

04-016

DESIGN OF AN AUXILIARY INSTALLATION FOR THE PRODUCTION OF 100 KG PER DAY OF BIODIESEL FROM USED FRYING OILS

Marques Gimeno, Raúl ⁽¹⁾; Arnal Arnal, José Miguel ⁽²⁾; Sancho Fernández, María ⁽¹⁾; García Fayos, Beatriz ⁽¹⁾

⁽¹⁾ UPV, ⁽²⁾ Universitat Politècnica de València

Nowadays, the environmental effects caused by human activities are increasingly and becoming more remarkable, especially on the global temperature and the extreme global events. For many years, the use of fossil fuels and high polluting emissions have encouraged to the global warming, which is a very important threat to the life in our planet. The main reason for doing this work comes from the need of a change in the energetic model based on fossil fuels by a more ecological and environmentally friendly model, so it pretends to achieve a reduction of the contaminant emissions and a better energetic use of the wastes generated. This work contains the design of an auxiliary installation for the daily production of 100 Kg of biodiesel, using waste cooking oils as feedstock. This installation could be implemented in any productive process, in order to generate fuel self-sufficiency and to achieve an efficient use of the wastes generated in the industry.

Keywords: Biodiesel; used oils; wastes; energetic valorization

DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN AUXILIAR PARA LA PRODUCCIÓN DE 100 KG/DÍA DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITES DE FRITURA USADOS

En la actualidad, los efectos medioambientales producidos por la acción del ser humano son cada vez más notorios, especialmente en lo que respecta a la temperatura global y a los fenómenos climatológicos. Durante muchos años, la excesiva explotación de los recursos fósiles y las elevadas emisiones contaminantes asociadas han contribuido al fenómeno del calentamiento global, el cual supone un riesgo muy serio para la vida en nuestro planeta. El motivo principal del presente trabajo nace de la necesidad de realizar un cambio en el modelo energético basado en combustibles fósiles por un modelo más ecológico y respetuoso con el medio ambiente, donde se pretende conseguir una reducción de las emisiones contaminantes y un mejor aprovechamiento energético de los residuos generados. En este trabajo se realiza el diseño de una instalación destinada a la producción de unos 100 Kg diarios de biodiésel, utilizando los aceites de fritura usados como materia prima. Dicha instalación se podría implementar de forma auxiliar en cualquier proceso productivo, ya sea para el autoabastecimiento de combustible o para el aprovechamiento de los residuos generados tanto en la propia industria como en industrias próximas al lugar de implementación.

Palabras clave: Biodiésel; aceites usados; residuos; valorización energética

Correspondencia: José Miguel Arnal Arnal jarnala@iqn.upv.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

En los últimos años, el excesivo consumo y la explotación de los combustibles fósiles, propiciado por el incremento de las necesidades energéticas a nivel mundial, han contribuido al fenómeno del calentamiento global, con los graves riesgos asociados tanto para la salud humana como para el medioambiente.

Con el acuerdo del Protocolo de Kyoto, los principales países industrializados se comprometieron a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y se propuso apostar por modelos energéticos más sostenibles. Por lo tanto, la nueva política energética y la preocupación por la sostenibilidad medioambiental obliga a reducir el consumo de combustibles de origen fósil y apostar por alternativas como los biocombustibles, que pretenden sustituir total o parcialmente a los carburantes derivados del petróleo.

Así pues, las energías renovables como el biodiésel se plantean como una posible solución para diversos problemas medioambientales, como son el cambio climático o el fenómeno de la lluvia ácida, además de presentarse como una alternativa frente a la situación de escasez y agotamiento próximo de las reservas de combustibles fósiles como el petróleo.

Entre las ventajas que presenta el biodiésel, hay que destacar que presenta unas propiedades prácticamente idénticas al diésel convencional de origen fósil, lo cual permite su aplicación directa en los motores actuales sin realizar ninguna modificación. Sin embargo, debido a que se obtiene a partir de fuentes naturales como la biomasa, durante la combustión del biodiésel no se realizan emisiones de efecto invernadero, por lo que se considera una alternativa renovable, ecológica y más respetuosa con el medioambiente.

La alternativa que se plantea en este trabajo es el aprovechamiento de la biomasa para su transformación en un biocarburante líquido, como es el biodiésel. Concretamente, se propone aprovechar los residuos altamente contaminantes, como son los aceites vegetales de fritura, para obtener biodiésel mediante la aplicación de diversos procesos de conversión bioquímica.

1.1 El biodiésel

El biodiésel es un biocarburante líquido que consiste en diversos ésteres alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, procedentes de lípidos renovables tales como los aceites vegetales o las grasas animales (Fernández Salgado, 2010).

El biodiésel se obtiene a través de un proceso de transesterificación de los triglicéridos presentes en los aceites vegetales o las grasas animales, mediante la reacción con un alcohol de bajo peso molecular, normalmente metanol o etanol. Es importante tener en cuenta el tipo de materia prima empleada en el proceso de obtención de biodiésel, ya que según el perfil de triglicéridos y ácidos grasos presente en la materia prima, se obtiene un perfil específico de ésteres monoalquílicos que determinan las propiedades y características del biodiésel.

Por dicho motivo, existen diversas normativas que establecen una serie de especificaciones que debe de cumplir un biocombustible para ser considerado como biodiésel, definiendo unos valores límites para diversas propiedades del biodiésel junto con los procedimientos de ensayo correspondientes para su determinación. Como normativas de referencia, se pueden destacar tanto la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) como la norma europea UNE 14214.

2. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es realizar el diseño de una instalación auxiliar destinada a la producción de 100 Kg diarios de biodiésel a partir de aceites de fritura usados. La idea es que la instalación de producción de biodiésel se pueda implementar en cualquier industria que genere o gestione aceites vegetales residuales, procedentes del sector de la hostelería y la alimentación, donde se involucran procesos de fritura.

Para poder alcanzar el objetivo principal que supone el diseño completo de la instalación auxiliar para la obtención del biodiésel, se requiere haber alcanzado previamente una serie de objetivos más específicos como los establecidos a continuación:

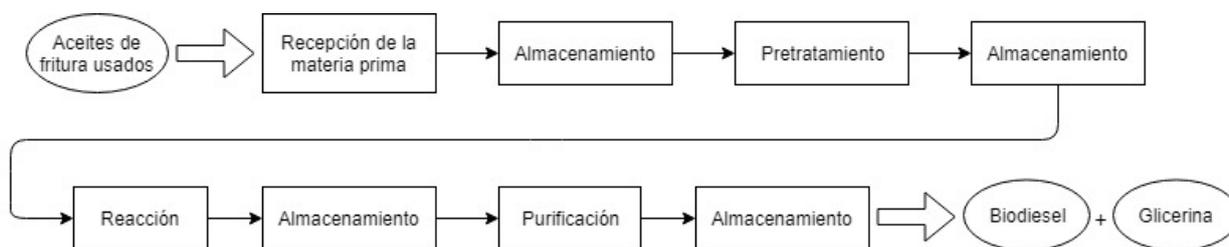
- Definición de las etapas del proceso global de producción de biodiésel.
- Determinación de las sustancias químicas que interviene en cada una de las etapas del proceso global de producción de biodiésel.
- Cálculo de las cantidades a emplear de cada sustancia química involucrada.
- Cálculo de los productos y residuos generados en cada una de las etapas del proceso.
- Dimensionamiento y selección de los equipos empleados en cada etapa del proceso.

3. Metodología

3.1 Etapas del proceso de obtención de biodiésel

En la Figura 1, se muestra un diagrama de bloques global del proceso de obtención de biodiésel a partir de aceites de fritura usados, donde aparecen las distintas etapas y operaciones del proceso para obtener el biodiésel como producto de interés y la glicerina como subproducto.

Figura 1: Proceso global de producción de biodiésel



En primer lugar, tras la recepción y el almacenamiento de la materia prima, se procede con la fase de pretratamiento. El pretratamiento pretende acondicionar la materia prima antes de proceder con la fase de la reacción química. A continuación, con la fase de reacción química, se consigue obtener el biodiésel como producto de interés y la glicerina como subproducto de la reacción. Finalmente, es necesario aplicar una última fase de purificación que permita recuperar ambos productos por separado.

3.2.1 Pretratamiento

El pretratamiento de la materia prima pretende eliminar las impurezas presentes en el aceite de fritura usado, ya que podría afectar a la reacción de transesterificación provocando una reducción en la conversión alcanzada a biodiésel.

En primer lugar, se requiere una etapa de filtración para retirar los restos sólidos generados tras el proceso de fritura del aceite. Esta operación se puede llevar a cabo mediante un filtro convencional o a través de balsas de sedimentación.

A continuación, la etapa de desacidificación resulta indispensable si se pretende llevar a cabo una reacción de transesterificación mediante catálisis alcalina. La presencia de ácidos grasos libres puede propiciar la formación de jabones mediante una reacción de neutralización, consumiendo parte del catalizador alcalino empleado y reduciendo así la actividad catalítica, además de dificultar la separación de los productos de la reacción de transesterificación debido al efecto emulsionante de los jabones (Vicente, Martínez, & Aracil, 2004). En este caso, se plantea realizar una esterificación de los ácidos grasos libres con un alcohol de bajo peso molecular y por vía ácida, ya que así se consigue sintetizar una cierta cantidad de ésteres alquílicos que componen el biodiésel incluso durante la fase de pretratamiento (Canacki & Van Gerpen, 1999).

Por último, como etapa final del pretratamiento, la materia prima debe ser sometida a un proceso de deshidratación para tratar de reducir el contenido en humedad; ya que durante la reacción de transesterificación mediante catálisis alcalina, la presencia de agua puede favorecer la aparición de ciertas reacciones indeseadas, tales como la saponificación de los triglicéridos o la neutralización de los ácidos grasos libres mencionada anteriormente (Dorado, Ballesteros, & de Almeida, 2002).

3.2.2 Reacción química - Transesterificación

A escala industrial, el método más extendido para obtener biodiésel es mediante la reacción de transesterificación de los triglicéridos con alcoholes de bajo peso molecular. Químicamente, la reacción de transesterificación consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles y consecutivas en las que la molécula de triglicéridos se convierte sucesivamente en las moléculas de diglicéridos, monoglicéridos y glicerina, consumiendo un mol de alcohol y produciendo un mol de éster alquílico en cada una de las etapas.

Teniendo en cuenta que la transesterificación es una reacción reversible, la conversión alcanzable en ésteres alquílicos está limitada por la condición del equilibrio químico. Sin embargo, es habitual recurrir al empleo de un exceso de alcohol y a la retirada sucesiva de la glicerina formada con el objetivo de alcanzar una conversión completa.

Del mismo modo, la reacción de transesterificación obedece una cinética bastante lenta, con unas elevadas condiciones de operación y altos tiempos de reacción. Por dicho motivo, también se recurre al fenómeno de la catálisis por vía alcalina para tratar de conseguir unos tiempos de reacción más bajos y con unas condiciones de operación más suaves. La catálisis alcalina homogénea que permite las mayores conversiones bajo las condiciones de operación más suaves y en el menor tiempo de reacción posible, es la que emplea metóxidos alcalinos (Loaiza, 2003), por lo que es necesario realizar un mezclado previo del metanol con un hidróxido alcalino para así formar el metóxido correspondiente.

La transferencia de materia y la separación de fases son clave durante todo el transcurso de la reacción de transesterificación. En la fase inicial, puesto que el alcohol no es soluble en la materia grasa del aceite, se requiere de un sistema de agitación que permita homogeneizar la mezcla reaccionante hasta que se haya formado la cantidad suficiente de ésteres y glicéridos parciales, que actuarán como disolventes del aceite y del alcohol, formando una única fase homogénea de reacción.

Una vez finalizada la reacción de transesterificación, se producirá una separación en dos fases heterogéneas: una fase contiene mayoritariamente el biodiésel y la otra fase contiene a la glicerina. Estas fases requieren de una separación por decantación antes de proceder con la fase de purificación de los productos de reacción (Freedman, Butterfield, & Pryde, 1986).

3.2.3 Purificación

Tras la reacción de transesterificación, se obtienen dos fases heterogéneas como son la fase éster que contiene al biodiésel y la fase glicerina. Sin embargo, dichas fases presentan además ciertos componentes indeseados que alteran su composición y podrían interferir en la función del biodiésel como combustible y en las salidas de la glicerina como subproducto, por lo que es necesario aplicar un proceso de purificación para ambas fases.

Para la purificación de la fase éster, se decide comenzar con un proceso de evaporación del alcohol, de forma que éste se recupera mediante un sistema de condensación. Posteriormente, se aplica un lavado con un sistema de burbujeo constante de agua para retirar las trazas de glicerina y del catalizador empleado. Sin embargo, el agua aportada debe ser retirada mediante una evaporación posterior, de forma que el biodiésel cumpla con las especificaciones correspondientes para ser empleado como combustible.

Para la purificación de la fase glicerina, se comienza con una adición de ácido fosfórico para descomponer los jabones y formar un precipitado sólido que facilita su separación. Por último, se requiere un proceso de destilación para retirar el alcohol y así obtener la glicerina cruda.

3.3 Determinación de las sustancias químicas involucradas en cada etapa del proceso

En la fase de pretratamiento, la desacidificación es la única etapa que requiere de la intervención de algún reactivo. En este caso, se lleva a cabo un proceso de esterificación de los ácidos grasos libres empleando el mismo alcohol que en la reacción de transesterificación de los triglicéridos, ya que se consigue el mismo tipo de ésteres alquílicos. Por su parte, se debe emplear un catalizador ácido que permita el menor tiempo de reacción y bajo unas condiciones de operación moderadas (Marchetti & Errazu, 2008).

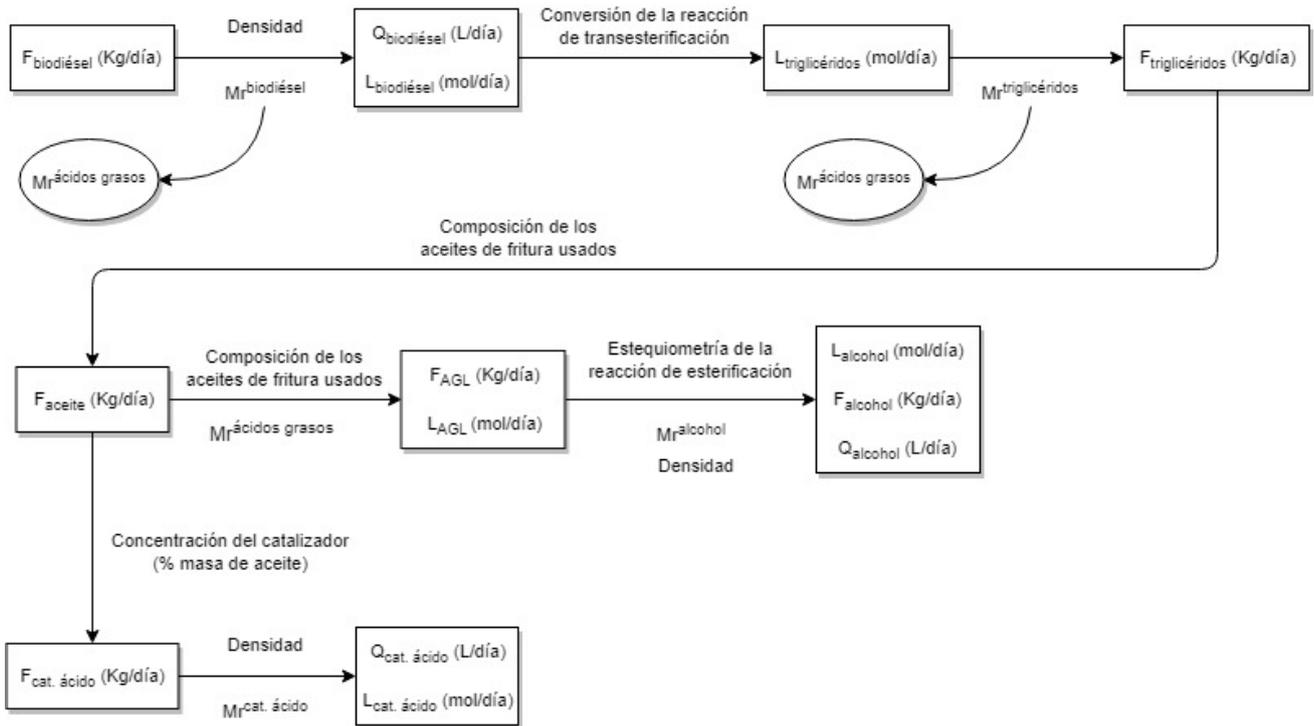
En la fase de reacción química, la transesterificación de los triglicéridos se lleva a cabo con un alcohol y por vía alcalina homogénea. La selección del alcohol determinará las propiedades del biodiésel, de modo que se pretende obtener unos ésteres alquílicos con las propiedades más similares al diésel de origen fósil. El catalizador alcalino homogéneo debe permitir que la cinética de reacción sea lo más rápida posible bajo unas condiciones suaves de operación

En la fase de purificación, la fase éster obtenida no requiere de la intervención de ningún reactivo. Sin embargo, en la primera etapa del proceso de purificación de la fase glicerina sí que se necesita de la intervención de una especie ácida que sea capaz de retirar los restos del catalizador alcalino por precipitación. La selección del ácido dependerá del tipo de sal alcalina formada y de su potencial de revalorización como residuo del proceso.

3.4 Cálculo de las cantidades de los reactivos empleados y de los productos obtenidos

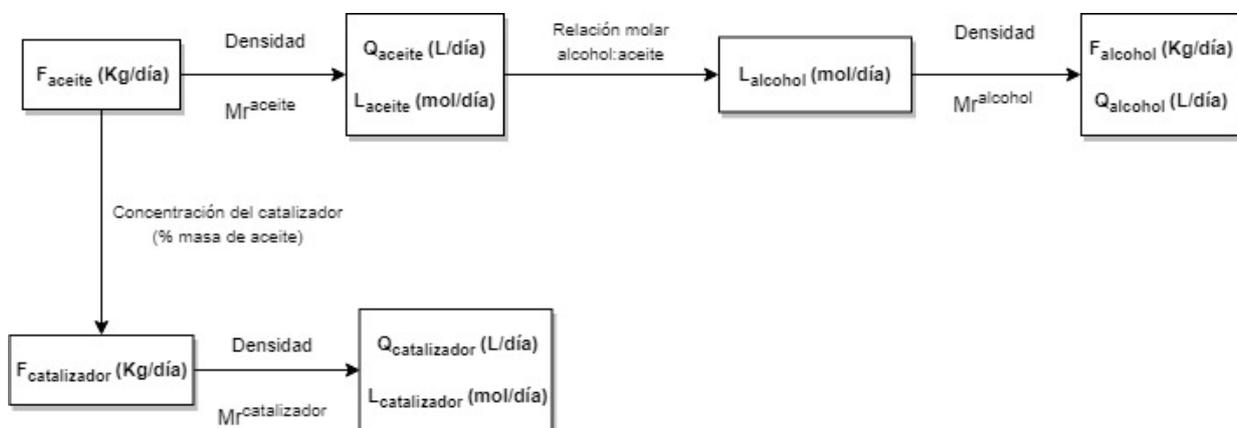
En la Figura 2 se muestra detalladamente el procedimiento de cálculo de los reactivos empleados en la fase de pretratamiento. Considerando la conversión de la reacción de esterificación de los ácidos grasos libres, también se puede obtener la cantidad de ésteres alquílicos obtenidos durante el pretratamiento de la materia prima.

Figura 2: Proceso de cálculo para la fase de pretratamiento



Del mismo modo, en la Figura 3 se muestra detalladamente el proceso de cálculo de los reactivos en la fase de reacción química. Teniendo en cuenta la estequiometría y la conversión de la reacción de transesterificación, se pueden obtener las cantidades de los productos de la reacción, que son los ésteres alquílicos y la glicerina.

Figura 3: Proceso de cálculo para la fase de reacción química



Por último, para la fase de purificación, lo importante es conocer la composición tanto de la fase éster como de la fase glicerina para poder determinar las cantidades de los reactivos y de los residuos generados.

3.5 Dimensionamiento y selección de los equipos empleados

En este apartado se incluye el dimensionamiento y la selección tanto de los reactores químicos como los depósitos para la materia prima y los reactivos, además de los tanques de almacenamiento intermedios.

Por lo tanto, es de vital importancia conocer las cantidades necesarias de todas las especies químicas involucradas en el proceso global de obtención de biodiésel: materia prima, reactivos, productos y residuos. Por su parte, para la selección de los equipos como los tanques y los reactores, se consultan diversos catálogos comerciales de empresas del sector químico especializadas, de forma que se comprueban que los equipos de catálogo cumplan con las condiciones de almacenamiento y de operación requeridas en cada etapa del proceso bajo unos estándares mínimos de seguridad, prestando especial atención a las características del material que compone el equipo para así descartar posibles incompatibilidades referentes con las exigentes condiciones de almacenamiento y operación.

Así pues, todos los equipos de la instalación como los depósitos de almacenamiento y los reactores químicos presentan una identificación a través de los pictogramas de seguridad en función de las especies químicas que contienen en su interior. Esto se ha realizado mediante la consulta de las FDS de las sustancias y mediante el uso del calculador del INSST llamado "Riskquim" versión 6.0.

4. Resultados

4.1 Proceso global de obtención de biodiésel propuesto

En el siguiente Diagrama de Bloques Ampliado de la Figura 4 se representan cada una de las etapas del proceso global de obtención de biodiésel. En el diagrama aparecen indicados los reactivos empleados y los residuos generados en cada etapa del proceso, incluyendo además la selección de los equipos correspondientes y también la identificación de peligros mediante los pictogramas de seguridad.

La fase de pretratamiento consta de una filtración, una desacidificación por esterificación metílica por vía ácida y una deshidratación. Por su parte, la fase de reacción química supone una transesterificación metílica por vía alcalina homogénea. Por último, la purificación de la fase éster consiste en una evaporación, un lavado y una destilación; mientras que la purificación de la fase glicerina requiere de una precipitación ácida y una destilación.

4.2 Cálculo de los reactivos empleados y de los productos obtenidos en cada etapa del proceso global de obtención de biodiésel

A continuación, en la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos del cálculo efectuado para la fase de pretratamiento:

Figura 4: Diagrama de Bloques Ampliado del proceso global de obtención de biodiésel y glicerina cruda

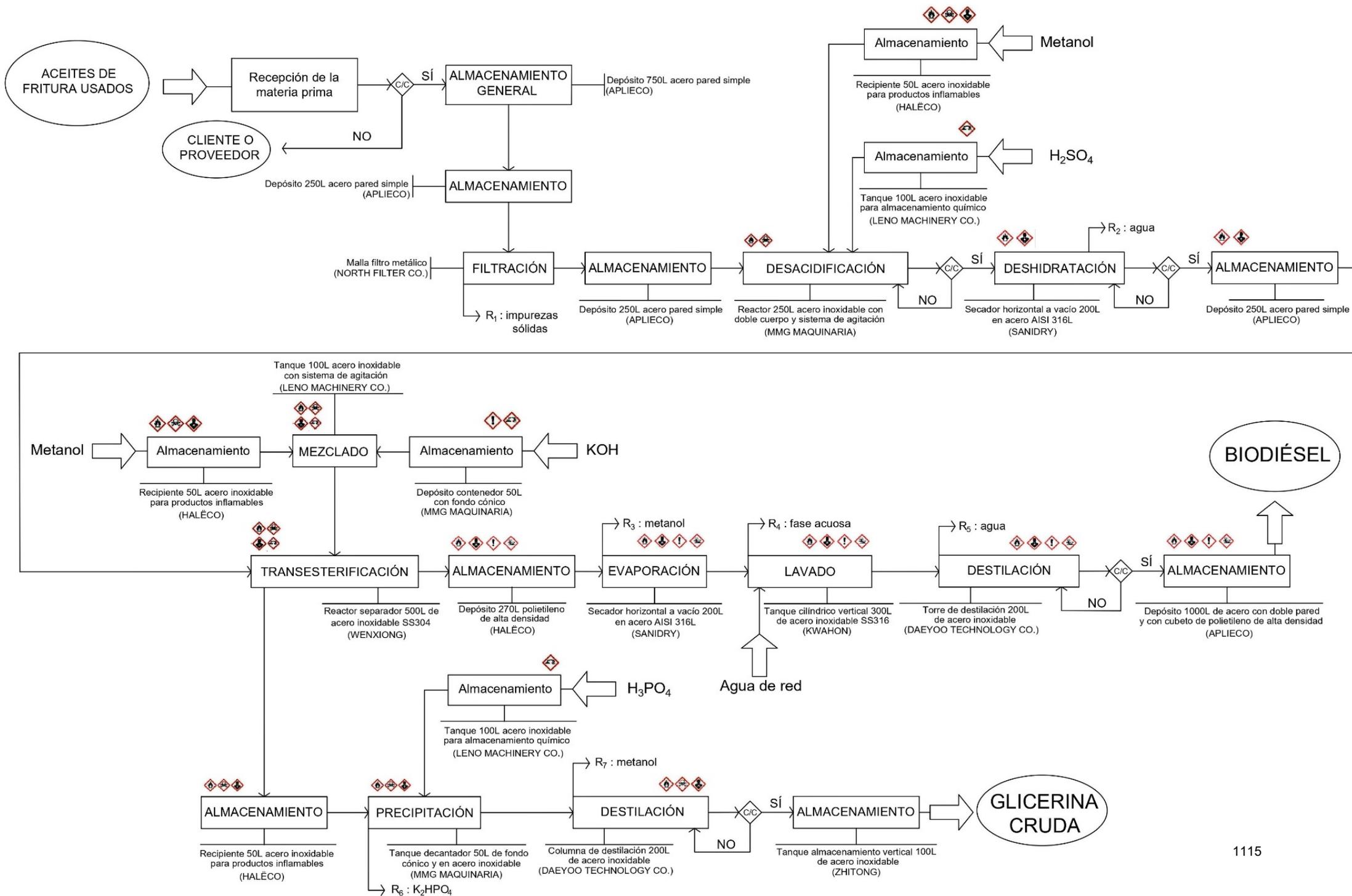


Tabla 2: Cantidades de reactivos y productos en la fase de pretratamiento

Reactivos	L (mol/día)	F (Kg/día)	Q (L/día)
Aceite de fritura usado	127,75	118	130
Ácidos grasos libres	21,3	5,9	-
Metanol	21,3	0,69	0,87
Ácido sulfúrico	6	0,59	0,52
Productos	L (mol/día)	F (Kg/día)	Q (L/día)
Biodiésel	21,3	6,86	7,8

Conviene destacar que en la fase de pretratamiento se consigue sintetizar una pequeña cantidad de ésteres metílicos (biodiésel) durante la etapa de desacidificación de la materia prima, mediante una reacción de esterificación de los ácidos grasos libres por vía ácida.

Del mismo modo, en la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del cálculo realizado para la fase de reacción química por transesterificación:

Tabla 3: Cantidades de reactivos y productos en la fase de reacción química

Reactivos	L (mol/día)	F (Kg/día)	Q (L/día)
Aceite de fritura pretratado	127,75	118	130
Triglicéridos	105,6	106	-
Metanol	766,5	24,56	31
Metóxido potásico	16,86	1,18	-
Hidróxido potásico	16,86	0,95	-
Productos	L (mol/día)	F (Kg/día)	Q (L/día)
Biodiésel	310,5	100	114
Glicerina	105,6	9,726	7,75

Por último, en la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos para el cálculo de la fase de purificación. En este caso, el producto obtenido es el precipitado potásico que se forma durante la purificación de la fase glicerina:

Tabla 4: Cantidades de reactivos y productos en la fase de purificación

Reactivos	L (mol/día)	F (Kg/día)	Q (L/día)
Ácido fosfórico	8,43	0,826	0,5
Productos	L (mol/día)	F (Kg/día)	Q (L/día)
Fosfato diácido potásico	8,43	1,14	-

4.3 Dimensionamiento de los equipos en cada etapa del proceso

A continuación, en la Tabla 5 se presentan los resultados del dimensionamiento de todos los depósitos de almacenamiento, tanto para la materia prima y los reactivos como para los productos intermedios y finales.

Tabla 5: Dimensionado de los depósitos de almacenamiento

Depósitos de almacenamiento	Volumen libre (L)	Dimensiones (Ancho x largo x alto)
Aceites fritura usados (general)	750	1200x1000x650 (mm)
Aceite fritura usado	250	1000x500x500 (mm)
Metanol	50	600x365x365 (mm)
Hidróxido potásico	50	400x400x500 (mm)
Ácido sulfúrico	100	400x500x600 (mm)
Ácido fosfórico	100	400x500x600 (mm)
Polietilenglicol	500	800x900x1000 (mm)
Fase éster	270	600x500x900 (mm)
Fase glicerina	50	600x350x350 (mm)
Biodiésel	1000	1100x1500x620 (mm)
Glicerina cruda	100	300x400x700 (mm)

Por otro lado, también se ha realizado el cálculo del dimensionamiento de los reactores químicos que intervienen en alguna etapa del proceso de obtención de biodiésel, tal y como se puede apreciar en la Tabla 6 siguiente:

Tabla 6: Dimensionado de los reactores químicos

Reactores	Volumen libre (L)	Dimensiones (Alto x largo x ancho)
Esterificación	250	1000x900x600 (mm)
Transesterificación	500	850x850x800 (mm)
Precipitación	50	300x300x700 (mm)
Mezclado	100	500x600x1300 (mm)
Lavado	300	700x700x1200 (mm)

Por último, también se ha considerado la capacidad del resto de equipos que intervienen en alguna etapa del proceso de obtención de biodiésel, tales como los secadores o las torres y columnas de destilación. Los resultados se presentan en la siguiente Tabla 7:

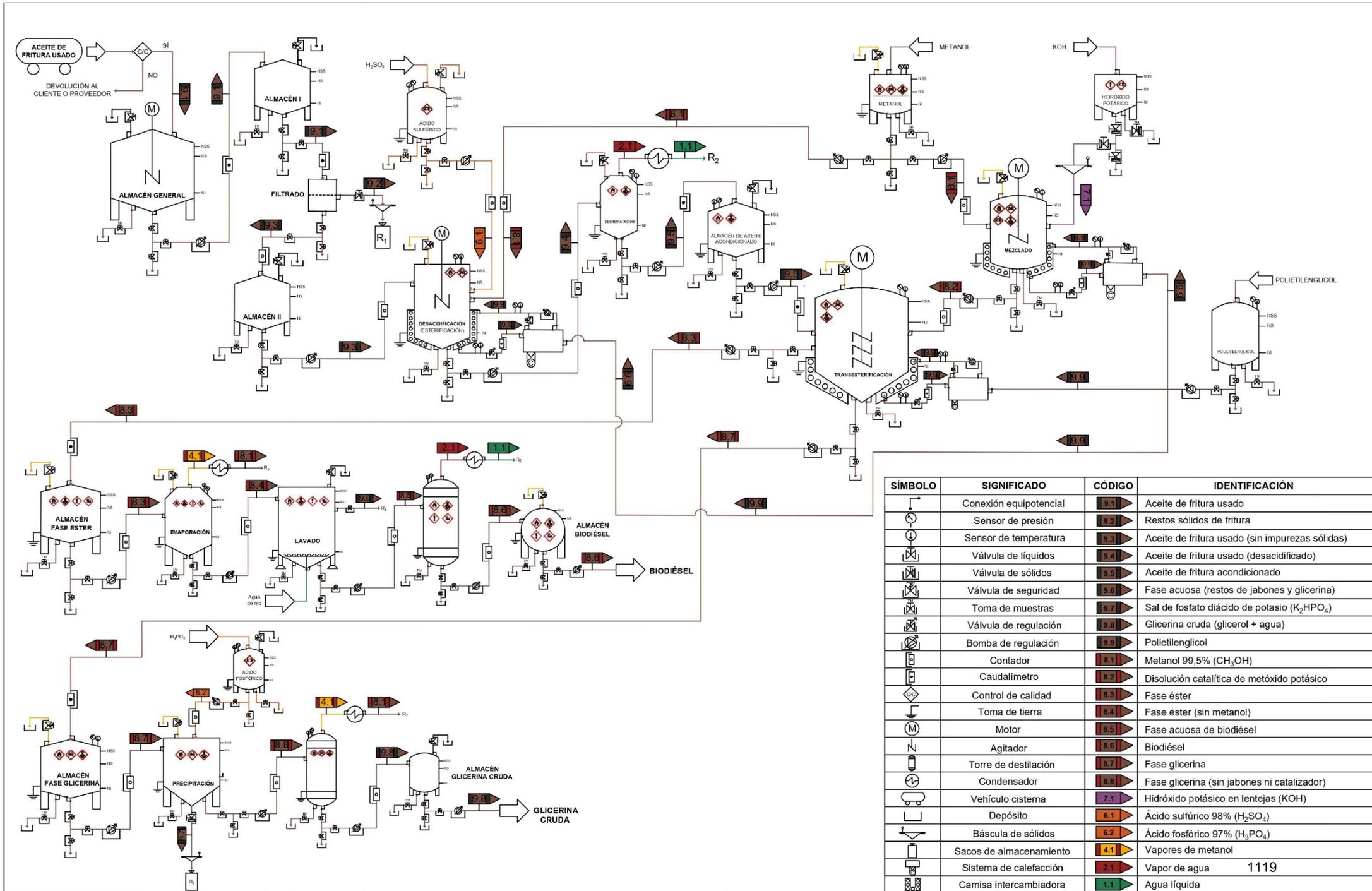
Tabla 7: Dimensionado del resto de equipos de la instalación

Equipos	Etapas (fase)	Capacidad total (L)
Secadora	Deshidratación (pretratamiento)	130
Secadora	Evaporación (purificación éster)	125
Torre de destilación	Destilación (purificación éster)	160
Columna de destilación	Destilación (purificación glicerina)	15

4.4 Diseño de la instalación para la producción de biodiésel

El diseño propuesto para la instalación auxiliar destinada a la obtención de biodiésel a partir de aceites de fritura usados se representa en el Diagrama de Flujo de la instalación mostrado en la Figura 5, donde se identifican claramente cada una de las etapas y las fases que conforman el proceso global de producción del biocarburante líquido:

Figura 5: Diagrama de Flujo de la instalación de producción de biodiésel



SÍMBOLO	SIGNIFICADO	CÓDIGO	IDENTIFICACIÓN
	Conexión equipotencial	9.1	Aceite de fritura usado
	Sensor de presión	9.2	Restos sólidos de fritura
	Sensor de temperatura	9.3	Aceite de fritura usado (sin impurezas sólidas)
	Válvula de líquidos	9.4	Aceite de fritura usado (desacidificado)
	Válvula de sólidos	9.5	Aceite de fritura acondicionado
	Válvula de seguridad	9.6	Fase acuosa (restos de jabones y glicerina)
	Toma de muestras	9.7	Sal de fosfato diácido de potasio (K ₂ HPO ₄)
	Válvula de regulación	9.8	Glicerina cruda (glicerol + agua)
	Bomba de regulación	9.9	Polietilenglicol
	Contador	9.1	Metanol 99,5% (CH ₃ OH)
	Caudalímetro	9.2	Disolución catalítica de metóxido potásico
	Control de calidad	9.3	Fase éster
	Toma de tierra	9.4	Fase éster (sin metanol)
	Motor	9.5	Fase acuosa de biodiésel
	Agitador	9.6	Biodiésel
	Torre de destilación	9.7	Fase glicerina
	Condensador	9.8	Fase glicerina (sin jabones ni catalizador)
	Vehículo cisterna	7.1	Hidróxido potásico en lentejas (KOH)
	Depósito	6.1	Ácido sulfúrico 98% (H ₂ SO ₄)
	Báscula de sólidos	6.2	Ácido fosfórico 97% (H ₃ PO ₄)
	Sacos de almacenamiento	4.1	Vapores de metanol
	Sistema de calefacción	2.1	Vapor de agua
	Camisa intercambiadora	1.1	Agua líquida

5. Conclusiones

Con el diseño de una instalación auxiliar destinada a la producción de biodiésel a partir de aceites de fritura usados, se han conseguido diversos logros:

- Proponer una revalorización energética y un mejor aprovechamiento de un residuo altamente contaminante para el medioambiente, como son los aceites de fritura usados. Además, permite obtener 100 Kg diarios de un biocombustible líquido como es el biodiésel, el cual se postula como una alternativa real frente al diésel de origen fósil.
- Permitir una mayor autosuficiencia energética a las empresas e industrias destinadas a la gestión de los residuos procedentes del sector doméstico y la hostelería, ya que podrían ser capaces de aprovechar los aceites de fritura usados para elaborar un biocombustible destinado al abastecimiento de sus vehículos de transporte o maquinaria sin la necesidad de implementar modificaciones en sus motores.

6. Referencias

American Society for Testing and Material. (2008). *Norma ASTM D6751*.

Canakci, M., & Van Gerpen, J. (1999). Biodiesel Production via Acid Catalysis. *Transactions of the ASAE*, 1203-1210.

Dorado, M. P., Ballesteros, E., & de Almeida, J. A. (2002). An Alkali-Catalyzed Transesterification Process For High Free Fatty Acids Waste Oils. *Transactions of the ASAE*, 525-529.

Fernández Salgado, J. M. (2010). Tipos de biocarburantes y su clasificación. *Guía completa de la biomasa y los biocombustibles* (pág. 105). Madrid: AMV Ediciones.

Freedman, B., Kwolek, F., & Pryde, E. H. (1986). *Quantitation in Analysis of Transesterified Soybean Oil*. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1370-1380.

Loaiza, F. E. (2003). *Cinética de la reacción de transesterificación del aceite en la obtención de biodiesel*. Manizales.

Marchetti, J., & Errazu, A. (2008). *Esterification of free fatty acids using sulfuric acid as catalyst in the presence of triglycerides*. Biomass and Bioenergy, 892.

Norma UNE EN 14214 - *Especificaciones del biodiésel*. (2013).

Vicente Crespo, G., Martínez Rodríguez, M., & Aracil Mira, J. (2004). *Biodiesel: una alternativa real al gasóleo mineral*. Madrid: Facultad de Ciencias Químicas Universidad Complutense.