



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de una planta para tratamiento de aceite usado
procedente de motores navales*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Pablo Sierra Caruncho

DIRECTORES: Rocío Maceiras Castro
Víctor Alfonsín Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2015-2016

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de una planta para tratamiento de aceite usado
procedente de motores navales*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Se podría establecer que los procesos pirolíticos ofrecen una interesante forma de recuperar tanto el valor químico como energético de los residuos para su futuro uso. Aunque se sabe que este es un método efectivo, es necesario continuar con la investigación de este proceso para así poder transformarlo en una forma viable de reciclaje.

En este trabajo, se trata de diseñar y dimensionar una planta de tratamiento de aceite usado de motor para su destilación y transformación en diesel, así como un breve estudio económico de la misma, con la ayuda de la herramienta Hysys[®], para su posible ubicación en la Escuela Naval Militar.

Una planta de estas características, dotaría a la Escuela Naval de la posibilidad de auto-gestionar sus residuos de aceite procedente tanto de las lanchas de instrucción como de los vehículos, evitando así la dependencia de empresas ajenas a la Armada para el tratamiento de este desecho y demostrando además, la concienciación de las Fuerzas Armadas con el medioambiente.

PALABRAS CLAVE

Destilación pirolítica, aceite usado, simulación, diesel, tratamiento de residuos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mis tutores Rocío Maceiras y Víctor Alfonsín cuya ayuda constante y eterna paciencia a lo largo de la elaboración de este trabajo, ha sido clave para la finalización del mismo.

Por otro lado, agradecer también la información facilitada por el Alférez de Navío Marcos Ramos Fernández en todo lo referente al tratamiento de residuos que se lleva a cabo en la Escuela Naval Militar. Información que ha sido de gran ayuda para la elaboración de algunos puntos de este trabajo.

Por último y no por ello menos importante, el apoyo de toda mi familia y en especial el de mis abuelos, no sólo durante este trabajo si no durante todos mis estudios en la Escuela Naval, han sido de vital importancia para finalizar mi tiempo de instrucción en esta institución.

CONTENIDO

Índice de Figuras.....	1
Índice de Tablas	3
Introducción y objetivos.....	5
1. Contaminación por vertidos oleosos.....	7
1.1. Contaminación del aire.....	7
1.2. Contaminación del agua	7
1.3. Contaminación de suelos.....	8
2. Regulación.....	8
3. Tratamiento de Residuos.....	9
4. Objetivos	10
Estado del arte.....	11
1. Técnicas pirolíticas actuales.....	13
1.1. Pirólisis mediante arco eléctrico.....	13
1.2. Pirólisis por ondas microondas.....	13
1.3. Pirólisis tradicional.....	14
1.4. Pirólisis mediante ultrasonidos.....	16
Desarrollo del TFG	19
1. Caracterización del aceite	21
2. Diseño de la planta	22
2.1. Pasos previos	22
2.2. Primera etapa: Eliminación de compuestos volátiles.....	23
2.3. Mezclador.....	26
2.4. Segunda etapa: Obtención del diesel.....	27
2.5. Tercera etapa: Refinamiento.	29
3.2.6 Vista global de la planta.....	31
3. Estudio económico.....	33
4. Dimensionamiento y emplazamiento en la Escuela Naval Militar	33
Resultados.....	37
1. Análisis de resultados.....	39
1.1. Eliminación de compuestos volátiles.....	39
1.2. Primera destilación del aceite.....	39
1.3. Segunda destilación del aceite.....	40
Conclusiones y líneas futuras.....	43
1. Conclusiones	45
2. Líneas futuras	45

2.1. Adaptación de una planta de estas características a un buque mercante o similar para poder auto-gestionar sus propios residuos	45
2.2. Estudio de viabilidad económica para la construcción de una planta de tratamiento de aceite en los arsenales de la Armada.	46
2.3. Continuación con la investigación de técnicas pirolíticas como el uso de ondas microondas.	46
Bibliografía	47
Anexo I: Contenido del primer anexo.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vertido de petróleo en el Golfo de México	7
Figura 2. Espectro radioeléctrico	14
Figura 3. Esquema planta de tratamiento de aceite	15
Figura 4. Diagrama del proceso	22
Figura 5. Eliminación de agua y compuestos volátiles	23
Figura 6. Mezclador	26
Figura 7. Primera etapa de la destilación	27
Figura 8. Segunda etapa de la destilación	30
Figura 9. Vista global	32
Figura 10. Vista aérea de la localización.....	34
Figura 11. Diagrama de la planta	35
Figura 12. Eliminación de agua.....	39
Figura 13. Resultado 1ª destilación	40
Figura 14. Composición del diésel	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de resultados y normativa.....	15
Tabla 2. Estudios relacionados con el tratamiento de residuos.....	16
Tabla 3. Composición muestra de aceite.....	21
Tabla 4. Composición muestra de aceite.....	21
Tabla 5. Condiciones iniciales del aceite	23
Tabla 6. Composición de la corriente “Compuestos Volátiles”	24
Tabla 7. Condiciones de la corriente “Compuestos Volátiles”	24
Tabla 8. Composición de la corriente “H1”	25
Tabla 9. Condiciones de la corriente “H1”	25
Tabla 10. Parámetros de la bomba “B1”	25
Tabla 11. Composición de la corriente “HP1”	26
Tabla 12. Condiciones de la corriente “HP1”	27
Tabla 13. Parametros de la bomba “B2”	27
Tabla 14. Composición de la corriente “H3”	28
Tabla 15. Condiciones de la corriente “H3”	28
Tabla 16. Composición de la corriente “Residuo1”	29
Tabla 17. Condiciones de la corriente “Residuo1”	29
Tabla 18. Parámetros de la bomba “B3”	29
Tabla 19. Composicion de la corriente “Residuo2”	30
Tabla 20. Condiciones de la corriente “Residuo2”	30
Tabla 21. Composición del Diésel	31
Tabla 22. Condiciones del Diésel.....	31
Tabla 23. Relación de materiales y precios.....	33
Tabla 24. Medidas de los componentes de la planta	34

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. Contaminación por vertidos oleosos

Para entender el “por qué” de la realización de este proyecto es necesario conocer algo sobre el mundo de los aceites lubricantes y la problemática que existe con el alto poder contaminante que generan.

El negocio del aceite lubricante en el mundo es tan grande que mueve alrededor de 40 millones de toneladas de este material al año. Ya solo en España, se usa una media de 500.000 toneladas anuales [1].

Los aceites con el uso, dejan de ser útiles para su utilización tras la degradación de los materiales con los que trabajan, tales como las partículas de metal desprendidas de los motores, etc., por lo que deben ser recogidos y tratados para evitar la contaminación del medio ambiente.

Estos aceites están compuestos de una base mineral o sintética a la que se le añade cierta cantidad de aditivos. Pero lo que hace que los aceites sean tan contaminantes es su composición química tras haber sido usados, ya que pueden contaminarse con partículas metálicas, compuestos de azufre, ácidos y demás.

Los problemas que ocasionan estos aceites al medioambiente afectan principalmente al aire, agua y suelo:

1.1. Contaminación del aire

Con la combustión del aceite, se generan gases tóxicos que son emitidos a la atmósfera, con lo que esto supone para la salud del ser humano. El principal componente tóxico de estos gases es el plomo, el cual, es el más volátil de los componentes metálicos del aceite, y por lo que al quemarlo, todo el plomo contenido en este, se evapora, contaminando el aire a su alrededor.

1.2. Contaminación del agua

El aceite lubricante que se pierde de los motores o los vertidos oleosos que se realizan por los desagües, y que llegan hasta ríos y mares, genera un deterioro notable de la calidad de las aguas y perturba gravemente el desarrollo de la vida en dicho medio.

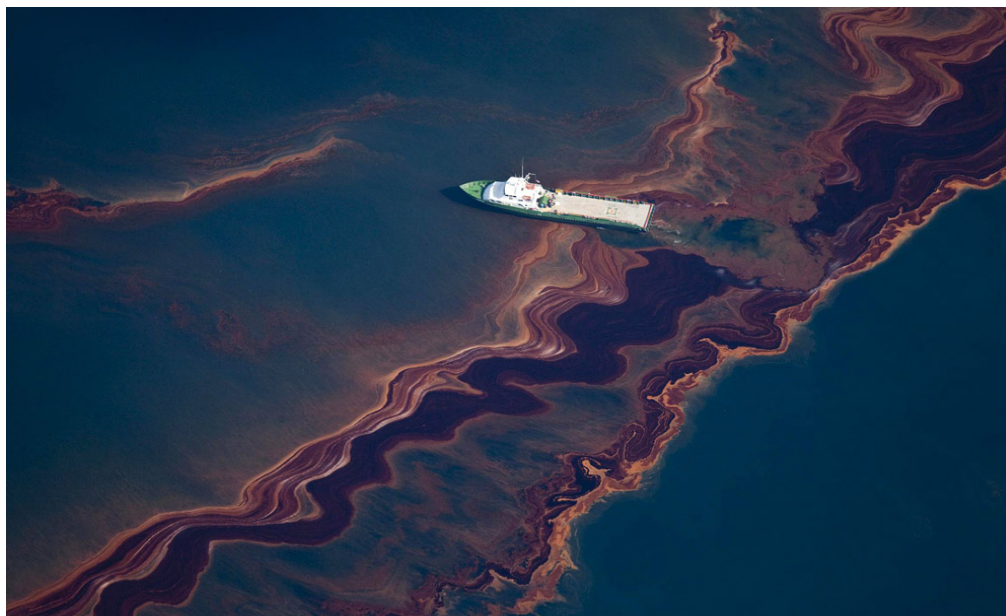


Figura 1. Vertido de petróleo en el Golfo de México

El problema de los aceites vertidos al agua es que generan una película impermeable en su superficie que impide el paso de oxígeno. Esto se produce ya que los hidrocarburos no son biodegradables y su tiempo de eliminación en el mar puede ser de hasta 15 años. Además, las sustancias tóxicas contenidas en los aceites como fenoles o aminas aromáticas usadas como aditivos, pueden ser ingeridas tanto por los animales como por los seres humanos con los riesgos que estos conllevan.

Para poder entender mejor la magnitud de este problema, se sabe que un litro de aceite usado vertido en el mar, contamina 1000 m³ de agua [2].

1.3. Contaminación de suelos

Como se ha explicado anteriormente, los hidrocarburos saturados no son biodegradables y este vuelve a ser el problema en la contaminación de los suelos. Los aceites por lo tanto, crean una película impermeable que destruye el humus vegetal y por lo tanto, la fertilidad del suelo.

Para los problemas de contaminación aquí expuestos, el ser humano está tratando de buscar la forma más eficiente y limpia de tratar los residuos provenientes de aceites usados. En el apartado Técnicas pirolíticas actuales se expondrán algunos de los tratamientos más utilizados hoy en día, entrando más en detalle en aquel que ocupará el objeto de este trabajo que es la pirolisis tradicional.

2. Regulación

El tratamiento de aceites usados y todo lo que rodea su gestión está legislado en España según el Real Decreto 679/2006, de 2 de Junio [3], en la que se regula la gestión de los aceites industriales usados:

La incidencia ambiental de estos residuos, que tienen la consideración de peligrosos, motivó una regulación en lo referente a su tratamiento y almacenaje ordenada en el año 1975 para que se adoptaran medidas en el plano comunitario. Se elaboró entonces, la Directiva 75/439/CEE del Consejo del Ministerio de Medioambiente, que tras varias modificaciones, pasó a afectar tanto a las empresas productoras de aceites como a las empresas que usan estos aceites con fines industriales. Esta regulación establecía para la producción de aceites que se debería seguir un plan empresarial de prevención de sus efectos sobre el medio ambiente que incluirá, al menos, la identificación de los mecanismos que se vayan a poner en marcha para alargar su vida útil y mejorar sus características, con la finalidad de facilitar su regeneración, reciclado u otras formas de valorización de los aceites usados generados tras su utilización. Por otro lado, los productores de aceites usados deberían cumplir las siguientes obligaciones:

- a) Almacenar los aceites usados en condiciones adecuadas, evitando especialmente las mezclas con agua o con otros residuos no oleaginosos; se evitarán también sus mezclas con otros residuos oleaginosos si con ello se dificulta su correcta gestión.*
- b) Disponer de instalaciones que permitan la conservación de los aceites usados hasta su recogida y que sean accesibles a los vehículos encargados para ello.*
- c) Evitar que los depósitos de aceites usados, incluidos los subterráneos, tengan efectos nocivos sobre el suelo.*

2. Con carácter general, quedan prohibidas las siguientes actuaciones:

- a) Todo vertido de aceites usados en aguas superficiales o subterráneas, en cualquier zona del mar territorial y en los sistemas de alcantarillado o de evacuación de aguas residuales.*

b) *Todo vertido de aceite usado, o de los residuos derivados de su tratamiento, sobre el suelo.*

c) *Todo tratamiento de aceite usado que provoque una contaminación atmosférica superior al nivel establecido en la legislación sobre protección del ambiente atmosférico.*

3. *Los productores de aceites usados que generen más de 500 litros al año, así como los gestores de aceites usados, deberán llevar un Libro-registro propio con indicaciones relativas a cantidades, calidad, origen, localización y fechas de entrega y recepción. La llevanza de este Libro-registro propio, y la inscripción como productores en el Registro de producción y gestión de residuos por la correspondiente comunidad autónoma, eximirá a estos productores del cumplimiento de lo establecido en el artículo 22.1 del Real Decreto 833/1988, de 20 de julio [4], por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo [5], Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos.*

4. *El transporte de aceites usados entre España y otros países, incluidos los pertenecientes a la Unión Europea, se llevará a cabo cumpliendo lo establecido en el Reglamento (CEE) n.º 259/93 del Consejo, de 1 de febrero de 1993 [6], relativo a la vigilancia y al control de los traslados de residuos en el interior, a la entrada y a la salida de la Comunidad Europea. Las correspondientes y preceptivas autorizaciones se supeditarán a la constitución de un seguro de responsabilidad civil, o prestación de fianza, aval bancario u otro tipo de garantía financiera que cubra los gastos de transporte y los de valorización [6].*

3. Tratamiento de Residuos

Residuos como aceites, plásticos y biomasa, son generados diariamente por todo el mundo. Algunos de estos residuos se recogen y reciclan de forma efectiva para su posterior uso como fuente de energía o materias primas para crear otros productos, mientras que el resto de residuos se desechan o se queman pudiendo dañar el medioambiente. La eliminación de dichos residuos de manera inapropiada constituye un peligro para el medioambiente por la presencia en estos de sustancias como metales, hollín e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs). Por ejemplo, algunos estudios [7] han demostrado que las altas concentraciones de este tipo de hidrocarburos en las aguas residuales y vertidos urbanos son debidas a la contaminación por residuos de aceite.

Debido a las dificultades asociadas con los contaminantes presentes en estos materiales de desecho, gran parte de los residuos son simplemente eliminados depositándolos en vertederos. Este método no presenta ninguna posibilidad de recuperación del valor potencial de los desechos pero sin embargo, deja serios problemas de contaminación medioambiental por sus largos periodos de descomposición. Por este motivo, el tratamiento y eliminación de estos residuos, presenta un reto importante a nivel mundial.

Una forma de eliminación de este tipo de residuos se puede conseguir mediante la incineración de estos. Dicha técnica es actualmente muy frecuente, ya que puede ser utilizada con fines energéticos. En este proceso de recuperación energética, los residuos son quemados en hornos para producir energía en forma de electricidad y/o calor [7]. Este método puede ser usado para cualquier forma de hidrocarburo aunque presenta ciertos inconvenientes. Entre los más importantes, la combustión de estos hidrocarburos genera la producción de los conocidos gases de efecto invernadero como puede ser el CO₂ y que contribuye al cambio climático. Además, la incineración puede provocar emisiones tóxicas (partículas de hollín con metales pesados, etc.), que presentan un riesgo directo tanto para el medioambiente como para el ser humano. Por otro lado, la incineración sólo permite recuperar el valor energético de los

residuos pero no el valor químico. Este factor, sumado a la concienciación con el cambio climático y el peligro que conlleva para la salud del ser humano, ha llevado a que esta práctica este siendo abandonada.

Por lo tanto, y tras las investigaciones que se han llevado a cabo para sustituir estos métodos ineficientes, se ha conseguido llegar a soluciones más limpias desde el punto de vista medioambiental que se basan en el uso de procesos de conversión térmica.

La conversión térmica implica el uso de un amplio rango de procesos de descomposición tales como la pirólisis y la gasificación, que se utilizan para descomponer materiales de desecho en moléculas más pequeñas, para que a su vez puedan ser usadas bien como fuentes de energía, o bien como base para la síntesis de nuevos materiales. En estos procesos, los materiales de desecho son calentados en ausencia de oxígeno para poder romper los enlaces en moléculas más pequeñas.

Mientras que la conversión térmica muestra grandes ventajas a la hora de eliminar material de desecho procedente de hidrocarburos, recobrando como hemos dicho anteriormente tanto el valor energético como el químico, es un proceso que requiere una operación a gran escala con cierta inversión de capital para construir la planta de tratamiento. Aunque estas técnicas han demostrado su gran potencial para la eliminación de residuos, todavía queda mucho por investigar para que pueda convertirse en una técnica popular [7].

4. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo el diseño de una planta de tratamiento de aceite usado procedente de motores navales mediante el uso de una herramienta de simulación llamada Hysys[®]. También se plantea encontrar el emplazamiento adecuado dentro del recinto de la Escuela Naval Militar donde pudiera construirse, y así poder dotar a esta de la posibilidad de tratar sus propios residuos, con el objeto de no depender de empresas exteriores, tal y como ocurre en la actualidad.

Por otro lado, la construcción de una planta de estas características mostraría a la sociedad la concienciación de las Fuerzas Armadas con el medio ambiente y el reciclaje, tal y como viene regulado en la directiva 107/1997 del ministro de Defensa y la Instrucción 30/1998 del secretario de Estado de Defensa, las cuales constituyen el marco legal que define la política ambiental del Ministerio de Defensa. Estableciendo así las pautas a seguir por las instituciones públicas en materia de tratamiento de residuos

ESTADO DEL ARTE

1. Técnicas pirolíticas actuales

Las técnicas pirolíticas han sido desarrolladas como alternativa para tratar y convertir residuos en productos válidos para su uso como fuentes potenciales de energía.

Como ya se ha indicado anteriormente, la mayor ventaja de la pirolisis es la capacidad que tienen para recuperar tanto el valor energético como químico de los desechos.

Se ha establecido que las técnicas pirolíticas actuales, comparadas con los procesos de incineración, ofrecen una gran cantidad de ventajas y muestran un excelente potencial para conseguir energía. Sin embargo, estas prácticas tienen ciertas limitaciones que siguen dando problemas a la hora de usar estas técnicas. La baja conductividad térmica de algunos residuos hace que los procesos para que la pirólisis se produzca sean excesivamente largos.

Por ejemplo, el calentador usado en la pirolisis convencional, además de calentar el residuo, también calienta los materiales e instrumentos que le rodean. Esto se traduce en pérdidas de energía notables, además aparece la posibilidad de que se produzcan reacciones químicas secundarias no deseadas, que pueden llevar a la aparición de productos tóxicos, además de generar otros componentes que podrían provocar que las fracciones finales obtenidas varíen y dependan críticamente del proceso usado sobre los desechos [8].

Con el objeto de buscar la máxima eficiencia de este proceso se han desarrollado distintos métodos basados en la pirolisis para el tratamiento de aceite usados. A continuación se explicarán algunos de los procedimientos más investigados y utilizados hasta el momento.

1.1. *Pirólisis mediante arco eléctrico*

El uso de un arco eléctrico para realizar la pirolisis de un aceite usado, es una de las técnicas más novedosas hasta el momento. Este método, emplea una forma diferente a la técnica convencional de pirolisis de calentar los residuos, usando un arco eléctrico para generar una descarga momentánea y así poder realizar la pirolisis del aceite, obteniendo gases con alto poder energético y residuos carbonosos útiles. Se considera una pirolisis del tipo “flash” ya que el residuo es calentado rápidamente hasta los 1300-1500°C en apenas 1 segundo. Aunque esta técnica muestra gran potencial, debe continuarse con su desarrollo, debido a la presencia de componentes indeseados en los productos como metales y aditivos contaminados [7].

1.2. *Pirólisis por ondas microondas*

La pirolisis con microondas es un proceso relativamente novedoso. Este tratamiento térmico ha demostrado ser un método efectivo para reciclar residuos que antes eran difíciles de tratar.

En este proceso, los residuos se mezclan con materiales capaces de absorber fácilmente las ondas microondas. Por ejemplo, el carbono puede absorber la cantidad necesaria de energía, para posteriormente aportar al residuo el calor necesario para que ocurra el proceso de pirólisis. En ausencia de oxígeno, el material de desecho se romperá en moléculas más pequeñas. Los productos volátiles resultantes pueden ser tanto recondensados, como recogidos en forma de productos gaseosos. En la siguiente imagen (Figura 2), se observa el espectro radioeléctrico donde se localizan las ondas microondas entre el espectro de radiación IR y la de de TV [7].

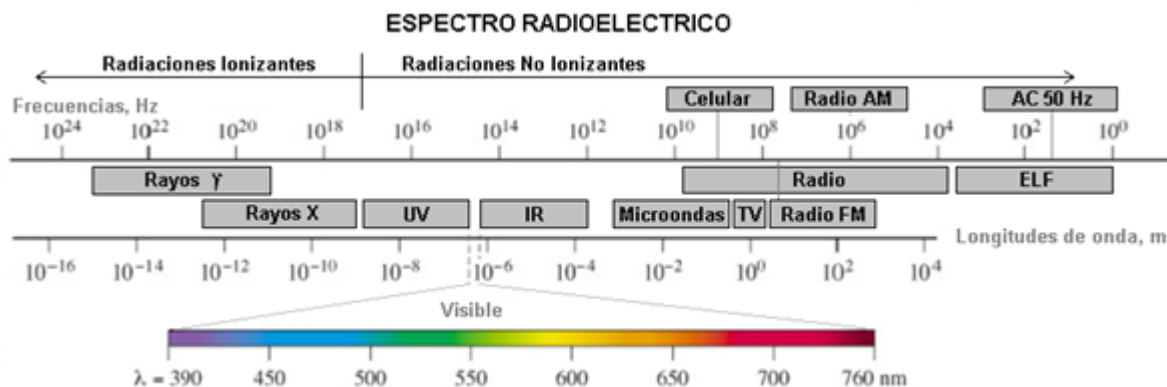


Figura 2. Espectro radioeléctrico

Para que esta técnica sea llevada a cabo, se deben utilizar frecuencias entre 915 MHz y 2,45 GHz, con longitudes de onda comprendidas entre 33 y 12 cm. El calentamiento ocurre cuando el magnetrón (dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía electromagnética en forma de microondas), genera radiación electromagnética que provoca que las moléculas dipolares comiencen a rotar, influenciadas por el campo magnético generado. La resistencia que se genera ante esta rotación a nivel molecular, genera una fricción entre las moléculas, la cual es transformada en calor. En la Figura 2, además se pueden observar los distintos rangos de frecuencias existentes en el espectro electromagnético donde se sitúan las ondas microondas.

En el caso del calentamiento térmico convencional se utiliza, por lo general, una fuente de calor exterior, la cual permite transmitir calor al residuo a través de un material intermedio, que va a limitar la absorción de calor de dicho residuo. La cantidad de calor absorbido también dependerá de las propiedades físicas del aceite, tales como la densidad y la capacidad calorífica. Por el contrario, en el calentamiento por microondas, la superficie intermedia entre el productor del campo electromagnético y el producto no influye, siendo un proceso de calentamiento con una mayor eficiencia a la hora de distribuir el calor y de control del mismo si se compara con el método anteriormente citado. Gracias a esto, se pueden conseguir altas temperaturas y una alta conversión de energía eléctrica en calor, y cuyo valor ronda el 85 %.

En cuanto a la aplicación de este método para el tratamiento de residuos de aceite usado [7], se sabe que el aceite es un pobre absorbente de calor debido a su carácter no polar, por lo que para su reciclado se debe usar un material como el carbono, que tiene una gran capacidad de absorción y de transmisión de calor. Tras la aplicación de las microondas, se generan hidrocarburos de un tamaño más pequeño que los inicialmente contenidos en el aceite y H_2 . Tanto los hidrocarburos como los gases generados contienen un gran potencial para ser usados como fuente de energía o materia prima.

La pirólisis por medio de microondas puede llegar a alcanzar un rendimiento bastante alto para un aceite usado con altas concentraciones de hidrocarburos aromáticos y alifáticos ligeros (alrededor del 88 wt%) [7]. El resultado de la aplicación de este método, es un aceite con un valor de recuperación calorífica alto y que se presenta relativamente libre de contaminantes como azufre, metales y demás residuos.

1.3. Pirólisis tradicional

Orhan Arpa, Recep Yumrutas y Ayhan Demirbas, llevaron a cabo un estudio acerca de la obtención de combustible diesel a partir de aceites usados [9]. En dicho estudio, distintas muestras de aceites de motor fueron purificadas de los contaminantes que contenían en una primera fase. A continuación para estas muestras limpias, fueron añadidos diferentes tipos de aditivos, tales como carbonato sódico (Na_2CO_3), cal (CaO) y zeolita. A continuación, las muestras fueron calentadas en un reactor y expuestas

a la destilación pirolítica de manera separada, con el fin de convertirlas en combustible diésel. Tras el proceso pirolítico, se midieron las características más significativas del combustible como pueden ser la densidad y viscosidad para poder compararlo con la normativa que regula dicho combustible.

El sistema purificador que se diseñó para este experimento, consistía de diferentes elementos para contener y mover el aceite a lo largo del circuito, así como de elementos de medición y control. En la Figura 3 se puede observar un esquema de la planta usada por estos autores para la purificación de aceite.

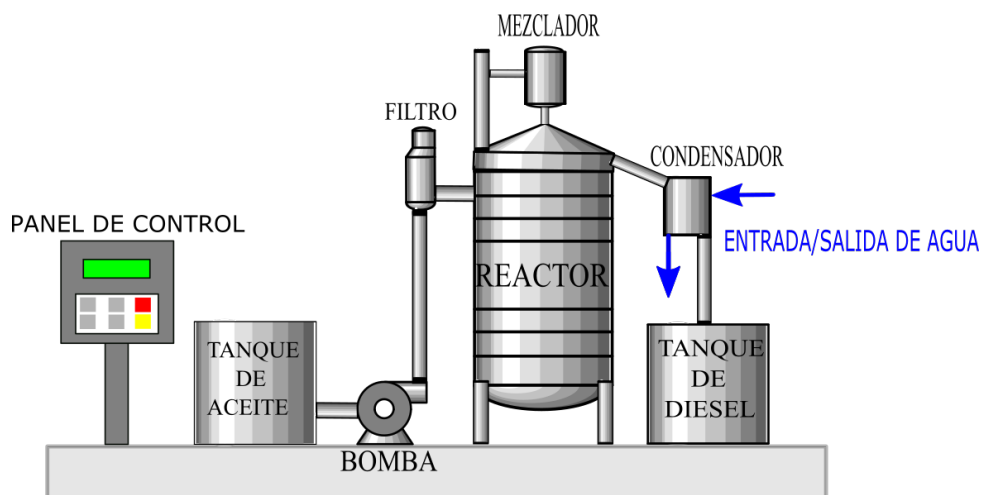


Figura 3. Esquema planta de tratamiento de aceite

La misión del tanque de aceite es la de contener los desechos contaminados. La bomba envía el aceite por las tuberías que llevan al reactor. Dicho aceite debe ser filtrado con un filtro de aceite en una etapa anterior. El reactor, parte principal del sistema, está diseñado para calentar el aceite mediante un calentador eléctrico que puede llevar la muestra hasta los 600 °C de temperatura. El calentador cuenta con un controlador de tensión para poder regular la temperatura desde el panel de control. Además, se emplea un mezclador para que la temperatura dentro del reactor sea uniforme. Por último, se usa un condensador para destilar el aceite vaporizado en el reactor. Todos estos elementos se pueden observar en la Figura 3.

Tras los experimentos realizados por estos autores, se obtuvieron datos que fueron comparados con los parámetros regulados por la normativa, que se muestran en la siguiente tabla:

PROPIEDADES	RESULTADOS	NORMATIVA
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	818	820-845
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	3,49	2-4,5
Sulfatos (ppm)	3500	50
Agua (mg/kg)	130	<200
Punto de ignición	57	<55

Tabla 1. Comparativa de resultados y normativa.

Como se puede extraer de la tabla, densidad, viscosidad y la cantidad de agua contenida son parámetros que se encuentran dentro de la normativa. Por otro lado, el punto de ignición queda dos grados por encima del máximo establecido lo cual podría suponer un problema a la hora de usar este combustible en un motor pero el mayor problema de este combustible es la alta concentración de sulfatos

la cual se encuentra en un 7000 % por encima de la máxima permitida la cual equivale a la establecida para los combustibles de bajo azufre (O., 2003). Este problema conllevaría unas emisiones de SO₂ que en ningún caso podrían ser aceptadas.

1.4. Pirólisis mediante ultrasonidos

La sonoquímica es la rama de la química que estudia los efectos de los ultrasonidos en sistemas químicos homogéneos y heterogéneos [11]. La teoría más aceptada para explicar los efectos químicos de los ultrasonidos es la llamada "hot spot theory". Según esta teoría, la cavitación causada por los ultrasonidos en líquidos, crea burbujas de corta duración que, por implosión adiabática, crean puntos de alta temperatura y presión en el líquido que generan los cambios químicos (por ejemplo sonólisis). Se han propuesto otras teorías como por ejemplo, aplicar una descarga eléctrica dentro de las burbujas provocadas por la cavitación llegando a la conclusión de que este método podría ser una alternativa válida a la "hot spot theory" [12].

Uno de los temas más estudiados de la sonoquímica es la sonólisis de hidrocarburos. Cuando los hidrocarburos alifáticos se tratan con ultrasonidos a temperatura ambiente, las moléculas se agrietan y se descomponen en hidrocarburos con cadenas de carbonos más simples, con una distribución especial del producto. Por ejemplo, en el caso de la sonólisis del n-decano, los principales productos son hidrógeno, metano, acetileno, etileno y propileno además de muchos otros productos. En comparación con el craqueo de alcanos a 500 °C [13], la sonólisis produce mucho más hidrógeno, metano y acetileno, productos que también se pueden observar en la pirólisis por "shock-tube" (1200 °C) [13], lo que sugiere que la cavitación acústica genera temperaturas máximas muy altas comparables a las generadas por las ondas de choque. Esto le convierte en un método muy válido para la destilación pirolítica de hidrocarburos.

En la siguiente tabla resumen, se incluyen algunos trabajos donde se tratan temas similares o directamente relacionados con el objeto de este trabajo.

TITULO	AUTORES	FECHA	TEMA
Ultrasound-induced cracking and pyrolysis of some aromatic and naphthenic hydrocarbons [14]	Cataldo	Febrero 1999	Craqueo pirolítico de hidrocarburos mediante ultrasonidos
Production of diesel-like fuel from waste engine oil by pyrolytic distillation [9]	Arpa et al.	Julio 2009	Destilación de aceites de motor usados por pirólisis
Microwave pyrolysis, a novel process for recycling waste automotive engine oil [15]	Shiung et al.	Abril 2010	Reciclaje de aceites de motor usados mediante pirolisis por microondas
A review on waste to energy processes using microwave pyrolysis [7]	Shiung et al.	Octubre 2012	Tipos de tratamientos de aceites. Pirólisis mediante microondas
A comparison of the use of pyrolysis oils in diesel engine [16]	Wongkhorsub et al.	Julio 2013	Prueba en un motor diésel de combustible obtenido a partir de aceite usado de motor.
Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags [17]	Sharma et al.	Febrero 2014	Obtención de combustible diésel a partir de la pirolisis de bolsas de plástico usadas
Production of alternative diesel fuel from waste oils and comparison with fresh diesel:-A review [18]	Sharma et al.	Abril 2014	Obtención de diésel a partir de aceites usados (Diésel convencional y Biodiésel)

Tabla 2. Estudios relacionados con el tratamiento de residuos.

Como se puede observar en la Tabla 2, en 1999 ya se estudiaba el efecto de los ultrasonidos en compuestos aromáticos e hidrocarburos con el fin de romper sus enlaces y conseguir moléculas más pequeñas gracias a la pirólisis.

Posteriormente, en 2009 se investiga el tratamiento de residuos provenientes de los hidrocarburos, como por ejemplo, el aceite de motor usado o las bolsas de plástico usando distintos métodos de pirólisis como puede ser el método tradicional, por microondas o por arco eléctrico, buscando la obtención de combustible diésel.

En el estudio “realizado por Wongkhorsub y Chindaprasert [16], se emplea combustible obtenido a partir de plásticos y neumáticos usados en un motor mono cilíndrico multipropósito empleado para la agricultura. El análisis económico de este estudio muestra que los combustibles obtenidos por pirólisis son capaces de remplazar al diésel en términos de rendimiento y entrega de energía siempre y cuando este combustible tenga un precio no mayor al 85 % del combustible diésel estándar [16].

De estos estudios se puede extraer que el tratamiento de residuos procedentes de hidrocarburos es un tema de actualidad y sobre el que se seguirá investigando hasta llegar a una solución limpia y económica para revalorizar los desechos.

DESARROLLO DEL TFG

1. Caracterización del aceite

Antes de comenzar con la simulación, es necesario conocer todos y cada uno de los componentes presentes en el aceite para poder definir la corriente de entrada en la primera columna de la planta. La composición de este aceite es la obtenida tras un análisis efectuado a una muestra procedente del motor del patrullero “*Tabarca*”, basado en la Escuela Naval Militar. Dicho análisis fue realizado en el Centro de Apoyo Científico y Tecnológico a la Investigación (CACTI), de la Universidad de Vigo mediante un cromatógrafo de gases cuya función es la de separar los componentes de una mezcla en el tiempo. La identificación estructural de cada componente se realiza mediante un espectrómetro de masas.

A continuación se presenta la composición de dicho aceite en la Tabla 3 y Tabla 4:

COMPUESTO	mg/L
C10	222
C12	223
C14	244
C16	350
C18	450
C20	533
C22	608
C24	849
C26	834
C28	807
Benceno	9
TOTAL rango C10-C40	300g/L (45,5%)

Tabla 3. Composición muestra de aceite.

COMPUESTO	mg/L	COMPUESTO	mg/L
Naftaleno	8	Benzo (a) antraceno	<3
Acenafteno	<3	Criseno	3
Acenaftileno	nd	Benzo (b) fluoranteno	nd
Fluoreno	8	Benzo (k) fluoranteno	nd
Fenantreno	19	Benzo (a) pireno	nd
Antraceno	nd	Benzo (ghi) perileno	nd
Fluoranteno	3	Dibenzo (ah) antraceno	nd
Pireno	16	Indeno (123cd) pireno	nd

Tabla 4. Composición muestra de aceite.

Además de estos compuestos y para determinar la cantidad exacta de agua, o lo que es lo mismo el porcentaje de humedad contenida en una muestra de materia orgánica en el aceite se ha utilizado una termobalanza. El modelo de termobalanza o analizador de humedad utilizado ha sido el MA 110.R del fabricante Radwag.

La termobalanza cuenta con dos elementos principales. Una balanza electrónica usada para medir el peso de la muestra y un calentador el cual aportará a la materia orgánica, el calor necesario para conseguir evaporar la totalidad del agua contenida en ella.

Tras la medición realizada sobre una muestra del mismo aceite, la termobalanza dio un resultado de 4,022 % de humedad. Una vez caracterizado el aceite, ya es posible pasar a la simulación de la planta de tratamiento.

2. Diseño de la planta

En este apartado se expondrá como se ha llevado a cabo el diseño y simulación de la planta de tratamiento de aceite de motor usado, todo ello haciendo uso de la herramienta de simulación Hysys[®], así como de su dimensionamiento, para la posible construcción en la Escuela Naval Militar.

Para el diseño de esta planta, basándose en datos experimentales, serán necesarias tres columnas de destilación que cumplirán las funciones de: en primer lugar, eliminar el agua y los elementos volátiles contenidos en el residuo. En segundo lugar el aceite entra en la segunda columna para ser destilado y así obtener el combustible diésel, no sin antes ser mezclado con un 2% en peso de NaOH, usado como aditivo para purificar la muestra. En tercer y último lugar, se producirá el refinamiento del diésel para obtener unas mejores propiedades.

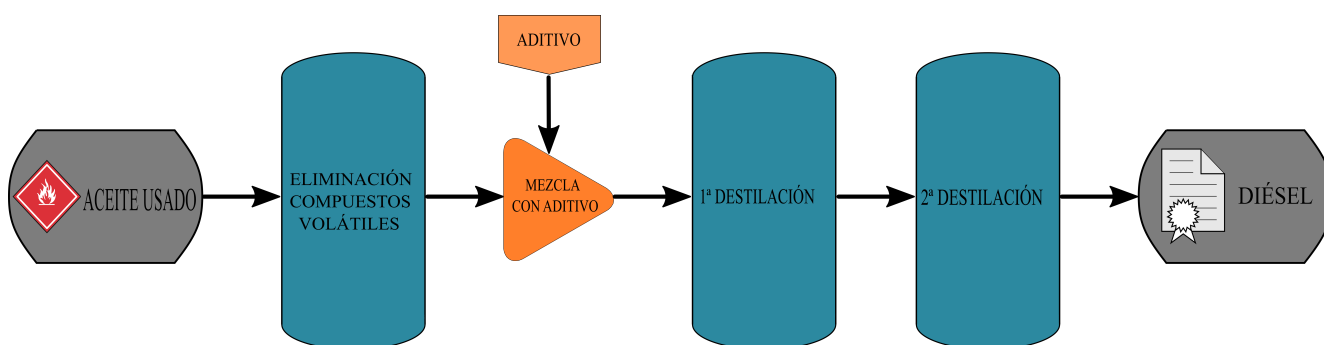


Figura 4. Diagrama del proceso

Todas las columnas, tendrán ocho platos y estarán fabricadas en acero inoxidable para poder situarlas en exteriores, donde se llevarán a cabo las distintas etapas del proceso de pirólisis. Por medio de gráficos y tablas, se explicarán las distintas etapas del proceso especificando todas las corrientes y energías necesarias para llevar a cabo la destilación.

2.1. Pasos previos

Antes de comenzar a diseñar la planta, se deben seguir unos pasos previos para asegurarse que el programa trabaja correctamente y de la manera más adecuada, para que así la simulación se pueda llevar a cabo. Lo primero que se debe hacer es configurar el tipo de unidades que se van a usar durante la simulación. Para esta nueva simulación, el sistema usado es el sistema métrico internacional (SI).

Una vez seleccionadas las unidades, se puede comenzar un nuevo caso. Al abrir un nuevo caso, lo primero que el software requiere es que se introduzcan todos los componentes que se van a utilizar durante la simulación, tanto los hidrocarburos saturados como los aromáticos, el agua y el aditivo que se va a usar en el “*Simulation Basis Manager*” donde también se seleccionará el paquete de propiedades para los fluidos.

La elección de un paquete de propiedades adecuado es el paso previo más importante ya que define la base de la simulación. Para esta simulación se selecciona el método UNIQUAC (UNiversal QUAsi-Chemical). Este método se usa principalmente para pronosticar el equilibrio en sistemas que resultan ser elevadamente no ideales como por ejemplo los compuestos por moléculas con diferentes magnitudes y formas como son las mezclas que contienen agua, hidrocarburos, etc.

2.2. Primera etapa: Eliminación de compuestos volátiles.

La función de la primera columna de destilación, es básicamente la de eliminar los compuestos más volátiles que forman parte de la composición del aceite. El objeto de su eliminación es que no son de interés a la hora de producir combustible diésel. Además de estos elementos más volátiles, se eliminará por completo la cantidad de agua contenida en el residuo.

En primer lugar, se debe definir la corriente de entrada en la primera columna de destilación, la cual denominaremos como “Aceite”. Esta corriente sale de un tanque donde se almacena el aceite de motor que hemos caracterizado con las composiciones que se presentaban anteriormente en la Tabla 3 y Tabla 4. Las condiciones iniciales establecidas para la corriente de entrada son:

Temperatura [°C]	20
Presión [kPa]	101,3
Flujo másico [kg/h]	100

Tabla 5. Condiciones iniciales del aceite

El resto de parámetros como flujos molares, peso másico, densidades, etc, necesarios para la simulación son calculados por el software a partir de las ya dadas.

Tras definir la primera corriente se añade la torre de destilación, que es donde se llevará a cabo la primera etapa del proceso. En la Figura 5 se puede ver una imagen extraída de la simulación con las corrientes entrantes y salientes de la columna. Además se puede observar la bomba necesaria para distribuir el aceite al resto de las etapas de la planta.

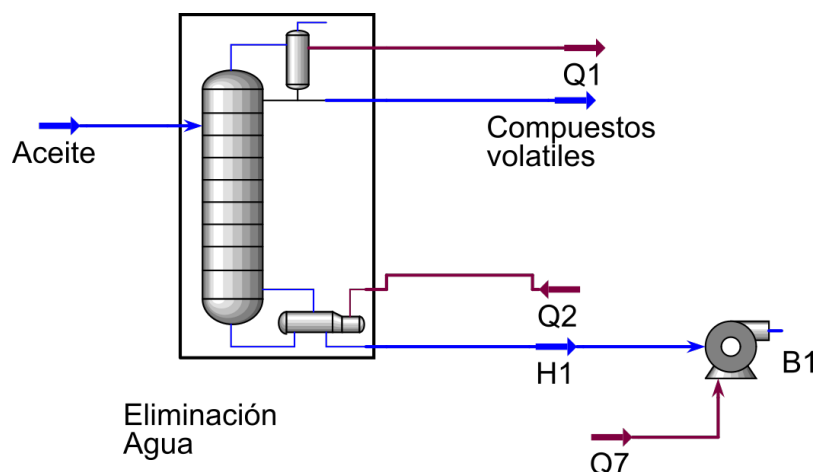


Figura 5. Eliminación de agua y compuestos volátiles

A continuación se pasará a explicar cada uno de estos flujos y componentes:

1ª Columna: para el diseño de la columna, lo primero que se debe establecer son tanto las corrientes de entrada como de salida. Una vez hecho esto, se definen ciertos parámetros necesarios para el funcionamiento de la columna como son las presiones en el condensador y en el calentador, ambas establecidas a presión atmosférica, y la cantidad de platos que contendrá la columna que serán 8 para todas las etapas de la destilación del combustible. Una vez definidas las presiones, se deben indicar ciertas especificaciones de la columna. En primer lugar, se establece la tasa de reflujo en un 90 %, que es la relación entre la cantidad de condensado que regresa a la columna de destilación y la cantidad de destilado obtenida. Por otro lado, el caudal de destilación se establece en 3,5 kg/h con el fin de garantizar que se elimine la mayor parte de agua.

El flujo de energía “Q1” proveniente del condensador, enfría los gases generados dentro de la columna de destilación para obtener un flujo líquido que se denominará “Compuestos volátiles”. El calor extraído en esta etapa es de 1554 kJ/h y se modificará en función de la temperatura alcanzada en la columna.

La corriente “Compuestos Volátiles” contiene los elementos que deseamos eliminar, como el agua y los hidrocarburos más volátiles, y es el resultado de la primera destilación. En la Tabla 6 y Tabla 7 se refleja la composición de dicha corriente y los datos de salida de la misma.

•

COMPONENTE	FRACCION MOLAR
Agua	0,0826
Decano	0,6948
C-12	0,1251
C-14	0,0101
C-16	0,0009
Benceno	0,0808
Naftaleno	0,0056

Tabla 6. Composición de la corriente “Compuestos Volátiles”

Temperatura [°C]	142,8
Presión [kPa]	101,3
Flujo másico [kg/h]	3,5

Tabla 7. Condiciones de la corriente “Compuestos Volátiles”

El flujo de energía “Q2” que entra en el calentador es el encargado de aportar a la columna el calor necesario para llegar a la temperatura óptima para llevar a cabo la destilación. Debido a las altas temperaturas requeridas en la columna, el aporte de energía al calentador también tendrá que ser alto. En el caso de esta columna, el calor necesario que se debe aportar para que la corriente de salida llegue a los casi 300 °C es de $7,435 \times 10^4$ kJ/h.

La corriente “H1” (Hidrocarburos1), sale de la primera torre de destilación tras eliminar el agua y los compuestos más volátiles. Esta es la corriente que usaremos en la mezcla con el aditivo NaOH para la purificación y su posterior destilación para la obtención del diésel. En la Tabla 8 y Tabla 9, como en la corriente anterior, se muestra la composición y los datos que las caracterizan.

COMPONENTE	FRACCION MOLAR
Decano	0,0312
C-12	0,0636
C-14	0,0685
C-16	0,0871
C-18	0,0997
C-20	0,1064
C-22	0,1104
C-24	0,1414
C-26	0,1283
C-28	0,1153
C-30	0,0289
Fenantreno	0,0060
Acenafteno	0,0012
Fluoreno	0,0028
Fluoranteno	0,0009
Pireno	0,0045
Criseno	0,0008
Naftaleno	0,0031

Tabla 8. Composición de la corriente “H1”

Como se puede observar, la composición de esta corriente está caracterizada principalmente por hidrocarburos de cadena larga de carbono e hidrocarburos aromáticos. Por otro lado, después del proceso, el agua contenida queda completamente eliminada.

Temperatura [°C]	297,9
Presión [kPa]	101,3
Flujo másico [kg/h]	96,5

Tabla 9. Condiciones de la corriente “H1”

La bomba “B1” es la encargada de impulsar la corriente “H1” hasta el mezclador para añadirle el aditivo que en este caso estará formado por NaOH puro cuya función se explicará más adelante. El flujo de energía “Q7” se encarga de darle la fuerza necesaria a la bomba aportándole una potencia de $6,065 \times 10^{-6}$ kW. Los parámetros adicionales de la bomba son los siguientes:

Eficiencia [%]	75
Incremento de presión [kPa]	0,10000
Potencia [kJ/h]	0,02184
Capacidad [m3/h]	0,16377

Tabla 10. Parámetros de la bomba “B1”

El único parámetro introducido en las bombas de toda la planta es el incremento de presión cuyo valor es bajo para que la presión del circuito no sea demasiado elevada. El resto de parámetros es calculado por Hysys[®] en función del dato dado, lo que nos da una capacidad más que suficiente para impulsar el caudal que circula por la instalación

2.3. Mezclador.

Una vez realizado el diseño de la primera columna, se añade un mezclador donde la corriente H2 se combina con un aditivo, en este caso un 2% de NaOH sobre la cantidad total de aceite. El fin de añadir este aditivo es el de purificar el residuo y cumplir algunas de las especificaciones que marca la normativa acerca del combustible diésel en motores agrícolas y marinos [19]. Para el diseño del mezclador no se requiere ningún dato en concreto a excepción de definir las corrientes que entran en este.

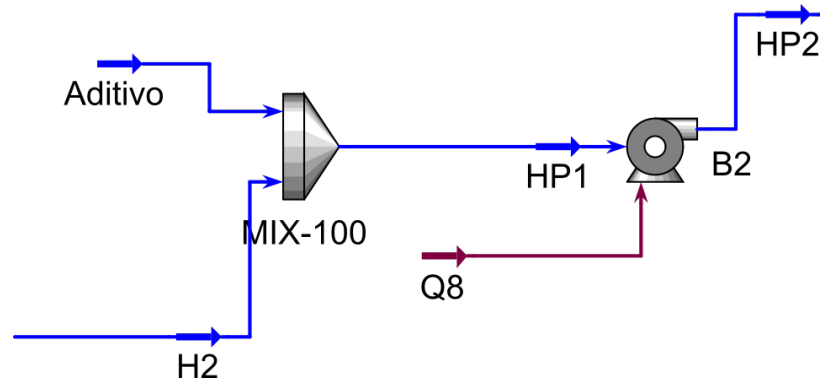


Figura 6. Mezclador

Aditivo: esta corriente consiste básicamente en la introducción en el mezclador de 2 kg/h de NaOH sólido a 20 °C y 1 atm de presión para que se mezcle con la corriente H2 anteriormente definida.

La corriente HP1 (Hidrocarburos purificados) sale del mezclador tras mezclarse con el NaOH con la siguiente composición y características:

COMPONENTE	FRACCION MOLAR
Decano	0,0271
C-12	0,0552
C-14	0,0594
C-16	0,0756
C-18	0,0865
C-20	0,0924
C-22	0,0958
C-24	0,1227
C-26	0,1113
C-28	0,1000
C-30	0,0250
Fenantreno	0,0052
Acenafteno	0,0010
Fluoreno	0,0024
Fluoranteno	0,0008
Pireno	0,0039
Criseno	0,0007
Naftaleno	0,0027
NaOH	0,1323

Tabla 11. Composición de la corriente “HP1”

Tras pasar por el mezclador, podemos observar que ahora la corriente contiene un 13,23 % de NaOH, que será eliminado en la siguiente columna y que ayudará a obtener mejores resultados como se verá en los siguientes apartados.

Temperatura [°C]	290,7
Presión [kPa]	101,3
Flujo másico [kg/h]	98,5

Tabla 12. Condiciones de la corriente “HP1”

La bomba “B2” empuja la corriente “HP1” hacia la segunda columna de destilación, tras la eliminación del agua, donde ya se obtendrá la primera muestra de combustible diésel. Para realizar dicho trabajo, la bomba recibe de “Q8” una potencia de $5,71094 \times 10^{-6}$ kW. Además, para el correcto funcionamiento de esta, se ha configurado con los siguientes parámetros:

Eficiencia [%]	75
Incremento de presión [kPa]	0,10000
Potencia [kJ/h]	0,02056
Capacidad [m ³ /h]	0,15420

Tabla 13. Parametros de la bomba “B2”

En cuanto a la **corriente “HP2”** al salir de la bomba “B2”, su composición y parámetros no se ven modificados a excepción de la presión que será de 101,4 kPa debido al incremento de la misma que se le aporta a la corriente para su impulsión hacia la segunda columna.

2.4. Segunda etapa: Obtención del diesel.

En esta columna y tras la eliminación del agua en la primera, el aceite se destilará para obtener los hidrocarburos con cadenas de carbono más largas, presentes en el combustible diésel. Una vez definida la corriente de entrada “HP2” a la segunda columna, se puede pasar a explicar el diseño de la misma, además de los elementos y corrientes existentes en esta etapa.

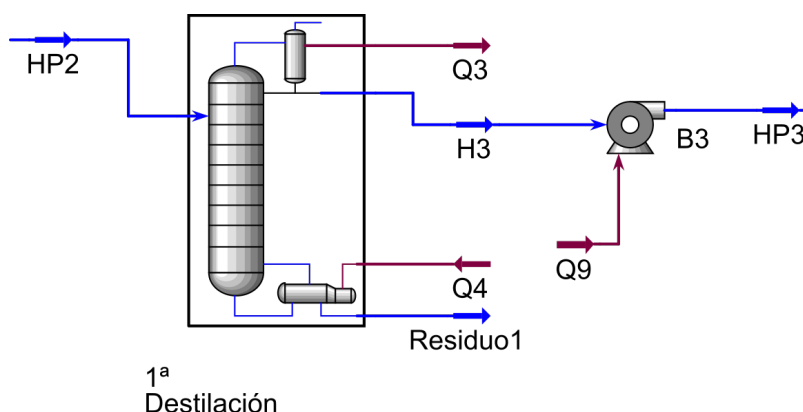


Figura 7. Primera etapa de la destilación

2ª Columna: como en la columna anterior, primero se establecen las corrientes de entrada y salida de la misma además de añadir las presiones al condensador y calentador y el número de platos de la columna. Los únicos datos que varían con respecto a la columna anterior son la tasa de reflujo, que en

el caso de esta columna se establece en un 90 % con el fin de eliminar los componentes más pesados que no interesan para la obtención del combustible, y el caudal de destilación que será de 89,10 kg/h. De esta columna, se obtiene ya un combustible válido.

La corriente “H3” que sale de la columna y que será propulsada hacia la 3ª columna para el refinamiento del combustible, tiene la siguiente composición y características.

COMPONENTE	FRACCION MOLAR
Decano	0,0330
C-12	0,0673
C-14	0,0726
C-16	0,0922
C-18	0,1056
C-20	0,1128
C-22	0,1169
C-24	0,1496
C-26	0,1333
C-28	0,0881
C-30	0,0086
Fenantreno	0,0063
Acenafteno	0,0013
Fluoreno	0,0029
Fluoranteno	0,0010
Pireno	0,0048
Criseno	0,0003
Naftaleno	0,0033
Benceno	0,0001

Tabla 14. Composición de la corriente “H3”

En esta corriente, se empieza a observar que la concentración de hidrocarburos aromáticos va disminuyendo lo cual favorecerá posteriormente a la composición del diésel.

Temperatura [°C]	294,4
Presión [kPa]	101,3
Flujo másico [kg/h]	89,1

Tabla 15. Condiciones de la corriente “H3”

La corriente “Residuo1” por otro lado, contiene los hidrocarburos de cadena más larga y que no son de interés para la obtención del diésel por lo que será desechada. La composición y condiciones de esta corriente son las que a continuación se exponen en la Tabla 16 y Tabla 17.

COMPONENTE	FRACCION MOLAR
C-22	0,0001
C-24	0,0008
C-26	0,0119
C-28	0,1541
C-30	0,0994
NaOH	0,7312
Pireno	0,0001
Criseno	0,0025

Tabla 16. Composición de la corriente “Residuo1”

Como se puede observar, el 70 % de la corriente “Residuo1” está compuesta por NaOH quedando eliminado por completo. Por otro lado, la eliminación de compuestos con largas cadenas de carbono es algo no deseado pero inevitable.

Temperatura [°C]	557,9
Presión [kPa]	101,3
Flujo másico [kg/h]	9,4

Tabla 17. Condiciones de la corriente “Residuo1”

El flujo de calor “Q3” procedente del condensador y cuya función se explica en el apartado anterior es de $7,435 \times 10^4$ kJ/h.

El flujo “Q4”, que es el flujo de calor que se debe aportar para elevar el aceite a la temperatura necesaria es de $9,037 \times 10^4$ kJ/h.

La bomba “B3” es, como en los apartados anteriores, la encargada de mover el fluido de una etapa a otra gracias a la potencia aportada por “Q9”, que en este caso es de $5,6 \times 10^{-6}$ kW. Los parámetros de la bomba son los que a continuación se exponen:

Eficiencia [%]	75
Incremento de presión [kPa]	0,10000
Potencia [kJ/h]	0,02015
Capacidad [m3/h]	0,15114

Tabla 18. Parámetros de la bomba “B3”

Al igual que en la salida del mezclador, la **corriente “HP3”** mantendrá su composición y condiciones a excepción de la presión que se verá incrementada en 0,1 kPa.

2.5. Tercera etapa: Refinamiento.

Como se demuestra en trabajos experimentales previos a este, es necesario la realización de una segunda destilación del aceite con el fin de obtener un combustible diésel más puro y con menos compuestos pesados y así mejorar ciertas propiedades del combustible que no cumplirían la reglamentación sobre dicho combustible como son la viscosidad y el color [19]. Tras lograr mejorar esas propiedades, el diésel cumpliría las especificaciones necesarias para ser usado en motores.

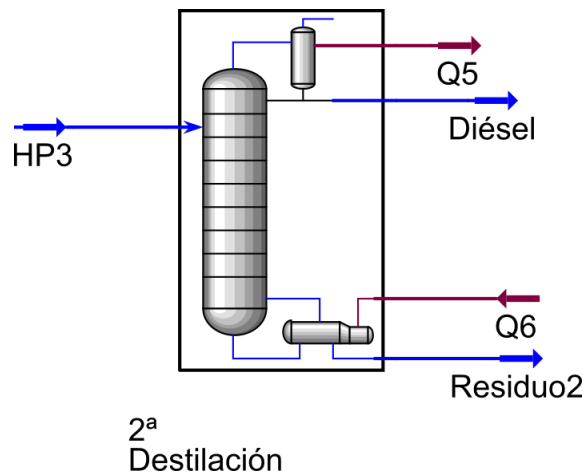


Figura 8. Segunda etapa de la destilación

3ª Columna: para el diseño de esta columna, se repiten los mismos pasos que en las anteriores fijando todas las corrientes entrantes y salientes de la misma, las presiones atmosféricas del condensador y calentador y por último, el número de platos de destilación necesarios. Como el resultado obtenido en la columna anterior ya era combustible, la única función de esta columna es la de purificarlo para cumplir ciertos requisitos como se ha explicado anteriormente. Para ello, se fija un valor bajo de tasa de reflujo, en torno al 10 %, mientras que en cuanto al caudal de destilación, buscamos que sea el máximo posible, fijándose este en 74,9 kg/h y obteniendo así la mayor cantidad posible de diésel.

Al igual que las columnas anteriores, también se dispone de un condensador y calentador donde se intercambia calor. En el caso del condensador, se extrae una cantidad de calor de $3,743 \times 10^4$ kJ/h a través de “Q5” para enfriar los gases procedentes de la destilación. El calentador por el contrario, requiere que se le aporte una cantidad de calor de $4,187 \times 10^4$ kJ/h por medio de “Q6”.

La corriente “Residuo2” sale de la columna para desecharse con la siguiente composición y condiciones:

COMPONENTE	FRACCION MOLAR
C-20	0,0003
C-22	0,0035
C-24	0,0456
C-26	0,3260
C-28	0,5573
C-30	0,0602
Fluoranteno	0,0003
Pireno	0,0047
Criseno	0,0021

Tabla 19. Composición de la corriente “Residuo2”

Como se puede observar en la composición, la mayor parte de esta corriente está constituida por los hidrocarburos más pesados de los presentes en el aceite inicial por lo que la purificación del combustible ha conseguido el efecto buscado.

Temperatura [°C]	442,0
Presión [kPa]	101,3
Flujo másico [kg/h]	14,2

Tabla 20. Condiciones de la corriente “Residuo2”

Por último, la corriente final obtenida es la denominada como **“Diésel”**. En la Tabla 21 y Tabla 22 queda reflejada la composición de la corriente obtenida además de las condiciones de salida de esta cuyos datos serán analizados en el apartado de Resultados.

COMPONENTE	FRACCION MOLAR
Decano	0,0375
C-12	0,0765
C-14	0,0825
C-16	0,1048
C-18	0,1200
C-20	0,1281
C-22	0,1324
C-24	0,1628
C-26	0,1070
C-28	0,0242
C-30	0,0016
Fenantreno	0,0072
Acenafteno	0,0014
Fluoreno	0,0033
Fluoranteno	0,0010
Pireno	0,0048
Naftaleno	0,0037
Benceno	0,0001

Tabla 21. Composición del diésel

Temperatura [°C]	286,9
Presión [kPa]	101,3
Flujo másico [kg/h]	74,9

Tabla 22. Condiciones del diésel

3.2.6 Vista global de la planta.

En la Figura 9 se puede ver un esquema completo de la planta donde se han diferenciado las cuatro partes donde se incluyen las tres etapas de destilación y el mezclador.

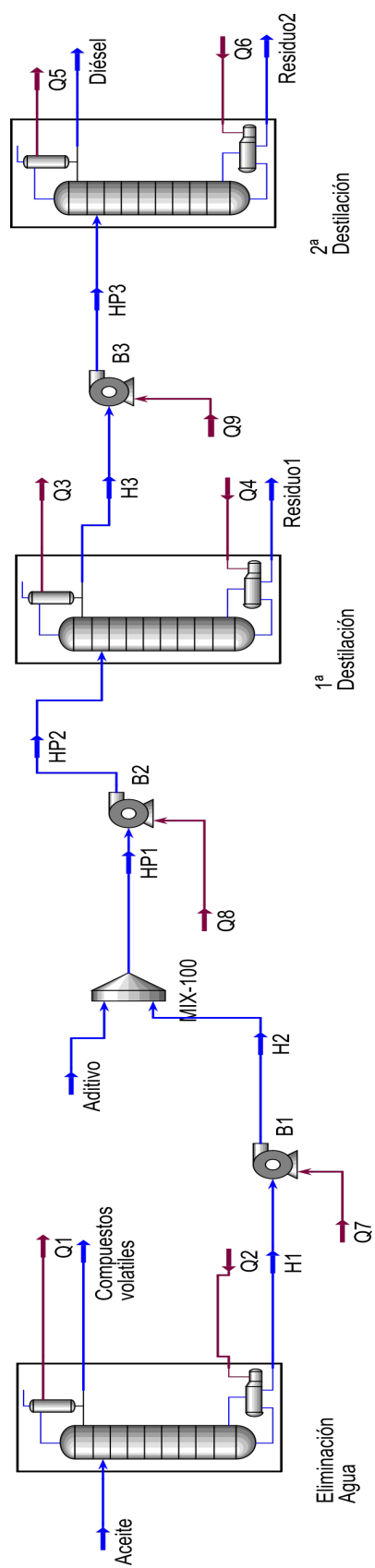


Figura 9. Vista global

3. Estudio económico

Para estudiar la viabilidad de la construcción de una planta de estas características en la Escuela Naval Militar, se presentará un breve presupuesto a modo orientativo, con los elementos principales que componen la instalación, el gasto energético que supone el uso de la misma y los consumibles que deben utilizarse como por ejemplo el aditivo usado.

A continuación se muestra una relación de precios y materiales:

EQUIPO	COSTE UNITARIO (€)
Bomba de aceite (5)	9.410
Mezclador	35.868
Tanque de aceite (900L)	1.074
Tanque de combustible (1000L)	2.774
Reactor (3)	65.524
Condensador (3)	4.667
Calentador (3)	1.000
COSTE TOTAL	300.339

Tabla 23. Relación de materiales y precios

El coste de los materiales necesarios para la construcción de la planta, se ha basado en precios obtenidos por CAPCOST[®] para un proyecto de fin de carrera de índole similar a la que ocupa este trabajo.

No se debe olvidar que la gestión del aceite usado procedente de la Escuela Naval, es llevada a cabo por una empresa subcontratada por el Arsenal de Ferrol y que debido al bajo nivel de producción de este residuo, la gestión es completamente gratuita. Por lo tanto, el motivo para llevar a cabo este proyecto, se basaría en la imagen proyectada hacia la sociedad y el afán de las Fuerzas Armadas de cumplir con todas las regulaciones medioambientales existentes sobre el tratamiento de residuos, siendo así un referente para el resto de instituciones públicas.

Por otro lado, aunque una inversión de esta magnitud no sea viable en la ENM, sí que podría tener mas sentido en los distintos Arsenales de la península donde la producción de residuos es mucho mayor.

4. Dimensionamiento y emplazamiento en la Escuela Naval Militar

En este apartado se tratará de encontrar lo que podría ser un buen emplazamiento para la planta de tratamiento de aceite motor usado dentro del recinto de la Escuela Naval. No debería suponer un reto importante el encontrar el lugar que cumpla con las regulaciones existentes y que sea adecuado para las características de la planta ya que la ENM cuenta con una gran cantidad de espacios abiertos.

Ya que las dimensiones de la planta no son excesivamente grandes y los materiales necesarios están contruidos en acero inoxidable, las posibilidades se amplían al poder localizarla en zonas cerca del mar ya que la planta debe quedar al aire libre para que se puedan extraer los gases generados en los diferentes procesos.

El lugar que más se ajusta a las necesidades existentes sería la zona noroeste de la Escuela Naval en las proximidades del CASI (Centro de Adiestramiento en Seguridad Interior). Esa zona es un espacio de

terreno ganado al mar donde se podrían anclar los elementos de la planta al suelo ya que el peso de esta no sería excesivo. Además, la existencia de instalaciones contraincendios en las proximidades mejora las condiciones de la instalación al tratar esta con productos altamente inflamables.

En la Figura 10 se puede observar una vista aérea de la zona elegida.



Figura 10. Vista aérea de la localización.

Además, en la Tabla 24 se especifican las medidas de los elementos principales de la planta. Todas las medidas a continuación expuestas han sido tomadas de distintos fabricantes teniendo en cuenta las especificaciones dadas por la simulación.

Componente	Medidas
Destilador	$\varnothing = 1,50 \text{ m}$ $h = 5 \text{ m}$
Mezclador	$\varnothing = 1 \text{ m}$ $h = 2,20 \text{ m}$
Calentador	$\varnothing = 1,20 \text{ m}$ $h = 1,80 \text{ m}$
Condensador	$\varnothing = 1,20 \text{ m}$ $h = 1,80 \text{ m}$
Tanque aceite	$l \times w \times h = 1,58 \text{ m} \times 0,96 \text{ m} \times 0,94 \text{ m}$ (Capacidad 900 L)
Tanque combustible	$l \times w \times h = 2,10 \text{ m} \times 1,10 \text{ m} \times 1,30 \text{ m}$ (Capacidad 1000 L)

Tabla 24. Medidas de los componentes de la planta

En la Figura 11, se puede ver un diagrama de cómo estaría distribuida la planta con las medidas de cada uno de los elementos siendo:

- T.A → Tanque de Aceite
- D → Columna de Destilación
- CA → Calentador
- CO → Condensador
- M → Mezclador
- T.D → Tanque de combustible Diésel

La construcción de la instalación requeriría un espacio vallado y techado de aproximadamente 90 m² dotado con un sistema de alumbrado y alimentación eléctrica para que los equipos puedan ser manipulados.

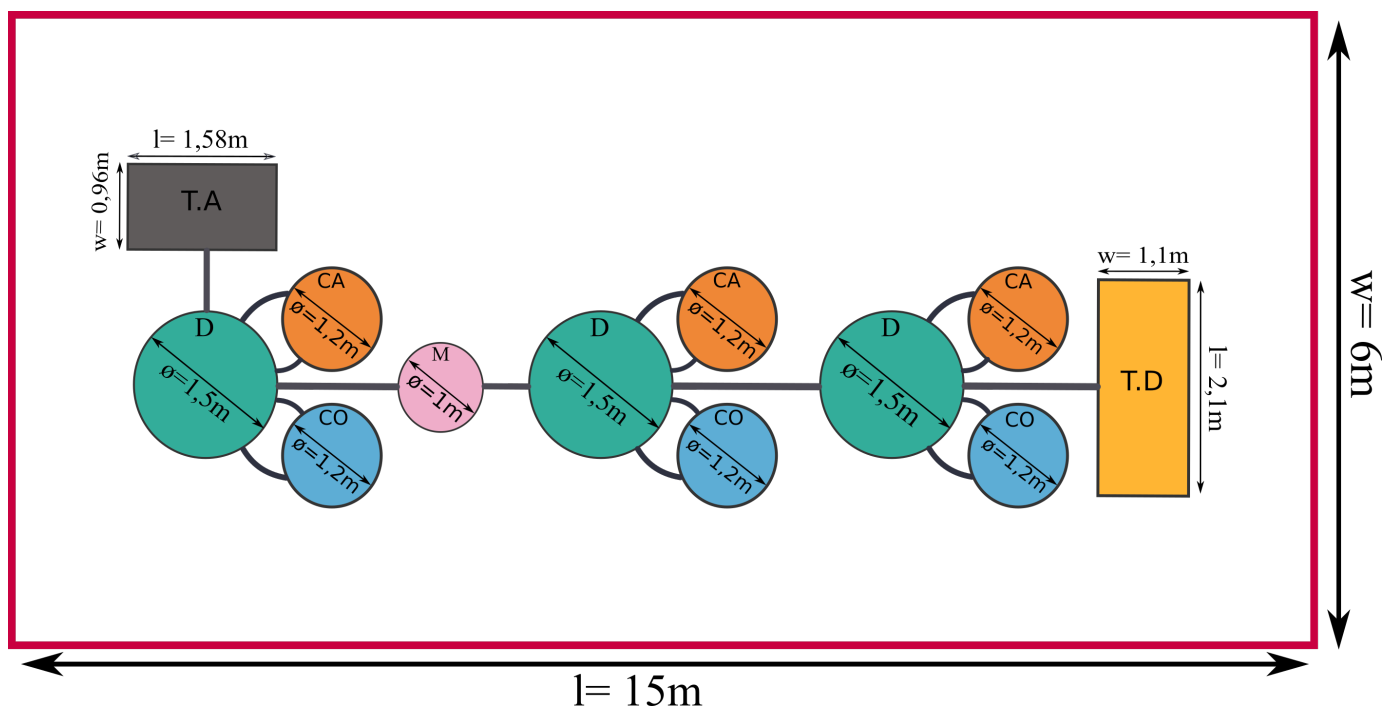


Figura 11. Diagrama de la planta

RESULTADOS

1. Análisis de resultados

En este apartado se comprobará si los resultados obtenidos a la salida de cada columna cumplen con los esperados en las diferentes etapas. Para ello se estudiará la composición de cada corriente hasta llegar al producto final obtenido.

1.1. Eliminación de compuestos volátiles.

En la Figura 12 se puede ver un gráfico de la composición de la corriente obtenida en la primera columna de destilación en la que se buscaba eliminar en su totalidad componentes como el agua o los elementos más volátiles que no interesan a la hora de obtener combustible diésel. Como se puede observar, la corriente no contiene absolutamente nada de agua y está compuesta principalmente por hidrocarburos saturados mientras que una mínima cantidad es de hidrocarburos aromáticos por lo que se puede afirmar que la primera etapa se ha realizado correctamente aportándonos una corriente de 96,5 kg/h de compuesto libre de agua.

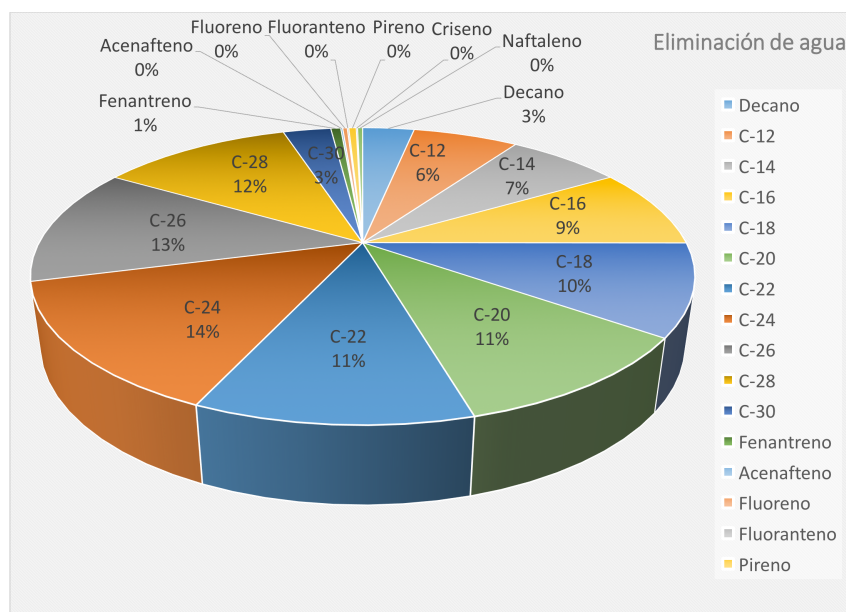


Figura 12. Eliminación de agua

1.2. Primera destilación del aceite.

Una vez la corriente sale de la primera columna libre de agua, entra en el mezclador para añadirle el aditivo y purificar el residuo. Al entrar en la segunda columna, se busca destilar dicho residuo para obtener la primera muestra de combustible diésel eliminándose todo el NaOH como producto de colas. Como se puede observar, se mantiene una baja concentración de hidrocarburos aromáticos lo que aportará al combustible unas mejores propiedades y mayor pureza. Además, en el anterior trabajo se comprobó que la presencia de este aditivo, mejoraba el índice de cetano, el cual mide la facilidad de inflamación de un combustible para un motor diésel [19].

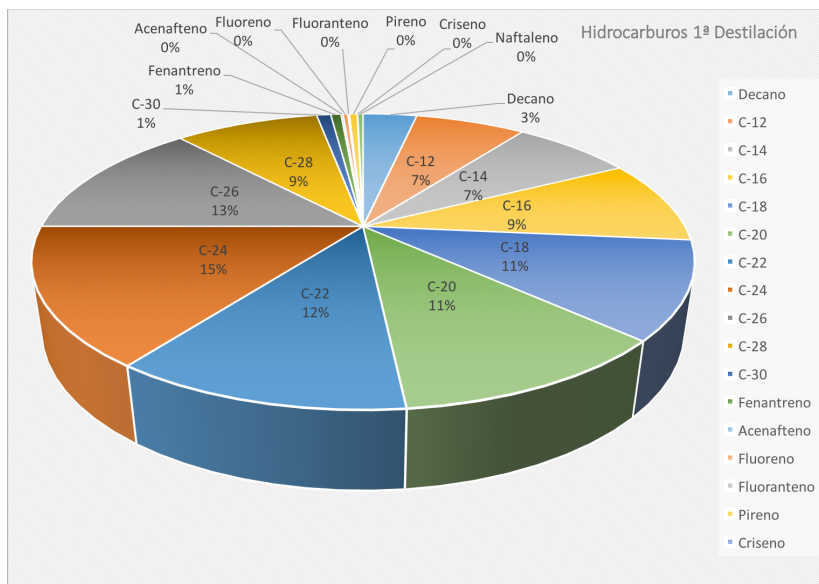


Figura 13. Resultado 1ª destilación

1.3. Segunda destilación del aceite.

Tras analizar y comparar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos en la fase experimental realizada anteriormente, se comprueba que los resultados son similares en cuanto a la composición del producto final, obteniéndose una alta concentración de hidrocarburos entre C-10 y C-28, siendo los más pesados los que presentan concentraciones más bajas, además de una concentración mínima de Benceno [19]. En la Figura 14 se puede observar de manera más gráfica la composición del diésel obtenido.

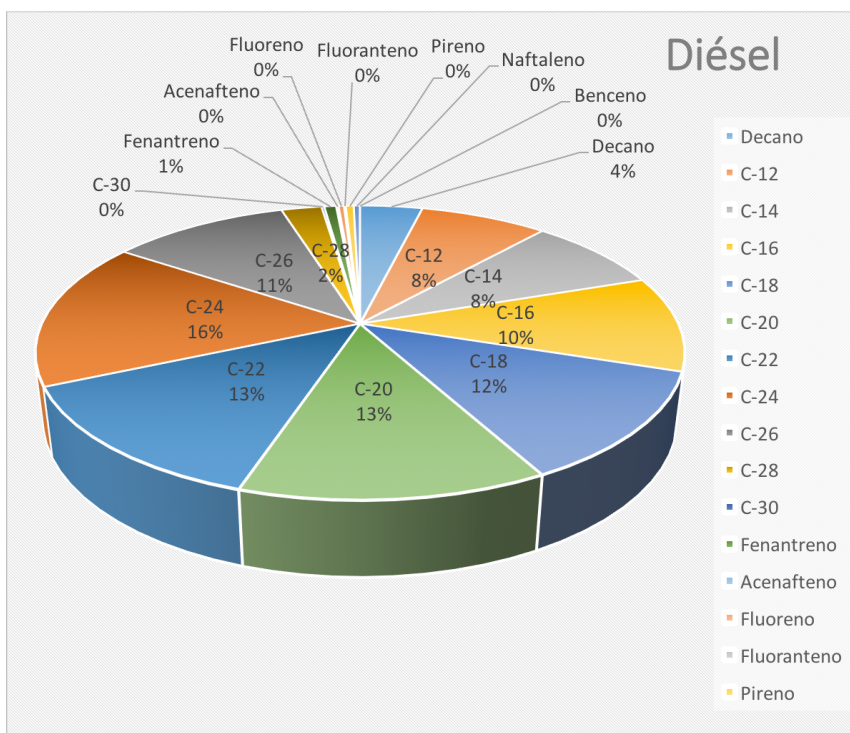


Figura 14. Composición del diésel

Por otro lado, la norma EN 590:2013 establece que los PAHs no deben sobrepasar una cantidad superior al 8 %. En el caso de los resultados obtenidos, los hidrocarburos saturados ocupan un 95 % de

la composición y los aromáticos tan solo un 5 % por lo que esta muestra de combustible sí cumpliría con la normativa en lo referente a este tema. Esta diferencia se puede deber a la presencia del aditivo que purifica la muestra durante la simulación. Este factor ayudará a conseguir mejorar ciertas propiedades para el cumplimiento de la normativa por lo que se puede afirmar que este resultado podría satisfacer los requerimientos legales establecidos y por tanto, ser válido para el uso en motores marinos y agrícolas tras haberse realizado los análisis pertinentes.

Para concluir, cabe recalcar que el rendimiento final obtenido de la planta ronda el 75 % lo cual es un resultado más que aceptable para una operación de estas características. Por tanto, basándonos en datos proporcionados por la Oficina de Gestión Ambiental de la Escuela Naval, tan sólo en 2015, se generaron 4000 litros de aceite. Con la presencia de una instalación de este tipo se podría reciclar dicha cantidad para obtener aproximadamente 3000 litros de combustible diésel

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

1. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado el diseño de una planta que permita la transformación de aceite usado de motor en diésel mediante el uso de software de simulación. Los resultados obtenidos permiten concluir que es posible realizar técnicamente dicha planta. Además esta simulación se ha adaptado a las condiciones específicas del aceite y del diésel obtenido, en base a resultados previos obtenidos en otro trabajo.

Por otra parte, se ha realizado un dimensionamiento de la planta para llevar a cabo el proceso así como un pequeño estudio económico en base a los equipos seleccionados. Para proceder a su posible implantación, se ha buscado un posible emplazamiento de la planta en la Escuela Naval Militar en base a las necesidades de la planta.

Por último, cabe destacar que la Escuela Naval Militar recoge anualmente 4000 litros de aceite que según el diseño presentado permitiría obtener 3000 litros de diésel. Según estos datos, es posible que una planta de estas características no fuese del todo rentable en un centro como este que genera unas cantidades de aceite usado de motor relativamente bajas, pero si este trabajo se extrapolase, en una escala mayor, a los principales arsenales de la península como son los de Ferrol, Cádiz y Cartagena, dividiendo esta en regiones donde las unidades de la Armada pueda enviar sus residuos, el beneficio tanto económico, por cuestiones de ahorro en la compra de combustible, como social, por la imagen desde el punto de vista medioambiental de cara al exterior que daría la Armada, podría ser enorme.

2. Líneas futuras

Para la posible continuación de este trabajo, se pueden proponer diferentes caminos que prosigan con la investigación sobre el amplio campo que abarca el tratamiento de residuos como el aceite.

- i. Adaptación de una planta de estas características a un buque mercante o similar para poder auto-gestionar sus propios residuos.
- ii. Estudio de viabilidad económica para la construcción de una planta de tratamiento de aceite en los arsenales de la Armada.
- iii. Continuación con la investigación de técnicas pirolíticas centrándose en técnicas innovadoras como las microondas o ultrasonidos.

A continuación se explicará, en líneas generales, el concepto buscado en cada una de estas proposiciones de líneas futuras:

2.1. Adaptación de una planta de estas características a un buque mercante o similar para poder auto-gestionar sus propios residuos

Este apartado se basaría básicamente en estudiar la posibilidad de instalar una planta de tratamiento de aceite usado en un buque de gran tamaño.

Para ello, se tratarían de buscar los componentes necesarios de dicha planta de un tamaño lo más reducido posible por las posibles limitaciones de espacio y además, estudiar la normativa y todo lo referente a la reglamentación existente en cuanto a residuos procedentes de barcos mercantes.

2.2. Estudio de viabilidad económica para la construcción de una planta de tratamiento de aceite en los Arsenales de la Armada.

Para continuar con la importancia que da la Armada al reciclaje y al cumplimiento de las normativas civiles en lo referente a dicho tema, se podría estudiar la viabilidad de la construcción de una planta de tratamiento de aceite procedente de motores navales en los principales Arsenales del país.

El gran número de barcos que suele haber en estos Arsenales, debe generar una gran cantidad de residuos de aceite al año por lo que la posibilidad de tratarlos y obtener combustible diésel de dichos residuos podría parecer algo rentable a primera vista.

2.3. Continuación con la investigación de técnicas pirolíticas como el uso de ondas microondas.

Como se ha podido deducir tras la finalización de este trabajo, las técnicas pirolíticas actuales tienen un gran potencial para el tratamiento de residuos porque como ya se ha dicho, ofrecen la posibilidad de recuperar gran parte del valor químico y energético contenido en los residuos. El problema con estas técnicas es que hoy en día no están suficientemente desarrolladas como para establecerlas como un método rentable para el tratamiento de desechos.

Con el trabajo experimental realizado anteriormente por el AF. Morales Yedra [TFG Morales] sobre la pirolisis tradicional, se podría partir ya de una base para continuar con la investigación de otras técnicas como puede ser la que emplea ondas microondas. Este método parece que podría obtener altos rendimientos por las pocas pérdidas de energía que existen en el proceso por lo que podría marcar un antes y un después en el reciclaje del aceite de motor usado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «euskalnet.net,» [En línea]. Available: <http://www.euskalnet.net/depuroilsa/Riesgosmedioambiente.html>.
- [2] «Euskalnet,» [En línea]. Available: <http://www.euskalnet.net/depuroilsa/Riesgosmedioambiente.html>.
- [3] «BOE,» [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2006/06/03/pdfs/A21061-21070.pdf>.
- [4] «BOE,» [En línea]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1988-18848.
- [5] «BOE,» [En línea]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1986-12192.
- [6] «BOE,» [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1999-82373>.
- [7] S. Shiung Lam, «A review on waste to energy processes using microwave pyrolysis,» 2012.
- [8] K. Naima, «Waste oils as alternative fuel for diesel engine: A review,» 2013.
- [9] O. Arpa, «Production of diesel-like fuel from waste engine oil by pyrolytic distillation,» 2009.
- [10] K. O., «Gasolina y diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares,» 2003.
- [11] T. Mason, «Theory, Applications and Uses of Ultrasound in Chemistry.,» 1988.
- [12] M. Margulis, «Ultrasonics,» p. 1992.
- [13] Y. M. Zhorov, «Thermodynamics of Petrochemical Processes,» 1987.
- [14] F. Cataldo, «Ultrasound-induced cracking and pyrolysis of some aromatic and naphthenic hydrocarbons,» 1999.
- [15] A. D. Russell, «Microwave pyrolysis, a novel process for recycling waste automotive engine oil,» 2010.
- [16] C. Wongkhorsub, «A comparison of the use of pyrolysis oils in diesel engine,» 2012.
- [17] B. K. Sharma, «Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags,» 2014.
- [18] M. C. Sharma, «Production of alternative diesel fuel from waste oils and comparison with fresh diesel:- A review,» 2014.
- [19] F. J. Moráles Yedra, Obtención de diésel a partir de aceite usado de buques, 2015.

ANEXO I: CONTENIDO DEL PRIMER ANEXO

1	 LEGENDS Burlington, MA USA			Case Name: COLUMNACONADITIVO.HSC		
2				Unit Set: SI		
3				Date/Time: Wed Mar 02 19:32:51 2016		
4						
5						
6	Workbook: Case (Main) (continued)					
7						
8						
9						
10	Compositions (continued)				Fluid Pkg:	All
11	Name	Aditivo	HP1	Diésel	Residuo2	H2
12	Comp Mole Frac (n-Decane)	0.0000 *	0.0271	0.0375	0.0000	0.0312
13	Comp Mole Frac (n-C12)	0.0000 *	0.0552	0.0765	0.0000	0.0636
14	Comp Mole Frac (n-C14)	0.0000 *	0.0594	0.0825	0.0000	0.0685
15	Comp Mole Frac (n-C16)	0.0000 *	0.0756	0.1048	0.0000	0.0871
16	Comp Mole Frac (Na2CO3*)	***	***	***	***	***
17	Comp Mole Frac (n-C18)	0.0000 *	0.0865	0.1200	0.0000	0.0997
18	Comp Mole Frac (n-C20)	0.0000 *	0.0924	0.1281	0.0003	0.1064
19	Comp Mole Frac (n-C22)	0.0000 *	0.0958	0.1324	0.0035	0.1104
20	Comp Mole Frac (n-C24)	0.0000 *	0.1227	0.1638	0.0456	0.1414
21	Comp Mole Frac (n-C26)	0.0000 *	0.1113	0.1070	0.3260	0.1283
22	Comp Mole Frac (n-C30)	0.0000 *	0.0250	0.0016	0.0602	0.0289
23	Comp Mole Frac (n-C28)	0.0000 *	0.1000	0.0242	0.5573	0.1153
24	Comp Mole Frac (NaOH)	1.0000 *	0.1323	0.0000	0.0000	0.0000
25	Comp Mole Frac (Phenanthrene)	0.0000 *	0.0052	0.0072	0.0000	0.0060
26	Comp Mole Frac (Benzene)	0.0000 *	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
27	Comp Mole Frac (Acenaphthene)	0.0000 *	0.0010	0.0014	0.0000	0.0012
28	Comp Mole Frac (Fluorene)	0.0000 *	0.0024	0.0033	0.0000	0.0028
29	Comp Mole Frac (Pyrene)	0.0000 *	0.0039	0.0048	0.0047	0.0045
30	Comp Mole Frac (Chrysene)	0.0000 *	0.0007	0.0000	0.0021	0.0008
31	Comp Mole Frac (Fluoranthene)	0.0000 *	0.0008	0.0010	0.0003	0.0009
32	Comp Mole Frac (Naphthalene)	0.0000 *	0.0027	0.0037	0.0000	0.0031
33	Comp Mole Frac (H2O)	0.0000 *	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34	Name	HP2	HP3			
35	Comp Mole Frac (n-Decane)	0.0271	0.0330			
36	Comp Mole Frac (n-C12)	0.0552	0.0673			
37	Comp Mole Frac (n-C14)	0.0594	0.0726			
38	Comp Mole Frac (n-C16)	0.0756	0.0922			
39	Comp Mole Frac (Na2CO3*)	***	***			
40	Comp Mole Frac (n-C18)	0.0865	0.1056			
41	Comp Mole Frac (n-C20)	0.0924	0.1128			
42	Comp Mole Frac (n-C22)	0.0958	0.1169			
43	Comp Mole Frac (n-C24)	0.1227	0.1496			
44	Comp Mole Frac (n-C26)	0.1113	0.1333			
45	Comp Mole Frac (n-C30)	0.0250	0.0086			
46	Comp Mole Frac (n-C28)	0.1000	0.0881			
47	Comp Mole Frac (NaOH)	0.1323	0.0000			
48	Comp Mole Frac (Phenanthrene)	0.0052	0.0063			
49	Comp Mole Frac (Benzene)	0.0000	0.0001			
50	Comp Mole Frac (Acenaphthene)	0.0010	0.0013			
51	Comp Mole Frac (Fluorene)	0.0024	0.0029			
52	Comp Mole Frac (Pyrene)	0.0039	0.0048			
53	Comp Mole Frac (Chrysene)	0.0007	0.0003			
54	Comp Mole Frac (Fluoranthene)	0.0008	0.0010			
55	Comp Mole Frac (Naphthalene)	0.0027	0.0033			
56	Comp Mole Frac (H2O)	0.0000	0.0000			
57						
58	Energy Streams				Fluid Pkg:	All
59	Name	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
60	Heat Flow (kJ/h)	1554	7.435e+004	7.927e+004	9.037e+004	3.743e+004
61	Name	Q6	Q7	Q8	Q9	
62	Heat Flow (kJ/h)	4.187e+004	2.184e-002	2.056e-002	2.015e-002	
63						
64	Unit Ops					
65	Operation Name	Operation Type	Feeds	Products	Ignored	Calc Level
66	Eliminación Agua	Distillation	Aceite	H1	No	2500 *
67			Q2	Compuestos volatiles		
68			Q1			
69	Aspen Technology Inc. Aspen HYSYS Version 7.2 (24.0.0.7263) Page 2 of 8					

1	 LEGENDS Burlington, MA USA			Case Name: COLUMNACONADITIVO.HSC		
2				Unit Set: SI		
3				Date/Time: Wed Mar 02 19:32:51 2016		
4						
5						
6	Workbook: Case (Main) (continued)					
7						
8						
9	Unit Ops (continued)					
10						
11	Operation Name	Operation Type	Feeds	Products	Ignored	Calc Level
12	1ª Destilación	Distillation	HP2	Residuo1	No	2500 *
13			Q4	H3		
14				Q3		
15	2ª Destilación	Distillation	HP3	Residuo2	No	2500 *
16			Q6	Diésel		
17				Q5		
18	MIX-100	Mixer	Aditivo	HP1	No	500.0 *
19			H2			
20	B1	Pump	H1	H2	No	500.0 *
21			Q7			
22	B2	Pump	HP1	HP2	No	500.0 *
23			Q8			
24	B3	Pump	H3	HP3	No	500.0 *
25			Q9			
26	Workbook: Eliminación Agua (COL1)					
27						
28						
29	Material Streams					
30					Fluid Pkg:	All
31	Name	Reflux @COL1	To Condenser @COL	Boilup @COL1	To Reboiler @COL1	1 @COL1
32	Vapour Fraction	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000
33	Temperature (C)	142.8	181.8	297.9	227.4	142.8
34	Pressure (kPa)	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3
35	Molar Flow (kgmole/h)	2.675e-003	2.943e-002	0.6459	0.9738	2.675e-002
36	Mass Flow (kg/h)	0.3502	3.853	122.6	219.1	3.502
37	Liquid Volume Flow (m3/h)	4.697e-004	5.167e-003	0.1604	0.2815	4.697e-003
38	Heat Flow (kJ/h)	-638.4	-5468	-1.269e+005	-3.137e+005	-6384
39	Name	2 @COL1	4 @COL1			
40	Vapour Fraction	0.0000	0.0000			
41	Temperature (C)	297.9	20.00			
42	Pressure (kPa)	101.3	101.3			
43	Molar Flow (kgmole/h)	0.3279	0.3546			
44	Mass Flow (kg/h)	96.50	100.0			
45	Liquid Volume Flow (m3/h)	0.1212	0.1259			
46	Heat Flow (kJ/h)	-1.125e+005	-1.916e+005			
47						
48						
49						
50						
51						
52						
53						
54						
55						
56						
57						
58						
59						
60						
61						
62						
63						
64						
65						
66						
67						
68						
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 7.2 (24.0.0.7263)		Page 3 of 8	
	Licensed to: LEGENDS				* Specified by user.	

1	 LEGENDS Burlington, MA USA			Case Name: COLUMNACONADITIVO.HSC		
2				Unit Set: SI		
3				Date/Time: Wed Mar 02 19:32:51 2016		
4						
5						
6						
7	Workbook: Eliminación Agua (COL1) (continued)					
8						
9						
10	Compositions				Fluid Pkg:	All
11	Name	Reflux @COL1	To Condenser @COL	Boilup @COL1	To Reboiler @COL1	1 @COL1
12	Comp Mole Frac (n-Decane)	0.6948	0.6948	0.2775	0.1945	0.6948
13	Comp Mole Frac (n-C12)	0.1251	0.1251	0.2896	0.2135	0.1251
14	Comp Mole Frac (n-C14)	0.0101	0.0101	0.1531	0.1246	0.0101
15	Comp Mole Frac (n-C16)	0.0009	0.0009	0.1060	0.0996	0.0009
16	Comp Mole Frac (Na2CO3*)	***	***	***	***	***
17	Comp Mole Frac (n-C18)	0.0000	0.0000	0.0664	0.0776	0.0000
18	Comp Mole Frac (n-C20)	0.0000	0.0000	0.0371	0.0605	0.0000
19	Comp Mole Frac (n-C22)	0.0000	0.0000	0.0216	0.0515	0.0000
20	Comp Mole Frac (n-C24)	0.0000	0.0000	0.0147	0.0573	0.0000
21	Comp Mole Frac (n-C26)	0.0000	0.0000	0.0073	0.0480	0.0000
22	Comp Mole Frac (n-C30)	0.0000	0.0000	0.0011	0.0105	0.0000
23	Comp Mole Frac (n-C28)	0.0000	0.0000	0.0037	0.0413	0.0000
24	Comp Mole Frac (NaOH)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	Comp Mole Frac (Phenanthrene)	0.0000	0.0000	0.0024	0.0036	0.0000
26	Comp Mole Frac (Benzene)	0.0808	0.0808	0.0014	0.0009	0.0808
27	Comp Mole Frac (Acenaphthene)	0.0000	0.0000	0.0016	0.0014	0.0000
28	Comp Mole Frac (Fluorene)	0.0000	0.0000	0.0025	0.0026	0.0000
29	Comp Mole Frac (Pyrene)	0.0000	0.0000	0.0006	0.0019	0.0000
30	Comp Mole Frac (Chrysene)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000
31	Comp Mole Frac (Fluoranthene)	0.0000	0.0000	0.0002	0.0004	0.0000
32	Comp Mole Frac (Naphthalene)	0.0056	0.0056	0.0121	0.0091	0.0056
33	Comp Mole Frac (H2O)	0.0826	0.0826	0.0011	0.0007	0.0826
34	Name	2 @COL1	4 @COL1			
35	Comp Mole Frac (n-Decane)	0.0312	0.0813			
36	Comp Mole Frac (n-C12)	0.0636	0.0682			
37	Comp Mole Frac (n-C14)	0.0685	0.0641			
38	Comp Mole Frac (n-C16)	0.0871	0.0806			
39	Comp Mole Frac (Na2CO3*)	***	***			
40	Comp Mole Frac (n-C18)	0.0997	0.0922			
41	Comp Mole Frac (n-C20)	0.1064	0.0984			
42	Comp Mole Frac (n-C22)	0.1104	0.1020			
43	Comp Mole Frac (n-C24)	0.1414	0.1307			
44	Comp Mole Frac (n-C26)	0.1283	0.1186			
45	Comp Mole Frac (n-C30)	0.0289	0.0267			
46	Comp Mole Frac (n-C28)	0.1153	0.1066			
47	Comp Mole Frac (NaOH)	0.0000	0.0000			
48	Comp Mole Frac (Phenanthrene)	0.0060	0.0055			
49	Comp Mole Frac (Benzene)	0.0000	0.0061			
50	Comp Mole Frac (Acenaphthene)	0.0012	0.0011			
51	Comp Mole Frac (Fluorene)	0.0028	0.0025			
52	Comp Mole Frac (Pyrene)	0.0045	0.0042			
53	Comp Mole Frac (Chrysene)	0.0008	0.0007			
54	Comp Mole Frac (Fluoranthene)	0.0009	0.0008			
55	Comp Mole Frac (Naphthalene)	0.0031	0.0033			
56	Comp Mole Frac (H2O)	0.0000	0.0063			
57						
58	Energy Streams				Fluid Pkg:	All
59	Name	Q1 @COL1	Q2 @COL1			
60	Heat Flow (kJ/h)	1554	7.435e+004			
61						
62	Unit Ops					
63	Operation Name	Operation Type	Feeds	Products	Ignored	Calc Level
64	Reboiler @COL1	Reboiler	To Reboiler @COL1	2 @COL1	No	500.0 *
65			Q2 @COL1	Boilup @COL1		
66	Main TS @COL1	Tray Section	Reflux @COL1	To Reboiler @COL1	No	500.0 *
67			Boilup @COL1	To Condenser @COL1		
68			4 @COL1			
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 7.2 (24.0.0.7263)			Page 4 of 8

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

aspentech

LEGENDS
Burlington, MA
USA

Case Name: COLUMNACONADITIVO.HSC

Unit Set: SI

Date/Time: Wed Mar 02 19:32:51 2016

Workbook: 1ª Destilación (COL2) (continued)

Compositions (continued)

Fluid Pkg: All

Name	5 @COL2	HidrocarburosPurifica			
Comp Mole Frac (n-Decane)	0.0000	0.0271			
Comp Mole Frac (n-C12)	0.0000	0.0552			
Comp Mole Frac (n-C14)	0.0000	0.0594			
Comp Mole Frac (n-C16)	0.0000	0.0756			
Comp Mole Frac (Na2CO3*)	***	***			
Comp Mole Frac (n-C18)	0.0000	0.0865			
Comp Mole Frac (n-C20)	0.0000	0.0924			
Comp Mole Frac (n-C22)	0.0001	0.0958			
Comp Mole Frac (n-C24)	0.0008	0.1227			
Comp Mole Frac (n-C26)	0.0119	0.1113			
Comp Mole Frac (n-C30)	0.0994	0.0250			
Comp Mole Frac (n-C28)	0.1541	0.1000			
Comp Mole Frac (NaOH)	0.7312	0.1323			
Comp Mole Frac (Phenanthrene)	0.0000	0.0052			
Comp Mole Frac (Benzene)	0.0000	0.0000			
Comp Mole Frac (Acenaphthene)	0.0000	0.0010			
Comp Mole Frac (Fluorene)	0.0000	0.0024			
Comp Mole Frac (Pyrene)	0.0001	0.0039			
Comp Mole Frac (Chrysene)	0.0025	0.0007			
Comp Mole Frac (Fluoranthene)	0.0000	0.0008			
Comp Mole Frac (Naphthalene)	0.0000	0.0027			
Comp Mole Frac (H2O)	0.0000	0.0000			

Energy Streams

Fluid Pkg: All

Name	Q3 @COL2	Q4 @COL2			
Heat Flow (kJ/h)	7.927e+004	9.037e+004			

Unit Ops

Operation Name	Operation Type	Feeds	Products	Ignored	Calc Level
Reboiler @COL2	Reboiler	To Reboiler @COL2	5 @COL2	No	500.0 *
		Q4 @COL2	Boilup @COL2		
Main TS @COL2	Tray Section	Reflux @COL2	To Reboiler @COL2	No	500.0 *
		Boilup @COL2	To Condenser @COL2		
		HidrocarburosPurificados2 @			
Condenser @COL2	Total Condenser	To Condenser @COL2	3 @COL2	No	500.0 *
		Q3 @COL2	Reflux @COL2		
			Q3 @COL2		

Workbook: 2ª Destilación (COL3)

Material Streams

Fluid Pkg: All

Name	Reflux @COL3	To Condenser @COL	Boilup @COL3	To Reboiler @COL3	6 @COL3
Vapour Fraction	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000
Temperature (C)	286.9	366.5	422.0	418.3	286.9
Pressure (kPa)	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3
Molar Flow (kgmole/h)	2.724e-002	0.2996	0.5980	0.6351	0.2724
Mass Flow (kg/h)	7.490	82.39	225.9	240.1	74.90
Liquid Volume Flow (m3/h)	9.447e-003	0.1039	0.2795	0.2971	9.447e-002
Heat Flow (kJ/h)	-9072	-6.235e+004	-1.207e+005	-1.726e+005	-9.072e+004

Aspen Technology Inc.

Aspen HYSYS Version 7.2 (24.0.0.7263)

Page 6 of 8

Licensed to: LEGENDS

* Specified by user.

1	 LEGENDS Burlington, MA USA			Case Name: COLUMNACONADITIVO.HSC		
2				Unit Set: SI		
3				Date/Time: Wed Mar 02 19:32:51 2016		
4						
5						
6						
7	Workbook: 2ª Destilación (COL3) (continued)					
8						
9						
10	Material Streams (continued)				Fluid Pkg:	All
11	Name	7 @COL3	HP3 @COL3			
12	Vapour Fraction	0.0000	0.0000			
13	Temperature (C)	422.0	294.4			
14	Pressure (kPa)	101.3	101.4			
15	Molar Flow (kgmole/h)	3.709e-002	0.3095			
16	Mass Flow (kg/h)	14.21	89.11			
17	Liquid Volume Flow (m3/h)	1.757e-002	0.1120			
18	Heat Flow (kJ/h)	-1.001e+004	-1.052e+005			
19						
20	Compositions				Fluid Pkg:	All
21	Name	Reflux @COL3	To Condenser @COL	Boilup @COL3	To Reboiler @COL3	6 @COL3
22	Comp Mole Frac (n-Decane)	0.0375	0.0375	0.0000	0.0000	0.0375
23	Comp Mole Frac (n-C12)	0.0765	0.0765	0.0000	0.0000	0.0765
24	Comp Mole Frac (n-C14)	0.0825	0.0825	0.0000	0.0000	0.0825
25	Comp Mole Frac (n-C16)	0.1048	0.1048	0.0000	0.0000	0.1048
26	Comp Mole Frac (Na2CO3*)	***	***	***	***	***
27	Comp Mole Frac (n-C18)	0.1200	0.1200	0.0001	0.0001	0.1200
28	Comp Mole Frac (n-C20)	0.1281	0.1281	0.0010	0.0009	0.1281
29	Comp Mole Frac (n-C22)	0.1324	0.1324	0.0090	0.0086	0.1324
30	Comp Mole Frac (n-C24)	0.1638	0.1638	0.0815	0.0794	0.1638
31	Comp Mole Frac (n-C26)	0.1070	0.1070	0.3958	0.3918	0.1070
32	Comp Mole Frac (n-C30)	0.0016	0.0016	0.0401	0.0413	0.0016
33	Comp Mole Frac (n-C28)	0.0242	0.0242	0.4641	0.4696	0.0242
34	Comp Mole Frac (NaOH)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
35	Comp Mole Frac (Phenanthrene)	0.0072	0.0072	0.0001	0.0001	0.0072
36	Comp Mole Frac (Benzene)	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001
37	Comp Mole Frac (Acenaphthene)	0.0014	0.0014	0.0000	0.0000	0.0014
38	Comp Mole Frac (Fluorene)	0.0033	0.0033	0.0000	0.0000	0.0033
39	Comp Mole Frac (Pyrene)	0.0048	0.0048	0.0063	0.0062	0.0048
40	Comp Mole Frac (Chrysene)	0.0000	0.0000	0.0013	0.0014	0.0000
41	Comp Mole Frac (Fluoranthene)	0.0010	0.0010	0.0005	0.0005	0.0010
42	Comp Mole Frac (Naphthalene)	0.0037	0.0037	0.0000	0.0000	0.0037
43	Comp Mole Frac (H2O)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
44	Name	7 @COL3	HP3 @COL3			
45	Comp Mole Frac (n-Decane)	0.0000	0.0330			
46	Comp Mole Frac (n-C12)	0.0000	0.0673			
47	Comp Mole Frac (n-C14)	0.0000	0.0726			
48	Comp Mole Frac (n-C16)	0.0000	0.0922			
49	Comp Mole Frac (Na2CO3*)	***	***			
50	Comp Mole Frac (n-C18)	0.0000	0.1056			
51	Comp Mole Frac (n-C20)	0.0003	0.1128			
52	Comp Mole Frac (n-C22)	0.0035	0.1169			
53	Comp Mole Frac (n-C24)	0.0456	0.1496			
54	Comp Mole Frac (n-C26)	0.3260	0.1333			
55	Comp Mole Frac (n-C30)	0.0602	0.0086			
56	Comp Mole Frac (n-C28)	0.5573	0.0881			
57	Comp Mole Frac (NaOH)	0.0000	0.0000			
58	Comp Mole Frac (Phenanthrene)	0.0000	0.0063			
59	Comp Mole Frac (Benzene)	0.0000	0.0001			
60	Comp Mole Frac (Acenaphthene)	0.0000	0.0013			
61	Comp Mole Frac (Fluorene)	0.0000	0.0029			
62	Comp Mole Frac (Pyrene)	0.0047	0.0048			
63	Comp Mole Frac (Chrysene)	0.0021	0.0003			
64	Comp Mole Frac (Fluoranthene)	0.0003	0.0010			
65	Comp Mole Frac (Naphthalene)	0.0000	0.0033			
66	Comp Mole Frac (H2O)	0.0000	0.0000			
67						
68						
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 7.2 (24.0.0.7263)		Page 7 of 8	

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

<