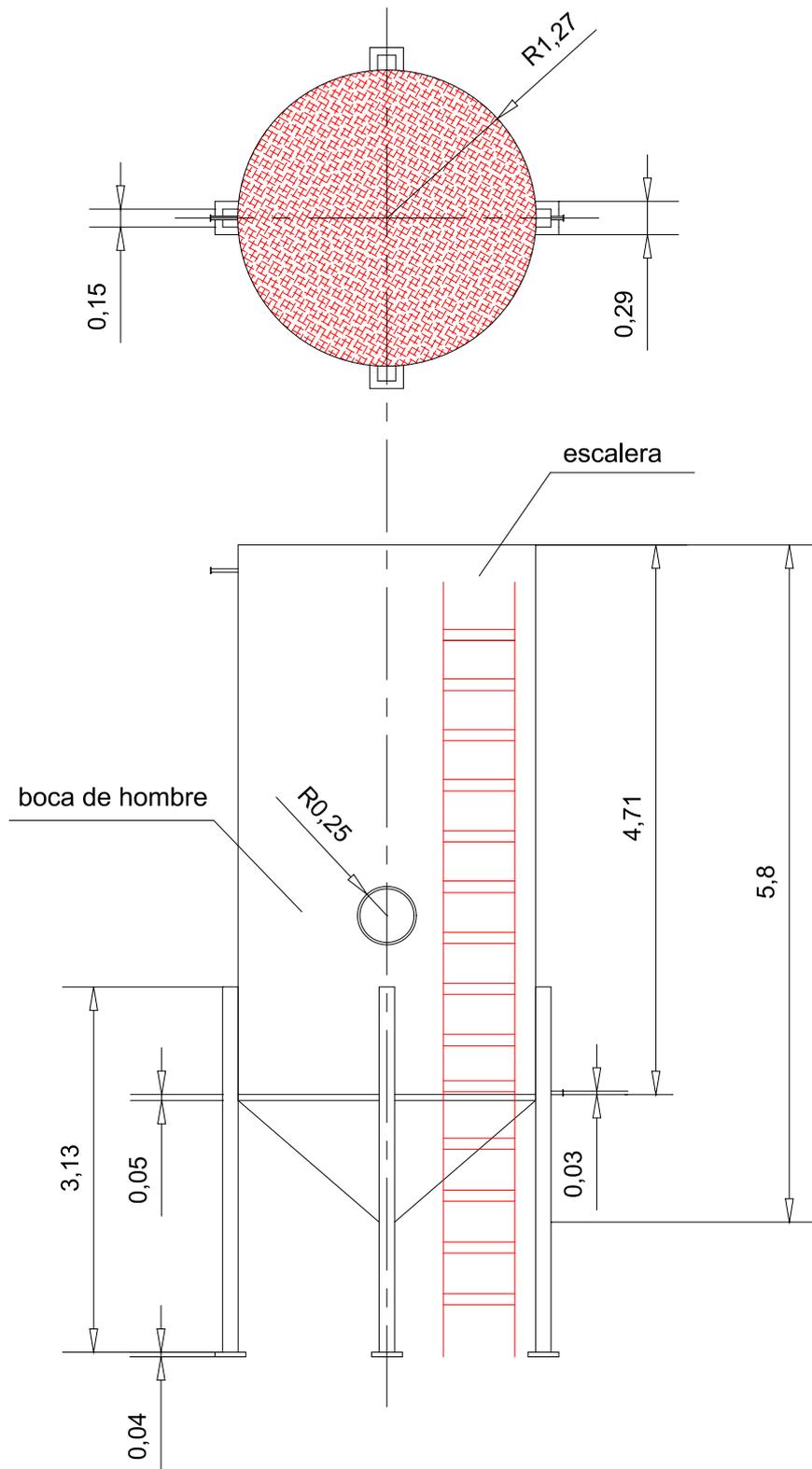
	Fecha	Apellidos, Nombre	Firma	FACULTAD DE CIENCIAS
Dibujado	15-09-07	García Cabello,		UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Comprobado		M ^a de los Milagros		
Escala:	PLANO DE IMPLANTACIÓN			PLANO N ^o
1:205				1



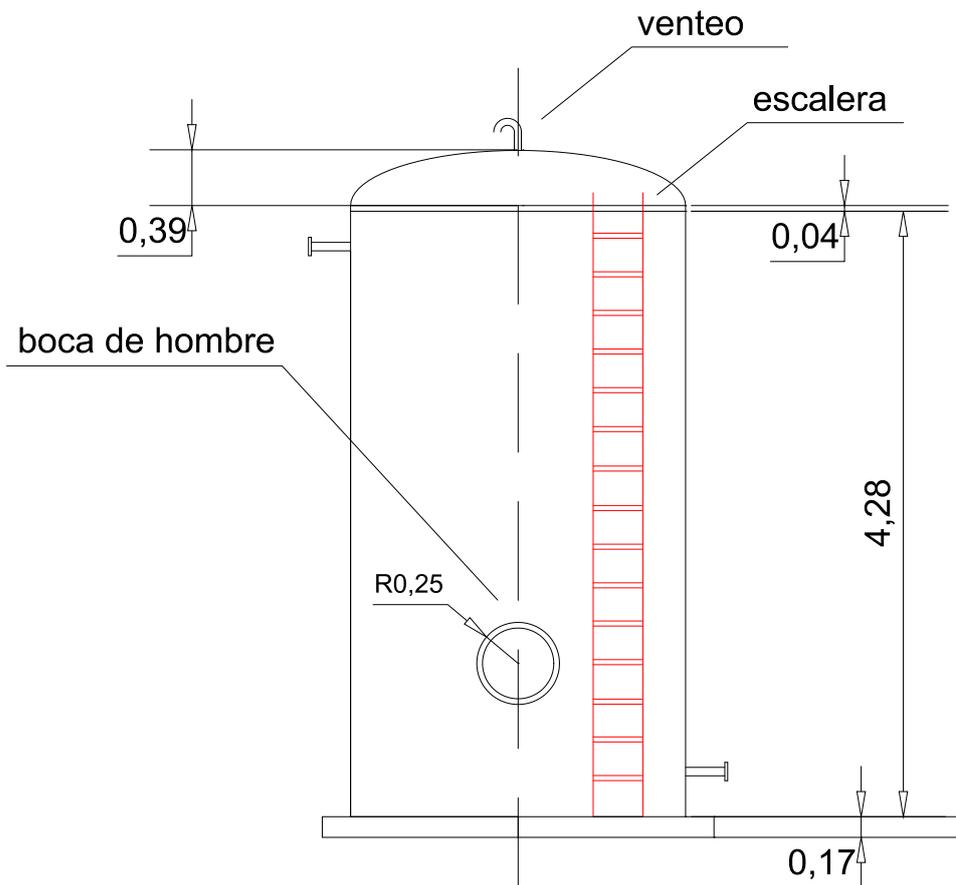
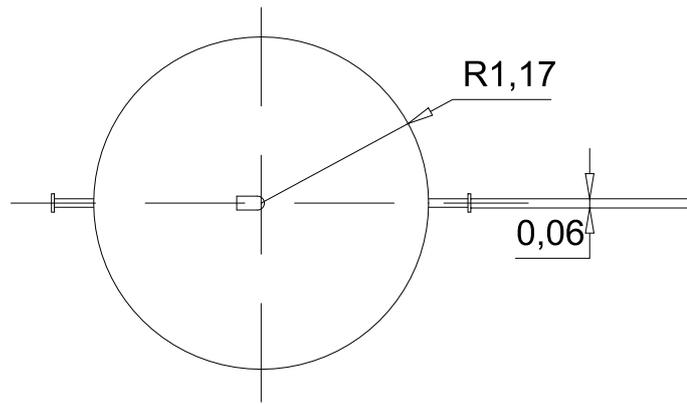
	Fecha	Apellidos, Nombre	Firma	FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Dibujado	15-09-07	García Cabello, M ^º de los Milagros		
Comprobado				
DIAGRAMA DE CORRIENTES DE PROCESO				PLANO N ^º 2



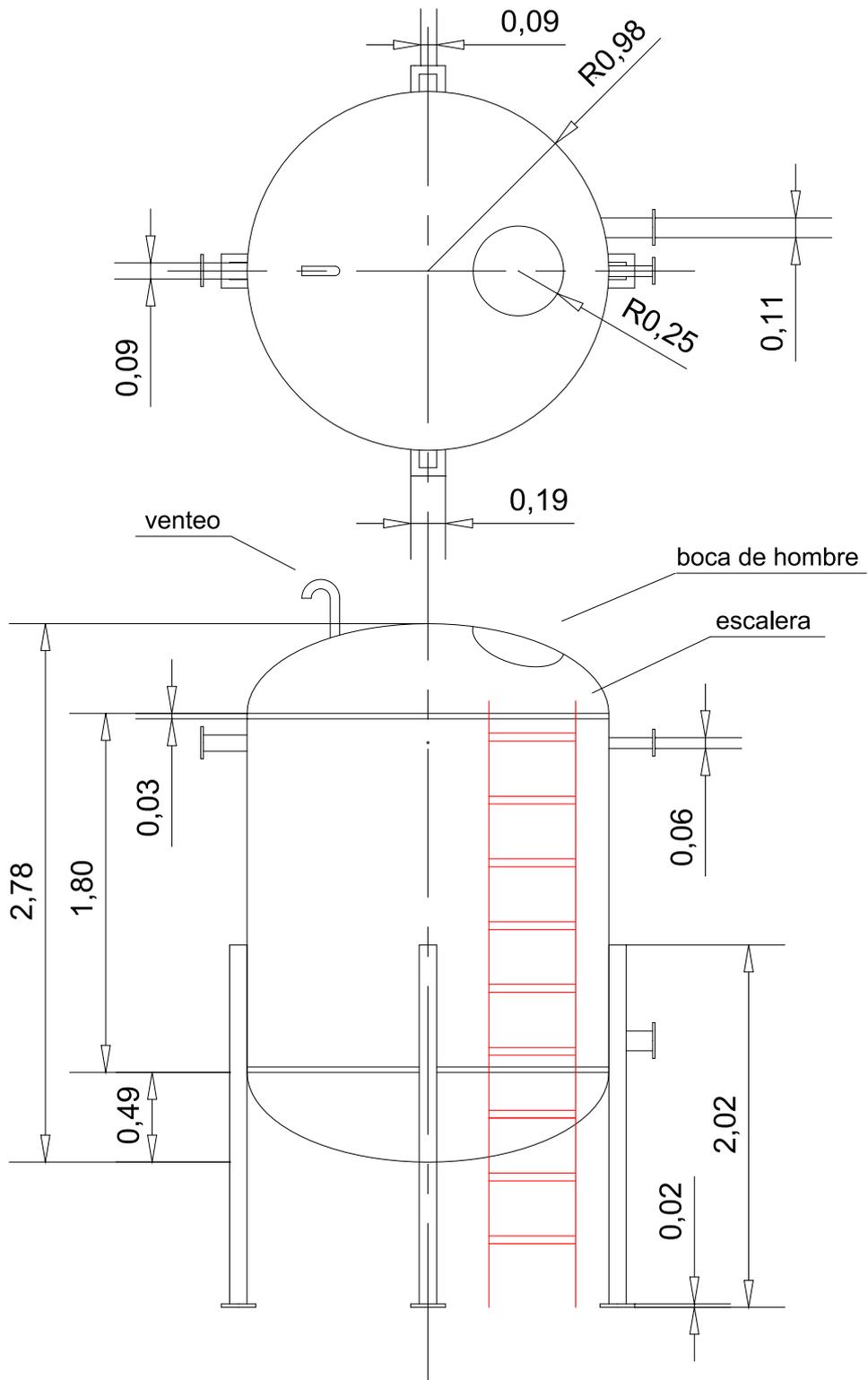
	Fecha	Apellidos, Nombre	Firma	FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Dibujado	15-09-07	García Cabello, M ^a de los Milagros		
Comprobado				
DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL				PLANO N° 3



	Fecha	Apellidos, Nombre	Firma	FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Dibujado	15-09-07	Garc_a Cabello,		
Comprobado		Mª de los Milagros		
Escala:	TANQUES DE SEDIMENTACIÓN 1, 2 Y 3			PLANO Nº
1:62				4



	Fecha	Apellidos, Nombre	Firma	FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Dibujado	15-09-07	García Cabello, M ^a de los Milagros		
Comprobado				
Escala: 1:55	TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE METANOL			PLANO N° 5



	Fecha	Apellidos, Nombre	Firma	FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Dibujado	15-09-07	García Cabello,		
Comprobado		Mª de los Milagros		
Escala: 1:39	REACTOR			PLANO N° 6

FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE PRETRATAMIENTO DE
ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS
LIBRES PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.**

DOCUMENTO Nº 3: PLIEGO DE CONDICIONES

M^a DE LOS MILAGROS GARCÍA CABELLO

SEPTIEMBRE, 2007

0. ÍNDICE

1. ÍNDICE	1
I. GENERALIDADES	5
Artículo 1.1. Objetivo	5
Artículo 1.2. Documentos del proyecto que definen las obras	5
Artículo 1.3. Compatibilidad y relación entre los documentos	5
Artículo 1.4. Dirección de las obras	6
Artículo 1.5. Programa de ejecución y plazos	6
Artículo 1.6. Modificación de las obras	6
Artículo 1.7. Prescripciones omitidas o contradictorias	6
Artículo 1.8. Condiciones de ejecución y control de las obras	7
Artículo 1.8.1. Ejecución de las obras	7
Artículo 1.8.2. Conservación de las obras	7
Artículo 1.8.3. Control de las obras	7
Artículo 1.9. Disposiciones a tener en cuenta	8
II. CONDICIONES DE ÍNDOLE TÉCNICA	9
Artículo 2.1. Movimiento de tierras	9
Artículo 2.2. Cimentaciones	9
Artículo 2.3. Estructuras	10
Artículo 2.3.1. Estructuras de hormigón	10
Artículo 2.3.2. Estructuras de acero	10
Artículo 2.4. Albañilería	11
Artículo 2.5. Cubiertas	11
Artículo 2.6. Aislamientos	12
Artículo 2.7. Instalaciones	12
Artículo 2.7.1. Condiciones Generales	12
Artículo 2.7.2. Equipos de Proceso	14
Artículo 2.7.3. Instalación eléctrica	14
Artículo 2.7.4. Protección contra el fuego	14
Artículo 2.8. Obras o instalaciones no especificadas	15

III. CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA	16
III.1. DELIMITACIÓN GENERAL DE FUNCIONES TÉCNICAS	16
Artículo 3.1. El ingeniero director	16
Artículo 3.2. El constructor	17
III.2. OBLIGACIONES Y DERECHOS GENERALES DEL CONSTRUCTOR O CONTRATISTA	18
Artículo 3.3. Verificación de los documentos del proyecto	18
Artículo 3.4. Plan de seguridad e higiene	18
Artículo 3.5. Oficina en la obra	18
Artículo 3.6. Presencia del constructor en la obra	19
Artículo 3.7. Interpretaciones, aclaraciones y modificaciones de los documentos del proyecto	19
Artículo 3.8. Reclamaciones contra las órdenes de la dirección facultativa	19
Artículo 3.9. Recusación por el contratista del personal nombrado por el ingeniero	20
Artículo 3.10. Faltas del personal	20
Artículo 3.11. Subcontratas	20
III.3. PRESCRIPCIONES GENERALES RELATIVAS A LOS TRABAJOS, A LOS MATERIALES Y A LOS MEDIOS AUXILIARES	21
Artículo 3.12. Replanteo	21
Artículo 3.13. Comienzo de obra. Ritmo de ejecución de los trabajos	21
Artículo 3.14. Orden de los trabajos	21
Artículo 3.15. Ampliación del proyecto por causas imprevistas o de fuerza mayor	22
Artículo 3.16. Prórroga por causa de fuerza mayor	22
Artículo 3.17. Responsabilidad de la dirección facultativa en el retraso de la obra	22
Artículo 3.18. Condiciones generales de ejecución de los trabajos	23
Artículo 3.19. Obras ocultas	23
Artículo 3.20. Trabajos defectuosos	23

Artículo 3.21. Vicios ocultos	24
Artículo 3.22. Procedencia de los materiales y los aparatos	24
Artículo 3.23. Materiales no utilizables	25
Artículo 3.24. Materiales y aparatos defectuosos	25
Artículo 3.25. Obras sin prescripciones	25
Artículo 3.26. Medios auxiliares	26
III.4. RECEPCIÓN DE LAS OBRAS	27
Artículo 3.27. Recepción provisional	27
Artículo 3.28. Conservación de los trabajos recibidos provisionalmente	27
Artículo 3.29. Plazo de garantía	28
Artículo 3.30. Recepción definitiva	28
IV. CONDICIONES DE ÍNDOLE ECONÓMICA	29
IV.1. PRINCIPIO GENERAL	29
Artículo 4.1. Principios generales	29
IV.2. FIANZAS	30
Artículo 4.2. Fianzas	30
Artículo 4.3. Ejecución de trabajos con cargo a la fianza	30
Artículo 4.4. Devolución de la fianza	31
IV.3. PRECIOS	32
Artículo 4.5. Composición de los precios unitarios	32
Artículo 4.6. Precios contradictorios	32
Artículo 4.7. Reclamaciones de aumentos de precios	33
Artículo 4.8. Revisión de los precios contratados	34
Artículo 4.9. Acopio de materiales	34
IV.4. VALORACIÓN Y ABONO DE LOS TRABAJOS	35
Artículo 4.10. Formas varias de abono de las obras	35
Artículo 4.11. Relaciones valoradas y certificaciones	35

Artículo 4.12. Pagos	36
Artículo 4.13. Abono de trabajos ejecutados durante el plazo de garantía	36
IV.5. INDEMNIZACIONES MUTUAS	38
Artículo 4.14. Importe de la indemnización por retraso no justificado en el plazo de terminación de las obras	38
Artículo 4.15. Demora de los pagos	38
IV.6. VARIOS	39
Artículo 4.16. Mejora de obras	39
Artículo 4.17. Unidades de obra defectuosas pero aceptables	39
V. CONDICIONES DE ÍNDOLE LEGAL	40
Artículo 5.1. Jurisdicción	40
Artículo 5.2. Accidentes de trabajo y daños a terceros	40
Artículo 5.3. Pagos de arbitrios	41
Artículo 5.4. Causas de rescisión del contrato	41
VI. CONDICIONES PARTICULARES DE EQUIPOS	43
Artículo 6.1. Especificaciones particulares de los equipos	43
Artículo 6.1.1. Tanques de almacenamiento	43
Artículo 6.1.2. Tanques de sedimentación	44
Artículo 6.1.3. Reactor	45
Artículo 6.1.4. Centrífugas	45
Artículo 6.1.5. Red de tuberías	46
Artículo 6.1.6. Bombas	47
Artículo 6.1.7. Instrumentación	47

I. GENERALIDADES

Artículo 1.1. Objetivo

El objetivo del presente pliego es definir el conjunto de directrices, requisitos y normas aplicables al desarrollo de las obras a las que se refiere el presente proyecto "Diseño de una instalación de pretratamiento de aceites con alto contenido en ácidos grasos libres para producción de biodiésel".

Artículo 1.2. Documentos del proyecto que definen las obras

El presente proyecto consta de los siguientes documentos:

- Documento nº 1: Memoria y Anexos.
- Documento nº 2: Planos.
- Documento nº 3: Pliego de Condiciones.
- Documento nº 4: Estudio Económico.

Se entiende por documentos contractuales aquéllos que estén incorporados en el contrato y que sean de obligado cumplimiento, excepto modificaciones debidamente autorizadas. Estos documentos son: Planos, Pliego de Condiciones y Presupuesto (incluido en el Estudio Económico).

Los datos incluidos en la Memoria y Anexos tienen carácter meramente informativo.

Artículo 1.3. Compatibilidad y relación entre los documentos

En caso de contradicción entre los Planos y el Pliego de Condiciones, prevalecerá lo prescrito en este último. Lo mencionado en los Planos y omitido en el Pliego de Condiciones o viceversa, habrá de ser ejecutado como si estuviera expuesto en ambos documentos.

Artículo 1.4. Dirección de las obras

El contratista deberá seguir las instrucciones del director de la obra en todo lo referente a calidad y acopio de materiales, ejecución de la obra, modificaciones del proyecto, programa de trabajo y precauciones a adoptar.

La propiedad nombrará en su representación a un ingeniero director, en quien recaerán las labores de dirección, control y vigilancia de las obras del presente proyecto. El contratista proporcionará toda clase de facilidades para que el ingeniero director o sus subalternos puedan llevar a cabo su trabajo con el máximo de eficacia.

Artículo 1.5. Programa de ejecución y plazos

El programa previsto para la ejecución de las obras e instalaciones se acordará con el contratista una vez adjudicada la obra.

Artículo 1.6. Modificación de las obras

El director de las obras podrá disponer el cambio de cualquier unidad proyectada por otra nueva, entregando al contratista los planos definitivos, que desde ese momento formarán parte del proyecto.

Las modificaciones serán recogidas en el preceptivo libro de órdenes, que será entregado a la contrata a la hora de hacer el replanteo de la obra, y que permanecerá en la misma a disposición del director o persona en quien éste delegue.

Artículo 1.7. Prescripciones omitidas o contradictorias

La dirección de obra resolverá de manera expresa y estricta los casos en que exista omisión de alguna prescripción o haya dos contradictorias.

Artículo 1.8. Condiciones de ejecución y control de las obras

Artículo 1.8.1. Ejecución de las obras

Todas las obras comprendidas en este proyecto se ejecutarán de acuerdo a lo especificado en los Planos y en este Pliego de Condiciones y siguiendo las indicaciones de la dirección técnica, quien resolverá las cuestiones que puedan plantearse en la interpretación de aquéllos y en las condiciones y detalles de la ejecución.

Artículo 1.8.2. Conservación de las obras

Se define como conservación de la obra el conjunto de trabajos de vigilancia, limpieza, acabado, mantenimiento y reparación y todos los que sean necesarios para mantener las obras en perfecto estado de funcionamiento y limpieza. La citada conservación se extiende a todas las obras ejecutadas bajo el mismo contrato.

El presente artículo será de aplicación desde la fecha de inicio de las obras hasta la recepción definitiva. Todos los gastos originados por este concepto serán a cuenta del contratista.

Artículo 1.8.3. Control de las obras

Por cuenta del contratista, y hasta el 1% del importe del presupuesto, se abonarán las facturas del laboratorio dictaminado por el director de obra para la realización del control de calidad.

El laboratorio encargado de este control de obra realizará todos los ensayos del programa, previa solicitud de la dirección facultativa.

Los resultados de cada ensayo se comunicarán simultáneamente a la dirección facultativa de las obras y a la empresa constructora.

Artículo 1.9. Disposiciones a tener en cuenta

- Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales vigentes del M.O.P.U.
- Métodos y Normas de Ensayo del Laboratorio Central del M.O.P.U.
- Normas Básicas (NBE) y Tecnológicas (NTE) de la Edificación.
- Instrucción EH-91 para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa o armado.
- Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, aprobado por decreto 842/2002 de 2 de Agosto, y sus Instrucciones Técnicas Complementarias.
- Reglamento de Aparatos a Presión, aprobado por decreto 1244/1979 de 4 de Abril.
- Ley 7/1994 de 18 de Mayo, de Protección Ambiental.
- Ley 31/1995 de 8 de Noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 1627/1997, de 24 de Octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.

II. CONDICIONES DE ÍNDOLE TÉCNICA

Artículo 2.1. Movimiento de tierras

Se refiere el presente artículo a los desmontes y terraplenes para dar al terreno la rasante de explanación, a la excavación a cielo abierto realizada con medios manuales y/o mecánicos y a la excavación de zanjas y pozos.

Se adoptan las condiciones generales de seguridad en el trabajo, así como las condiciones relativas a los materiales, control de la ejecución, valoración y mantenimiento que especifican las normas:

- NTE-AD “Acondicionamiento del terreno”.
- NTE-AD “Explanaciones”.
- NTE-ADV “Vaciados”.
- NTE-ADZ “Zanjas y pozos”.

Artículo 2.2. Cimentaciones

Las secciones y cotas de profundidad serán las que el ingeniero director señale. No se rellenarán los cimientos hasta que éste lo ordene.

El ingeniero director queda facultado para introducir las cimentaciones especiales o modificaciones que juzgue oportuno en función de las características particulares que presente el terreno.

Se adoptan las condiciones relativas a materiales, control, valoración, mantenimiento y seguridad especificados en las normas:

- NTE-CSZ. “Cimentaciones superficiales. Zapatas”.
- NTE-CSC. “Cimentaciones superficiales corridas”.
- NTE-CSL. “Cimentaciones superficiales. Losas”.

Artículo 2.3. Estructuras

Artículo 2.3.1. Estructuras de hormigón

Se refiere el presente artículo a las condiciones relativas a los materiales y equipos de origen industrial relacionados con la ejecución de las obras de hormigón en masa o armado fabricados en obra o prefabricados, así como las condiciones generales de ejecución, criterios de medición, valoración y mantenimiento.

Regirá lo prescrito en la Instrucción EH-91 para las obras de hormigón en masa o armado. Así mismo se adopta lo establecido en las normas NTE-EH “Estructuras de hormigón”, y NTE-EME “Estructuras de madera. Encofrados”.

Artículo 2.3.2. Estructuras de acero

Se establecen en el presente artículo las condiciones relativas a los materiales y equipos industriales relacionados con los aceros laminados utilizados en las estructuras de edificación, tanto en sus elementos estructurales, como en sus elementos de unión. Así mismo se adoptan las condiciones relativas a la ejecución, seguridad en el trabajo, control de la ejecución, valoración y mantenimiento establecidas en las normas:

- NBE-MV-102: “Ejecución de las estructuras de acero laminado en edificación”. Se fijan los tipos de uniones, la ejecución en el taller, el montaje en obra, las tolerancias y las protecciones.
- NBE-MV-103: “Acero laminado para estructuras de edificaciones”, donde se fijan las características del acero laminado, la determinación de sus características y los productos laminados actualmente utilizados.
- NBE-MV-105: “Roblones de acero”.
- NBE-MV-106: “Tornillos ordinarios calibrados para estructuras de acero”.

- NTE-EA: “Estructuras de acero”.

Artículo 2.4. Albañilería

Se refiere el presente artículo a la fábrica de bloques de hormigón o ladrillo, a tabiques de ladrillo o prefabricados y revestimiento de paramentos, suelos, escaleras y techos.

Las condiciones funcionales y de calidad relativa a los materiales y equipo de origen industrial, control de ejecución y seguridad en el trabajo, así como los criterios de valoración y mantenimiento son las que especifican las normas:

- NTE-FFL: “Fachadas de ladrillo”.
- NTE-RPA: “Revestimiento de paramentos. Alicatados”.
- NTE-RPE: “Revestimientos de paramentos. Enfoscado”.
- NTE-RPG: “Revestimiento de paramentos. Guarnecidos y enlucidos”.
- NTE-RPP: “Revestimiento de paramentos. Pinturas”.
- NTE-RPR: “Revestimiento de paramentos. Revocos”.
- NTE-RSP: “Revestimiento de suelos y escaleras. Placas”.
- NTE-RTC: “Revestimiento de techos. Continuos”.
- NTE-PTL: “Tabiques de ladrillo”.

Artículo 2.5. Cubiertas

Se refiere el presente artículo a la cobertura de edificios con tejas o plaquetas de fibrocemento, tejas cerámicas o de cemento, etc., en el que el propio elemento proporciona la estanqueidad.

Las condiciones funcionales y de calidad relativas a los materiales y equipos de origen industrial y control de la ejecución, condiciones generales de ejecución y seguridad en el trabajo, así como los criterios de valoración y mantenimiento son los especificados en las normas:

- NTE-QTF: “Cubiertas. Tejados de fibrocemento”.
- NTE-QTG: “Cubiertas. Tejados galvanizados”.
- NTE-QTP: “Cubiertas. Tejados de pizarra”.
- NTE-QTS: “Cubiertas. Tejados sintéticos”.
- NTE-QTT: “Cubiertas. Tejados de tejas”.

Artículo 2.6. Aislamientos

Los materiales a emplear y ejecución de la instalación de aislamiento estarán de acuerdo con lo prescrito en la norma NBE-CB/79 sobre condiciones térmicas de los edificios que en su anexo 5 establece las condiciones de los materiales empleados para aislamiento térmico así como el control, recepción y ensayos de dichos materiales, y en el anexo 6 establece diferentes recomendaciones para la ejecución de este tipo de instalaciones. Así mismo se ajustarán a la norma NBE-CA-81 sobre condiciones acústicas de los edificios y a las modificaciones contenidas en el R.D. 2.115/1982 de 12 de Agosto.

Artículo 2.7. Instalaciones

Artículo 2.7.1. Condiciones Generales

Las siguientes condiciones se refieren a la instalación de la siguiente maquinaria:

- Maquinaria de proceso.
- Instalación eléctrica de baja tensión.
- Instalación de protección contra el fuego.

Las casas instaladoras deberán garantizar un efectivo servicio post-venta de sus máquinas. No se admitirá ninguna maquinaria que no ofrezca por lo menos un año de garantía. La garantía abarcará todo defecto de fabricación o defectuosa instalación.

Las respectivas firmas instaladoras de cada una de las máquinas o elementos consignados en el epígrafe anterior, deberán responsabilizarse íntegramente del suministro, embalaje, transporte, colocación, montaje y puesta en marcha de las mismas.

Los plazos de montaje se fijarán en el contrato con las respectivas firmas instaladoras a partir de la recepción provisional de las obras.

Durante la ejecución de los trabajos de montaje e instalación, las casas suministradoras quedan obligadas a someterse a todas las verificaciones que solicite el director de las obras.

Una vez terminadas las distintas instalaciones, el conjunto será puesto en marcha por los respectivos montadores que darán las instrucciones necesarias para su manejo y control al personal encargado del mismo. La terminación de la instalación será certificada a petición de las casas comerciales por la dirección de obra.

Después de un período suficiente para que las instalaciones estén a punto, se procederá a los ensayos que verifiquen las garantías de las casas instaladoras, continuándose tales ensayos durante el tiempo necesario para que quede palpablemente demostrado el buen funcionamiento.

Una vez terminadas las pruebas de funcionamiento y si dichos ensayos son satisfactorios, se procederá a la recepción provisional. Caso de no ser satisfactorias las pruebas de funcionamiento, la recepción provisional no se llevará a cabo hasta que la firma instaladora haya subsanado los defectos encontrados, cuya reparación se llevará a cabo en un plazo máximo de 15 días.

Si por mal funcionamiento el director considera conveniente el cambio de una máquina por otra, la casa suministradora facilitará la nueva maquinaria, concertándose entre ambos el precio de la nueva máquina.

La recepción definitiva se llevará a cabo cuando finalicen los respectivos plazos de garantía a que se hizo referencia para cada tipo de máquina o instalación. El pago de las instalaciones se efectuará de la manera que se especifique en los contratos correspondientes.

Artículo 2.7.2. Equipos de Proceso

El número de equipos necesarios, sus características y disposición serán las que se indican en la Memoria y Anexos del presente proyecto.

Su instalación corre a cargo de las casas suministradoras debiendo éstas atenerse al orden, disposición y distancias marcadas en el plano de implantación general incluido en el documento Planos.

Artículo 2.7.3. Instalación eléctrica

Los materiales y ejecución de la instalación eléctrica cumplirán lo establecido en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión y sus instrucciones técnicas complementarias. Así mismo se adoptarán las diferentes condiciones previstas en las normas:

- NTE-IEB: "Instalación eléctrica de baja tensión".
- NTE-IEE: "Alumbrado exterior".
- NTE-IEI: "Alumbrado interior".
- NTE-IEP: "Puesta a tierra".

Artículo 2.7.4. Protección contra el fuego

Se refiere el presente artículo a las condiciones de ejecución de los materiales, de control de la ejecución, seguridad en el trabajo, medición, valoración y mantenimiento, relativas a las instalaciones de protección contra el fuego.

Se cumplirá lo prescrito en el Código Técnico de la Edificación (CTE) sobre condiciones de protección contra incendios y se adoptará lo establecido en la norma NTE-IPP: “Instalaciones de protección. Pararrayos”.

Artículo 2.8. Obras o instalaciones no especificadas

Si en el transcurso de los trabajos fuera necesario ejecutar alguna clase de obra no regulada en el presente Pliego de Condiciones, el contratista queda obligado a ejecutarla con arreglo a las instrucciones que reciba del ingeniero director quien, a su vez, cumplirá la normativa vigente sobre el particular. El contratista no tendrá derecho a reclamación alguna.

III. CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA

III.1. DELIMITACIÓN GENERAL DE FUNCIONES TÉCNICAS

Artículo 3.1. El ingeniero director

La dirección facultativa de las obras e instalaciones recaerá en el ingeniero que suscribe, salvo posterior acuerdo con la propiedad; corresponde al ingeniero director:

- Comprobar la adecuación de la cimentación proyectada a las características reales del suelo.
- Redactar los complementos o rectificaciones del proyecto que se precisen.
- Asistir a las obras, cuantas veces lo requieran su naturaleza y complejidad, a fin de resolver las contingencias que se produzcan.
- Coordinar la intervención en obra de otros técnicos.
- Aprobar las certificaciones parciales de la obra.
- Preparar la documentación final de la obra y expedir y suscribir el certificado final de la misma.
- Efectuar el replanteo de la obra y preparar el acta correspondiente, suscribiéndola en unión del contratista.
- Comprobar las instalaciones provisionales, medios auxiliares y sistemas de seguridad e higiene en el trabajo, controlando su correcta ejecución.
- Realizar y disponer las pruebas y ensayos de materiales, instalaciones y demás unidades de obra según la frecuencia de muestras programadas en el plan de control, así como efectuar las demás comprobaciones que resulten necesarias para asegurar la calidad constructiva. De los resultados se informará puntualmente al constructor, impartiendo, en su caso, las órdenes oportunas.

Artículo 3.2. El constructor

Corresponde al constructor:

- Organizar los trabajos de construcción, redactando los planes de obra que se precisen y proyectando o autorizando las instalaciones provisionales y medios auxiliares de la obra.
- Elaborar, cuando se requiera, el Plan de Seguridad e Higiene de la obra, en aplicación del estudio correspondiente, y disponer, en todo caso, la ejecución de las medidas preventivas, velando por su cumplimiento y por la observancia de la normativa vigente de seguridad e higiene en el trabajo.
- Suscribir con el ingeniero el acta de replanteo de la obra.
- Ordenar y dirigir la ejecución material con arreglo al proyecto, a las normas técnicas y a las de la buena construcción. A tal efecto, ostenta la jefatura de todo el personal que intervenga en la obra y coordina las intervenciones de los subcontratistas.
- Asegurar la idoneidad de todos y cada uno de los materiales y elementos constructivos que se utilicen, rechazando por iniciativa propia o por prescripción del ingeniero director, los suministros que no cuenten con la garantía o documentos de idoneidad requeridos por las normas de aplicación.
- Custodiar el libro de órdenes y seguimiento de la obra y dar el enterado y las anotaciones que se practiquen en el mismo.
- Facilitar al ingeniero director, con antelación suficiente, los materiales precisos para el cumplimiento de su cometido.
- Preparar las certificaciones parciales de la obra y la propuesta de liquidación final.
- Suscribir la recepción provisional y definitiva.
- Concertar los seguros de accidente de trabajo y de daños a terceros durante la obra.

III.2. OBLIGACIONES Y DERECHOS GENERALES DEL CONSTRUCTOR O CONTRATISTA

Artículo 3.3. Verificación de los documentos del proyecto

Antes de dar comienzo a las obras, el constructor consignará por escrito que la documentación aportada le resulta suficiente para la comprensión de la totalidad de la obra contratada o, en caso contrario, solicitará las aclaraciones pertinentes.

Artículo 3.4. Plan de seguridad e higiene

El constructor, a la vista del proyecto de ejecución, presentará el Plan de Seguridad e Higiene de la obra a la aprobación de la dirección facultativa.

Artículo 3.5. Oficina en la obra

El constructor habilitará en la obra una oficina en la que tendrá siempre a disposición de la dirección facultativa:

- El proyecto de ejecución completo, incluidos los complementos que en su caso redacte el ingeniero.
- La licencia de obras.
- El libro de órdenes y asistencias.
- El Plan de Seguridad e Higiene.
- El libro de incidencias.
- El reglamento y ordenanza de seguridad e higiene en el trabajo.

Dispondrá además el constructor una oficina para la dirección facultativa, convenientemente acondicionada para que se pueda trabajar con normalidad a cualquier hora de la jornada.

Artículo 3.6. Presencia del constructor en la obra

El jefe de obra por sí o por medio de sus técnicos ó encargados estará presente durante la jornada legal de trabajo y acompañará al ingeniero en las visitas que haga a las obras, poniéndose a su disposición para la práctica de los reconocimientos que se consideren necesarios y suministrándole los datos precisos para la comprobación de mediciones y liquidaciones.

Artículo 3.7. Interpretaciones, aclaraciones y modificaciones de los documentos del proyecto

Cuando se trate de aclarar, interpretar o modificar preceptos del Pliego de Condiciones o indicaciones de los Planos, las órdenes e instrucciones correspondientes se comunicarán por escrito al constructor, estando éste obligado a su vez a devolver los originales o las copias suscribiendo con su firma el enterado, que figurará al pie de todas las órdenes, avisos o instrucciones que reciba del ingeniero.

Cualquier reclamación que en contra de las disposiciones tomadas crea oportuno hacer el contratista habrá de dirigirla, dentro del plazo de 15 días, a la dirección facultativa, la cual dará al contratista el correspondiente recibo si éste lo solicitase.

Artículo 3.8. Reclamaciones contra las órdenes de la dirección facultativa

Las reclamaciones que el contratista quiera hacer contra las órdenes de la dirección facultativa sólo podrá presentarlas, a través del ingeniero, ante la propiedad, si son de orden económico y de acuerdo con las condiciones estipuladas. Contra disposiciones de orden técnico del ingeniero no se admitirá reclamación alguna, pudiendo el contratista salvar su responsabilidad, si lo estima oportuno, mediante exposición razonada

dirigida al ingeniero, el cual podrá limitar su contestación al acuse de recibo, que en todo caso será obligatorio para este tipo de reclamaciones.

Artículo 3.9. Recusación por el contratista del personal nombrado por el ingeniero

El constructor no podrá recusar a los ingenieros o personal encargado por éstos de la vigilancia de las obras, ni pedir que por parte de la propiedad se designen otros facultativos para los reconocimientos y mediciones.

Cuando se crea perjudicado por la labor de éstos procederá de acuerdo con lo estipulado en el artículo precedente, pero sin que por esta causa pueda interrumpirse ni perturbarse la marcha de los trabajos.

Artículo 3.10. Faltas del personal

El ingeniero, en supuestos de desobediencia a sus instrucciones, manifiesta incompetencia o negligencia grave que comprometan o perturben la marcha de los trabajos, podrá requerir al contratista para que aparte de la obra a los operarios causantes de la perturbación.

Artículo 3.11. Subcontratas

El contratista podrá subcontratar capítulos o unidades de la obra a otros contratistas e industriales sin perjuicio de sus obligaciones como contratista general de la obra.

Se permitirá la subcontrataciones de los trabajos siempre y cuando la empresa subcontratada garantice los niveles de formación y seguridad para realizar los trabajos mencionados.

III.3. PRESCRIPCIONES GENERALES RELATIVAS A LOS TRABAJOS, A LOS MATERIALES Y A LOS MEDIOS AUXILIARES

Artículo 3.12. Replanteo

El constructor iniciará las obras con el replanteo de las mismas en el terreno, señalando las referencias principales que mantendrá como base de posteriores replanteos parciales. Dichos trabajos se considerarán a cargo del contratista e incluidos en su oferta.

El constructor someterá el replanteo a la aprobación del ingeniero, y una vez éste haya dado su conformidad, preparará un acta acompañada de un plano que deberá ser aprobado por el ingeniero, siendo responsabilidad del constructor la omisión de este trámite.

Artículo 3.13. Comienzo de obra. Ritmo de ejecución de los trabajos

El contratista deberá dar comienzo a las obras en el plazo marcado en el contrato de adjudicación de la obra, desarrollándose en las formas necesarias para que dentro de los periodos parciales en aquél reseñados, queden ejecutadas las obras correspondientes y que, en consecuencia, la ejecución total se lleve a cabo dentro del plazo exigido por el contrato.

Obligatoriamente y por escrito deberá el contratista dar cuenta al ingeniero director del comienzo de los trabajos, antes de transcurrir veinticuatro horas de su iniciación.

Artículo 3.14. Orden de los trabajos

En general, la determinación del orden de los trabajos es facultad de la contrata, salvo aquellos casos en que por circunstancias de orden técnico estime conveniente su variación la dirección facultativa.

Artículo 3.15. Ampliación del proyecto por causas imprevistas o de fuerza mayor

Cuando sea preciso por motivo imprevisto o por cualquier accidente ampliar el proyecto, no se interrumpirán los trabajos, continuándose según las instrucciones dadas por el ingeniero en tanto se formula o se tramita el proyecto reformado.

El constructor está obligado a realizar con su persona y sus materiales cuanto la dirección de las obras disponga, anticipando de momento este servicio, cuyo importe le será consignado en un presupuesto adicional o abonado directamente, de acuerdo con lo que se convenga.

Artículo 3.16. Prórroga por causa de fuerza mayor

Si por causa de fuerza mayor o independiente de la voluntad del constructor, éste no pudiese comenzar las obras, o tuviese que suspenderlas, o no le fuese posible terminarlas en los plazos prefijados, se le otorgará una prórroga proporcionada para el cumplimiento de la contrata, previo informe favorable de la dirección facultativa. Para ello, el constructor expondrá en el escrito dirigido a la dirección facultativa la causa que impide la ejecución o la marcha de los trabajos y el retraso que por ello se originaría en los plazos acordados, razonando debidamente la prórroga que por dicha causa solicita.

Artículo 3.17. Responsabilidad de la dirección facultativa en el retraso de la obra

El contratista no podrá excusarse de no haber cumplido los plazos de obras estipulados, alegando como causa la carencia de planos u órdenes de la dirección facultativa, a excepción del caso en que habiéndolo solicitado por escrito no se lo hubiesen proporcionado.

Artículo 3.18. Condiciones generales de ejecución de los trabajos

Todos los trabajos se ejecutarán con estricta sujeción al proyecto, a las modificaciones del mismo que previamente hayan sido aprobadas y a las órdenes e instrucciones que bajo su responsabilidad y por escrito entregue la dirección facultativa al contratista, siempre que éstas encajen dentro de la cifra a que ascienden los presupuestos aprobados.

Artículo 3.19. Obras ocultas

De todos los trabajos y unidades de obra que hayan de quedar ocultos a la terminación de la obra, se levantarán los planos precisos para que queden perfectamente definidos; estos documentos se extenderán por triplicado, entregándose: uno al propietario, otro a la dirección facultativa y el tercero al contratista, firmados todos ellos por estos dos últimos. Dichos planos, que deberán ir suficientemente acotados, se considerarán documentos indispensables e irrecusables para efectuar las mediciones.

Artículo 3.20. Trabajos defectuosos

El contratista debe emplear los materiales que cumplan las condiciones exigidas en las condiciones generales de índole técnico del pliego de condiciones y realizará todos y cada uno de los trabajos contratados de acuerdo con lo especificado también en dicho documento.

Por ello, y hasta que tenga lugar la recepción definitiva de las obras, el contratista es responsable de la ejecución de los trabajos que ha contratado y de las faltas y defectos que en éstos pueda existir por su mala ejecución o por la deficiente calidad de los materiales empleados o aparatos colocados, sin que le exonere de responsabilidad el control que compete a la dirección facultativa, ni tampoco el hecho de que estos trabajos hayan sido valorados en las certificaciones parciales de obra, que siempre se supone que se extienden y abonan a buena cuenta.

Como consecuencia de lo anteriormente expresado, cuando la dirección facultativa advierta vicios o defectos en los trabajos ejecutados, o que los materiales empleados o los aparatos colocados no reúnen las condiciones preceptuadas, ya sea en el curso de la ejecución de los trabajos, o finalizados éstos, y antes de verificarse la recepción definitiva de la obra, podrá disponer que las partes defectuosas sean demolidas y reconstruidas de acuerdo con lo contratado, y todo ello a expensas de la contrata.

Artículo 3.21. Vicios ocultos

Si la dirección facultativa tuviese fundadas razones para creer la existencia de vicios ocultos de construcción en las obras ejecutadas, ordenará efectuar en cualquier tiempo, y antes de la recepción definitiva, los ensayos, destructivos o no, que crea necesarios para reconocer los trabajos que suponga defectuosos.

Los gastos que ocasionen serán de cuenta del contratista, siempre que los vicios existan realmente, en caso contrario correrán a cargo de la propiedad.

Artículo 3.22. Procedencia de los materiales y los aparatos

El contratista tiene libertad de proveerse de los materiales y aparatos de todas las clases en los puntos que le parezca conveniente excepto en los casos en el que el pliego de condiciones preceptúe una procedencia determinada.

Obligatoriamente, y antes de proceder a su empleo o acopio, el contratista deberá presentar al ingeniero director una lista completa de los materiales y aparatos que vaya a utilizar, en la que se indiquen todas las especificaciones sobre calidades, procedencia e idoneidad de cada uno de ellos.

Artículo 3.23. Materiales no utilizables

El contratista, a su costa, transportará y colocará agrupando ordenadamente y en el lugar adecuado los materiales procedentes de las excavaciones, derribos, etc., que no sean utilizables en la obra.

Se retirarán de ésta o se llevarán al vertedero cuando así estuviese establecido. Si no se hubiese preceptuado nada sobre el particular, se retirarán de ella cuando así lo ordene la dirección facultativa, acordando previamente con el contratista su justa tasación teniendo en cuenta el valor de dichos materiales y los gastos de su transporte.

Artículo 3.24. Materiales y aparatos defectuosos

Cuando los materiales, elementos de instalaciones o aparatos no fuesen de la calidad requerida o no tuviesen la preparación exigida, la dirección facultativa dará orden al contratista de sustituirlos por otros que satisfagan las condiciones requeridas.

Si los materiales, elementos de instalaciones o aparatos fueran defectuosos, pero aceptables a juicio de la dirección facultativa, se recibirán pero con la rebaja de precio que ésta determine.

Artículo 3.25. Obras sin prescripciones

En la ejecución de trabajos que entran en la ejecución de la obra y para los cuales no existan prescripciones consignadas explícitamente en este pliego ni en la restante documentación del proyecto, el contratista se atenderá, en primer término, a las instrucciones que dicte la dirección facultativa de la obra y, en segundo lugar, a las reglas y prácticas de la buena construcción.

Artículo 3.26. Medios auxiliares

Es obligación de la contrata el ejecutar cuanto sea necesario para la buena construcción y aspecto de las obras aún cuando no se halle expresamente estipulado en el Pliego de Condiciones, siempre que, sin separarse de su espíritu y recta interpretación, lo disponga el ingeniero director y dentro de los límites de posibilidad que los presupuestos determinen para cada unidad de obra y tipo de ejecución.

Serán de cuenta y riesgo del contratista, los andamios, cimbras, máquinas y demás medios auxiliares que para la debida marcha y ejecución de los trabajos se necesiten, no cabiendo, por tanto, al propietario responsabilidad alguna por cualquier avería o accidente personal que pueda ocurrir en las obras por insuficiencia de dichos medios auxiliares.

Serán así mismo de cuenta del contratista los medios auxiliares de protección y señalización de la obra, tales como vallado, elementos de protección provisionales, señales de tráfico adecuadas, señales luminosas nocturnas, etc. y todos los medios necesarios para evitar accidentes previsibles en función del estado de la obra y de acuerdo con la legislación vigente.

III.4. RECEPCIÓN DE LAS OBRAS

Artículo 3.27. Recepción provisional

Terminado el plazo de ejecución de las obras se procederá a la recepción provisional de las mismas, estando presente la comisión que designe el contratista y el director de obra. Se realizarán todas las pruebas que el director de obra estime oportunas para el cumplimiento de todo lo especificado en este pliego y buena ejecución y calidad de las mismas, siendo inapelable el fallo de dicho director, a la vista del resultado de las mismas, sobre la validez o invalidez de las obras ejecutadas.

Si las obras se encuentran en buen estado y han sido ejecutadas con arreglo a las condiciones establecidas, se darán por recibidas provisionalmente comenzando a correr en dicha fecha el plazo de garantía señalado en el presente pliego y procediéndose en el plazo más breve posible a su medición general y definitiva, con asistencia del contratista o su representante.

Cuando las obras no se encuentren en estado de ser recibidas, se hará constar en el acta especificando las premisas que el director de obra debe señalar al contratista para remediar los defectos observados, fijando un plazo para ello, expirado el cual, se efectuará un nuevo reconocimiento en idénticas condiciones, a fin de proceder a la recepción provisional de la obra.

Artículo 3.28. Conservación de los trabajos recibidos provisionalmente

Si el contratista, siendo su obligación, no atiende a la conservación de la obra durante el plazo de garantía, en el caso de que la instalación no haya sido ocupada por el propietario, procederá a disponer todo lo que se precise para que se atienda a la guardería, limpieza y todo lo que fuese menester

para su buena conservación, abonándose todo ello por cuenta de la contrata.

Al abandonar el contratista la instalación, tanto por buena terminación de las obras, como en el caso de rescisión de contrato, está obligado a dejarla desocupada y limpia en el plazo que la dirección facultativa fije.

Después de la recepción provisional y en el caso de que la conservación corra a cargo del contratista, no deberá haber más herramientas, útiles, materiales, muebles, etc., que los indispensables para su guardería y limpieza y para los trabajos que fuese preciso realizar.

El contratista se obliga a destinar a su costa a un vigilante de las obras que prestará su servicio de acuerdo con las órdenes recibidas de la dirección facultativa.

Artículo 3.29. Plazo de garantía

El plazo de garantía será de un año a contar desde la fecha de su recepción provisional. Durante el periodo de garantía todas las reparaciones derivadas de mala construcción imputables al contratista serán abonadas por éste.

Artículo 3.30. Recepción definitiva

Pasado el plazo de garantía, si las obras se encuentran en perfecto estado de uso y conservación, de acuerdo al presente pliego, se darán por recibidas definitivamente. Una vez recibidas definitivamente las obras se procederá de inmediato a su liquidación y resolución de la fianza de la que se detraerán las sanciones o cargas que procedan conforme a lo estipulado en el presente pliego. Si resultase que el contratista no hubiese cumplido, se declarará rescindida la contrata con pérdida de la fianza, a no ser que la propiedad crea conveniente conceder un nuevo plazo.

IV. CONDICIONES DE ÍNDOLE ECONÓMICA

IV.1. PRINCIPIO GENERAL

Artículo 4.1. Principios generales

Todos los que intervienen en el proceso de construcción tienen derecho a percibir puntualmente las cantidades devengadas por su correcta actuación con arreglo a las condiciones contractualmente establecidas.

La propiedad, el contratista y, en su caso, los técnicos pueden exigirse recíprocamente las garantías adecuadas al cumplimiento puntual de sus obligaciones de pago.

IV.2. FIANZAS

Artículo 4.2. Fianzas

El contratista prestará fianza con arreglo a alguno de los siguientes procedimientos, según se estipule:

- Depósito previo, en metálico o valores, o aval bancario, por importe entre el 3 % y 10 % del precio total de contrata.
- Mediante retención de las certificaciones parciales o pagos a cuenta en igual proporción.

En el caso de que la obra se adjudique por subasta pública, el depósito provisional para tomar parte en ella se especificará en el anuncio de la misma y su cuantía será de un 3 %, como mínimo, del total del presupuesto de la contrata.

El contratista a quien se haya adjudicado la ejecución de la obra deberá depositar, en el punto y plazo fijados en el anuncio de la subasta, la fianza definitiva que se señale y, en su defecto, su importe será del 10% de la cantidad por la que se otorgue la adjudicación de la obra, fianza que puede constituirse en cualquiera de las formas específicas explicadas anteriormente.

Artículo 4.3. Ejecución de trabajos con cargo a la fianza

Si el contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos precisos para ultimar la obra en las condiciones contratadas, el ingeniero director, en nombre y representación del propietario, los ordenará ejecutar a un tercero, o podrá realizarlos directamente por cuenta propia, abonando su importe con la fianza depositada, sin perjuicio de las acciones legales a que tenga derecho el propietario, en el caso de que el importe de la fianza no bastara

para cubrir el importe de los gastos efectuados en las unidades de obra que no fuesen de recibo.

Artículo 4.4. Devolución de la fianza

La fianza retenida será devuelta al contratista en un plazo que no excederá de treinta días una vez firmada el acta de recepción definitiva de la obra.

La propiedad podrá exigir que el contratista le acredite la liquidación y finiquito de sus deudas causadas por la ejecución de la obra, tales como salarios, suministros, subcontratos...

Si la propiedad, con la conformidad del ingeniero director, accediera a hacer recepciones parciales, tendrá derecho el contratista a que se le devuelva la parte proporcional de la fianza.

IV.3. PRECIOS

Artículo 4.5. Composición de los precios unitarios

Los precios unitarios se compondrán preceptivamente de la siguiente forma:

- Mano de obra, por categorías dentro de cada oficio, expresando el número de horas intervenidas por cada operario en la ejecución de cada unidad de obra y los jornales horarios correspondientes.
- Materiales, expresando la cantidad que en cada unidad de obra se precise de cada uno de ellos y su precio unitario respectivo.
- Transporte de materiales, desde el punto de origen al pie de trabajo.
- Tanto por ciento de medios auxiliares y de seguridad.
- Tanto por ciento de gastos generales.
- Tanto por ciento de seguros y cargas sociales.
- Tanto por ciento de beneficio industrial del contratista.

Se denominará precio de ejecución material al resultado obtenido por la suma de los anteriores conceptos a excepción del beneficio industrial.

Se entiende por precio por contrata el importe del coste de la unidad de obra total, es decir, el precio de ejecución material más el tanto por ciento sobre éste último precio en concepto de beneficio industrial del contratista. El beneficio se estima normalmente en un 6 %, salvo que se establezca otro distinto.

Artículo 4.6. Precios contradictorios

Si ocurriese algún caso por virtud del cual fuese necesario fijar un nuevo precio, se procederá a estudiarlo y convenirlo contradictoriamente de la siguiente forma:

El contratista formulará por escrito, bajo su firma, el precio que, a su juicio, debe aplicarse a la nueva unidad.

La dirección técnica estudiará el que, según su criterio, debe utilizarse.

Si ambos son coincidentes se formulará por la dirección técnica el acta de avenencia, igual que si cualquier pequeña diferencia o error fuesen salvados por simple exposición y convicción de una de las partes, quedando así formalizado el precio contradictorio.

Si no fuera posible conciliar por simple discusión los resultados, la dirección facultativa propondrá a la propiedad que adopte la resolución que estime conveniente, que podrá ser aprobatoria del precio exigido por el contratista o, en otro caso, la segregación de la obra o instalación nueva, para ser ejecutada por otro adjudicatario distinto.

La fijación del precio contradictorio habrá de preceder necesariamente al comienzo de la nueva unidad, puesto que, si por cualquier motivo ya se hubiese comenzado, el contratista estará obligado a aceptar el que buenamente quiera fijarle la dirección facultativa y a concluir a satisfacción de éste.

De los precios así acordados se levantarán actas que firmarán por triplicado el director de obra, el propietario y el contratista o los representantes autorizados a estos efectos por estos últimos.

Artículo 4.7. Reclamaciones de aumentos de precios

Si el contratista, antes de la firma del contrato, no hubiese hecho la reclamación u observación oportuna, no podrá bajo ningún pretexto de error u omisión reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro correspondiente del presupuesto que sirva de base para la ejecución de las obras.

Artículo 4.8. Revisión de los precios contratados

Contratándose las obras a riesgo y ventura, en principio no se debe admitir la revisión de los precios contratados. No obstante y dada la variabilidad continua de los precios de los jornales y sus cargas sociales, así como la de los materiales y transportes, que son características de determinadas épocas anormales, se admite durante ellas la rescisión de los precios contratados, bien en alza o en baja y en armonía con las oscilaciones de los precios del mercado. El contratista puede solicitar la revisión en alza del propietario en cuanto se produzca cualquier alteración de precio que repercuta aumentando los contratados. Ambas partes convendrán el nuevo precio unitario antes de comenzar o de recontinuar la ejecución de la unidad de obra en que intervenga el elemento cuyo precio en el mercado y por causas justificadas haya subido, especificándose y acordándose también previamente la fecha a partir de la cual se tendrá en cuenta.

Si el propietario o el ingeniero director, en su representación, no estuviese conforme con los nuevos precios de los materiales, transportes, etc., que el contratista desee recibir como normales en el mercado, aquél tiene la facultad de proponer al contratista, y éste la obligación de aceptarlos, los materiales, transportes, etc., a precios inferiores a los pedidos por el contratista, en cuyo caso lógico y natural, se tendrán en cuenta para la revisión, los precios de los materiales, transportes, etc., adquiridos por el contratista merced a la información del propietario.

Artículo 4.9. Acopio de materiales

Si el propietario ordenase por escrito al contratista el acopio de materiales o aparatos en la obra a los precios contratados y éste así lo efectuase, los que se hayan acopiado se incluirán en la certificación siguiente a su entrada en la obra.

IV.4. VALORACIÓN Y ABONO DE LOS TRABAJOS

Artículo 4.10. Formas varias de abono de las obras

El abono de los trabajos efectuados se realizará por uno de los procedimientos siguientes, convenido por el ingeniero y el contratista antes de dar comienzo los trabajos:

- Tipo fijo o tanto alzado total; se abonará la cifra previamente como base de la adjudicación.
- Tipo fijo o tanto alzado por unidad de obra, cuyo precio invariable se haya fijado de antemano, pudiendo variar solamente el número de unidades ejecutadas.
- Tanto variable por unidad de obra, según las condiciones en que se realice y los materiales diversos empleados en su ejecución de acuerdo con las órdenes del ingeniero director.
- Por listas de jornales y recibos de materiales, autorizados en la forma en que el presente pliego determina.
- Por horas de trabajo, ejecutadas en las condiciones determinadas en el contrato.

Artículo 4.11. Relaciones valoradas y certificaciones

Lo ejecutado por el contratista en las condiciones preestablecidas, se valorará aplicando al resultado de la medición general los precios señalados en el presupuesto para cada una de ellas, teniendo presente además lo establecido en el presente pliego respecto a mejoras o sustituciones de material y a las obras accesorias y especiales.

Al contratista se le facilitarán, por parte del ingeniero director, los datos correspondientes de la relación valorada, acompañándolos de una nota de envío, al objeto de que dentro del plazo de diez días a partir de la fecha del envío de dicha nota, pueda el contratista examinarlos y devolverlos firmados

con su conformidad o hacer, en caso contrario, las observaciones o reclamaciones que considere oportunas. Dentro de los diez días siguientes a su recibo, el ingeniero director aceptará o rechazará las reclamaciones del contratista si las hubiere, dando cuenta al mismo de su resolución, pudiendo éste en el segundo caso acudir ante el propietario contra la resolución del ingeniero director.

Tomando como base la relación valorada indicada en el párrafo anterior, expondrá el ingeniero director la certificación de las obras ejecutadas.

Las certificaciones se remitirán al propietario, dentro del mes siguiente al periodo a que se refieren, y tendrán el carácter de documento y entregas a buena cuenta, sujetas a las rectificaciones y variaciones que se deriven de la liquidación final, no suponiendo tampoco dichas certificaciones aprobación de las obras que comprenden.

Las relaciones valoradas contendrán solamente la obra ejecutada en el plazo que la valoración se refiere. En el caso de que el ingeniero director lo exigiera, las certificaciones se extenderán al origen.

Artículo 4.12. Pagos

Los pagos se efectuarán por el propietario en los plazos previamente establecidos, y su importe corresponderá precisamente al de las certificaciones de obra expedidas por el ingeniero director, en virtud de las cuales se verifican aquéllos.

Artículo 4.13. Abono de trabajos ejecutados durante el plazo de garantía

Efectuada la recepción provisional y si durante el plazo de garantía se hubieran ejecutado trabajos para su abono se procederá así:

- Si los trabajos se realizan y están especificados en el proyecto, y sin causa justificada no se hubieran realizado por el contratista a su debido tiempo, y el ingeniero exigiera su realización durante el plazo de garantía, serán valorados a los precios que figuren en el presupuesto y abonados de acuerdo con lo establecido en el pliego, en el caso de que dichos fueran inferiores a los que rijan en la época de su realización, en caso contrario, se aplicarán estos últimos.

- Si se han ejecutado trabajos precisos para la reparación de desperfectos ocasionados por el uso de las obras, por haber sido utilizadas durante dicho plazo por el propietario, se valorarán y abonarán a los precios del día, previamente acordados.

- Si se han ejecutado trabajos para la reparación de desperfectos ocasionados por deficiencia de la construcción o de la calidad de los materiales, nada se abonará por ellos al contratista.

IV.5. INDEMNIZACIONES MUTUAS

Artículo 4.14. Importe de la indemnización por retraso no justificado en el plazo de terminación de las obras

La indemnización por retraso de la terminación se establecerá en un tanto por mil del importe total de los trabajos contratados, por cada día natural del retraso, contados a partir del día de terminación fijado en el calendario de obra.

Artículo 4.15. Demora de los pagos

Si el propietario no efectuase el pago de las obras ejecutadas dentro del mes siguiente al que corresponde el plazo convenido, el contratista tendrá además el derecho a percibir el abono de un 4,5 % anual en concepto de interés de demora, durante el espacio de tiempo del retraso y sobre el importe de la mencionada certificación.

Si aún transcurrieran dos meses a partir del término de dicho plazo de un mes sin realizarse dicho pago, tendrá derecho el contratista a la rescisión del contrato, procediéndose a la liquidación correspondiente de las obras ejecutadas y de los materiales acopiados, siempre que éstos reúnan las condiciones preestablecidas y que su cantidad no exceda de la necesaria para la terminación de la obra contratada.

No obstante lo anteriormente expuesto, se rechazará toda solicitud de rescisión del contrato fundada en dicha demora de pagos, cuando el contratista no justifique que en la fecha de dicha solicitud ha invertido en obra o en materiales la parte de presupuesto correspondiente al plazo de ejecución que tenga señalado en el contrato.

IV.6. VARIOS

Artículo 4.16. Mejora de obras

No se admitirá mejorar las obras, más que en el caso de que el ingeniero haya ordenado por escrito la ejecución de los trabajos nuevos o que mejoren la calidad de los contratados.

Tampoco se admitirán aumentos de obra en las unidades contratadas, salvo el caso de error en las mediciones del proyecto, a menos que el ingeniero ordene también por escrito la ampliación de las contratadas.

Será condición indispensable que ambas partes contratadas convengan por escrito los importes totales de las unidades mejoradas, los precios de los nuevos materiales y los aumentos de todas las mejoras.

Artículo 4.17. Unidades de obra defectuosas pero aceptables

Cuando por cualquier causa fuera menester valorar una obra defectuosa pero aceptable a juicio del ingeniero director, éste determinará el precio o partida de abono después de oír al contratista, el cual deberá conformarse con dicha resolución, salvo en el caso que, estando dentro del plazo de ejecución, prefiera demoler la obra y rehacerla con arreglo a las condiciones sin exceder de dicho plazo.

V. CONDICIONES DE ÍNDOLE LEGAL

Artículo 5.1. Jurisdicción

Para cuantas cuestiones, litigios o diferencias pudieran surgir durante o después de los trabajos, las partes se someterán a juicio de amigables componedores nombrados en número igual por ellas y presidido por el ingeniero director de la obra y, en último término, a los tribunales de justicia del lugar en que radique la propiedad.

El contratista es responsable de toda falta relativa a la política urbana y a las ordenanzas municipales, aspectos vigentes en la localidad en que la obra esté emplazada.

Artículo 5.2. Accidentes de trabajo y daños a terceros

El contratista está obligado a adoptar todas las medidas de seguridad que las disposiciones vigentes preceptúan para evitar, en lo posible, accidentes a los obreros o viandantes en todos los lugares peligrosos de la obra.

De los accidentes o perjuicios de todo género que, por no cumplir el contratista lo legislado sobre la materia, pudieran acaecer, será éste el único responsable, o sus representantes en la obra.

El contratista será responsable de todos los accidentes que, por inexperiencia o descuido, sobrevinieran tanto en la edificación donde se efectúen las obras como en las contiguas. Será por tanto de su cuenta el abono de las indemnizaciones a quien corresponda y, cuando a ello hubiera lugar, de todos los daños y perjuicios que puedan causarse en las operaciones de ejecución de las obras.

Artículo 5.3. Pagos de arbitrios

El pago de impuestos y arbitrios en general, municipales o de otro origen, sobre vallas, alumbrado, etc., cuyo abono debe hacerse durante el tiempo de ejecución de las obras por concepto inherente a los propios trabajos que se realizan correrá a cargo de la contrata, siempre que en las condiciones del proyecto no se estipule lo contrario. No obstante, al contratista le deberá ser reintegrado el importe de todos aquellos conceptos que el ingeniero director considere justo hacerlo.

Artículo 5.4. Causas de rescisión del contrato

Se consideran causas suficientes de rescisión del contrato las que a continuación se señalan:

- La muerte o incapacidad del contratista.
- La quiebra del contratista.

En los casos anteriores, si los herederos o síndicos ofrecieran llevar a cabo las obras, bajo las mismas condiciones estipuladas en el contrato, el propietario puede admitir o rechazar el ofrecimiento, sin que en este último caso tengan aquéllos derecho a indemnización alguna.

- Las alteraciones del contrato por las causas siguientes:
 - La modificación del proyecto en forma tal que presente alteraciones fundamentales del mismo, a juicio de la dirección facultativa y, en cualquier caso, siempre que la variación del presupuesto de ejecución, como consecuencia de estas modificaciones, represente más o menos un 25%, como mínimo, del importe de aquél.
 - La modificación de unidades de obra, siempre que estas modificaciones representen variaciones más o menos del 40%, como mínimo, de las unidades del proyecto modificadas.
 - La suspensión de la obra comenzada y en todo caso siempre que,

por causas ajenas a la contrata, no se de comienzo a la obra adjudicada dentro del plazo de tres meses, a partir de la adjudicación; en este caso la devolución de la fianza será automática.

- El no dar comienzo la contrata a los trabajos dentro del plazo señalado en las condiciones del proyecto.
- El incumplimiento de las condiciones del contrato, cuando implique descuido o mala fe, con perjuicio de los intereses de la obra.
- La terminación del plazo de ejecución de la obra sin haberse llegado a ésta.
- La mala fe en la ejecución de los trabajos.

Quedará rescindido el contrato por incumplimiento del contratista de las condiciones estipuladas, perdiendo en este caso la fianza y quedando sin derecho a reclamación alguna.

VI. CONDICIONES PARTICULARES DE EQUIPOS

Artículo 6.1. Especificaciones particulares de los equipos

El objeto del presente artículo es concretar las especificaciones técnicas que deben satisfacer los distintos equipos, diseñados o de adquisición directa por compra, para que sean aceptados en la instalación que se proyecta.

Los equipos deben entregarse con las pruebas hidráulicas que correspondan, realizadas de forma satisfactoria.

La instalación sólo será recepcionada cuando se demuestre que todos los equipos de la planta y dispositivos de control funcionan perfectamente.

Artículo 6.1.1. Tanques de almacenamiento

TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE METANOL	
Descripción	Tanque cilíndrico, vertical, cerrado, de techo fijo semielíptico y fondo plano. Diseño en anexo 1.
Unidades	1
Díámetro interior(m)	2,34
Altura (m)	4,67
Capacidad (m³)	20
Espesor carcasa (mm)	7
Espesor fondos (mm)	7
Material	SA-285-C

TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ÁCIDO SULFÚRICO	
Descripción	Bidón retornable cilíndrico, vertical, cerrado. Adquisición por compra a la empresa Panreac
Unidades	1
Diámetro (m)	0,59
Altura (m)	0,94
Capacidad (m³)	0,2
Peso (kg)	30
Material	Acero inoxidable

Artículo 6.1.2. Tanques de sedimentación

Descripción	Tanques cilíndricos, verticales, abiertos, con fondo cónico para purgas, soportados por perfiles IPN, con serpentín de espiral simple. Diseño en anexo 1.
Unidades	3
Diámetro interior (m)	2,53
Altura (m)	5,81
Capacidad (m³)	25,57
Espesor carcasa (mm)	7
Espesor fondos (mm)	10
Material	SA-285-C

Artículo 6.1.3. Reactor

Descripción	Reactor de tanque agitado con fondo y tapa semielípticos, soportado por perfiles IPN, con serpentín de espiral plano. Diseño en anexo 1.
Unidades	1
Diámetro interior (m)	2
Altura (m)	3
Capacidad (m³)	8,36
Espesor carcasa (mm)	3
Espesor fondos (mm)	3
Material	SS-316
Potencia agitación (kW)	6

Artículo 6.1.4. Centrifugas

<i>CENTRÍFUGA PARA LIMPIEZA ACEITE</i>	
Descripción	Centrífuga continua de discos Westfalia tipo RSC 25-51-506. Adquisición directa por compra.
Unidades	1
Caudal máximo (l/h)	2.500
Altura (m)	1,4
Longitud (m)	1,8
Ancho (m)	1
Volumen tambor (l)	8
Volumen recinto sólidos (l)	4
Velocidad (r.p.m.)	7.500
Potencia motor (kW)	11

CENTRÍFUGA PARA SEPARACIÓN DE MEZCLA DE REACCIÓN	
Descripción	Centrífuga continua de discos Westfalia tipo RSE 200-01-576. Adquisición directa por compra.
Unidades	1
Caudal máximo (l/h)	40.000
Contenido en sólidos (%)	< 5
Rango de capacidad (ton/día)	400-800
Velocidad (r.p.m.)	4.800

Artículo 6.1.5. Red de tuberías

Línea (diseño en anexo 1)	Material	Longitud (m)	DN	Espesor (mm)	Sch
Tanque sediment.-centrífuga	SA-53-B	10	1	2,77	10S
Centrífuga-reactor	SS-304	25	3	2,11	5S
Depósito metanol-reactor	SA-53-B	15	2	2,77	10S
Depósito sulfúrico-reactor	SS-304	15	1/8	2,41	80S
Reactor-centrífuga final	SS-304	10	4	2,11	5S
Centrífuga final-reactor principal transesterific.	SS-304	16	4	2,11	5S
Centrífuga final-línea recuperación/purific.	SS-304	18	2	1,65	5S

Artículo 6.1.6. Bombas

Bomba	Modelo	Velocidad (rpm)	Caudal (m³/h)	Carga (m)	Potencia (W)
B-1	GNI 32-13	1.450	1 - 12	4 - 6,4	550
B-2	GNI 50-13	1.450	1 - 36	4 - 5,5	550
B-3	GNI 32-13	1.450	1 - 12	4 - 6,4	550
B-5	GNI 50-13	1.450	1 - 36	4 - 5,5	550

Bomba	Modelo	Velocidad (rpm)	Caudal (ml/min)	Carga (m)	Capacidad (ml/rev)
B-4	Boyser DS-M	0 - 150	1 - 1.500	1,6 - 8	0,16 - 10

Artículo 6.1.7. Instrumentación

Instrumento de medida		Unidades	Rango de medición	Tipo de dispositivo	Modelo
Medidor de temperatura		4	-50 – 150 °C	Sonda PT 100	RTF4-2
Medidor de nivel		4	0,1 – 10 m	Medidor por ultrasonido	Shuttle 200660
Célula de carga	Para reactor	4	0 – 1500 kg	Célula de carga	Sensocar CO-1
	Para bidón sulfúrico	1	0 - 40 kg	Célula de carga	Sensocar BL
Medidor de caudal		2	0,3 – 10 m/s	Medidor por ultrasonido	SIGNET 3-3350

Válvula	Unidades
Válvula de bola	7
Válvula de retención	6

CONTROLADOR	UNIDADES
De Temperatura	4
De nivel	7
De caudal	2

Puerto Real, a septiembre de 2007

Fdo.: M^a de los Milagros García Cabello

FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE PRETRATAMIENTO DE
ACEITES CON ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS
LIBRES PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.**

DOCUMENTO Nº 4: ESTUDIO ECONÓMICO

M^a DE LOS MILAGROS GARCÍA CABELLO

SEPTIEMBRE, 2007

0. ÍNDICE

0. ÍNDICE	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. CAPITAL FIJO INVERTIDO	2
3. COSTES DE PRODUCCIÓN	8
4. BENEFICIOS	12
5. RENTABILIDAD	14
6. PRESUPUESTO	16
6.1. PRECIOS DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES	16
6.2. PRECIOS DEL SISTEMA COMPLETO DE EQUIPOS	17
6.3. CAPITAL DE SERVICIOS AUXILIARES, CIRCULANTE Y CAPITAL FIJO INVERTIDO	18

1. INTRODUCCIÓN

Los objetivos de la estimación de costes son:

- Conocer los conceptos contables a tener en cuenta en el proyecto.
- Estimar el capital total invertido en el mismo.
- Estimar los costes de fabricación.
- Valorar la rentabilidad de la instalación.

A continuación se estudiarán los términos que intervienen en la estimación del valor económico del proyecto.

2. CAPITAL FIJO INVERTIDO

El capital total se divide en tres partes, según el grado de riesgo, y se muestran a continuación en orden decreciente de riesgo:

$$I = I_F + I_A + I_W$$

donde:

- I: es el capital fijo invertido.
- I_F : es el capital inmovilizado en el área de proceso.
- I_A : es el capital invertido en servicios auxiliares.
- I_W : es el capital circulante.

- Capital inmovilizado en el área de proceso:

Es el capital invertido en todo el equipo situado dentro de los límites del área de proceso.

Para calcular el capital inmovilizado se ha empleado el Método de Estimación Factorial, que se basa en los costes de los elementos principales, que son los costes de los equipos sin instalar. Para ello se ha

hecho uso de gráficas para cada tipo de equipo en función de las dimensiones de los mismos, las cuales se muestran a continuación:

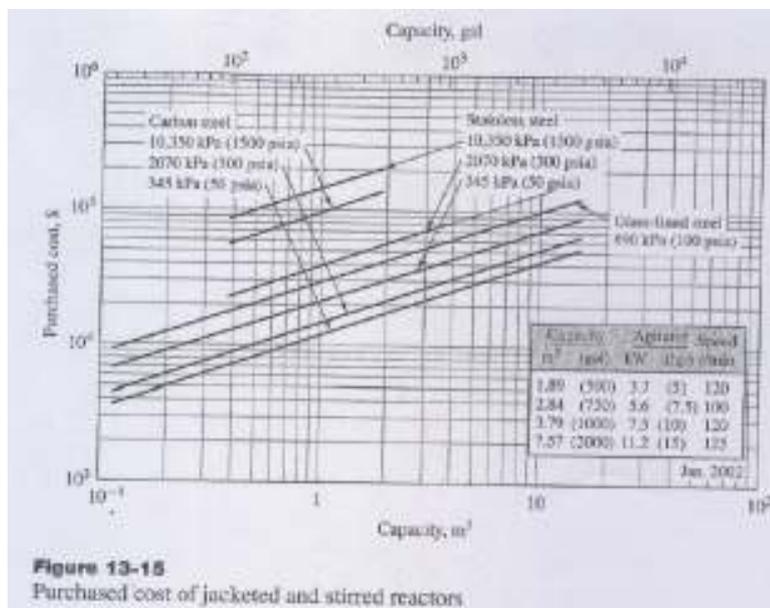


Figure 13-15
Purchased cost of jacketed and stirred reactors

Figura E.C.1. Gráfica de costes de reactor. [22]

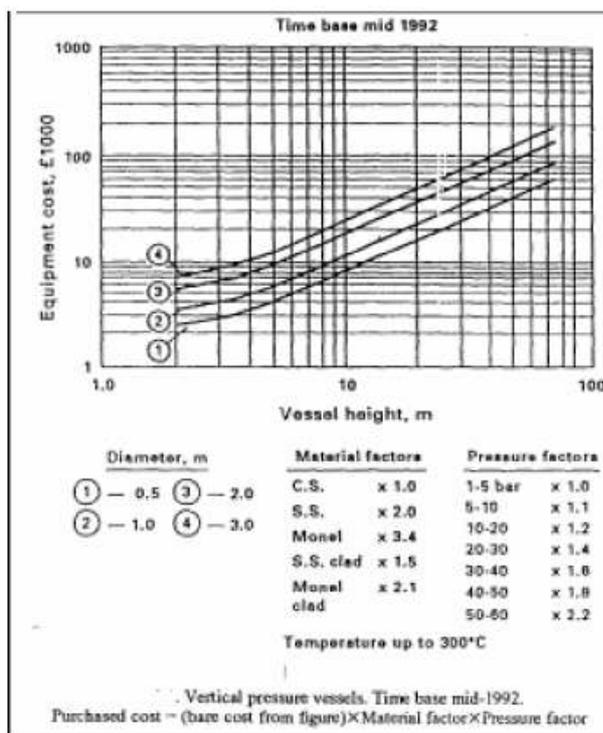


Figura E.C.2. Gráfica de costes de recipientes verticales. [23]

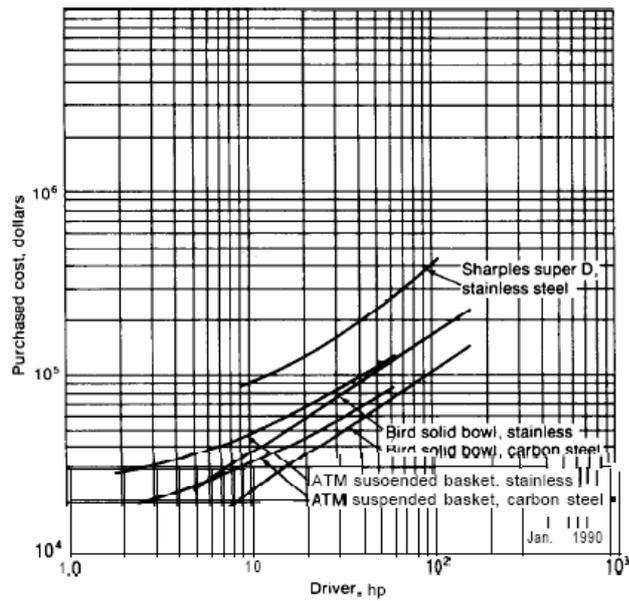


FIGURE 14-74
Centrifuges.

Figura E.C.3. Gráfica de costes de centrifugas. [22]

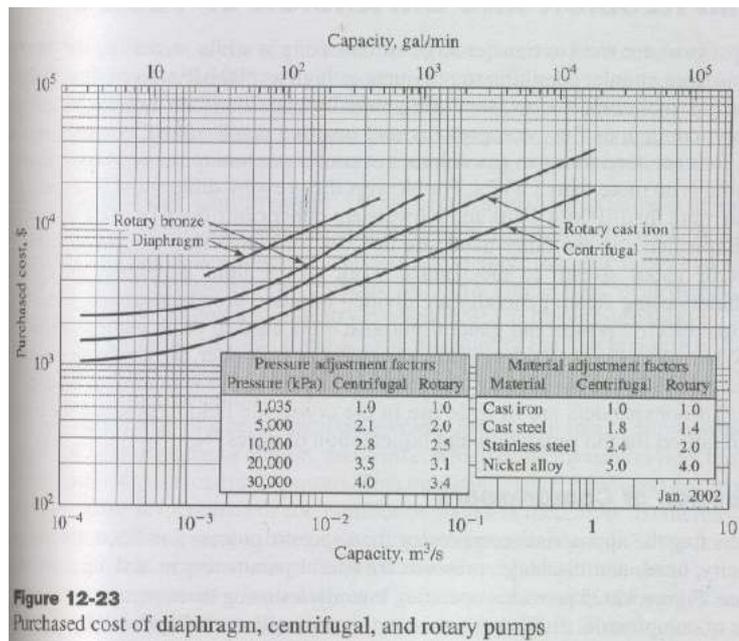


Figure 12-23
Purchased cost of diaphragm, centrifugal, and rotary pumps

Figura E.C.4. Gráfica de costes de bombas. [22]

En estas gráficas se determina el valor para las características de cada equipo, en el año de construcción de las gráficas. Para tener en cuenta el aumento del valor del dinero, se ha empleado el índice de Marshall Swift del tercer trimestre de 2005, que es el último que se ha encontrado disponible, y el del año de cada gráfica.



Figura E.C.5. Índices de Marshall Swift.
Fuente: Chemical Engineering.

A partir de estos valores, aplicando los factores de la figura E.C.6, se obtienen los valores de todos los equipos ya instalados en planta en condiciones de operar.

TABLA 13. Factores experimentales típicos para sistemas de proceso en los que predominan fluidos *

COSTE DEL EQUIPO PRINCIPAL SIN INSTALAR	I_E
COSTES DIRECTOS ADICIONALES COMO FRACCIÓN DE I_E	
Mano de obra para la instalación del equipo principal	0,10-0,20
Aislamiento	0,10-0,25
Conducciones (acero al carbono)	0,50-1,00
Cimientos	0,03-0,13
Edificios	0,07
Estructuras	0,05
Protección contra incendios	0,06-0,10
Instalación eléctrica	0,07-0,15
Pintura y limpieza	0,06-0,10
	Σf_i 1,09-2,05
COSTE DIRECTO TOTAL $(1 + \Sigma f_i)I_E$	
COSTES INDIRECTOS COMO FRACCIÓN DE LOS COSTES DIRECTOS	
Gastos generales, Gerencia	0,30
Servicios técnicos, honorarios de ingeniería	0,13
Imprevistos	0,13
	$f_j = 1 + 0,56 = 1,56$
COSTE TOTAL $I_F = (1 + \Sigma f_i)f_j I_E = (3,1-4,8)I_E$	

Figura E.C.6. Tabla de factores del Método de Estimación Factorial. [24]

El valor del capital inmovilizado total (I_F) es de 1.300.715,11 €.

- Capital invertido en servicios auxiliares:

Es el capital invertido en el equipo situado fuera del área de proceso y que es simultáneamente utilizado por diversos sistemas de proceso, es decir, unidades tales como generadores de vapor, servicio de protección contra incendios, etc.

Los costes de los servicios auxiliares se calculan a partir de la figura E.C.7, en función del coste total de la planta instalada (I_F).

Tabla 15. Valores típicos de los costes de los servicios auxiliares expresados como porcentaje del coste total de la planta instalada (plantas aisladas o grandes adiciones de servicios) *

Servicio	Intervalo	Valor medio (%)
Edificios auxiliares	3,0-9,0	5,0
Generación de vapor	2,6-6,0	3,0
Refrigeración (incluye su distribución)	1,0-3,0	2,0
Refrigeración y bombeo de agua	0,4-3,7	1,8
Almacenamiento de producto terminado	0,7-2,4	1,8
Subestación eléctrica principal	0,9-2,6	1,5
Sistema de evacuación de residuos	0,4-1,8	1,1
Almacenamiento de materias primas	0,3-3,2	1,1
Distribución de vapor	0,2-2,0	1,0
Distribución de electricidad	0,4-2,1	1,0
Compresión y distribución de aire	0,2-3,0	1,0
Distribución de agua	0,1-2,0	0,9
Sistema de protección contra incendios	0,3-1,0	0,7
Tratamiento de aguas	0,2-1,1	0,6
Ferrocarril	0,3-0,9	0,6
Carreteras y aceras	0,2-1,2	0,6
Suministro y distribución de gas	0,2-0,4	0,3
Tratamiento sanitario de residuos	0,1-0,4	0,3
Comunicaciones	0,1-0,3	0,2
Alumbrado de planta y zonas limítrofes	0,1-0,3	0,2

Figura E.C.7. Costes de servicios auxiliares. ^[24]

El valor del capital invertido en servicios auxiliares (I_A) es 219.820,87 €.

- Capital circulante:

Es el capital invertido en el sistema en forma de dinero en efectivo, para prevenir gastos de operación y mantener el almacén de materias primas y productos.

Se ha considerado el capital invertido en una reserva de materias primas para un mes de operación.

El valor del capital circulante (I_w) es 102.596,68 €.

Por tanto, el valor del capital fijo invertido (I) asciende a 1.623.132,66 €.

3. COSTES DE PRODUCCIÓN

Los costes de producción son los que sirven para mantener en funcionamiento el sistema en la forma prevista. Se dividen en tres términos:

$$C = F_I + F_Q + F_L$$

donde:

- C: son los costes de producción.
- F_I : es el término proporcional al capital inmovilizado.
- F_Q : es el término proporcional al volumen de producción.
- F_L : es el término proporcional a la mano de obra.

- Término proporcional al capital inmovilizado:

Se refiere a factores que son normalmente independientes del volumen de producción, siendo proporcionales al capital inmovilizado de la planta, y son:

- Mantenimiento: mano de obra y materiales, impuestos sobre la propiedad y seguros.
- Gastos de seguridad: protección contra incendios, vigilancia, primeros auxilios, etc.
- Servicios generales: laboratorio, vías de circulación, etc.
- Servicios administrativos: oficinas, contabilidad, servicio jurídico, etc.

Se han calculado a partir de la figura E.C.8, como fracción del inmovilizado:

Tabla 16. Costes indirectos que intervienen en el coste de fabricación

Partida	Coste anual como fracción de inmovilizado
Mantenimiento y reparaciones	
Procesos sencillos	0,02-0,06
Procesos altamente corrosivos o a presiones o temperaturas elevadas	0,07-0,11
Patentes	0,01-0,04
Seguros	0,01
Servicios generales	0,02-0,10
Factor total razonable para costes indirectos	$\alpha = 0,10-0,20$

Figura E.C.8. Costes indirectos que intervienen en el coste de fabricación. [24]

El valor del coste proporcional al inmovilizado (F_i) es de 208.114,42 €.

- Término proporcional al volumen de producción:

Son costes que dependen de la velocidad con la que los productos son fabricados por el sistema, son factores proporcionales a:

- Costes de las materias primas.
- Costes de los servicios generales: energía eléctrica, agua de proceso, vapor, etc.
- Costes de mantenimiento motivados por el funcionamiento.
- Productos químicos, catalizadores y materias consumidas en la fabricación distintos de materias primas.
- Costes de almacenamiento y expedición, control de calidad y análisis rutinarios, royalties y patentes.

Se han considerado los costes de aceite y metanol para un año de funcionamiento, así como el catalizador necesario para ese año de funcionamiento. Los costes de mantenimiento debido a la operación se han considerado como un 2% del inmovilizado total. Por último se ha considerado el coste de la electricidad consumida teniendo en cuenta el precio del kWh en tarifa reducida por ser una empresa, a razón de un consumo de 0,5 kWh/kg de producto.

Con todas estas consideraciones se obtiene un valor del coste proporcional al volumen de producción (F_Q) de 1.439.578,55 €.

- Término proporcional a la mano de obra:

Son costes relacionados con el mantenimiento del personal que interviene en la operación:

- Mano de obra.
- Gerencia.
- Gastos adicionales: vacaciones pagadas, seguridad social, etc.

Se ha considerado que el término proporcional a la mano de obra es un 10% del total de los costes de producción, resultando un valor de F_L igual a 183.077 €.

Por tanto, los costes anuales de fabricación (C) ascienden a 1.830.769,97 €. En la siguiente tabla se detallan cada uno de los términos que intervienen en los costes de producción anuales:

Costes proporcionales al volumen de producción					
CONCEPTO	UNIDAD	€/UNIDAD	CONSUMO DIARIO	CONSUMO ANUAL	TOTAL ANUAL (€)
Aceite usado	t	200	20	5.040	1.008.000
Metanol	t	300	2,94	740,88	222.264
Ácido sulfúrico	t	3.333,33	0,064	16,13	53.766,61
Mantenimiento y reparación	2% I _F				26.014,30
Energía eléctrica	kWh	0,06	0,5 kWh/kg de producto		129.533,64
TOTAL					1.439.578,55 €
Costes proporcionales al inmovilizado					
				Fracción inmovilizado	Subtotal (€)
Mantenimiento y reparaciones				0,09	117.064,36
Seguros				0,01	13.007,15
Servicios generales				0,06	78.042,91
TOTAL					208.114,42 €
Costes proporcionales a la mano de obra					
Calculado como 10% coste total producción				TOTAL	183.077 €
COSTE DE PRODUCCIÓN TOTAL					1.830.769,97 €

Tabla E.C.1. Costes de producción anuales.

4. BENEFICIOS

- Beneficio bruto anual, R:

Es la diferencia entre el ingreso neto por ventas anuales, S (€/año) y los costes de fabricación anuales, C (€/año).

El resultado es de un beneficio bruto (R) de 68.604,43 €.

- Beneficio neto anual, P:

Se define como la cantidad que resta del beneficio bruto después de deducir la amortización y los impuestos, según la ecuación:

$$P = R - eI_F - (R - dI_F)t$$

siendo:

- e: factor anual de amortización calculado para recuperar la inversión hecha en inmovilizado (€/€año).
- d: factor anual de pérdida de valor del inmovilizado.
- t: impuestos (€/€ recibido).

Según la Directiva 2003/96/CE, a los productores de biocombustibles se les eximirá de los impuestos especiales, por esta razón sólo se han considerado 0,1 €/€ recibido, en lugar de 0,35 que es el valor que se aplica generalmente^[11]. Se ha considerado una amortización no lineal según la ecuación:

$$e = \frac{i}{\exp(i \cdot n) - 1}$$

siendo:

- i: rentabilidad promedia (0,11 €/€ año)^[24].
- n: vida esperada para el proyecto desde el punto de vista de la

amortización (10 años).

El valor obtenido es $e = 0,05 \text{ €/€ año}$.

Finalmente se obtiene un valor de $P = 9.715,38 \text{ €}$.

Este valor del beneficio neto se corresponde con el periodo de amortización de la planta, es decir, para los 10 primeros años. Para los siguientes años, al no tener amortización, el beneficio será mayor.

5. RENTABILIDAD

Por último, se va a estudiar la rentabilidad o tasa de retorno.

Para calcular la rentabilidad, se va a considerar que la instalación de pretratamiento de aceites va a tener una vida de 25 años, por ello se va a usar el capital fijo invertido promedio en esos 25 años; el cálculo se realizará mediante la siguiente ecuación:

$$i = \frac{\text{Beneficio neto obtenido}}{\text{Capital fijo invertido promedio}} \cdot 100$$

La rentabilidad de la planta, durante el periodo de amortización, es de un 14,96%. Durante los siguientes años, la rentabilidad será mayor, ya que como se indicó anteriormente, el beneficio será mayor.

En la siguiente tabla se detallan los beneficios y la rentabilidad de la instalación:

Ingreso neto por ventas anuales, S	
Producción diaria aceite pretratado (t)	17,13
Producción anual (t)	4.316,76
Precio de 1 kg de aceite pretratado (€)	0,44
Total anual	1.899.374,4 €

Costes de producción anuales	1.830.769,97 €
-------------------------------------	-----------------------

Beneficio bruto anual, R	68.604,43 €
---------------------------------	--------------------

Beneficio neto anual, P	
Impuestos (sólo 10% debido a Directiva que exime de los impuestos especiales)	0,1
Amortización	0,05
Factor anual de pérdida de valor del inmovilizado	0,1
Capital fijo invertido promedio 25 años	64.925,31 €
Total beneficio neto (10 primeros años)	9.715,38 €
Rentabilidad inicial	14,96%

Tabla E.C.2. Beneficios y rentabilidad de la instalación.

La rentabilidad mínima que se debe exigir en una planta química es del 15%, por lo que se puede afirmar que la instalación es rentable.

En definitiva, a partir del estudio económico realizado, en base a factores de inversión, operación e ingresos generados, puede concluirse que queda demostrada la viabilidad económica de la instalación.

6. PRESUPUESTO

6.1. PRECIOS DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES

EQUIPO	PRECIO POR UNIDAD (\$)	AÑO	ÍNDICE MS ANTIGUO	ÍNDICE MS ACTUAL	PRECIO ACTUAL (\$)	UDS	TOTAL (\$)	TOTAL (€)*
Reactor	65.000	2002	1.104,2	1.260,9	74.224	1	74.224	53.841,70
Tanque MeOH	18.263	1992	943,1	1.260,9	24.400	1	24.400	17.699,60
Tanque sedimentac.	30.439	1992	943,1	1.260,9	40.696	3	112.088	81.308,00
Centrífuga aceite	45.000	1990	915,1	1.260,9	62.005	1	62.005	44.978,10
Centrífuga mezcla reac.	80.000	1990	915,1	1.260,9	110.231	1	110.231	79.961,00
Bomba centrífuga	5.160	2002	1.104,2	1.260,9	5.892	4	23.568	17.096,10
Bomba peristáltica**	949	2002	1.104,2	1.260,9	1.084	1	1.084	786,33
TOTAL INMOVILIZADO DE EQUIPOS PRINCIPALES							295.670,83 €	

*Cambio monedas del 11/9/07.

**Escalado en capacidad y tiempo.

6.2. PRECIOS DEL SISTEMA COMPLETO DE EQUIPOS

Inmovilizado de elementos principales (sin instalar), I_E (€)	295.670,83 €
<i>Costes directos adicionales como fracción de I_E</i>	FACTOR
Mano de obra para la instalación del equipo principal	0,15
Aislamiento	0,2
Conducciones (acero al carbono)	1
Cimientos	0,08
Edificios	0,07
Estructuras	0,05
Protección contra incendios	0,08
Instalación eléctrica	0,11
Pintura y limpieza	0,08
Suma de factores, f_i	1,82
Coste directo total $(1+\sum f_i) I_E$	833.791,74 €
<i>Costes indirectos como fracción de los costes directos</i>	FACTOR
Gastos generales, gerencia	0,3
Servicios técnicos, honorarios de ingeniería	0,13
Imprevistos	0,13
Suma de factores, f_i	0,56
$F_I = (1+\sum f_i)$	1,56
COSTE TOTAL $I_F = (1+\sum f_i) F_I I_E$	1.300.715,11 €

6.3. CAPITAL DE SERVICIOS AUXILIARES, CIRCULANTE Y CAPITAL FIJO INVERTIDO

<i>Capital de servicios auxiliares, I_A</i>	<i>% del coste total de la planta instalada</i>	<i>Subtotal (€)</i>
Edificios auxiliares	5	65.035,76
Generación de vapor	3	39.021,45
Subestación eléctrica principal	1,5	19.510,73
Sistema de evacuación de residuos	1,1	14.307,87
Almacenamiento de materias primas	1,1	14.307,87
Distribución de vapor	1	13.007,15
Distribución de electricidad	1	13.007,15
Distribución de agua	0,9	11.706,44
Sistema de protección contra incendios	0,7	9.105,01
Tratamiento de aguas	0,6	7.804,29
Carreteras y aceras	0,6	7.804,29
Comunicaciones	0,2	2.601,43
Alumbrado de plantas y zonas limítrofes	0,2	2.601,43
Total I _A		219.820,87 €
Capital circulante, I _w		102.596,68 €
CAPITAL FIJO INVERTIDO, I = I_F + I_A + I_w		1.623.132,66 €

Puerto Real, a septiembre de 2007

Fdo.: M^a de los Milagros García Cabello

