

3. MEMORIA DESCRIPTIVA

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explica la ingeniería básica de una planta de producción de 2727 t/día de biodiésel mediante una transesterificación catalizada por un derivado del azúcar contenido en los carbohidratos.

Para ello se necesitan procesar 2673 t/día de aceite de fritura usado, e incorporando 321 ton/día de metanol dan la producción de biodiésel requerida y se obtienen 245 ton/día de glicerol como subproducto, tal y como se detalla en el siguiente capítulo.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL

Como se puede comprobar en la Fig. 3-1, la planta está dividida en cuatro secciones, según el proceso que se lleve a cabo. Asimismo, la nomenclatura de los equipos irá acorde a la sección a la que pertenezcan.

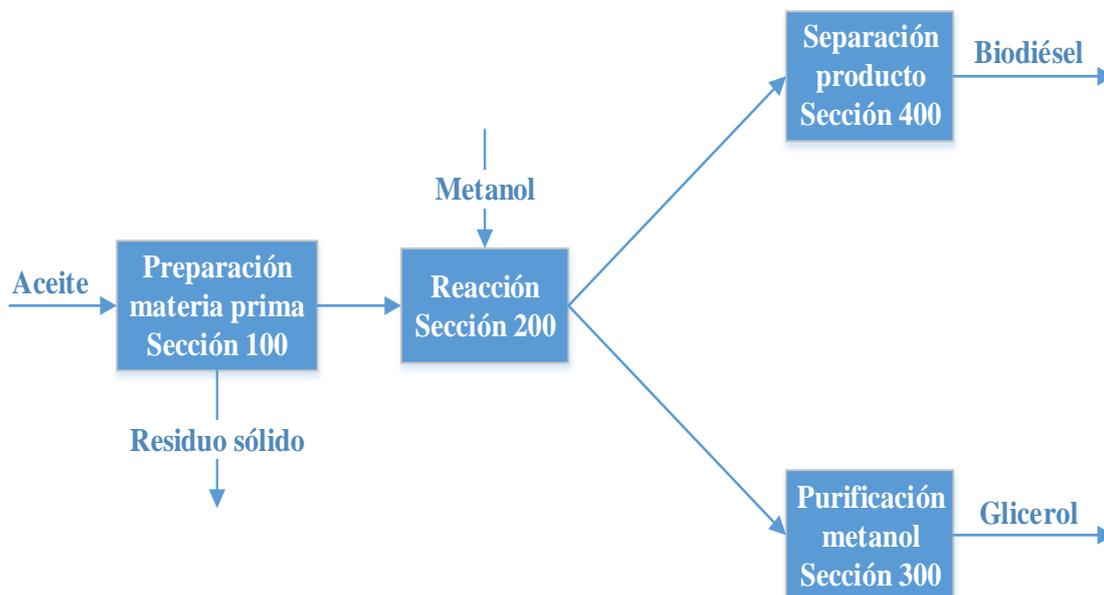


Fig. 3-1 Diagrama de bloques

El aceite de fritura usado procedente del sector hostelero y de cocinas industriales puede contener ciertas impurezas sólidas procedentes de los alimentos en el proceso de fritura, que deben ser retiradas, mediante un sedimentador centrífugo en este caso. Los sólidos extraídos se venden para compostaje.

El aceite ya libre de impurezas entra en un evaporador, con la finalidad de disminuir la cantidad de agua que se desprende durante la fritura de los alimentos y que, por lo tanto, contiene el aceite. Esta agua no contiene contaminantes, por lo que se envía a la atmósfera.

Posteriormente, en el reactor de lecho fijo catalítico se añade metanol en una relación molar de 10:1 respecto al aceite, y se da la reacción de transesterificación para producir biodiésel. Es necesario que los reactivos estén bien mezclados para aumentar la conversión, siendo necesario un mezclador para ello.

En la reacción se produce glicerol como subproducto, que se separa de la corriente producto mediante un decantador líquido-líquido.

El glicerol, y parte del metanol extraído por la zona inferior, se dirige hacia un evaporador para separar ambos compuestos. El metanol se extrae en forma vapor, se condensa y es devuelto al proceso para reutilizarlo en la reacción, mientras que el glicerol obtenido se vende.

La otra corriente del decantador, que contiene el biodiésel pasa a la zona final del proceso. Consta de dos tanques flash para extraer la mayoría del metanol y agua, y de una torre de destilación, donde se obtiene el producto por cabeza, y el aceite que no ha reaccionado, por colas, que al igual que el metanol de los tanques flash, se reintroduce al proceso

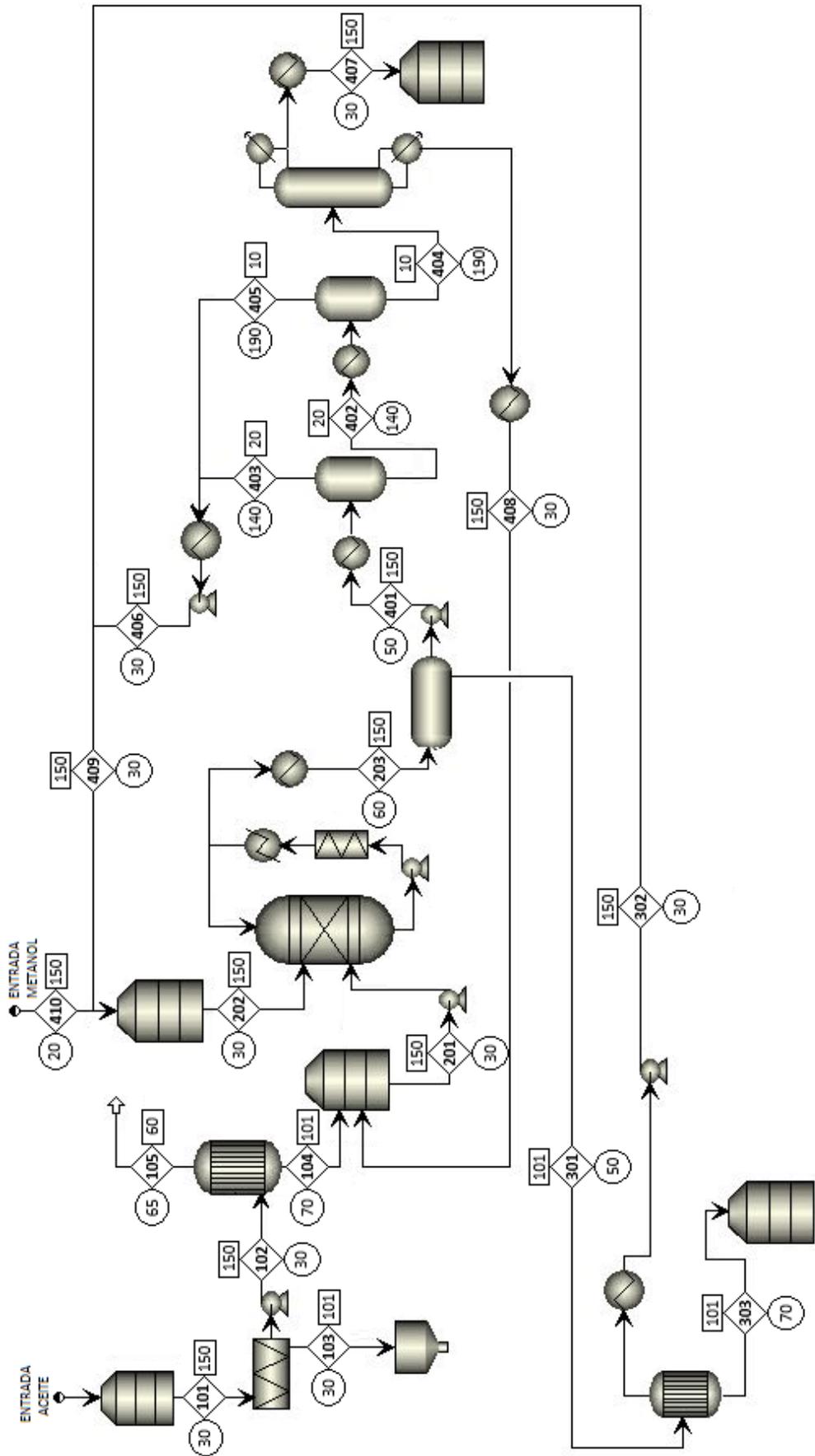


Fig. 3-2 Diagrama de flujo del proceso

3. EQUIPOS

A continuación, se van a describir los equipos empleados, el motivo de su elección frente a otras posibilidades, y los datos más característicos de cada uno de ellos. En el siguiente capítulo se justifican las dimensiones asociadas al dibujo y especificación de cada equipo.

3.1 Sección 100

3.1.1 Sedimentador centrífugo

El aceite de fritura usado entra en un decantador centrífugo para separar los sólidos que puedan haberse desprendido de los alimentos en el proceso de fritura.

Los separadores centrífugos se utilizan para separar los sólidos contenidos en un líquido, que son generalmente de dos tipos: centrífugas de sedimentación, en las que se requiere una diferencia de densidades entre las dos fases, y centrífugas de filtración, en las que la fase sólida está soportada y se retiene en una membrana permeable a través de la cual pasa libremente la fase líquida.

Las centrífugas de sedimentación separan o concentran partículas de sólidos en un líquido haciendo que se muevan a través del fluido en dirección radial hacia el eje de rotación o alejándose de él, según la diferencia de densidades entre el líquido y las partículas.

Debido al tamaño de los sólidos presentes en este tipo de aceite, se ha optado por un decantador centrífugo, en lugar del filtro, ya que el filtro puede separar sólidos con un tamaño máximo de 1 μm , aproximadamente, que es menor al de las partículas que se pueden encontrar en este tipo de aceites.

Por el elevado caudal a tratar, el sedimentador necesario será un “scroll conveyor” o sedimentador centrífugo helicoidal, de 1 m aproximado de diámetro y 3 m de longitud.

En el caso tratado no existen problemas de corrosión, por lo que no es necesario utilizar un acero inoxidable, ya que, el acero dulce (con bajo nivel de carbono) cumple su función perfectamente y el coste del equipo es inferior.

Tal y como se puede apreciar en la Fig. 3-3, los sólidos se descargan por la zona opuesta a la alimentación, mientras que el líquido rebosa en una zona inferior a la misma, siendo en la mitad del equipo, donde se desvían ambas corrientes.

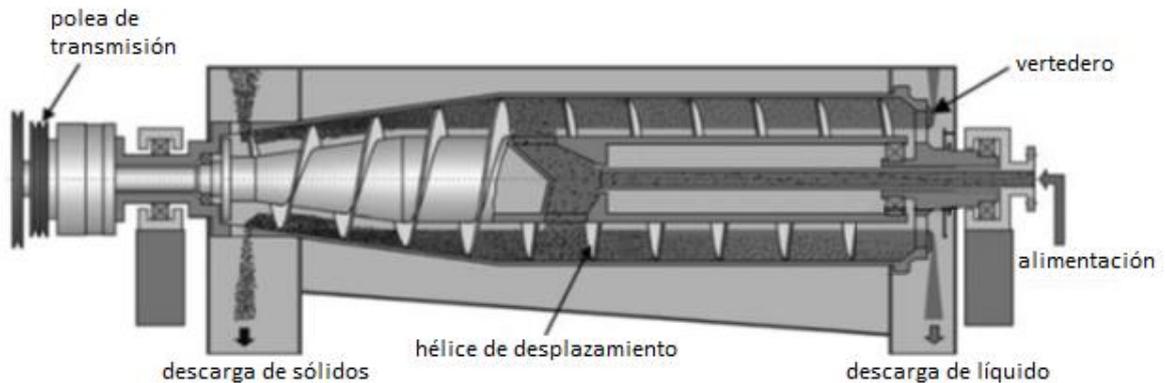


Fig. 3-3 Scroll Conveyor

3.2 Evaporador

Una vez separados los sólidos, el aceite entra en un evaporador para elevar la temperatura con una doble finalidad: evaporar el agua que pudiese traer consigo del proceso de fritura de alimentos, y precalentar el aceite antes de alcanzar el reactor.

Un evaporador es un equipo destinado a concentrar una solución consistente en un soluto no volátil y un solvente volátil. La evaporación se realiza vaporizando una parte del solvente para producir una solución concentrada de licor espeso.

La mayoría de estos equipos se calientan con vapor de agua que condensa sobre tubos metálicos. Excepto en algunos casos de evaporadores de tubos horizontales que la solución circula por el exterior de los tubos, el material a evaporarse fluye por dentro. El vapor a utilizarse suele ser de baja presión (3 bar), por lo que el líquido a hervir se encuentra a un vacío moderado, para evitar que pierda ciertas propiedades físicas por exceso de temperatura. La evaporación puede ser de simple efecto, es decir, solo un evaporador, o de múltiple efecto, evaporadores situados en serie en los que el producto de uno es la alimentación del siguiente.

Existen evaporadores de distintas clases, según las propiedades del fluido a evaporar como viscosidad, presencia de sólidos, corrosividad, etc. Entre ellos se distinguen dos grupos principalmente, los de circulación natural, y los de circulación forzada. Se ha seleccionado circulación natural debido a que los evaporadores de circulación forzada están pensados para fluidos muy viscosos, y no se da esta condición con el aceite a la temperatura de operación (McCabe et al. 2007)

Dentro de circulación natural, se pueden encontrar evaporadores de flujo ascendente, utilizados para líquidos con tendencia a la formación de espumas, y descendente, para líquidos que no tengan esta tendencia, como en este caso. La concentración de fluidos sensibles al calor, requieren un tiempo mínimo de exposición a una superficie caliente. Esto se consigue con evaporadores de película descendente de un solo paso, en los que el líquido entra por la parte superior, desciende por el interior de los tubos calentados con vapor de agua, y sale por el fondo. Estos evaporadores, tal y como se puede observar en la Fig. 3-4, parecen largos intercambiadores tubulares verticales con un separador de líquido y vapor en el fondo (para solucionar los problemas de arrastres de evaporado) y un distribuidor en la parte superior.

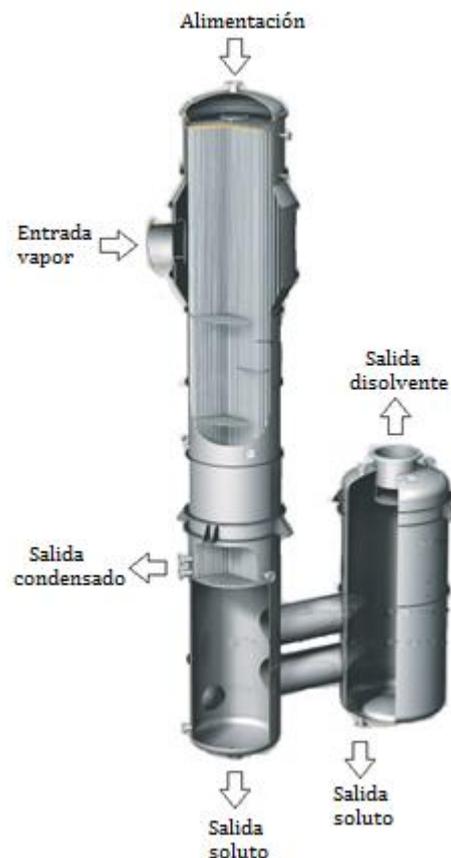


Fig. 3-4 Evaporador de flujo descendente natural

El principal problema de este tipo de evaporadores es conseguir una buena distribución del líquido, para que descienda en forma de película. Para ello, el evaporador consta de una serie de placas metálicas perforadas situadas sobre una placa tubular cuidadosamente nivelada.

Cuando es posible recircular sin dañar el líquido, como en el caso tratado, la distribución de este se facilita por una recirculación moderada en la parte superior de los tubos.

En un evaporador de circulación natural la velocidad del fluido suele estar entre 0,3-1,2 m/s (Díaz-Ovalle et al., 2013), por lo que para que se pueda separar la mayor parte de agua del aceite el evaporador constará de 93 tubos de 2 pulgadas de diámetro y 7 m de longitud

Una vez que el aceite abandona este equipo se dispone a entrar en el reactor de lecho fijo catalítico, perteneciente a la sección 200.

Por otro lado, el evaporador requerido en el proceso de metanol-glicerol (sección 300), también es de flujo descendente natural, debido a que se adaptan muy bien cuando la mezcla va incrementando su viscosidad conforme avanza por el equipo debido a la disminución de la cantidad de disolvente en la composición. En este caso el evaporador tiene 122 tubos de igual diámetro y longitud que en el evaporador anterior (sección 100).

3.2 Sección 200

3.2.1 Reactor

El reactor catalítico de lecho fijo es uno de los reactores más comunes utilizados en procesos industriales. Normalmente, no es el de menor coste y el de mayor simplicidad, pero su rendimiento se puede predecir de forma fiable para reacciones de pseudo-primer orden en muchos casos, por lo que es muy habitual en la industria química.

Es necesario un reactor que contenga el volumen de las 5 horas de reacción necesarias (900 m³ aprox.). Por lo tanto, empleando una relación de L/D igual a 3 (Green et al., 2008), el diámetro requerido es 7,25 m y la altura 22 m.

En el reactor se alimenta por la parte superior (Fig. 3-5), pasa a través de una placa distribuidora para aumentar la dispersión del líquido por el relleno y minimizar la existencia de caminos preferenciales. A la salida, el líquido entra en un mezclador en línea para homogeneizar la corriente.

En cuanto al catalizador existen tres constituyentes principales para su preparación: el soporte, el agente activo del catalizador y los promotores que a menudo se utilizan.

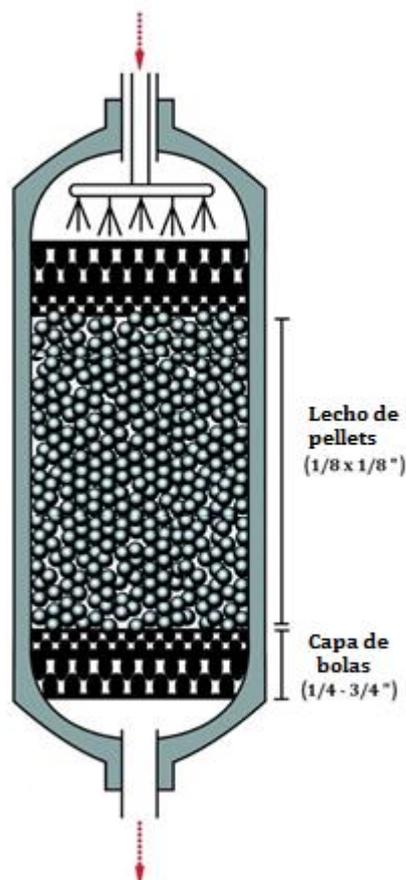


Fig. 3-5 Reactor de lecho fijo catalítico

El agente activo es la propia sustancia catalítica, catalizador ácido heterogéneo, obtenida a partir del azúcar. El catalizador empleado es semiconductor, y como la mayoría de los catalizadores semiconductores necesita ser soportado (Rase, 1977).

El soporte debe ser material muy poco activo en la reacción, de gran superficie específica y porosidad, para que así pueda aumentar el área del agente activo. Se han elegido pellets cilíndricos de cerámica de 1/8 x 1/8 de pulgada para sustentar el catalizador, y bolas desde 3/8 hasta 3/4 de pulgadas, tanto en la zona superior, como inferior, para homogeneizar la distribución del fluido (Rase, 1977).

Para dar continuidad al proceso se dispondrá de tres reactores, dos en operación normal, y un tercer reactor para evitar paradas en el proceso en caso de mantenimiento o limpieza.

Para mantener en todo momento los reactivos bien mezclados se emplea un mezclador en línea de diez pulgadas, con una cama de relleno aleatorio de anillos tipo Pall cerámicos en su interior.

Una vez mezclado el fluido, pasa por un intercambiador de calor para volver a la temperatura fijada de reacción (475 K) y se vuelve a introducir en el reactor.

3.2.2 Decantador

Finalizada la reacción, es necesario separar el glicerol formado como subproducto. Para ello, se emplea un sedimentador líquido-líquido continuo o decantador, que opera por gravedad.

En este equipo, el recipiente tiene un volumen que da un tiempo de asentamiento a dos fases líquidas de distinta densidad, para, una vez asentadas, extraerlas de forma continua en la zona opuesta a la entrada. Idealmente, las fases ligera y pesada se encuentran separadas por una banda de dispersión.

Normalmente, suelen estar colocados de forma horizontal, con una relación de longitud-diámetro entre 2 y 5, o incluso mayor en algunos casos, para maximizar el área de la interfase. Por esta razón, los decantadores horizontales son más efectivos que los verticales, los cuales son más prácticos para caudales bajos, o necesarios, en casos que, por motivos de espacio, el equipo debe ocupar poca superficie.

La alimentación debe estar en torno a 1 m/s, y mantenerse constante a lo largo del equipo, para disminuir la turbulencia, además, los recipientes poseen deflectores (baffles), que facilitan la formación de la interfase. Todas estas medidas hacen que la separación sea más efectiva, y logran disminuir el volumen del decantador (McCabe, et al., 2007).

El decantador empleado (Fig. 3-6) posee un diámetro de 1 m y una longitud de 5 m. El deflector situado a la entrada del equipo posee un 70 % del diámetro del equipo (0,7 m).

La fracción del volumen del tanque ocupado por el total del líquido será de 95%, y para un cilindro horizontal esto significa que la profundidad del vertedero será de 90% del diámetro del tanque (McCabe, et al., 2007).

El material empleado es acero al carbono.

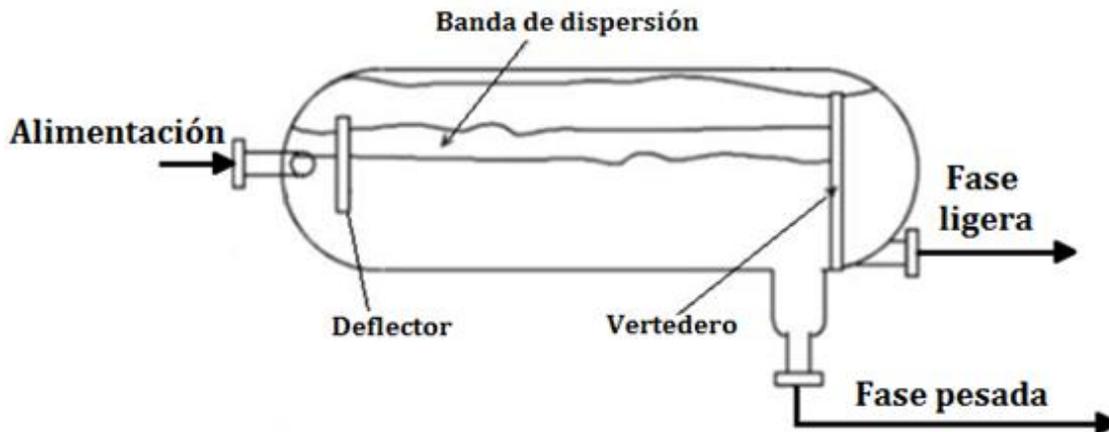


Fig. 3-6 Decantador L-L

Las dos corrientes que salen de este equipo, una hacia la sección de separación de producto (ligera) y otra hacia purificación del metanol (pesada).

3.3 Sección 300

La corriente pesada, compuesta por glicerol y metanol, entra en el evaporador de flujo descendente. El metanol sale como vapor, se condensa y se reintroduce al proceso, mientras que el glicerol, como soluto concentrado, se almacena para su posterior venta.

En el condensador, tanto del evaporador, como de la columna de platos posterior, se extraen los vapores no condensados por una bomba a vacío, que es la que permite la presión de operación deseada (50kPa). Estos vapores, al contener metanol, no se pueden emitir a la atmósfera, debido a su toxicidad, por lo que se debe tratar la corriente en un scrubber, que queda fuera de los límites de batería.

3.3.1 Condensador

Tanto en el evaporador E-301, como en la salida del vapor de los tanques Flash F-401 y F-402 son necesarios de condensadores (C-301 y C-401). El condensador retira el calor latente del vapor absorbiéndolo mediante un líquido más frío denominado refrigerante (agua en este caso).

El tipo de condensador empleado es de carcasa y tubo de un solo paso (Fig. 3-7), es decir, toda la corriente de fluido refrigerante que entra, circula en paralelo a través de todos los tubos. Debido a las diferencias de temperatura que existen en los condensadores, pueden realizarse esfuerzos de expansión suficientemente grandes como para doblar los tubos o aflojarlos de las placas tubulares, esto se ha solucionado utilizando un cabezal flotante, en el que una de las placas tubulares es independiente de la coraza (McCabe et al., 2007).

El material empleado para su construcción es de acero al carbono, constando el condensador C-301 de 70 tubos de 3 pulgadas y 4 metros de longitud, y el C-401 de 100 tubos de 3 pulgadas y 4 metros de longitud. Empleando agua en ambos condensadores, son necesarios 73 m³/h en el primero y 7,2 m³/h el segundo condensador (se emplea menos en C-401 porque el agua vaporiza en este caso).

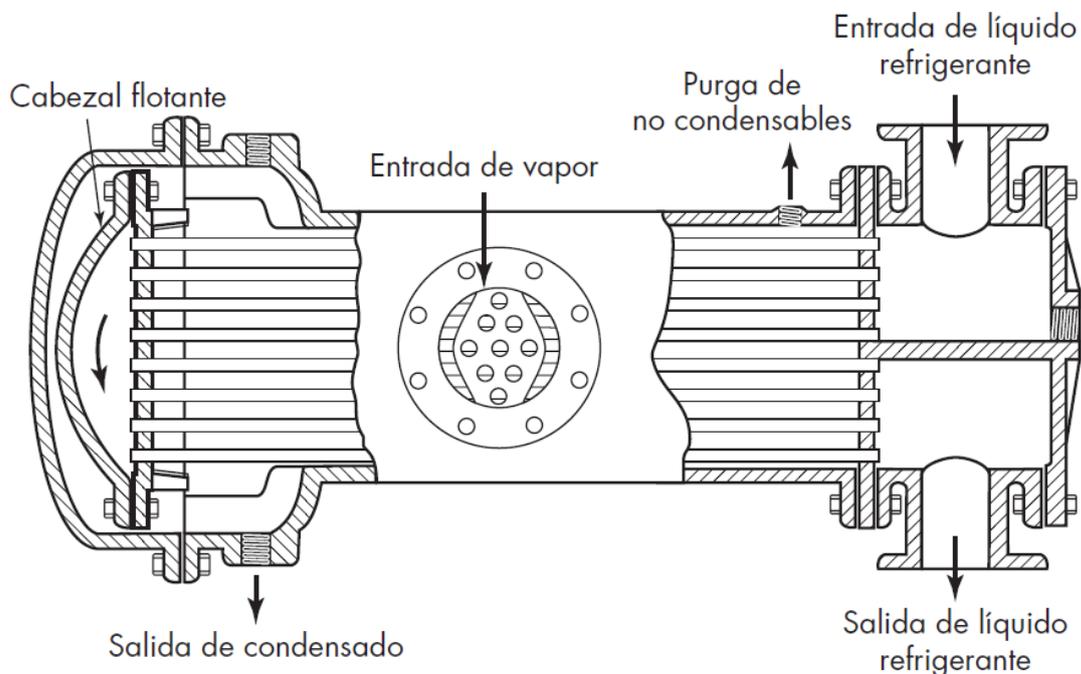


Fig. 3-7 Condensador con cabezal flotante

3.4 Sección 400

La corriente ligera del decantador se envía a la última sección del proceso, constituida por dos tanques flash seguidos de una columna de platos.

3.4.1 Tanques Flash

Los tanques Flash extraen la mayor parte del agua y metanol de la corriente producto para obtener las especificaciones deseadas por cabeza de la torre, debido a que estas sustancias también se extraerían junto al biodiésel.

Ambos tanques son de acero al carbono, y poseen un diámetro de 1,8 m y una altura de 6,3 metros, teniendo una relación L/D de 3,5, que es usual. La alimentación a los mismos se realiza a una altura de 4,2 metros desde la base, lugar desde donde hasta donde llega el sello hidráulico con un tiempo de residencia medio de 5 minutos, tal y como se indica en el método de Souders–Brown (Green et al., 2008).

Los tanques flash poseen una malla metálica en la parte superior para evitar el arrastre de gotas por parte del vapor.

3.4.2 Columna de destilación

Para obtener las concentraciones de producto deseadas (99,6 % en peso) son necesarias 24 etapas de equilibrios teóricas para tratar un caudal de entrada de 32,5 kg/s, que debido a la no idealidad de la torre, conducen a 32 platos reales, más una etapa de equilibrio más debida al hervidor. Siendo el espaciamiento entre platos de 0,6 metros, resulta una altura de torre de 19,2 m, y un diámetro de 4,27 m.

Al no existir sustancias corrosivas, se ha escogido acero al carbono para la construcción de la columna de destilación (Fig. 3-8).

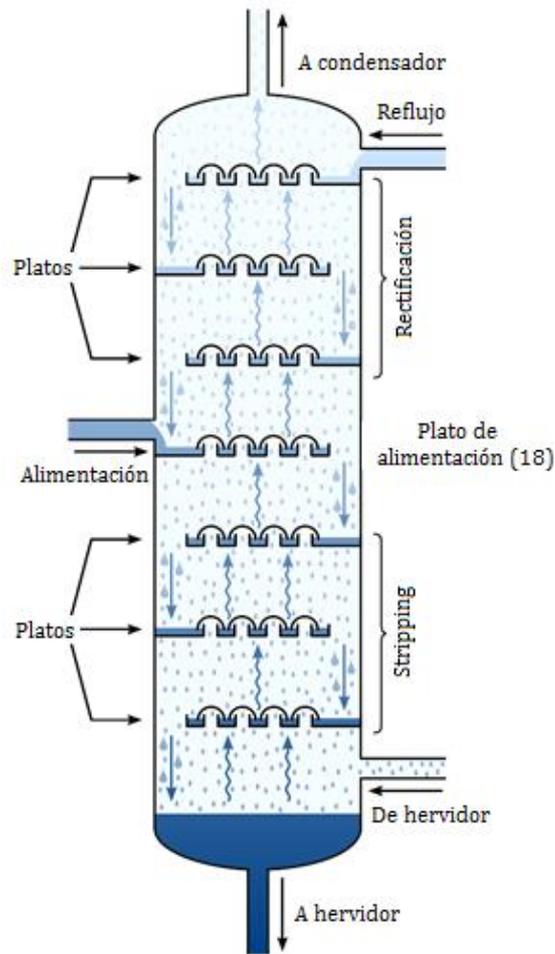


Fig. 3-8 Torre de platos

Para obtener las concentraciones de producto deseadas (99,6 % en peso) se han calculado 24 etapas de equilibrios teóricas para tratar un caudal de entrada de 32,5 kg/s, que debido a la no idealidad de la torre, conducen a 32 platos reales, más una etapa de equilibrio más debida al hervidor. Siendo el espaciamiento entre platos de 0,6 metros, resulta una altura de torre de 19,2 m, y un diámetro de 4,27 m.

De la separación, se obtiene el biodiésel por cabeza, con una pureza mínima del 99,6 %, para que cumpla la norma ASTM D6751 referente a las propiedades que debe tener el biodiésel para su comercialización. Mientras que el aceite que ha quedado sin reaccionar sale por colas, devolviéndose de nuevo al proceso.

4. ESTRATEGIA DE CONTROL

Los lazos de control principales se van a presentar separados en las distintas secciones del proceso, para facilitar el entendimiento del mismo. Solo se numerarán los lazos de control en los tags asociados a los propios controladores por mayor claridad.

Se han añadido las líneas auxiliares para poder explicar el control sobre ellas.

Se van a emplear instrumentos SIEMENS debido a su alta fidelidad en los resultados.

Como termopar tipo k se va a utilizar el sensor-transmisor SIEMENS SITRANS TF280, debido a su posibilidad de montaje en tanques y tuberías, empleándose en la planta vainas entre 2 y 5 pulgadas.

Para la medida de presiones se va a emplear el sensor-transmisor SIEMENS SITRANS P410, que mediante la medida diferencial de presiones obtiene un error menor del $\pm 0,04$ %, con presiones entre 0 y 160 bar.

Los caudalímetros empleados son de presión diferencial, del modelo SIEMENS SITRANS F O, el cual aporta una precisión del ± 1 % en presiones máximas de 315 bar y un rango de temperatura entre -60 y 570 °C.

Los sensores de nivel son de tipo capacitivo, debido a su versatilidad en cuanto a fluidos tratados. El modelo empleado es el SIEMENS POINTEK CLS300, que permite la medida en un amplio rango de temperatura (desde -40 hasta 400 °C).

En la Fig. 3-9 se encuentra la estrategia de control de la sección 100 del proceso (tratamiento de la materia prima). El tanque de almacenamiento de aceite posee un indicador de nivel en campo y otro en la sala principal de control. El nivel se controla mediante una válvula de regulación situada a la salida del mismo. Esta válvula también regula el nivel del tanque de almacenamiento de lodo extraído mediante el sedimentador centrífugo.

En el evaporador se controlan dos variables, la presión, mediante la regulación del caudal en la bomba que proporciona vacío al evaporador, y la temperatura, a través del caudal de vapor a condensar.

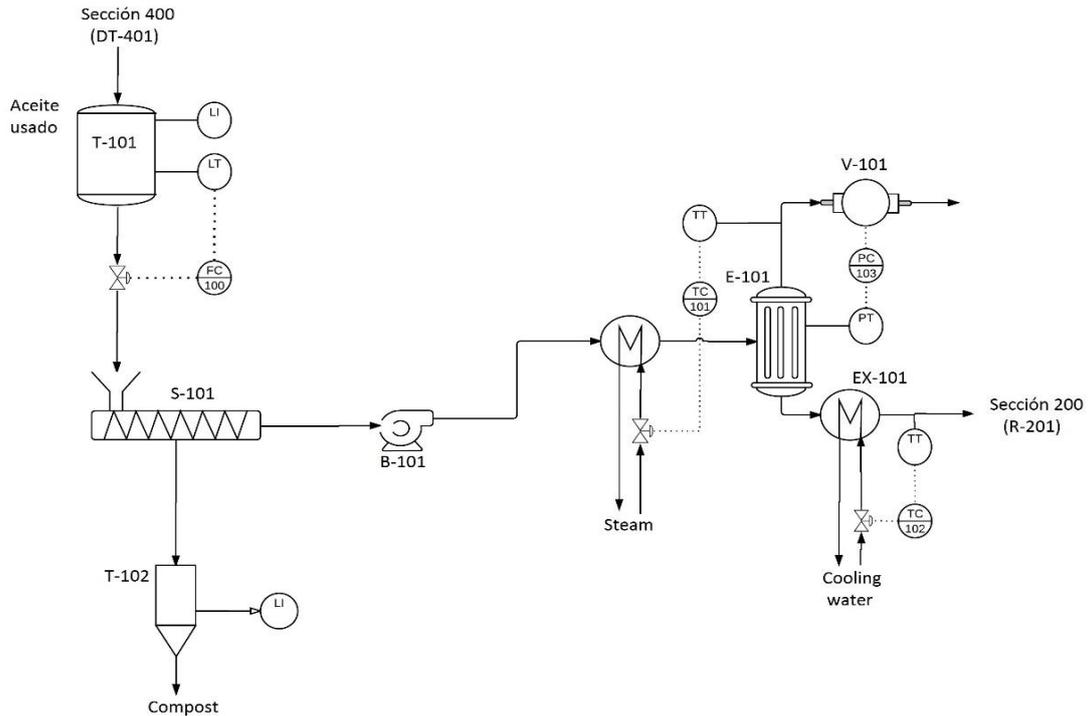


Fig. 3-9 Sección 100

Tras el evaporador, existe un intercambiador que enfría la corriente de aceite hasta 30 °C, cuya temperatura está controlada mediante el caudal de agua que utiliza el intercambiador.

El nivel del tanque de almacenamiento intermedio se muestra en campo mediante un sensor de nivel

La Fig. 3-10 muestra la sección 200 del proceso (reacción y separación del glicerol).

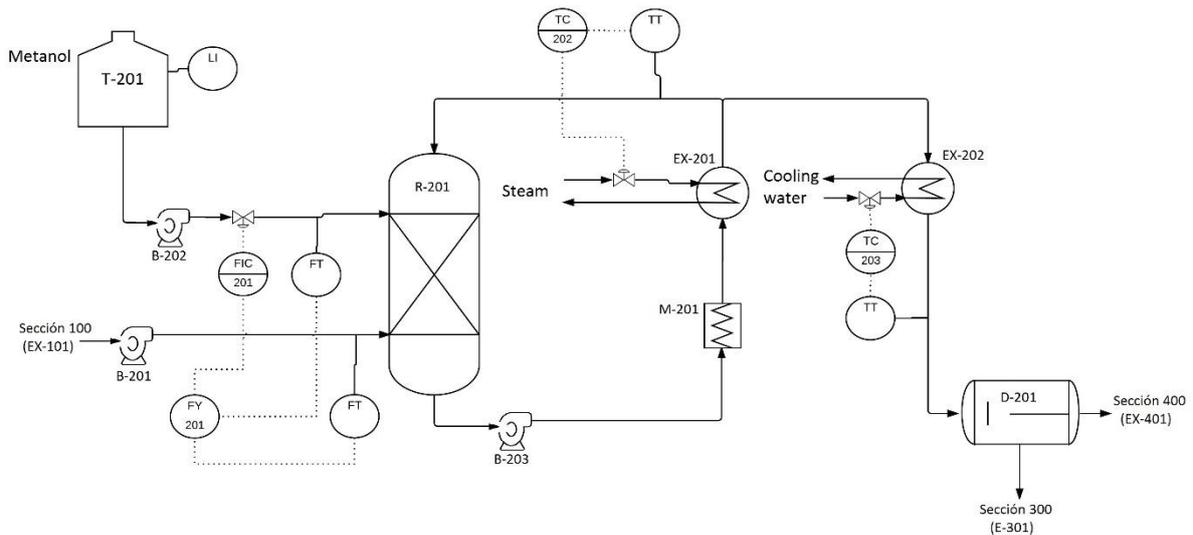


Fig. 3-10 Sección 200

El caudal de alimentación al reactor de la corriente de metanol (superior) se controla mediante una válvula que mantiene el ratio másico metanol:aceite en 0,4 (el ratio molar es 10:1).

La temperatura al reactor, la cual debe permanecer estable en 240 °C, es controlada mediante el caudal de vapor que alimenta al intercambiador de calor (EX-201).

Cuando finaliza la reacción, se disminuye la temperatura del producto en un intercambiador (EX-202), la cual se controla por la válvula situada en la corriente de agua de refrigeración del intercambiador.

El nivel del separador líquido-líquido es mostrado en campo mediante un indicador de nivel.

La Fig. 3-11 muestra la sección 300 del proceso (purificación del metanol).

La temperatura del evaporador se mide en la corriente de salida del disolvente evaporado, controlándose mediante una válvula que regula el caudal de vapor que alimenta al mismo.

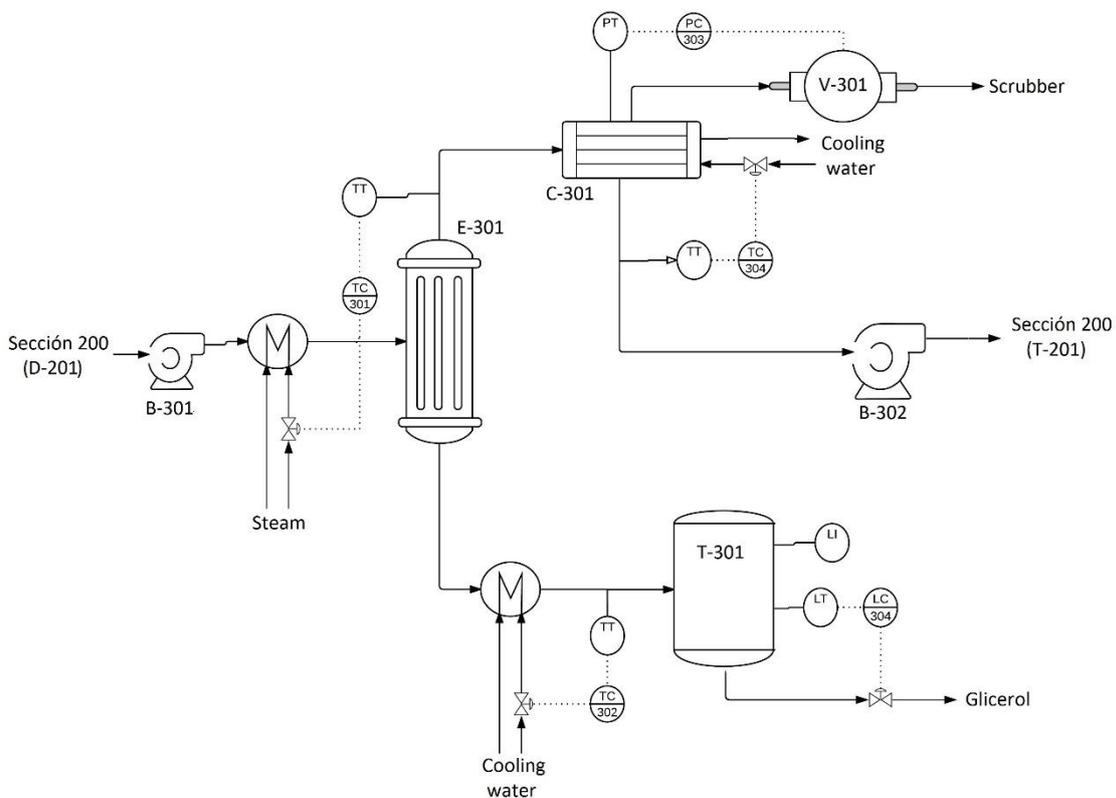


Fig. 3-11 Sección 300

El soluto (glicerol) pasa a un tanque de almacenamiento, previo enfriamiento, y se controla la temperatura (debe estar en 30 °C) mediante el caudal de agua de refrigeración. El nivel del tanque de almacenamiento de glicerol se muestra en campo mediante un indicador de nivel, y se controla a través de una válvula situada en la descarga del mismo (enfocada a la recogida del glicerol por el comprador).

El metanol vapor que se extrae por la parte superior del evaporador se condensa en C-301, donde se controla la presión con una bomba de vacío y la temperatura a través del caudal del agua de refrigeración.

En la Fig. 3-12 se muestra la sección de purificación del producto. La temperatura de alimentación a los tanques flash se controla mediante una válvula que regula el caudal de vapor en los intercambiadores, mientras que la presión se controla mediante una válvula de alimentación a los propios tanques.

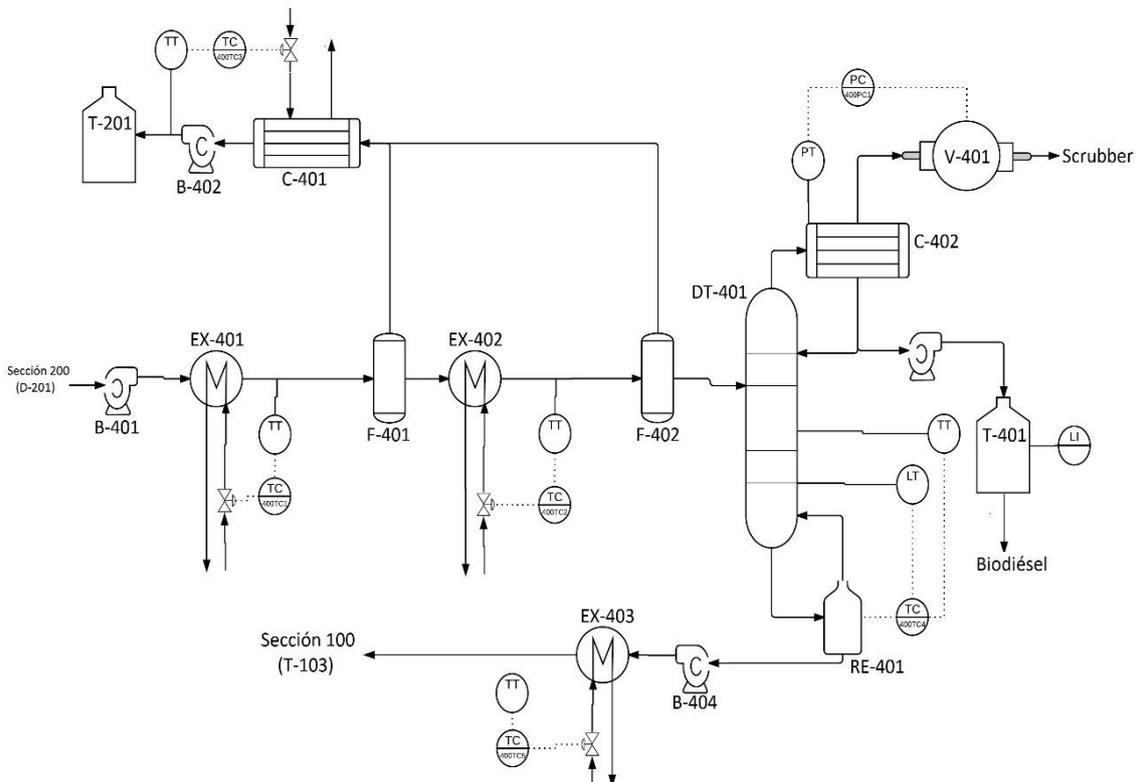


Fig. 3-12 Sección 400

Los volátiles extraídos por los tanques flash se enfrían en un condensador, donde se controla la temperatura por el caudal de agua de refrigeración, para poder almacenarlos a la temperatura deseada.

El tanque de almacenamiento posee un indicador de nivel en campo, y un detector de nivel, para evitar que se llene más de su capacidad, con una válvula en cada entrada del mismo.

En la torre de destilación se regula la presión mediante una bomba de vacío, y el nivel en fondo mediante el caudal de vapor que alimenta al reboiler situado en la zona inferior de la columna.

El tanque de almacenamiento de producto posee un indicador de nivel en campo.

La corriente que se extrae por colas (aceite que no ha reaccionado) se reenvía a la sección 100, previo enfriamiento, y se regula a través del caudal de agua de refrigeración del intercambiador.

5. TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Para asegurar la continuidad del proceso se han introducido cuatro tanques pulmón, que poseen una capacidad de almacenaje desde 10 hasta 48 horas, con una relación L/D igual a 1,5, estando contruidos de acero al carbono, ya que no almacenan sustancias corrosivas.

Para alimentarlos reactores se ha diseñado un tanque para el metanol, que abastece a la reacción durante 10 horas de producción, ya que se necesitan 5 horas en cada reactor para obtener la conversión deseada, con un diámetro de 7,9 m.

Los tanques de 48 horas poseen la función de abastecer a la planta de materia prima, y almacenar el glicerol y el biodiésel hasta su recogida. Este periodo de tiempo está pensado para una regularidad diaria tanto de llegada del aceite como recogida de los productos. Los tanques (2 unidades) de almacenamiento de aceite usado poseen un diámetro de 13,5 m, el de glicerol 6,8 m y los de biodiésel (2 unidades) 13,8 m.

6. TUBERÍAS

Las tuberías que conectan los distintos equipos se han especificado de modo que su velocidad está en torno a 1 m/s, variando su diámetro entre 2 y 10 pulgadas a lo largo de la planta, dependiendo de la cantidad de caudal a transportar.

El acero al carbono A-53 es adecuado para el transporte de los fluidos empleados en el proceso, ya que no se presentan en ningún punto temperaturas superiores a 450 °C.

7. AISLAMIENTO TÉRMICO

Se van a aislar aquellos equipos con una temperatura superior a 60 °C, mediante lana de roca de 80 kg/m² recubierta con aluminio. Esto permite que no se ocasionen accidentes por quemaduras en los trabajadores por contacto físico directo con el equipo.