



**Universidad**  
**Zaragoza**

## Trabajo Fin de Máster

Diseño de una Columna de Destilación a Vacío para Separar Biodiesel (FAME's) con Vistas a la Producción de Bioqueroseno para Aviación.

Autor/es

**Claudia Ivette Mejía Parra**

Director/es

Dr. Laureano Canoira López

Dr. Francisco Javier Royo Herrero

Escuela de Ingeniería y Arquitectura / Universidad de Zaragoza

2012

# Diseño de una Columna de Destilación a Vacío para Separar Biodiesel (FAME's) con Vistas a la Producción de Bioqueroseno para Aviación.

## RESUMEN

El transporte aéreo es uno de los sectores de mayor expansión y es blanco de numerosos informes sobre emisiones de gases de efecto invernadero, según datos de la Asociación Internacional del Transporte Aéreo IATA, el tráfico aéreo mundial crecerá alrededor de un 4,5 % anual hasta el 2050. Este incremento de la actividad se traducirá, consecuentemente, en un aumento del consumo de combustible de aviación y de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por ello es evidente la búsqueda de nuevos combustibles de aviación más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. El primer paso para producir un queroseno de mejor comportamiento desde el punto de vista ambiental es la reducción de su contenido de azufre, aunque continúe tratándose de un combustible no renovable, un menor contenido de azufre reducirá las emisiones de óxidos de azufre. La segunda aproximación a nuevos combustibles son los combustibles sintéticos no renovables, son combustibles derivados de otras fuentes de energía distintas al petróleo, principalmente gas y carbón. La tercera aproximación a nuevas alternativas de combustibles para aviación son los biocombustibles en concreto biocombustibles de segunda generación. Se trata de biocombustibles producidos a partir de aceites vegetales, como el biodiesel. Estos combustibles son conocidos como ésteres grasos o ácidos grasos hidroprocesados **HEFA's** y normas internacionales, tal como la ASTM D7566 permite su uso en mezclas de hasta el 50%.

El presente proyecto se centra en la destilación de tres tipos ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) provenientes del aceite de coco, palmiste y babasú, las propiedades de los FAME's dependen del tipo de materia prima debido al rango de compuestos que los constituyen que varían de C8:0 a C20:0. La destilación a vacío tiene el principal objetivo de obtener una fracción ligera similar al queroseno que denominamos *bioqueroseno*, comprendida en un rango de C8:0 a C14:0 sin producir la descomposición de los FAME's. Aunque la norma ASTM D7566 limita el contenido en FAME a menos de 5 ppm, estudios recientes han demostrado que la mezcla de este bioqueroseno con combustible fósil Jet-A1 en proporción de hasta 10% v/v no altera negativamente las propiedades del Jet A-1. La simulación realizada en el programa PRO/II del proceso de destilación a vacío reproduce con buena concordancia los resultados de destilación experimentales para los tres bioquerosenos de coco, palmiste y babasú ensayados. Es así mismo destacable el hecho de que la mayoría de los FAME's utilizados en la simulación no se hallaban en la base de datos del programa PRO/II, por lo que ha sido necesaria la estimación de sus propiedades fijas y dependientes de la temperatura mediante el programa *PhysProps*, encontrándose una buena correlación entre dichas propiedades estimadas y las publicadas en la literatura.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

1.	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1.	Objetivos .....	4
2.	<b>COMBUSTIBLES EN EL SECTOR DE AVIACIÓN</b> .....	5
2.1.	Combustibles Alternativos .....	5
2.1.1.	Combustibles de origen fósil .....	6
2.1.2.	Combustibles de origen renovable .....	6
2.2.	Normativa y Estándares .....	9
2.3.	Antecedentes del Uso de Biocombustibles en Aviación .....	10
3.	<b>PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS FAME's</b> .....	15
3.1.	Babasú ( <i>Orbygnya martiana</i> ) .....	15
3.2.	Palmiste ( <i>Elaeis guineensis L</i> ) .....	16
3.3.	Coco ( <i>Cocos nucifera</i> ) .....	18
4.	<b>DESTILACIÓN A VACÍO DE LOS FAME's</b> .....	20
4.1.	Aspectos Generales sobre Destilación .....	20
4.2.	Paquete de simulación PRO/II .....	22
4.3.	Trabajos Experimentales en Destilación de FAME's .....	23
5.	<b>DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN</b> .....	26
5.1.	Evaluación de las Propiedades de los FAME's .....	26
5.2.	Evaluación de las Condiciones de Operación .....	32
5.3.	Metodología de Cálculo en el Software de Simulación Procesos de Ingeniería PRO/II. ....	35
5.3.1.	Planteamiento del problema .....	35
5.3.2.	Metodología de solución .....	35
6.	<b>RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b> .....	47
6.1.	Columna de Destilación FAME de Coco .....	47
6.2.	Columna de Destilación FAME de Palmiste .....	47
6.3.	Columna de Destilación FAME de Babasu .....	58
7.	<b>NOMENCLATURA</b> .....	66
8.	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	67
9.	<b>ANEXOS</b> .....	69
9.1.	Propiedades Dependientes de la Temperatura .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

---

<b>Figura 1.1.-</b> Reacción de transesterificación. ....	3
<b>Figura 1.2.-</b> Rangos de destilación de combustibles de aviación y automoción [4] .....	3
<b>Figura 3.1.-</b> Attalea speciosa, babasú. Porte y fruto entero. ....	15
<b>Figura 3.2.-</b> Palma Eleais guineensis y fruto. ....	16
<b>Figura 3.3.-</b> Palma de coco (Cocos Nucifera) y fruto. ....	18
<b>Figura 4.1.-</b> Esquema de una columna de destilación. ....	21
<b>Figura 5.1.-</b> Comparativa del punto normal de ebullición obtenido de la base de datos del programa PhysProps y del obtenido del artículo de referencia. ....	30
<b>Figura 5.2.-</b> Comparativa de la temperatura crítica obtenida de la base de datos del programa PhysProps y de la obtenida del artículo de referencia. ....	30
<b>Figura 5.3.-</b> Comparativa de la presión crítica obtenida de la base de datos del programa PhysProps y de la obtenida del artículo de referencia. ....	31
<b>Figura 5.4.-</b> Comparativa del volumen crítico obtenido de la base de datos del programa PhysProps y del obtenido del artículo de referencia. ....	31
<b>Figura 5.5.-</b> Comparativa de la presión de vapor obtenida por la estimación de métodos de contribución de grupos del programa PhysProps y del artículo de referencia. ....	32
<b>Figura 5.6.-</b> Elección del método Shortcut en PRO/II. ....	35
<b>Figura 5.7.-</b> Columna de destilación por el método Shortcut en PRO/II. ....	35
<b>Figura 5.8.-</b> Selección de componentes en PRO/II. ....	35
<b>Figura 5.9.-</b> Adicción de propiedades fijas para componentes nuevos creados en PRO/II. ....	36
<b>Figura 5.10.-</b> Adicción de propiedades dependientes de la temperatura en PRO/II. ....	37
<b>Figura 5.11.-</b> Selección del modelo termodinámico en PRO/II. ....	37
<b>Figura 5.12.-</b> Composición y condiciones térmicas de la corriente de alimentación S1 en PRO/II. ....	37
<b>Figura 5.13.-</b> Determinación de componentes clave liviano, pesado y especificaciones, método Schortcut en PRO/II. ....	38
<b>Figura 5.14.-</b> Columna de destilación por el método Shortcut en PRO/II. ....	39
<b>Figura 5.15.-</b> Flujos totales de las corrientes de salida y cálculo de especificaciones en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II. ....	39
<b>Figura 5.16.-</b> Reflujo mínimo, $R_{min}$ en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II. ....	40
<b>Figura 5.17.-</b> Composiciones y propiedades térmicas de las corrientes S1, S2 y S3 en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II. ....	40
<b>Figura 5.18.-</b> Flujos totales de las corrientes de salida y cálculo de especificaciones para un reflujo de $1,5 \cdot R_{min}$ , en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II. ....	41
<b>Figura 5.19.-</b> Número de platos y plato de alimentación para un reflujo de $1,5 \cdot R_{min}$ , en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II. ....	41
<b>Figura 5.20.-</b> Composiciones y propiedades térmicas de las corrientes S1, S2 y S3 para un reflujo de $1,5 \cdot R_{min}$ en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II. ....	42

<b>Figura 5.21.-Elección del método Distillation en PRO/II.....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 5.22.-Determinación de componentes clave liviano, pesado y especificaciones, método Distillation en PRO/II. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 5.23.-Composiciones y propiedades térmicas de las corrientes S1, S2 y S3 por el método Distillation en el reporte de resultados en PRO/II.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 5.24.-Columna de destilación por el método Distillation en PRO/II.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 5.25.-Cálculo de especificaciones y reflujo por el método Distillation en PRO/II. ....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 5.26.-Composiciones y propiedades térmicas de las corrientes S1, S2 y S3 por el método Distillation en el reporte de resultados en PRO/II.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 6.1.-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de destilado, S2 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de coco.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 6.2.-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de fondo, S3 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de coco.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 6.3.-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de destilado, S2 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de palmiste.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 6.4.-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de fondo, S3 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de palmiste.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 6.5.-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de destilado, S2 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de babasú. ....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 6.6.-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de fondo, S3 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de babasú. ....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 6.7.-Análisis de la alternativa de sustitución del combustible fósil de aviación JET-A1 por bioqueroseno de FAME de coco, palmiste y babasú. ....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 2.1.-Combustibles de aviación[6] .....</b>	<b>6</b>
<b>Tabla 2.2-Principales ventajas del uso de Jatrofa y Camelina en la producción de biocombustibles [7] ....</b>	<b>8</b>
<b>Tabla 2.3.-Antecedentes de usos de biocombustibles en vuelos de demostración.....</b>	<b>11</b>
<b>Tabla 2.4.-Antecedentes de usos de biocombustibles en vuelos comerciales .....</b>	<b>14</b>
<b>Tabla 3.1.-Gamas de composición de ácidos grasos de aceite vegetal: babasú, expresadas en porcentaje del contenido total de ácidos grasos[30].....</b>	<b>16</b>
<b>Tabla 3.2.-Gamas de composición de ácidos grasos de aceites vegetales: palma y palmiste, expresadas en porcentaje del contenido total de ácidos grasos[30] .....</b>	<b>17</b>
<b>Tabla 3.3.-Gamas de composición de ácidos grasos de aceite vegetal: coco, expresadas en porcentaje del contenido total de ácidos grasos [30].....</b>	<b>19</b>
<b>Tabla 4.1.-Condiciones de operación del destilado de FAME de coco y palmiste [2] .....</b>	<b>23</b>

<b>Tabla 4.2.-</b> Perfil de composiciones de FAME de coco y de las fracción ligera (bioqueroseno) y pesada de la destilación a vacío [2].....	24
<b>Tabla 4.3.-</b> Perfil de composiciones de FAME de palmiste y de las fracción ligeras (bioqueroseno) y pesada de la destilación a vacío [2].....	24
<b>Tabla 4.4.-</b> Condiciones de operación del destilado de FAME de babasú [33] .....	24
<b>Tabla 4.5.-</b> Perfil de composiciones de FAME de babasú y de la fracción ligera (bioqueroseno) y pesada de la destilación a vacío [33].....	25
<b>Tabla 5.1.-</b> Típicos metil esteres de biodiesel.....	26
<b>Tabla 5.2.-</b> Grupos estructurales de los metil esteres de ácidos grasos.....	27
<b>Tabla 5.3.-</b> Propiedades fijas de los metil esteres de ácidos grasos .....	28
<b>Tabla 5.4.-</b> Comparativa de propiedades fijas de los metil esteres de ácidos grasos (C12:0 y C18:1) de la base de datos de los programas PRO/II y PhysProps .....	28
<b>Tabla 5.5.-</b> Punto normal de ebullición obtenido por el programa PhysProps y el obtenido de la referencia de artículo .....	30
<b>Tabla 5.6.-</b> Temperatura crítica obtenida por el programa PhysProps y el obtenido de la referencia de artículo .....	30
<b>Tabla 5.7.-</b> Presión crítica obtenida por el programa PhysProps y el obtenido de la referencia de artículo .....	31
<b>Tabla 5.8.-</b> Volumen crítico obtenido por el programa PhysProps y el obtenido de la referencia de artículo .....	31
<b>Tabla 6.1.-</b> Calculo del número total de platos y plato de alimentación en función del reflujo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de coco.....	46
<b>Tabla 6.2.-</b> Temperatura de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de coco.....	46
<b>Tabla 6.3.-</b> Tasas globales de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de coco.....	47
<b>Tabla 6.4.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de coco.....	47
<b>Tabla 6.5.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de coco.....	47
<b>Tabla 6.6.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Distillation en la destilación de FAME de coco.....	48
<b>Tabla 6.7.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Distillation en la destilación de FAME de coco.....	48
<b>Tabla 6.8.-</b> Dimensiones del diámetro de la columna de destilación de FAME de coco.....	49
<b>Tabla 6.9.-</b> Condiciones terminas y fracciones másicas de las corrientes S2 y S3 en la destilación de FAME de coco por el método Distillation (PRO/II) y artículo de referencia.....	50
<b>Tabla 6.10.-</b> Calculo del número total de platos y plato de alimentación en función del reflujo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de palmiste.....	51

<b>Tabla 6.11.-</b> Temperatura de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de palmiste .....	51
<b>Tabla 6.12.-</b> Tasas globales de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de palmiste .....	52
<b>Tabla 6.13.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de palmiste .....	52
<b>Tabla 6.14.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de palmiste .....	52
<b>Tabla 6.15.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Distillation en la destilación de FAME de palmiste .....	53
<b>Tabla 6.16.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Distillation en la destilación de FAME de palmiste .....	53
<b>Tabla 6.17.-</b> Dimensiones de diámetro de la columna de destilación de FAME de palmiste.....	54
<b>Tabla 6.18.-</b> Condiciones terminas y fracciones másicas de las corrientes S2 y S3 en la destilación de FAME de palmiste por el método Distillation (PRO/II) y artículo de referencia .....	55
<b>Tabla 6.19.-</b> Calculo del número total de platos y plato de alimentación en función del reflujo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de babasú.....	56
<b>Tabla 6.20.-</b> Temperatura de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de babasú.....	56
<b>Tabla 6.21.-</b> Tasas globales de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de babasú.....	56
<b>Tabla 6.22.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de babasú.....	57
<b>Tabla 6.23.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de babasú.....	57
<b>Tabla 6.24.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Distillation en la destilación de FAME de babasú.....	58
<b>Tabla 6.25.-</b> Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Distillation en la destilación de FAME de babasú.....	58
<b>Tabla 6.26.-</b> Dimensiones de diámetro de la columna de destilación de FAME de babasú .....	59
<b>Tabla 6.27.-</b> Condiciones terminas y fracciones másicas de las corrientes S2 y S3 en la destilación de FAME de babasú por el método Distillation (PRO/II) y artículo de referencia.....	60
<b>Tabla 9.1.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, calor latente de vaporización, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Caprilato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.....	66
<b>Tabla 9.2.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, calor latente de vaporización, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Caprato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.....	67
<b>Tabla 9.3.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, calor latente de vaporización, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Miristato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.....	68

<b>Tabla 9.4.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, calor latente de vaporización, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Palmitato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.....	69
<b>Tabla 9.5.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, calor latente de vaporización, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Estearato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.....	70
<b>Tabla 9.6.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Linoleato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.....	71
<b>Tabla 9.7.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Linolenato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.....	72
<b>Tabla 9.8.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Caprilato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.....	73
<b>Tabla 9.9.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Caprato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.....	74
<b>Tabla 9.10.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Miristato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.....	75
<b>Tabla 9.11.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Palmitato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.....	76
<b>Tabla 9.12.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Estearato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.....	77
<b>Tabla 9.13.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Linoleato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.....	78
<b>Tabla 9.14.-</b> Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Linolenato de metilo, por métodos de contribución de grupos PhysProps.....	79



# 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el sector de la aviación utiliza combustibles líquidos derivados del petróleo como fuente de energía. A la vista de los actuales problemas ambientales, económicos y políticos en cuanto a la sostenibilidad de esta fuente de energía, la cuestión de alternativas de combustible en el sector de la aviación es eminente. Entre estas preocupaciones, el impacto ambiental del uso de combustibles fósiles en el calentamiento global y la calidad del aire es de gran importancia, mientras que el impacto de la volatilidad de los precios del petróleo y la necesidad de un suministro sostenible de combustible son estímulos importantes para la economía de los usuarios de combustibles.

Hoy en día, se considera que el transporte aéreo representa el 2% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> globales. No obstante, se prevé que la demanda mundial de este medio de transporte seguirá aumentando a corto, mediano y largo plazo y con ello la probabilidad de aumento en sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) prevé un aumento de la demanda de combustible de aviación a partir de unos 190 millones de toneladas en 2009 a entre 300-350 millones de toneladas en 2030, induciendo a un aumento proporcional de sus emisiones de CO<sub>2</sub> [1]. Existe un interés mundial en los biocombustibles como fuente de energía renovable para la sostenibilidad a largo plazo del combustible debido al previsible agotamiento de los combustibles fósiles.

Por otro lado, el 20 de diciembre de 2006 la Comisión Europea aprobó una propuesta de ley para incluir el sector de la aviación civil en el mercado europeo de derechos de emisión de dióxido de carbono (Régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea, EUETS). El 8 de julio de 2009, el Parlamento Europeo y el Consejo acordaron que todos los vuelos que despegan o aterrizan en los aeropuertos de la Unión Europea a partir del 1 de enero 2012 deberían incluirse en los EUETS. El 19 de noviembre de 2008, la Directiva de la 2008/101/CE incluye las actividades de aviación civil de los EUETS, y esta directiva ha sido transpuesta por la Ley española 13/2010 de 5 de julio de 2010. Así, en 2012 el sector de la aviación deberá reducir sus emisiones al 97% de los valores medios registrados en el periodo 2004-2006, y para el 2013 estas reducciones de emisiones deben alcanzar el 95% de los valores medios para el mismo período [1], [2]. Tratando de hacer frente a esta situación, las empresas de aviación están planeando seriamente el uso de los combustibles alternativos para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y para reducir sus costos. Sin embargo, los combustibles para el sector de aviación deben cumplir una serie de propiedades extraordinariamente sensibles para garantizar la seguridad de los aviones y los pasajeros durante los vuelos. Algunos de los combustibles alternativos para el sector de aviación se resumen a continuación:

**Combustibles Fischer-Tropsch (XtL).**- En general Fischer-Tropsch, es una reacción química catalizada por la cual se transforma en un gas de síntesis, que consiste en una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, en hidrocarburos líquidos. Una aplicación de este proceso es el primer combustible sintético aprobado para aviación que se ha desarrollado a partir de carbón por Sasol en Sudáfrica [3].

Fischer-Tropsch se puede aplicar a carbón (dando luego **CtL** - Coal to Liquid), gas (**GtL** - Gas to Liquid) o biomasa (**BtL** - biomass to Liquid), el último proceso está todavía en desarrollo. Estos tres tipos de combustibles Fischer-Tropsch (combustibles FT) a menudo se denominan genéricamente como "**XtL**". Su uso en aviación ha sido recientemente aprobado para mezclas de hasta el 50% con Jet A-1 según el estándar ASTM D-7566 y por la norma DEF-STAN 91-91, [2].

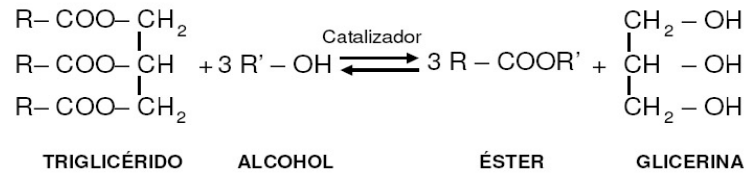
**Hidrogenación de aceites (HVO).**- A partir de un aceite vegetal se obtiene un combustible de alto contenido energético. El procedimiento se ha mejorado para que el combustible resulte estable ante las situaciones extremas de presión y temperatura de los vuelos. El proceso de transformación puede ser bioquímico (mediante microorganismos y enzimas) o termoquímico. Aceites hidrotratados a menudo se designan en las publicaciones como **HRJ**, (por sus siglas en inglés *Hydroprocessed Renewable Jet*) y recientemente en la norma ASTM D7566 se han designado como **HEFAs** (por sus siglas en inglés *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*).

**Fermentación de azúcares.**- Etanol producido a través de la fermentación de biomasa procedentes de cultivos ricos en azúcares (caña de azúcar, maíz, etc.) o de desechos vegetales ligno-celulósicos (subproductos de cultivo o cultivos específicos como *switchgrass*). En el caso de los cultivos ricos en azúcares se consideran competidores con los alimentos, pero en el caso de los desechos vegetales solo se consideran algunos productos. Por sus características de densidad energética el bioetanol no es muy adecuado en general como combustible de aviación. Su uso está aceptado en Brasil para una aeronave agrícola del fabricante Embraer. Actualmente se está estudiando una vía de transformación directa de azúcares, denominada *sugars to hydrocarbons*, que permite obtener combustibles más similares al queroseno.

**Otras alternativas.**- Tales como el hidrógeno líquido o el metano están siendo investigados como combustibles alternativos, pero por su estabilidad físico-química y densidad energética, entre otras cuestiones técnicas, no pueden utilizarse sin modificaciones significativas en las aeronaves, por lo que el uso sólo se plantea a muy largo plazo.

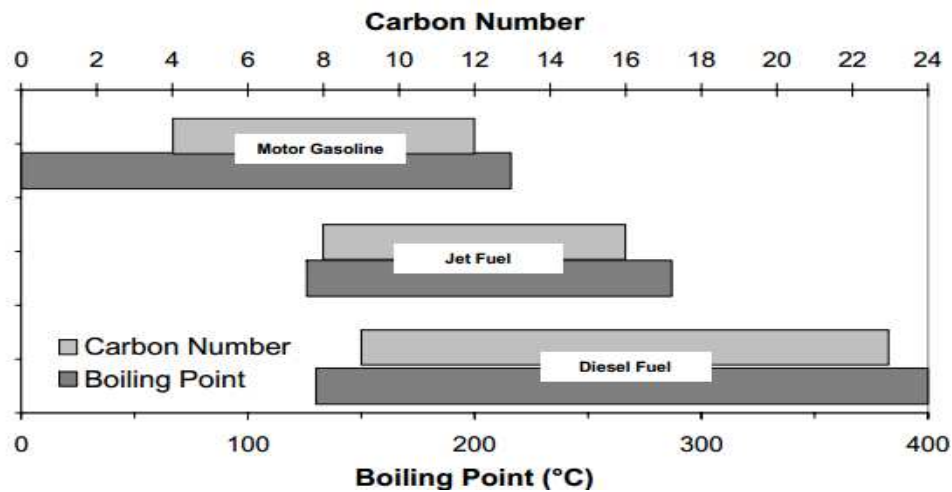
**Esteres metílicos de ácidos grasos, FAME "biodiesel".**- El biodiesel se produce a través de un proceso químico llamado transesterificación, donde se separa la glicerina del aceite o grasa vegetal. El proceso deja dos productos: los ésteres metílicos de ácidos grasos (**FAME**) que se conocen comúnmente como "*biodiesel*" y glicerina (un subproducto valioso vendido generalmente para ser utilizado en jabones y otros productos). Los ésteres metílicos de ácidos grasos se utilizan como componentes de mezcla para combustible diesel. En general, el término biodiesel cubre una variedad de materiales hechos a partir de aceites vegetales o grasas animales. Diversos cultivos se usan en diferentes partes del mundo para hacer biodiesel. En Estados Unidos., el aceite de soja es la fuente más importante para el biodiesel, en Europa el aceite de colza y en Asia aceite de palma y coco. El

biodiesel también puede obtenerse a partir de otras materias primas, que incluyen grasas animales y residuos restaurantes. La investigación también se está llevando a cabo en el uso de algas como fuente de biodiesel. Como se menciona anteriormente los aceites se pueden convertir en sus ésteres metílicos mediante el proceso de transesterificación (Ver *Figura 1.1*) en presencia de un catalizador.



**Figura 1.1.-**Reacción de transesterificación.

El combustible de avión y el diesel son similares, debido a que cuentan con rangos de destilación parecidos, tal como se muestra en la siguiente *Figura 1.2*.



**Figura 1.2.-**Rangos de destilación de combustibles de aviación y automoción [4].

Las propiedades de los esteres dependerá del material de partida, debido a que los esteres pueden tener diferentes números de átomos de carbono y diversos grados de insaturación (el número de doble enlace carbono carbono). El número mayor de carbonos y una alta viscosidad que presenta el FAME en comparación al combustible de aviación podrían afectar la atomización y vaporización en la cámara de combustión. Por ello las propiedades principales de los esteres deben ser revisadas con respecto a los requisitos de la aviación. El presente proyecto se centra en este último combustible alternativo, para el cual se ha realizado una simulación de destilación a vacío de tres tipos de FAME's (aceite de coco, palmiste y babasu) con la finalidad de obtener una fracción ligera similar al queroseno denominada "bioqueroseno", basándose en estudios previos de investigación que se detallaran más adelante en los siguientes apartados.

## 1.1. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto llevado a cabo con la asesoría de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad de Zaragoza es el desarrollo de una columna de destilación para cada uno de los FAME's (coco, palmiste y babasu), partiendo de proyectos de investigación donde experimentalmente se ha llevado a cabo una destilación para cada uno de los FAME's mencionados anteriormente y cuya finalidad ha sido estudiar el porcentaje de sustitución factible de queroseno fósil (Jet-A1) por bioqueroseno obtenido de FAME de coco, palmiste y babasu. Basándose en el estudio de propiedades físicas de mezclas producidas de bioqueroseno y queroseno fósil que cumplan con la normativa ASTM D1655. Con la finalidad de escalar el nivel de laboratorio al nivel industrial se propone una simulación de esta destilación con la ayuda del software PRO/II. Desglosando el presente objetivo principal en los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la situación actual de los combustibles alternativos en el sector de la aviación así como la normativa aplicable.
- Analizar y estimar las propiedades de cada uno de los FAME's estudiados para llevar a cabo la destilación.
- Realizar la simulación del proceso de destilación de FAME de coco, palmiste y babasu, mediante el software PRO/II.
- Analizar resultados obtenidos.
- Comparativa de resultados obtenidos en productos de la columna de destilación frente a los datos recopilados de proyectos de investigación.

## 2. COMBUSTIBLES EN EL SECTOR DE AVIACIÓN

Los combustibles para turbinas o queroseno de aviación se denominan JP, de los cuales se fabrica en la actualidad, principalmente, el JP-4 para vuelos comerciales. El JP-1 fue el primero, cuya especificación limitaba la cantidad a extraer del petróleo por ser un corte muy estrecho. El JP-5 con mayor densidad que el JP-4, se usa en aviones supersónicos que son más “calientes” y disminuyen las posibilidades de cristalizar el combustible permitiendo aumentar la potencia y autonomía, críticas en aeronaves de combate. Se ha llegado hasta el JP-8, con una densidad máxima de 0,84 kg/l y un punto final de destilación ASTM de 330°C. Las especificaciones por las que se rigen los contratos de suministro de combustibles para turbina de aviación pueden tener dos fuentes:

- a. Militares de EEUU, denominación “JP”
  - MIL-T-5624L incluye JP-4 y JP-5
  - MIL-T-38219 incluye JP-7
  - MIL-T-83133 incluye JP-8
- b. Civiles del ASTM, denominación Jet-A, Jet A-1, Jet-B:
  - Norma D1655-98a

El tipo Jet-A, es esencialmente una mezcla de fracciones de queroseno producto de la destilación del petróleo. Tiene un punto de inflamación de 43 a 66°C y un punto de congelación de -40°C. La equivalencia militar del Jet-A, es el JP-5 y se usa como combustible de alternativa en lugar del Jet-B.

El tipo Jet A-1 es también una mezcla de fracciones de queroseno y tiene muy pequeñas diferencias físicas con el tipo Jet A. El Jet A-1 tiene un punto de congelación de -50°C y un punto de inflamación de 43°C. La equivalencia militar del Jet A-1 es el JP-1.

El Jet-B, es una mezcla de fracciones de gasolina de aviación y queroseno. Los límites de inflamación son aproximadamente los mismos que en la gasolina de aviación. El tipo B, tiene un mínimo de calor neto de combustión de 18.400 BTU/lb, punto de congelación de -51°C. La equivalencia militar del Jet-B es el JP-4 y como alternativa se usa el Jet A-1, [5].

### 2.1. Combustibles Alternativos

Los combustibles alternativos de aviación pueden agruparse, en función de su fuente y forma de obtención en las siguientes categorías que se muestran en la *Tabla 2.1*:

**Tabla 2.1.- Combustibles de aviación [6].**

<b>Fuentes</b>	<b>Combustible</b>	<b>Proceso</b>
Carbón	CTL	<i>Fischer-Tropsch</i>
Gas Natural	GTL	<i>Fischer-Tropsch</i>
Biomasa	BTL	<i>Fischer-Tropsch</i>
Aceites vegetales	Bioqueroseno (HRJ)	<i>Hidrogenación</i>
Azúcares vegetales	Bioetanol	<i>Fermentación</i>
Agua	Hidrógeno	<i>Hidrolisis eléctrica</i>

### **2.1.1. Combustibles de origen fósil**

Los combustibles actuales utilizados en la aviación, refiriéndonos al queroseno, se obtiene fundamentalmente de petróleo crudo. Sin embargo, también es posible utilizar otras fuentes fósiles tales como las arenas bituminosas, pizarras bituminosas o gas natural condensado.

Existen otras alternativas denominadas en forma genérica *combustibles sintéticos*, es importante tener en cuenta que no todos los combustibles alternativos reducen el efecto de la aviación sobre el cambio climático, esta denominación simplemente indica que es obtenido de un modo diferente al convencional, ejemplo de esto son los combustibles sintetizados a partir de carbón (CtL) o gas natural (GtL) mediante un proceso de transformación y refinado denominado Fischer-Tropsch permitiendo obtener combustibles con contenido ultra-bajo en azufre (ULS jet). Así mismo también el hidrógeno líquido (criogenizado) que puede obtenerse a partir de hidrocarburos (petróleo, gas natural, etc.).

### **2.1.2. Combustibles de origen renovable**

Bajo el término de biocombustibles se engloban todos aquellos combustibles líquidos o biocarburantes que proceden de materiales biológicos no fosilizados, fundamentalmente plantas, de acuerdo a los avances tecnológicos en su desarrollo, habitualmente se distingue entre biocombustibles de primera, segunda y tercera generación, los cuales se describirán más adelante.

Los grandes grupos de estos combustibles de origen renovable que se mencionan en la *Tabla 2.1*, son:

- *BtL* (por sus siglas en inglés *Biomass to Liquid*); combustible sintetizado mediante el proceso Fischer-Tropsch a partir de biomasa. Puede utilizarse cualquier biomasa, sólida o líquida, lo que permite utilizar residuos forestales o urbanos.
- *Bioqueroseno*; combustible obtenido a partir de aceites vegetales con las mismas características que el queroseno convencional (Jet-A y Jet-A1).
- *Bioetanol*; a partir de fermentación de azúcares que puede asemejarse a la gasolina de aviación.

- *Hidrogeno líquido (criogenizado)*; puede obtenerse a partir de la hidrólisis de agua pura mediante energía eléctrica.

### ***Biocombustibles de primera generación***

Son aquellos que son obtenidos a partir de cultivos alimenticios o forrajeros tradicionales. Dependiendo de si el contenido principal del cultivo son aceites o azúcares, su cultivo se dedicará a la obtención de bioetanol o biodiesel.

El etanol es producido fundamentalmente a partir de caña de azúcar y maíz en menor grado a partir de trigo, remolacha azucarera, sorgo y yuca. Los aceites vegetales; fundamentalmente a partir de colza, palma aceitera, moringa aceitera, soja, babasu, coco, ricino y aguacate.

El presente proyecto se enfocara en los cultivos tradicionales tales como, el babasu, palmiste y coco para la producción de bioqueroseno, los cuales se detallaran en el siguiente apartado.

### ***Biocombustibles de segunda generación***

Estos biocombustibles son denominados fundamentalmente lignocelulósicos. En estos cultivos no sólo se aprovecha la semilla sino toda la planta, degradando la lignina y celulosa para su fermentación y obtención de etanol, a través de procesos dirigidos mayoritariamente por enzimas. Permite aprovechar residuos de los cultivos tradicionales mencionados anteriormente así como el aprovechamiento adicional de otros cultivos como el mijo perenne (switchgrass) y los residuos forestales. Este tipo de materiales puede ser utilizado también para sintetizar BtL.

Otro tipo de fuente de biocombustibles sería el uso de desechos de la industria alimentaria y del sector servicios, como pueden ser las grasas y aceites de fritura usados. También son considerados biocombustibles de segunda generación los cultivos no tradicionales como la jatrofa (*Jatropha curcas*) o la camelina (*Camelina sativa*).

La jatrofa produce una semilla de la que se obtiene aceite al igual que la palma aceitera. Sin embargo, no tiene uso alimentario (es tóxica). Así mismo la camelina se utiliza para producir aceites no comestibles aunque genera un subproducto de alimentación animal. En la siguiente *Tabla 2.2*, se citan algunas de las principales ventajas que presentan estos cultivos no tradicionales para la aplicación como biocombustibles.

**Tabla 2.2- Principales ventajas del uso de Jatrofa y Camelina en la producción de biocombustibles, [7].**

<b>Jatrofa</b>	<b>Camelina</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Producción de un aceite no comestible que no estará directamente vinculado a competir con el suministro de alimentos.</li> <li>- Mayor ciclo de vida de las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> que actuales materias primas de primera generación como la colza.</li> <li>- Aptas para el cultivo en suelos marginales o rehabilitar terrenos baldíos.</li> <li>- Posibilidad de trabajar con los pequeños agricultores en las zonas remotas de escasa infraestructura de transporte, ya que las semillas de jatrofa (a diferencia de palma) se pueden almacenar.</li> <li>- Oportunidades para el cultivo en los trópicos semiáridos ya que la jatrofa necesita mucha menos agua que la palma.</li> <li>- Excelentes propiedades de la torta de semillas como fertilizante orgánico o como insumo para las plantas de fermentación de biogás, con un mayor equilibrio de carbono.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ciclo de crecimiento muy corto (menos de 4 meses cuando se siembra a principios de primavera).</li> <li>- Pocas necesidades agronómicas (fertilizantes, pesticidas, herbicidas).</li> <li>- Alto contenido en aceite (35%-40%)</li> <li>- Potencial de crecimiento en una amplia gama de diferentes regiones templadas y con diferentes condiciones de suelo, excepto en arcilla limosa pesada y suelos susceptibles a la formación de costras superficiales.</li> <li>- Resistente a varias enfermedades de forma natural, tales como <i>alternaria brassicae</i> y a las plagas de insectos.</li> <li>- Alta calidad como comida, la harina de la semilla es el subproducto de la extracción de aceite y representa un importante co-producto con un alto valor económico para la alimentación animal.</li> </ul>

### **Biocombustibles de tercera generación**

Los biocombustibles más avanzados de tercera generación son las algas microscópicas que permiten obtener un tipo de “crudo” vegetal del que se puede obtener bioqueroseno. Las algas se cultivan en lagos, en el mar o en biorreactores usando agua salada o aguas residuales. Así mismo las algas consumen dióxido de carbono y emiten oxígeno a medida que crecen, por lo que hacen captura de carbono en vez de liberación del mismo a la atmósfera. Su productividad por unidad de superficie es muy superior a la de los cultivos tradicionales (hasta 300 veces mayor) para la obtención de combustibles, ya que no invierten energía en la generación de troncos, raíces, flores o frutos.

La producción de algas se puede llevar a cabo a través de la fotosíntesis, siendo un proceso en el que las algas convierten la luz solar y el CO<sub>2</sub> en energía química para luego convertir esa energía en aceites. Las microalgas fotosintéticas se cultivan, por lo general, en grandes sistemas de charcas al aire libre, en tubos o bolsas, o en el interior utilizando luz artificial. En los sistemas de crecimiento fotosintético, los insumos primarios para el crecimiento de biomasa (algas) son luz, CO<sub>2</sub> y nutrientes. Las algas son frecuentemente alimentadas de carbono que de otro modo sería emitido a la atmósfera proveniente de fuentes fijas, como emisoras industriales. Los nutrientes se pueden derivar de fertilizantes tradicionales,



pero también se pueden extraer de una serie de residuos industriales, incluido el estiércol y la escorrentía agrícola.

Otra forma de producción es la obtención de aceite de algas heterótrofas, que en lugar de utilizar luz solar y CO<sub>2</sub> como insumos primarios y producir aceites, las algas heterótrofas se alimentan de sustancias orgánicas, tales como azúcares, para sus ciclos de vida. Las algas heterótrofas son cultivadas a gran escala en tanques de fermentación siendo capaces de convertir biomasa en el aceite de manera eficiente sin luz del sol.

Después de que las algas han crecido lo suficiente para producir aceite a través de los procesos mencionados anteriormente, la biomasa de algas se extrae del medio de crecimiento, se seca y se extrae el aceite mediante un proceso mecánico o químico. Los procesos químicos utilizan hexano o cloroformo para extraer el aceite de las paredes de las algas, los procesos mecánicos utilizan un aparato que físicamente rompe las paredes celulares y extrae el aceite a presión. El resto de la biomasa de las algas secas es un co-producto de alto valor, con una demanda creciente y fuerte en nutrición humana, nutracéuticos, alimentos para animales y en el mercado de los bioplásticos. El último paso es que el aceite que se extrae se convierta en el combustible deseado.

## **2.2. Normativa y Estándares**

El propósito principal de los requisitos técnicos del combustible de aviación es para garantizar la seguridad del transporte aéreo. Por lo tanto, el combustible para aviones comerciales debe cumplir con condiciones técnicas precisas y operativas. Así mismo los motores están diseñados para funcionar con un combustible que cuente con esas características específicas. Los combustibles alternativos o biocombustibles que podrían utilizarse en aviación deberán cumplir con las especificaciones del combustible de aviación derivado del petróleo. Como tal, el uso de un combustible alternativo no debería representar un cambio o desafío en los fuselajes de aviones o motores. Esto representa un inconveniente para nuevos combustibles. Sin embargo, las soluciones no deben ser sistemáticamente rechazadas, pero su evaluación requiere un cuidadoso equilibrio entre las ventajas potenciales de la eficiencia, el medio ambiente o punto de vista económico, de su aprobación y costos de implementación. En la actualidad, un combustible utilizado en la aviación comercial tiene que cumplir con las especificaciones para el combustible jet civil, una de ellas es la ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) D1655.

### **- *ASTM D1655 y Defence Standard 91-91/5***

Las especificaciones comprenden una lista de valores permisibles mínimo y máximo para un número de propiedades del combustible, proporcionando así una comprobación relativamente rápida con pruebas en un laboratorio para verificar que cada lote de combustible está "adecuado", es decir, que coincida con todos los requisitos para su uso en una aeronave. Las propiedades cubrir la seguridad de manipulación de tierra del combustible, la idoneidad del combustible para el almacenamiento, la estabilidad del

combustible en forma de líquido en un rango de temperaturas de funcionamiento y algunas características físicas. Estas pruebas se han desarrollado durante muchos años para garantizar la seguridad. Las especificaciones se describen de una manera para restringir el proceso de fabricación utilizado y el producto final producido. Las dos limitaciones significativas son:

- Que el producto se obtenga a partir del petróleo crudo mediante un proceso ya establecido,
- Que el producto sea totalmente hidrocarburo (es decir, moléculas que contiene sólo hidrogeno y carbono) con excepción de los aditivos permitidos y tazas muy bajas de no hidrocarburos.

- **ASTM D7566**

La especificación de la ASTM D7566 se refiere a los hidrocarburos sintetizados que contienen combustible para turbinas de aviación, y se combina con la ASTM D1655. La norma D7566 especifica que la porción sintética no puede superar el 50% del combustible; al menos el 50% debe ser combustible convencional para aviones comerciales o Jet A y Jet A-1.

Esta versión inicial de la norma D7566 brinda criterios para la producción, distribución y uso de combustible para los motores de turbinas de aviones que se fabrican con carbón, gas natural o biomasa usando el proceso Fischer-Tropsch. Sin embargo, la estructura de la norma está planteada para que en el futuro cubra otros tipos de combustibles sintéticos que se fabriquen con materias primas y procesos no convencionales a medida que se vayan desarrollando. Una vez que se califiquen, estos nuevos tipos de combustible podrán incorporarse en la norma D7566 como anexos. El segundo anexo de esta norma define los requerimientos del queroseno parafínico sintetizado a partir de ésteres y ácidos grasos hidroprocesados **HEFA's** (por ejemplo el caso de los FAME's que son hidroprocesados con la finalidad de remover esencialmente todo el oxígeno), en dichos requerimientos se menciona de una concentración de FAME máxima de <5 ppm.

### **2.3. Antecedentes del Uso de Biocombustibles en Aviación**

A continuación, se mencionan algunos de los sucesos más importantes en la aviación internacional en la que los biocombustibles han participado en operaciones de vuelos de demostración, vuelos comerciales y misiones militares (Ver *Tablas 2.3 y 2.4*), los cuales, intentan implementar en sus operaciones y rutas aéreas el uso de combustibles alternativos que disminuyan las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y que representen una opción de cara a contrarrestar el cambio climático y la escasez de los combustibles fósiles.

**Tabla 2.3.-Antecedentes de usos de biocombustibles en vuelos de demostración.**

<b>VUELOS DE DEMOSTRACIÓN</b>	
<p><b>24 de Febrero 2008</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Virgin Atlantic,                      General Electric,                      Boeing,                      Imperium Renewables.  <b>Aeronave:</b> Boeing 747  <b>Motor:</b> CF6  <b>Biocombustible:</b>                      Coco y Babasú                      [8] [9]</p>	<p>En febrero del 2008 Virgin Atlantic se convirtió en la primera aerolínea en el mundo en operar una aeronave comercial con una mezcla de biocombustible. El Boeing 747 realizó un vuelo corto partiendo del aeropuerto de Heathrow en Londres a Ámsterdam utilizando una mezcla con 20% de biocombustible y 80% de queroseno en uno de sus cuatro motores. Además, en tierra se comprobó el funcionamiento del motor con hasta un 40% de biocombustible.</p> <p>En esta exhibición, se mostró el compromiso en el uso de combustibles alternativos por medio del análisis del rendimiento de un turborreactor de uso comercial alimentado con una fracción de biocombustible a base de aceite de coco y babasú. Se comprobó que este combustible fue capaz de mantener sus propiedades incluso a condiciones extremas de temperatura a -47 C.</p>
<p><b>30 de Diciembre del 2008</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Air New Zealand,                      Boeing,                      Rolls Royce,                      Honeywell  <b>Aeronave:</b> Boeing 747  <b>Motor:</b> Rolls-Royce RB211  <b>Biocombustible:</b> Jatropa                      [10] [11]</p>	<p>En Diciembre del 2008, Air New Zealand, se unió al grupo de líneas aéreas comerciales que realizan pruebas con combustibles alternativos. Durante un vuelo de dos horas desde el Aeropuerto Internacional de Auckland en la aeronave comercial B-747, la tripulación realizó distintas maniobras en vuelo para comprobar el rendimiento de la mezcla de combustible en uno de sus motores con 50% de biocombustible derivado de la planta jatropa y 50% de Jet A1 (queroseno).</p> <p>Se concluyó que en un vuelo de 12 horas se alcanzaría un ahorro del 1.2% de combustible, es decir, 1.43 toneladas de combustible.</p> <p>Tal reducción en consumo de combustible resultaría en una reducción de aproximadamente 4.5 toneladas de CO<sub>2</sub> al ambiente.</p>
<p><b>7 de Enero del 2009</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Continental Airlines,                      Boeing,                      General Electric,                      Honeywell  <b>Aeronave:</b> Boeing 737  <b>Motor:</b> CFM56-7B  <b>Biocombustible:</b>                      Alga y Jatropa                      [12]</p>	<p>Continental Airlines fue el primer operador de una aeronave comercial con biocombustible en Estados Unidos al realizar un vuelo experimental con duración de 2 horas el 7 de enero del 2008 que partió y regreso del Aeropuerto Intercontinental Bush en Houston. Biocombustibles derivados de alga y jatropa fueron utilizados al 50% de mezcla en uno de los motores CFM56-7B de la aeronave B-737.</p> <p>Durante el vuelo, los pilotos sometieron a la aeronave a numerosas maniobras de vuelo para comprobar el funcionamiento del motor 2 alimentado con mezcla de biocombustibles y el motor 1 en condiciones estándar. Además, se realizó la prueba de apagado y reencendido del motor en vuelo, así como aceleraciones y desaceleraciones mientras que un ingeniero de vuelo almacenaba la información obtenida de cada uno de los motores.</p>
<p><b>30 de Enero del 2009</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Japan Airlines,                      Boeing, Pratt &amp; Whitney  <b>Aeronave:</b> Boeing 747-300  <b>Motor:</b>                      Pratt &amp; Whitney JT9D  <b>Biocombustible:</b>                      Camelina, Jatropa, Alga.                      [13]</p>	<p>La aerolínea japonesa Japan Airlines, realizó su primer vuelo de prueba con biocombustible derivado de la planta camelina el 30 de enero del 2009 en colaboración con las empresas Boeing de Estados Unidos y Pratt &amp; Whitney de Canadá. Uno de los cuatro motores JT9D de la aeronave B-747 fue alimentado con una mezcla de 50% de biocombustible (84% camelina, 15% jatropa, 1% alga) y 50% de combustible tradicional Jet A-1.</p> <p>El vuelo salió del Aeropuerto Haneda en Tokio y tuvo una duración de 90 minutos. Los pilotos y el ingeniero de vuelo reportaron que no hubo diferencia alguna entre el rendimiento del motor alimentado con biocombustible y los demás motores. Como en los vuelos realizados previamente por otras aerolíneas de Estados Unidos y Europa, durante el recorrido, se llevaron a cabo diferentes maniobras que permiten extraer datos críticos del funcionamiento de los motores y que sirven como fuente de información para la mejora y la implementación de estos combustibles alternativos en el mercado.</p>

**Tabla 2.3.-Antecedentes de usos de biocombustibles en vuelos de demostración (Continuación).**

<b>VUELOS DE DEMOSTRACIÓN</b>	
<p><b>22 de Abril del 2010</b>  <b>Colaboradores:</b>                      US Navy,                      Marine Corps,                      General Electric  <b>Aeronave:</b>                      F/A-18 "Green Hornet"  <b>Motor:</b> GE F414  <b>Biocombustible:</b>                      Camelina. [14]</p>	<p>El 22 de Abril del 2010 se llevo a cabo el primer vuelo de prueba con biocombustibles en una aeronave de uso militar para el combate. El vuelo se llevo a cabo en la Estacion Aeronaval Patuxent River en Meryland y tuvo una duracion de 45 minutos durante los cuales, se realizaron las primeras maniobras supersónicas con una fuente de potencia alimentada al 50% de biocombustibles. De acuerdo con los reportes, la aeronave tuvo un desempeño normal y sin contratiempos después de las diferentes maniobras a las que se sometió. Además, la Marina de Estados Unidos cuenta con un programa de investigación y desarrollo que trabaja en la realización de estándares de certificación para el uso de diferentes fuentes de energía renovable y alternativa.</p>
<p><b>25 de Marzo del 2010</b>  <b>Colaboradores:</b>                      US Air Force  <b>Aeronave:</b>                      A-10 Thunderbolt II  <b>Motores:</b> General Electric TF34-GE-100  <b>Biocombustible:</b>                      Camelina. [15] [16]</p>	<p>En Marzo del 2010, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos realizo un vuelo de 90 minutos en la aeronave A-10 utilizando un porcentaje del 50% de biocombustible a base de camelina en su fuente de potencia que consta de dos motores General Electric TF34-GE-100. El Departamento de Defensa de Estados Unidos, trabaja en la certificación de biocombustibles para la aviación militar y comercial, ya que la aprobación en el uso de este tipo de combustibles alternativos y su producción a gran escala representa grandes beneficios económicos.</p>
<p><b>13 de Junio del 2010</b>  <b>Colaboradores:</b>                      ILA Berlin Air Show,                      EADS  <b>Aeronave:</b> Diamond DA42  <b>Motores:</b>                      Austro Engine AE300  <b>Biocombustible:</b> Alga. [17]</p>	<p>La nueva generación del Diamond DA42 impulsado por sus dos motores AE300 realizo sus primeras pruebas en tierra y vuelos experimentales por primera vez en su base ubicada en Wiener Neustadt, Austria, sin embargo, el primer vuelo oficial sin ser una aeronave experimental se realizo durante el evento aéreo ILA 2010 en Berlín, Alemania. Dicho vuelo fue el primero en la historia en la historia con una alimentación al 100% de biocombustible a base de Alga. Se comprobó que al alimentar la aeronave con biocombustible se obtuvo un consumo de 1.5 litros por hora menos que con combustible convencional Jet A-1 sin comprometer el rendimiento y las prestaciones de la planta motriz.</p>
<p><b>18 de Noviembre del 2010</b>  <b>Colaboradores:</b>                      US Navy,                      General Electric  <b>Aeronave:</b>                      MH60S Sea Hawk                      Helicopter  <b>Motores:</b>T700-GE-401C  <b>Biocombustible:</b> Camelina</p>	<p>Continuando con los esfuerzos en disminuir el consumo de combustibles derivados del petróleo, la Marina de los Estados Unidos realizó el vuelo de un helicóptero MH60S Sea Hawk alimentando sus dos motores General Electric con un porcentaje de 50% de biocombustible a base de camelina. El vuelo se realizo desde la estación aeronaval Patuxent River en Meryland y la aeronave fue sometida a diferentes maniobras y condiciones de operación durante 45 minutos. [18]</p>
<p><b>30 de Noviembre del 2010</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Aerolínea TAM,                      CFM International,                      General Electric.  <b>Aeronave:</b> Aibus 320  <b>Motores:</b> CFM56  <b>Biocombustible:</b> Jatropa [19]</p>	<p>A finales de Noviembre del 2010, la Aerolínea Brasileña TAM opero un vuelo de prueba con biocombustibles en una aeronave A320 utilizando una mezcla con el 50% de combustible derivado de la jatropa. La aeronave equipada con un par de motores CFM56, despegó desde el Aeropuerto Internacional Galeão Antonio Carlos Jobim en Rio de Janeiro y voló durante 45 minutos antes de regresar a su punto de origen. Además, estudios realizados por TAM Airlines y Airbus demostraron que los biocombustibles hechos de Jatropa podrían reducir la huella de carbono del sector de la aviación hasta en un 80% comparado con combustible convencional (de acuerdo con el libro "Department of Energy's Transportation Energy Data Book, 2008").</p>

**Tabla 2.3.-Antecedentes de usos de biocombustibles en vuelos de demostración (Continuación).**

<b>VUELOS DE DEMOSTRACIÓN</b>	
<p><b>21 de Junio del 2011</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Paris Air Show,                      Boeing,                      General Electric.  <b>Aeronave:</b> Boeing 747-8F  <b>Motores:</b> GEnx-2B  <b>Biocombustible:</b> Camelina [20]</p>	<p>El primer vuelo trasatlántico de la historia utilizando una fracción en la mezcla de biocombustibles, fue realizado por la aeronave B747 durante el evento aéreo de Paris 2011 partiendo desde Seattle en Estados Unidos y aterrizando sin contratiempos en el aeropuerto Le Bourget en Francia. La fracción de biocombustible a base de camelina utilizada fue del 15%, lo cual, según los pilotos no tuvo ningún impacto en las operaciones normales de la aeronave. Así mismo, la aeronave tuvo el mismo consumo de combustible que al utilizar 100% de queroseno y el proceso de reabastecimiento de combustible también duro lo mismo.</p>
<p><b>21 de Junio del 2011</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Honeywell,                      Paris Air Show.  <b>Aeronave:</b> Boeing 747  <b>Motores:</b>                      Rolls-Royce Tay Mk 611-8C  <b>Biocombustible:</b> Camelina [21]</p>	<p>Honeywell también participo en el espectáculo aéreo de Paris 2011 y realizo un vuelo trasatlántico con la aeronave Gulfstream G450 propulsada con motores Tay Mk 611-8C, los cuales, fueron alimentados con una mezcla al 50% de biocombustible a base de camelina (a diferencia del vuelo trasatlántico del Boeing 747 al 15% de biocombustible). Este vuelo salió desde el aeropuerto de Morristown, New Jersey.</p> <p>Un mes antes de este evento, el uso de biocombustibles en aviación tuvo un gran avance debido a que la ASTM (por sus siglas en inglés) expidió una serie de estándares provisionales para la producción de biocombustible para la aviación.</p>
<p><b>29 de Octubre del 2011</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Air China,                      Boeing,                      Pratt &amp; Whitney,                      PetroChina Co Ltd.  <b>Aeronave:</b> Boeing 747  <b>Motores:</b> PW400  <b>Biocombustible:</b> Jatropa</p>	<p>En octubre del 2011, Air China realizo su primera demostración de una aeronave en vuelo propulsada por una mezcla al 50% de combustible en uno de sus motores PW400.</p> <p>La aeronave despegó del aeropuerto internacional de la capital de Beijing a las 8:32 am y regreso a las 9:30 am realizando maniobras a diferentes altitudes.</p> <p>Gracias a este suceso, la Administración Nacional de Energía de China y Boeing firmaron un acuerdo para futuros estudios en el desarrollo de biocombustibles que se puedan producir en el país, lo cual, ayudara a los esfuerzos por establecer una industria de la aviación sostenible en China. [22] [23]</p>
<p><b>24 de Enero del 2012</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Etihad Airways,                      SkyNRG  <b>Aeronave:</b>                      Boeing 777-300ER  <b>Motores:</b>                      General Electric GE90-115B  <b>Biocombustible:</b> Aceite de cocina vegetal reciclado</p>	<p>El pasado 24 de Enero del 2012, se realizo el primer vuelo en medio oriente operado con biocombustibles. Eithad Airways opero la aeronave B777 desde Seattle a Abu Dhabi. Con una duración de 14 horas de vuelo, la aerolínea tuvo la oportunidad de comprobar el funcionamiento de una de las aeronaves más eficientes para viajes de larga duración utilizando una combinación de biocombustible y Jet A-1.</p> <p>Eithad Airlines es también uno de los miembros fundadores del Consorcio de Investigación en Bioenergía Sostenible del Instituto de Masdar en Abu Dhabi. Este programa de 5 años cuenta con un presupuesto de 2 millones de dólares para la investigación sobre todo de plantas tolerantes al agua salada. [24].</p>

**Tabla 2.4.-Antecedentes de usos de biocombustibles en vuelos comerciales.**

<b>VUELOS COMERCIALES</b>	
<p><b>29 de Enero del 2011</b>  <b>Colaboradores:</b>                      KLM, Sky NRG  <b>Aeronave:</b> Boeing 737-800  <b>Motores:</b> CFM56-7B  <b>Biocombustible:</b> Aceite de cocina vegetal reciclado  <b>[25]</b></p>	<p>KLM realizo el primer vuelo comercial en el mundo con biocombustibles al transportar 171 pasajeros de Ámsterdam a Paris el 29 de enero del 2012.                      El vuelo se realizo sin contratiempos desde el Aeropuerto de Schiphol en Ámsterdam y el Charles de Gaulle en Paris utilizando una mezcla denominada bioqueroseno que es la mezcla de Jet A1 y aceite de cocina reciclado.                      Sin embargo, KLM afirmo que mientras los biocombustibles no tengan una producción a gran escala y sean competitivos con los precios de los combustibles fósiles, la implementación de rutas específicas operadas con estos combustibles alternativos, será una ardua tarea. Así mismo, resalto la necesidad de un trabajo en conjunto entre el gobierno, las empresas y la sociedad.</p>
<p><b>15 de Julio del 2011</b>  <b>Colaboradores:</b> Lufthansa  <b>Aeronave:</b> Airbus 321  <b>Motores:</b> CFM56  <b>Biocombustible:</b> Jatropa, Camelina, grasas animales.  <b>[26]</b></p>	<p>En Julio del 2011, Lufthansa realizo su primer vuelo comercial con pasajeros utilizando una mezcla al 50% de biocombustible basado en jatropa, camelina y grasas animales. El A321 voló desde Hamburgo a Frankfurt y dio inicio a una serie de vuelos programados por Lufthansa en diferentes rutas finalizando con un vuelo entre Frankfurt y Washington el 12 de enero del 2012. Estos vuelos se reanudarán una vez que se tenga una mayor producción de biocombustibles en el mundo. <b>[26]</b></p>
<p><b>21 de Julio del 2011</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Interjet,                      Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA),                      Gobierno de Chiapas.  <b>Aeronave:</b> Airbus 320-200  <b>Motores:</b> CFM56-5B4  <b>Biocombustible:</b> Jatropa.  <b>[27]</b></p>	<p>El 21 de julio del 2011 la aerolínea mexicana Interjet, realizo exitosamente un vuelo regular de ida y vuelta entre la Ciudad de México y la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en Chiapas. Esto gracias a la entrada en vigor de la Norma Internacional ASTM D7566 el 1 de julio del 2011 para el uso de biocombustibles mezclados con turbosina convencional, que permite a las aerolíneas comerciales este tipo de operaciones, ya que antes eran estrictamente de prueba bajo delicados protocolos de autorización.                      Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), en colaboración con el gobierno de Chiapas y de productores independientes, realizó las tareas de acopio de semilla de Jatropa, extracción de aceite, transporte a las instalaciones de la empresa norteamericana UPO Honeywell para su transformación en "Bioqueroseno Parafínico Sintético" comúnmente denominado "Bioturbosina" y finalmente su retorno al país y su almacenamiento y conservación.                      ASA decidió usar en este vuelo una mezcla 27% de bioturbosina y 73% de turbosina convencional que está dentro de la norma ASTM D7566.</p>
<p><b>1 de Agosto del 2011</b>  <b>Colaboradores:</b>                      Aeroméxico,                      Boeing,                      Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA)  <b>Aeronave:</b> Boeing 777-200  <b>Motores:</b>                      General Electric GE-90  <b>Biocombustible:</b> Jatropa.  <b>[28]</b></p>	<p>En agosto del 2011, Aeroméxico y el Gobierno Mexicano anunciaron orgullosamente su participación en el primer vuelo transcontinental con pasajeros utilizando mezcla de biocombustible y combustible tradicional en sus motores GE90.                      El vuelo salió desde el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y arribo al Aeropuerto de Barajas en Madrid sin contratiempos. El vuelo utilizo un 30% de biocombustible suministrado por ASA y extraído de la planta Jatropa.                      Como miembro del SkyTeam y del Grupo de Usuarios de Combustibles Sostenibles para la Aviación, Aeroméxico demostró su compromiso en la promoción y el desarrollo de combustibles alternativos como parte de sus iniciativas ecológicas.</p>

### 3. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS FAME'S

#### 3.1. Babasú (*Orbygnya martiana*)

Crece en el noreste de Brasil, en áreas secas y en poblaciones silvestres de alto polimorfismo, compuestas por millones de plantas. Babasu, *Attalea speciosa* (*Orbygnya martiana*) suple el 60% de los aceites comestibles consumidos en Brasil. Produce además, cantidades considerables de torta para el ganado, carbón de alta calidad para la industria y otros productos derivados.

En *A. speciosa* (Figura 3.1) el tronco recto y cilíndrico alcanza de 15-25m de alto y 25-40 cm de diámetro, termina en un penacho de 15-20 hojas erectas, dobladas hacia abajo en el ápice, de 5 a 10 m de largo, blancuzcas cuando jóvenes, verde- amarillentas en la madurez. La palma produce racimos numerosos, cilíndricos y colgantes, con 200-600 frutos de cáscara ferrugínea. Los cocos de babasu son oblongos y terminan en un ápice agudo, miden de 8 a 15 cm de largo por cinco a siete centímetros de diámetro. Interiormente están formados por el mesocarpo seco y fibroso, que por su alto contenido en carbohidratos y proteína se utiliza localmente en la preparación de alimentos. El endocarpo es muy duro, ocupa más de la mitad del fruto y por su espesor y textura fibrosa resulta muy difícil de quebrar.

Contiene de dos a ocho semillas, generalmente de cuatro a cinco, de 2,5-5 cm de largo por 1-1,5 cm de ancho, de color marrón oscuro por fuera, amarillentas en su interior, el cuál está formado de endosperma sólido, rico en aceite semejante al coco.



**Figura 3.1.**-*Attalea speciosa*, babasu. Porte y fruto entero.

El babasu se exporta en semilla o se prensa localmente para extraer el aceite. La producción se estima en más de 90000 toneladas, cuyo consumo para alimentación, industria de jabones o combustible, aumenta constantemente en Brasil [29].

**Tabla 3.1.-**Gamas de composición de ácidos grasos de aceite vegetal: babasú, expresadas en porcentaje del contenido total de ácidos grasos [30].

Ácidos grasos	Aceite de Babasú
Ácido Caproico C6:0	-
Ácido Caprílico C8:0	2,6 - 7,3
Ácido Cáprico C10:0	1,2 - 7,6
Ácido Láurico C12:0	40,0 -55,0
Ácido Mirístico C14:0	11,0 - 27,0
Ácido Palmítico C16:0	5,2 -11,0
Ácido Esteárico C18:0	1,8 -7,4
Ácido Oleico C18:1	9,0 -20,0
Ácido Linoleico C18:2	1,4 -6,6
Ácido Alfa-Linolénico C18:3	-

### 3.2. Palmiste (*Elaeis guineensis* L)

El aceite de palma se obtiene del fruto de la palma *Elaeis guineensis*, (Ver Figura 3.2). Originaria del golfo de Guinea, en África Occidental, en la actualidad el cultivo de palma se ha extendido por todas las regiones tropicales del mundo. Debido a su mejor rendimiento por hectárea, sus bajos costes de producción y sus múltiples usos. De la palma se utilizan los frutos, tanto la pulpa como la almendra. Una vez transformados, los productos de la palma se utilizan en la industria agroalimentaria (más de 50%), la industria química, cosmética, alimentación animal y más recientemente para agrocombustibles.



**Figura 3.2.-**Palma *Elaeis guineensis* y fruto.

- El aceite de palma rojo, o “aceite de palma”.

Se obtiene de la pulpa y representa entre el 18-26 % del peso fresco de un racimo. Antes de ser refinado o tratado, este aceite está considerado como el alimento natural más rico en vitamina A (cerca de 15 veces más que la zanahoria). Es, por lo tanto, un alimento muy valioso en los casos en que existen



carencias en la dieta, particularmente en África. Sin embargo, durante el proceso de refinado pierde características como su valor nutritivo o calidad de sus ácidos grasos. Después de ser transformado, es un componente esencial de la industria agroalimentaria: se encuentra en aceites de fritura, margarinas, muchos platos precocinados, sopas, patatas fritas, helados, bizcochos, etc.

- *El aceite de palmiste.*

Se extrae de la almendra de la semilla del fruto de la palma y representa entre un 3-6 % del peso fresco del racimo. Su composición química es completamente diferente a la del aceite de palma rojo. El aceite de palmiste es semi-sólido a temperatura ambiente. Tras su transformación es más utilizado por la industria cosmética (jabones y cremas), la industria química (barniz, pintura, resina), la fabricación de detergentes y también la industria agroalimentaria.

- *Torta de palma ó torta de palmiste.*

Son residuos sólidos de la cascarilla de la almendra y son valorados como alimento animal.

En condiciones ideales los cultivos de palma pueden producir 20 toneladas de racimos por hectárea y por año, de los cuales se pueden extraer hasta el 25% de aceite de palma y el 5% de aceite de palmiste. Las semillas de palma son extremadamente duras, convirtiéndolas en aptas para el almacenaje, lo cual significa que no es necesario extraer el aceite en el mismo lugar donde se cosecha. El aceite de palmiste es muy saturado, con énfasis en el ácido láurico como se observa en la *Tabla 3.2*, lo que lo hace fundamentalmente diferente al aceite de palma, presentado una mayor semejanza con el aceite de coco.

**Tabla 3.2.-Gamas de composición de ácidos grasos de aceites vegetales: palma y palmiste, expresadas en porcentaje del contenido total de ácidos grasos [30].**

<b>Ácidos grasos</b>	<b>Aceite de Palma</b>	<b>Aceite de Palmiste</b>
Ácido Caproico C6:0	-	-
Ácido Caprílico C8:0	-	2,4 - 6,2
Ácido Cáprico C10:0	-	2,6 - 5,0
Ácido Láurico C12:0	-	45,0 - 55,0
Ácido Mirístico C14:0	0,5 - 2,0	14,0 - 18,0
Ácido Palmítico C16:0	39,3 - 47,5	6,5 - 10,0
Ácido Esteárico C18:0	3,5 - 6,0	1,0 - 3,0
Ácido Oleico C18:1	36,0 - 44,0	12,0 - 19,0
Ácido Linoleico C18:2	9,0 - 12,0	1,0 - 3,5
Ácido Alfa-Linolénico C18:3	-	-

### **3.3. Coco (*Cocos nucifera*)**

El aceite de coco se obtiene a partir de la copra (pulpa seca del coco; *Cocos Nucifera* L.), ver *Figura 3.3*. La copra tierna se seca, se prensa y se extrae, y después se refina. El cocotero es de utilidad muy diversa para los pueblos trópicos, sobre todo en el sureste de Asia y Polinesia. En la alimentación tropical el aceite de coco suple grasas, minerales y vitaminas esenciales. Se consume como fruta fresca; de la inflorescencia se obtiene una bebida refrescante o fermentada y el tronco y las hojas suplen materiales de construcción, abundantes y durables. El uso local de los productos del cocotero es básico en la economía de los pueblos de Oriente, aún es mayor su valor como artículo de exportación, en forma de copra para aceite o de coir para fibra.

Hasta hace unos 30 años el cocotero era la oleaginosa más importante en el comercio mundial, actualmente ocupa el tercer lugar, después de la soya y la palma africana. La producción exportable de copra se estima en 300 millones de toneladas métricas al año y tres quintas partes provienen de la región compuesta por Filipinas, Indonesia, Sri Lanka y Oceanía. América produce apenas un decimo de la producción exportable mundial, la mitad de la cual corresponde a México y el resto en su mayor parte a los países del Caribe.

El primer uso industrial del aceite de coco fue en jabonería, por su alto contenido de ácido láurico que produce un jabón liviano y espumoso. Esta utilización ha disminuido bastante en los últimos años, remplazada por otros productos industriales. Entre los usos industriales más importantes están la fabricación de margarina, cosméticos y lubricantes, y en menor grado estearina que se aplica en la fabricación de velas; una vez extraído el aceite, la torta se emplea en la alimentación de ganado. La copra seca tiene un uso menor en confitería.



**Figura 3.3.-Palma de coco (*Cocos Nucifera*) y fruto.**

El cocotero pertenece a un género monotípico, es decir de una sola especie, de la subfamilia de las Cocoideas, en la cual se incluyen géneros africanos y americanos. La distribución geográfica del cocotero abarca todas las áreas húmedas de los trópicos. Crece de preferencia en los litorales, aunque se conocen casos en que se desarrolla y fructifica normalmente muy lejos del mar; en las regiones cercanas al ecuador se encuentran hasta 1000 m de altura. La producción comercial, sin embargo está limitada a las llanuras litorales, donde crece mejor en suelos sueltos y bien drenados y con humedad permanente a escasa profundidad, condiciones que son más frecuentes en los llanos al pie de los cerros costeros. Requiere además luz abundante y alta humedad en el aire. Resiste bien los suelos salinos, las sequías prolongadas le son muy desfavorables y aunque la estructura del tronco y hojas parecieran protegerlo de los vientos huracanados, las plantaciones comerciales deben establecerse en lugares abrigados [29]. En la siguiente *Tabla 3.3* se enlista la composición de ácidos grasos del aceite vegetal.

**Tabla 3.3.-Gamas de composición de ácidos grasos de aceite vegetal: coco, expresadas en porcentaje del contenido total de ácidos grasos [30].**

<b>Ácidos grasos</b>	<b>Aceite de Coco</b>
Ácido Caproico C6:0	-
Ácido Caprílico C8:0	4,6 -10,0
Ácido Cáprico C10:0	5,0 -8,0
Ácido Láurico C12:0	45,1 - 53,2
Ácido Mirístico C14:0	16,8 -21,0
Ácido Palmítico C16:0	7,5 -10,2
Ácido Esteárico C18:0	2,0 -4,0
Ácido Oleico C18:1	5,0 -10,0
Ácido Linoleico C18:2	1,0 - 2,5
Ácido Alfa-Linolénico C18:3	-

## 4. DESTILACIÓN A VACÍO DE LOS FAME'S

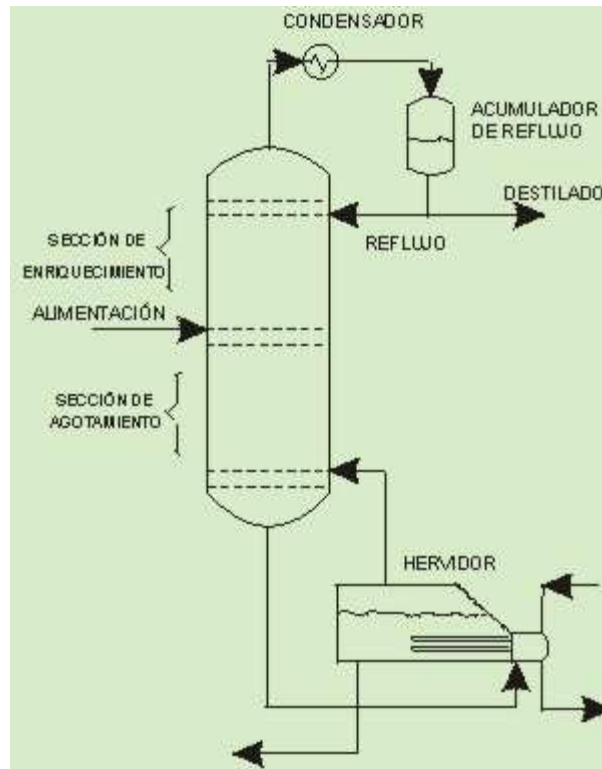
### 4.1. Aspectos Generales sobre Destilación

El objetivo general de la destilación consiste en separar compuestos que tienen diferentes presiones de vapor a una temperatura determinada. La palabra *destilación* se refiere a la separación física de una mezcla en dos o más fracciones que tienen distintos puntos de ebullición. Si se calienta una mezcla líquida de dos materiales volátiles, el vapor que se separa tendrá una mayor concentración del material de menor punto de ebullición que el líquido del cual se desprendió. A la inversa, si se enfría un vapor caliente, el material de mayor punto de ebullición tiende a condensarse en mayor proporción que el material de menor punto de ebullición.

Una columna de destilación consiste en un espacio para que hagan contacto las corrientes de vapor y el líquido con el propósito de que se efectúe una transferencia de masa entre las dos fases. Si bien el contacto de las dos fases en general se lleva a cabo mediante una serie de platos (o charolas), las columnas empacadas se utilizan cada vez más. Sin embargo, en el desarrollo de las bases fundamentales de los diversos procedimientos de cálculo se supone que la columna está equipada con platos.

Se han construido columnas de destilación hasta de 338 pies de altura. Los diámetros alcanzan hasta 50 pies. Las presiones de trabajo para las columnas de destilación alcanzan cifras que varían de 15 mmHg hasta 500 lb/pulg<sup>2</sup> abs.

Tal como se observa en la *Figura 4.1*, el vapor en la parte superior, **V** al salir del plato superior, entra al condensador, donde se le condensa parcial o totalmente. El líquido que se forma se recoge en un acumulador, del cual se extrae la corriente líquida **L**, (denominada reflujo) y la corriente del producto superior, **D** (llamado destilado). Cuando el vapor superior **V**, se condensa totalmente al estado líquido y se extrae el destilado líquido, el condensador será un *condensador total*. Si **V** se condensa parcialmente al estado líquido para proporcionar el reflujo **L** y el destilado **D** se extrae como vapor, el condensador será un condensador parcial. La cantidad de reflujo interno se expresa comúnmente en términos de la relación de reflujo,  $R=L/D$ .



**Figura 4.1.-Esquema de una columna de destilación**

El líquido que sale de la placa inferior de la columna entra al hervidor, en donde se vaporiza parcialmente. El vapor producido fluye otra vez hacia arriba por la columna y el líquido que se extrae del hervidor se llama fondo o producto inferior B. En la práctica, el rehervidor en general está ubicado en el exterior de la columna [31].

La relación de reflujo se evalúa a partir de un valor mínimo  $R_{min}$  caracterizado por las dos condiciones de que, siendo infinito el número de platos para esta relación, toma un valor finito al sufrir aquélla un pequeño aumento. La relación de reflujo mínima se calcula, con ayuda del diagrama de equilibrio.

Para la determinación del reflujo óptimo, o relación de reflujo más económica, han de tenerse en cuenta el coste funcionamiento y el coste inicial de instalación. Al aumentar la relación de reflujo aumenta el consumo de medios de calefacción y de refrigeración, pero disminuye el número de platos necesarios para la separación de la mezcla dada. Como el diámetro de la columna y el tamaño de los cambiadores de calor varían en sentido contrario al número de platos, el coste de instalación alcanza un valor mínimo para una determinada relación de reflujo. El coste de funcionamiento aumenta con la relación de reflujo como ya se ha mencionado anteriormente. La suma de ambos costes con los de amortización, intereses, etc. Nos permite determinar el reflujo más económico y este puede expresarse como múltiplo del reflujo mínimo ( $R = z \cdot R_{min}$ ). El valor de  $z$  oscila entre 1,3 y 5, llegando a 10 como máximo [32].

La destilación al vacío significa, que la presión del proceso de destilación es más baja que la presión atmosférica, para que la destilación pueda llevarse a cabo, la presión de vapor del líquido que está siendo

destilado debe ser un poco más grande que la presión ejercida sobre él. Las columnas al vacío se diferencian de las atmosféricas, porque tienen un diámetro mayor y sus platos están más separados, debido a que se deben manejar mayores volúmenes de vapores debido a la baja presión. Cualquier aumento de vacío aumenta el volumen del vapor rápidamente y posiblemente cause inundación en la columna. Se dice que una torre está inundada cuando el volumen de líquido o de vapores fluyendo en la columna es mayor que la capacidad de esta.

#### **4.2. Paquete de simulación PRO/II**

En la actualidad se utilizan modernas técnicas computacionales para la resolución de las ecuaciones que modelan el comportamiento de la columna de destilación, las cuales se encuentran disponibles en diversos paquetes comerciales de simulación de procesos. Estos permiten lograr una alta precisión en el diseño, la cual solo está limitada por la exactitud en el modelaje del comportamiento termodinámico del sistema. El paquete de simulación PRO/II en general pueden simularse columnas con múltiples alimentaciones, múltiples etapas de enfriamiento, múltiples retiros laterales, condensadores parciales o totales, etc. La metodología utilizada para el diseño de una columna de destilación involucra las siguientes etapas:

1. Caracterización de las corrientes de proceso
2. Selección de métodos termodinámicos
3. Generación balance detallado de masa y energía.

El diseño de columnas de destilación requiere de la predicción del comportamiento en el equilibrio de una mezcla líquido-vapor, el cual depende principalmente de la naturaleza de las especies químicas que constituyen la mezcla y de las condiciones de operación de la unidad en estudio. Los métodos o modelos termodinámicos predicen el comportamiento en el equilibrio de una mezcla líquido. Los métodos de mayor aplicación son: *Soave-Redlich-Kwong* y *Peng-Robinson*.

### 4.3. Trabajos Experimentales en Destilación de FAME's

Para el diseño y simulación de una columna de destilación de FAME de palmiste, coco y babasú se ha tomado como referencia trabajos previos experimentales realizados por *Llamas A. et al., 2012 [2]* y *Llamas, A.; Al-Lal, A.M. et al., 2012 [33]*, con la finalidad de realizar una comparativa entre los resultados obtenidos experimentalmente y los obtenidos a través de la simulación, así mismo contar con una referencia de las condiciones de operación, rendimientos y composiciones de las fracciones ligeras (bioqueroseno) y pesadas de los destilados de FAME's antes mencionados. Los trabajos experimentales se resumen brevemente a continuación para cada uno de los FAME's:

- *FAME de Coco y Palmiste*

El trabajo de investigación realizado por *Llamas A. et al., 2012 [2]*, se centra en la transesterificación del aceite de palmiste y coco con metanol mediante el método de catálisis homogénea. Los FAME's obtenidos se destilan a vacío mediante un equipo usual de laboratorio (columna Vigreux de 41 cm de largo y 3.5 cm de diámetro), En la *Tabla 4.1*, se muestra las condiciones de operación en las que fue llevada a cabo la destilación para cada uno de los FAME's. Los resultados de composición de fracción ligera y pesada del destilado de FAME de coco y palmiste (normalizadas al 100% en peso másico), se muestran en las *Tablas 4.2 y 4.3* respectivamente, estas composiciones se encuentran normalizadas al 100%. Posteriormente la fracción ligera obtenida es mezclada con dos tipos de queroseno fósil llamados K-1 y K-2 (comercial Jet A1), con la finalidad de realizar un análisis de algunas propiedades tales, densidad, viscosidad, punto de congelación, punto de inflamación, etc., con la especificación estándar ASTM D1655.

**Tabla 4.1.- Condiciones de operación del destilado de FAME de coco y palmiste [2].**

<b>Condiciones de operación</b>	<b>FAME de Coco</b>	<b>FAME de Palmiste</b>
Temperatura de destilado, °C a presión de 2 torr	47-114	35-113
Temperatura de destilado, °C a presión atmosférica	273-349	259-348
Fracción de ligera, % másico	81,8	40,8
Fracción pesado, % másico	12,6	58,6

**Tabla 4.2.- Perfil de composiciones de FAME de coco y de la fracción ligera (bioqueroseno) y pesada de la destilación a vacío [2].**

Compuesto	Fame de coco %wt	Fracción ligera (Bioqueroseno de coco)	Fracción pesada
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	8,3	17,3	--
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	3	7	trazas
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	55,5	66,7	16,3
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	14,9	8,9	46,1
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	6,4	0,1	26
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	2,5	--	2,2
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	7,5	trazas	8,7
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	1,9	--	0,7

**Tabla 4.3.- Perfil de composiciones de FAME de palmiste y de la fracción ligera (bioqueroseno) y pesada de la destilación a vacío [2].**

Compuesto	Fame de palmiste %wt	Fracción ligera (Bioqueroseno de palmiste)	Fracción pesada
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	Trazas	3,6	--
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	Trazas	3,5	trazas
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	56,6	90,8	19
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	15	2,1	19,7
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	8,5	--	9,9
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	1,7	--	12,8
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	17,1	--	32,7
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	1,1	--	5,9

- FAME de Babasú

El trabajo de investigación realizado por Llamas, A.; Al-Lal, A.M. et al., 2012 [33], es similar al descrito anteriormente (FAME de coco y palmiste), pero en este caso se realiza la transesterificación del babasu. Posteriormente el FAME de babasu se destila a vacío con unas condiciones de operación que se muestran en la Tabla 4.4. Los resultados obtenidos en relación a las composiciones de fracción ligera y pesada del destilado (normalizadas al 100% en peso másico) se resumen en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.4.- Condiciones de operación del destilado de FAME de babasú [33].**

Condiciones de operación	FAME de Babasu
Temperatura de destilado, °C a presión de 2 torr	47-124
Temperatura de destilado, °C a presión atmosférica	273-359
Fracción de ligera, % másico	73,3
Fracción pesado, % másico	19,4



**Tabla 4.5.- Perfil de composiciones de FAME de babasú y de la fracción ligera (bioqueroseno) y pesada de la destilación a vacío [33].**

Compuesto	Fame de babasú %wt	Fracción ligera (Bioqueroseno de babasú)	Fracción pesada
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	3,91	13,27	--
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	3,30	11,27	--
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	20,85	69,26	21,91
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	31,33	5,58	34,08
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	18	0,61	19,84
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	5,51	--	6,18
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	12,41	--	13,25
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	0,21	--	0,22
C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> (C18:3)	3,45	--	3,58
C <sub>21</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub> (C20:0)	0,19	--	0,19
C <sub>21</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub> (C20:1)	0,72	--	0,75

Las conclusiones principales de estos trabajos es la factibilidad de mezclar hasta un 10% en volumen de bioquerosenos de coco, palmiste y babasú con queroseno fósil Jet A1. Basándose en un análisis de propiedades principales descritas en la norma ASTM D1655. En la *Tabla 4.6*, se muestran las propiedades estudiadas para distintos porcentajes de bioqueroseno de aceite de palmiste, donde la mayoría de las propiedades cumplen con lo descrito en la normativa para el queroseno fósil Jet-A1. A excepción del poder calorífico inferior PCI, ya que de acuerdo a lo norma el PCI para el Jet A1 corresponde a 42,8 MJ/kg. Como se observa en la *Tabla 4.6* esta variación es mucho mayor para un porcentaje de sustitución de 20% v/v, esta propiedad depende de la materia prima y no de la actuación del proceso de producción de biocombustibles. Por otro lado la fracción obtenida en el fondo ha sido evaluada con algunas propiedades descritas en el estándar EN 14213 para biodiesel de calefacción, existiendo la posibilidad de utilizar estas fracciones como porcentaje mezcla con otros biodiesel o diesel fósil para el uso de la combustible de calefacción con la finalidad de cumplir todas las propiedades descritas en la norma, ya que por si solos no cumplen con algunas de estas propiedades como es el caso de la estabilidad de oxidación.

**Tabla 4.6.- Propiedades de las mezclas de bioqueroseno de palmiste y queroseno fósil de acuerdo al estándar ASTM D1655, [2].**




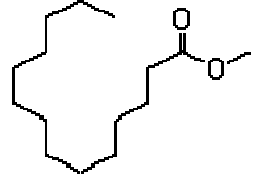
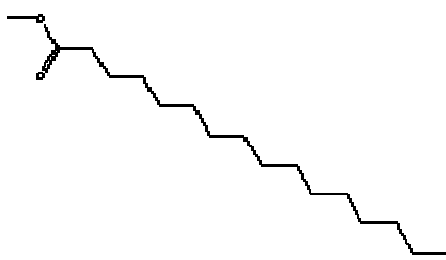



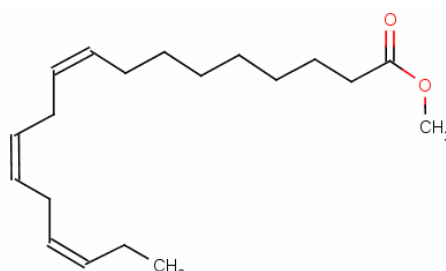
Propiedades	Bioqueroseno de palmiste_0% /Jet A1_100%	Bioqueroseno de palmiste_5% /Jet A1_95%	Bioqueroseno de palmiste_10% /Jet A1_90%	Bioqueroseno de palmiste_20% /Jet A1_80%	Método
Color y aspecto	Claro	Claro	Claro	Claro	ASTM D1500
Composición elemental					
C (%)	84,12	84,47	84,17	82,57	ASTM D5291
H (%)	14,67	14,24	13,97	14,11	
O (%)	1,22	1,29	1,86	3,32	
Densidad a 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	791	802,3	805,5	811,8	ASTM D1298
PCS (MJ/kg)	46,04	45,68	45,17	44,21	ASTM D240
PCI (MJ/kg)	42,9	42,64	42,18	41,19	ASTM D240
Punto de inflamación (°C)	43	43,5	45	45,5	EN ISO 3679
Punto de congelación (°C)	-62	-60	-48,3	-41,5	ASTM D2386
Punto de humo (mm)	27,1	26,8	27,6	29,1	ASTM D1322
Corrosión	1a	1a	1a	1a	ASTM D130
Viscosidad a 20°C (mm <sup>2</sup> /s)	3,42	3,51	3,67	4,06	ASTM D445

## 5. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN

### 5.1. Evaluación de las Propiedades de los FAME's

Los principales metil ésteres de ácidos grasos que constituyen el aceite de coco, palmiste y babasu se resumen en la siguiente *Tabla 5.1*.

*Tabla 5.1-. Típicos metil esteres de biodiesel.*

<b>Compuesto</b>	<b>Formula química</b>	<b>Estructura química</b>
Caprilato de metilo ( <i>Methyl caprylate</i> )	$C_9H_{18}O_2$ (C8:0)	
Caprato de metilo ( <i>Methyl caprate</i> )	$C_{11}H_{22}O_2$ (C10:0)	
Laurato de metilo ( <i>Methyl laurate</i> )	$C_{13}H_{26}O_2$ (C12:0)	
Miristato de metilo ( <i>Methyl myristate</i> )	$C_{15}H_{30}O_2$ (C14:0)	
Palmitato de metilo ( <i>Methyl palmitate</i> )	$C_{17}H_{34}O_2$ (C16:0)	
Estearato de metilo ( <i>Methyl stearate</i> )	$C_{19}H_{38}O_2$ (C18:0)	
Oleato de metilo ( <i>Methyl oleate</i> )	$C_{19}H_{36}O_2$ (C18:1)	
Linoleato de metilo ( <i>Methyl linoleate</i> )	$C_{19}H_{34}O_2$ (C18:2)	
Linolenato de metilo ( <i>Methyl linolenate</i> )	$C_{19}H_{32}O_2$ (C18:3)	

Al utilizar la simulación como herramienta para el diseño de una columna de destilación para FAME de aceite de coco, palmiste y babasu, nos encontramos que la mayoría de estos metil éster que los constituyen (Ver Tabla 5.1), no se encuentra en la base de datos del programa PRO/II, siendo necesario añadir estos componentes con sus respectivas propiedades. Algunas de las propiedades principales de estos compuestos son difíciles de encontrar en la bibliografía, para ello se ha utilizado los métodos de contribución de grupos para estimar las propiedades principales de estos compuestos, mediante la ayuda del programa *PhysProps* (base de datos de propiedades físicas y herramienta de estimación de propiedades). Estos métodos relacionan las propiedades para una dada sustancia con su estructura molecular que tiene especial influencia en el valor de las propiedades termodinámicas. Así, cada sustancia se considera formada por la unión de grupos estructurales definidos (Ver Tabla 5.2). A cada grupo se les asigna un determinado valor como contribución o aporte a dicha propiedad y se supone que es la misma en todo compuesto donde esté presente. De esta manera, proporcionan la ventaja de estimaciones sin demasiados requerimientos.

**Tabla 5.2.- Grupos estructurales de los metil ésteres de ácidos grasos.**

Compuesto	Grupos no aromáticos		Grupos oxigenados	
	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>2</sub> -	=C<	-COO
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	2	6	0	1
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	2	8	0	1
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	2	10	0	1
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	2	12	0	1
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	2	14	0	1
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	2	16	0	1
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	2	15	1	1
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	2	14	2	1
C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> (C18:3)	2	13	3	1

Las propiedades que se evalúan y que se requieren para llevar a cabo la simulación de la columna de destilación en el programa PRO/II son de dos tipos, las primeras de ellas son llamadas **propiedades fijas**, tales como:

- *Peso molecular.*
- *Densidad líquida estándar.*
- *Punto normal de ebullición.*
- *Temperatura crítica.*
- *Presión crítica.*
- *Volumen crítico.*
- *Factor acéntrico.*

Cabe mencionar que en la base de datos que contiene el programa PRO/II, se encuentran dos de los metil ésteres con sus respectivas propiedades: el *Laurato de metilo (C12:0)* y *Oleato de metilo (C18:1)*. Siendo necesario solo estimar las propiedades del resto de los componentes. Para el caso de las propiedades fijas éstas se han encontrado en la base de datos del programa *PhysProps*, a excepción de la densidad líquida estándar, la cual se ha estimado mediante los métodos de contribución de grupos de dicho programa mencionado anteriormente. Los resultados se muestran en la *Tabla 5.3*.

**Tabla 5.3.- Propiedades fijas de los metil ésteres de ácidos grasos.**

Compuesto	Peso Molecular, <i>PM</i>	Densidad líquida estándar, $\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Punto normal de ebullición, [K]	Temperatura crítica, <i>Tc</i> [K]	Presión crítica, <i>Pc</i> [kPa]	Volumen crítico, <i>Vc</i> [m <sup>3</sup> /kg-mol]	Factor acéntrico, $\omega$
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> ( <b>C8:0</b> )	158,243	839,351	466,69	644,48	2248	0,6223	0,5208
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> ( <b>C10:0</b> )	186,297	909,402	505,41	681,5	2056	0,8078	0,6165
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> ( <b>C12:0</b> )	214,351	1029,9	540	712	1740	0,758	0,68994
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> ( <b>C14:0</b> )	242,405	955,603	572,08	740,60	1635	1,1044	0,7753
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> ( <b>C16:0</b> )	270,456	973,495	600,41	765,60	1486	1,2567	0,8352
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> ( <b>C18:0</b> )	298,514	811,193	625,97	788,37	1158	1,3216	0,8155
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> ( <b>C18:1</b> )	296,499	876,88	617	764	1280	1,06	1,0494
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> ( <b>C18:2</b> )	294,483	1316,151	620,41	782,26	1200	1,1989	1,7184
C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> ( <b>C18:3</b> )	292,467	1354,060	625,41	789,48	1265	1,1742	1,6970

Con la finalidad de observar la variación que pudiera existir entre la base de datos del programa de PRO/II y la base de datos de propiedades del programa *PhysProps*. La *Tabla 5.4*, muestra una comparativa de las propiedades fijas de los dos compuestos existentes (C12:0 y C18:1) en la base de datos del programa PRO/II, frente a las propiedades que se obtienen de la base de datos del programa *PhysProps*. En la cual, podemos observar que las propiedades son iguales a excepción de la densidad que tiene una variación mínima alrededor de un  $\pm 0,8\%$ .

**Tabla 5.4.- Comparativa de Propiedades fijas de los metil ésteres de ácidos grasos de la base de datos de los programas PRO/II y PhysProps.**

Base de datos	Densidad líquida estándar, $\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Normal punto de ebullición, [K]	Temperatura crítica, <i>Tc</i> [K]	Presión crítica, <i>Pc</i> [kPa]	Volumen crítico, <i>Vc</i> [m <sup>3</sup> /kg-mol]	Factor acéntrico, $\omega$
PRO/II	1029,9	540	712	1740	0,758	0,68994
PhysProps	1021,338	540,04	712,04	1740	0,7583	0,6899
PRO/II	876,88	617	764	1280	1,06	1,0494
PhysProps	870,224	617,04	764,04	1280	1,0605	1,0494

El segundo tipo de propiedades son las llamadas **propiedades dependientes de la temperatura**, siendo las siguientes:

- *Presión de vapor*
- *Entalpía*
- *Calor latente de vaporización*
- *Densidad Líquida*
- *Viscosidad Líquida / Vapor*
- *Conductividad Líquida/ Vapor*
- *Superficie de Tensión*

Este tipo de propiedades se agregan en el programa PRO/II, mediante una tabulación de datos a distintas temperaturas. De la base de datos del programa *PhysProps*, se obtienen las propiedades de *presión de vapor*, *calor latente de vaporización*, *capacidad calorífica líquida*, y *entalpía* a distintas temperaturas para cada uno de los metil ésteres. Los resultados se muestran en el *anexo 9.1*, de la *Tabla 9.1* a la *Tabla 9.7*. A excepción de los demás compuestos el *calor latente de vaporización* del Linoleato de metilo y Linolenato no fue hallado en la base de datos de dicho programa, siendo necesario calcularlo mediante los métodos de contribución de datos, herramienta de cálculo con la que cuenta el programa *PhysProps*. Los resultados de *calor latente de vaporización* para dichos compuestos se muestran en las *Tabla 9.7* y *9.8* respectivamente. Del mismo modo también se calcula el resto de propiedades dependientes de la temperatura, tales como, *densidad líquida*, *viscosidad líquida/vapor*, *conductividad líquida/vapor* y *superficie de tensión* para cada uno de los metil ésteres y los resultados a distintas temperaturas se muestran en el *anexo 9.1*, de la *Tabla 9.8* a la *Tabla 9.14*.

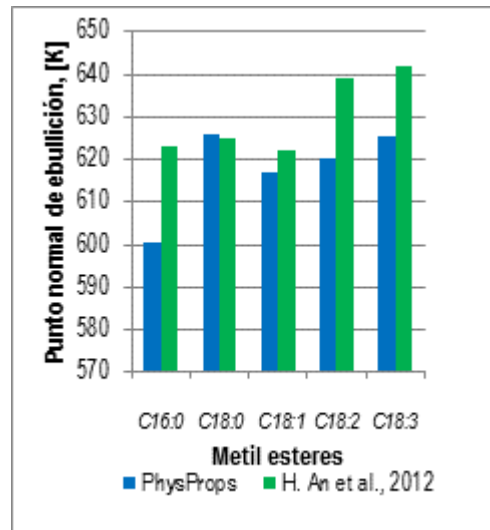
En la literatura, existe una documentación reciente relativa a las propiedades físicas de metil ésteres realizada por *H. An et al., 2012 [34]*. En su trabajo, se realiza una estimación detallada de propiedades físicas tales como, propiedades críticas, presión vapor, calor latente de vaporización, densidad, conductividad, viscosidad y tensión superficial, para cinco ésteres metílicos típicos de biodiesel (C16:0, C18:0, C18:1, C18:2 y C18:3), utilizando métodos de contribución de grupos, correlaciones empíricas, etc. Para cada propiedad física se identificó el mejor modelo de predicción. Siendo este trabajo una referencia para los datos que se han obtenido a través del programa *PhysProps*. Con la finalidad de ver la variación que existe entre las propiedades obtenidas en este proyecto con las propiedades tomadas de referencia de este artículo, se realiza una comparativa y se toman como ejemplo los datos de cuatro propiedades fijas (*punto normal de ebullición*, *temperatura crítica*, *presión crítica* y *volumen crítico*) y de una propiedad dependiente de la temperatura (*presión de vapor*) para observar dicha variación. Los datos obtenidos en este proyecto y los datos de referencia para el punto normal de ebullición, temperatura crítica, presión crítica y volumen crítico se muestran en las *Tablas 5.5*, *5.6*, *5.7* y *5.8* respectivamente, cuya variación para cada una de ellas se aprecian en las *Figuras 5.1*, *5.2*, *5.3* y *5.4* respectivamente. El compuesto que presentó una variación significativa es el palmitato de metilo C16:0, teniendo una

variación de  $\pm 3,8\%$  para el punto normal de ebullición,  $\pm 2,1\%$  para la temperatura crítica,  $\pm 16,9\%$  para la presión crítica y finalmente  $\pm 15,9\%$  para el volumen crítico.

Para el caso de la propiedad dependiente de la temperatura (*presión de vapor*), se tomo como ejemplo el compuesto palmitato de metilo C16:0 para representar gráficamente la variación de esta propiedad frente a la temperatura. En la *Figura 5,5* se muestran los dos valores de presión de vapor, los obtenidos en este proyecto y los tomados de referencia del artículo, cuya variación entre ambos datos es significativa para valores de temperatura superiores a 600 °C. En los métodos de contribución de datos siempre se presenta un rango de fiabilidad de datos en cuya variación es mínima, cuando se sale de este rango esta variación incrementa, esto se observa muy bien en la diferencia que encontramos en la presión de vapor calculada mediante métodos de contribución de datos tomadas de referencia del artículo de investigación frente a las obtenidas de la base de datos del programa *PhysProps*.

**Tabla 5.5.-** Punto normal de ebullición obtenido de la base de datos del programa *PhysProps* y del artículo de referencia.

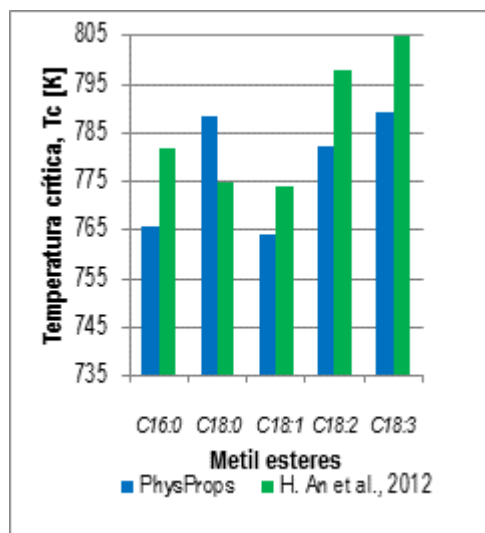
Compuesto	Punto normal de ebullición, [K]	Punto normal de ebullición, [K] (H. An et al., 2012).
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	600,41	623
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	625,97	625
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	617	622
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	620,41	639
C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> (C18:3)	625,41	642



**Figura 5.1.-**Comparativa del punto normal de ebullición obtenido de la base de datos del programa *PhysProps* y del obtenido del artículo de referencia.

**Tabla 5.6.-**Temperatura crítica obtenida de la base de datos del programa PhysProps y del artículo de referencia.

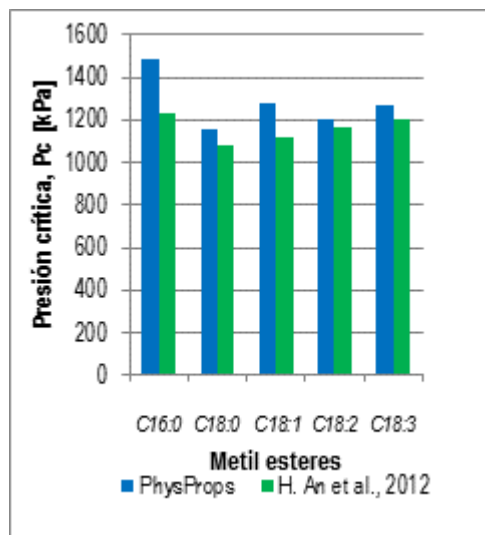
Compuesto	Temperatura crítica, $T_c$ [K]	Temperatura crítica, $T_c$ [K] (H. An et al., 2012).
$C_{17}H_{34}O_2$ (C16:0)	765,6	782
$C_{19}H_{38}O_2$ (C18:0)	788,37	775
$C_{19}H_{36}O_2$ (C18:1)	764	774
$C_{19}H_{34}O_2$ (C18:2)	782,26	798
$C_{19}H_{32}O_2$ (C18:3)	789,48	805



**Figura 5.2.-**Comparativa de la temperatura crítica obtenida de la base de datos del programa PhysProps y de la obtenida del artículo de referencia.

**Tabla 5.7.-**Presión crítica obtenida de la base de datos del programa PhysProps y del artículo de referencia.

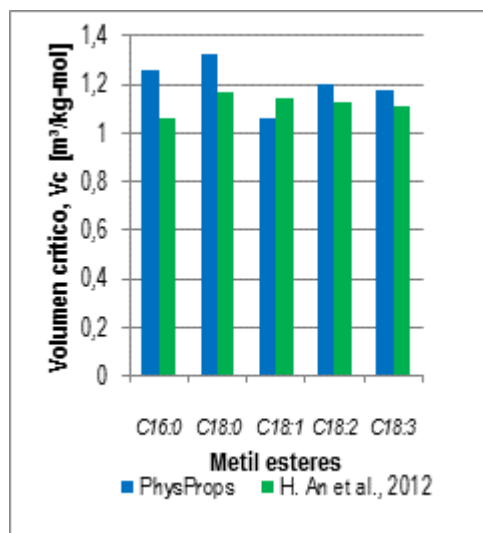
Compuesto	Presión crítica, $P_c$ [kPa]	Presión crítica, $P_c$ [kPa] (H. An et al., 2012).
$C_{17}H_{34}O_2$ (C16:0)	1486	1235
$C_{19}H_{38}O_2$ (C18:0)	1158	1084
$C_{19}H_{36}O_2$ (C18:1)	1280	1122
$C_{19}H_{34}O_2$ (C18:2)	1200	1162
$C_{19}H_{32}O_2$ (C18:3)	1265	1205



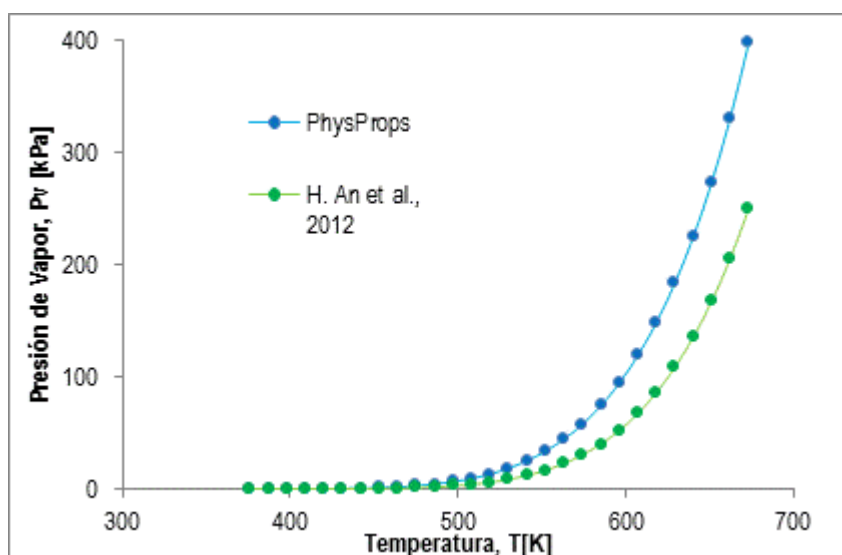
**Figura 5.3.-**Comparativa de la presión crítica obtenida de la base de datos del programa PhysProps y de la obtenida del artículo de referencia.

**Tabla 5.8.** Volumen crítico obtenido de la base de datos del programa PhysProps y del artículo de referencia.

Compuesto	Volumen crítico, Vc [m³/kg-mol]	Volumen crítico, Vc [m³/kg-mol] (H. An et al., 2012).
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> <b>(C16:0)</b>	1,2567	1,057
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> <b>(C18:0)</b>	1,3216	1,167
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> <b>(C18:1)</b>	1,06	1,147
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> <b>(C18:2)</b>	1,1989	1,127
C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> <b>(C18:3)</b>	1,1742	1,107



**Figura 5.4.** Comparativa del volumen crítico obtenido de la base de datos del programa PhysProps y del obtenido del artículo de referencia.



**Figura 5.5.** Comparativa de la presión de vapor obtenida por la estimación de métodos de contribución de grupos del programa PhysProps y del artículo de referencia.

## 5.2. Evaluación de las Condiciones de Operación

Para el diseño de columnas de destilación y selección de condiciones de operación óptimas, se tienen que tener en cuenta los siguientes puntos [31].

1. La determinación del número mínimo de etapas requeridas para efectuar una separación determinada a una relación de flujo dada.
2. El diseño económico óptimo de una columna de destilación.
3. Determinación de la localización óptima del plato de alimentación.

Los procedimientos de cálculo se determinan fijando las siguientes variables:



1. *La definición completa de alimentación (gasto total, composición y condición térmica).*

La composición másica para el FAME de coco, palmiste y babasu se ha establecido de acuerdo a los datos reportados en trabajos de investigación experimentales citados en el apartado 4 en las *Tablas 4.2, 4.3 y 4.5* respectivamente. Lo más frecuente es dar dos especificaciones de composición; la de un componente en el destilado y la de otro en el fondo. De esta manera el resto de las composiciones vienen fijadas por el balance. Se denominan componentes clave a aquellos para los que se especifica la separación. El componente clave ligero es el más volátil de ambos y el otro componente será el clave pesado, dichas especificaciones para cada uno de los FAME's se han determinado en base a los resultados experimentales mostrados en las tablas mencionadas anteriormente, siendo las siguientes:

- *FAME de coco:* **Componente clave ligero:** *Laurato de metilo (C12:0).*

**Componente clave pesado:** *Palmitato de metilo (C16:0).*

**Especificación 1:** Composición másica de (C16:0) en la corriente de destilado sea de 0,1 kg/h.

**Especificación 2:** Composición másica de (C12:0) en la corriente de fondo sea de 5 kg/h.

- *FAME de palmiste:* **Componente clave ligero:** *Laurato de metilo (C12:0).*

**Componente clave pesado:** *Palmitato de metilo (C16:0).*

**Especificación 1:** Composición másica de (C16:0) en la corriente de destilado sea de 0,01 kg/h.

**Especificación 2:** Composición másica de (C12:0) en la corriente de fondo sea de 6 kg/h.

- *FAME de babasu:* **Componente clave ligero:** *Miristato de metilo (C14:0)*

**Componente clave pesado:** *Palmitato de metilo (C16:0).*

**Especificación 1:** Composición másica de (C16:0) en la corriente de destilado sea de 0,6 kg/h.

**Especificación 2:** Composición másica de (C14:0) en la corriente de fondo sea de 15 kg/h.

2. *La presión en la columna.*

Una columna puede trabajar a presión, a vacío o a presión atmosférica. Lo más económico resultaría operar a presión atmosférica, pero esto no siempre es posible. Se va a operar a vacío si:

- La temperatura produce descomposición de los componentes, ensuciamiento o polimerización.
- La alta temperatura en el hervidor complica el aporte de calor.

Cuando se considera trabajar a vacío se debe elegir la mayor presión posible, pues a medida que aumenta el vacío aumenta el diámetro de la columna y por tanto su coste. Para los tres casos de destilación de FAME's se ha decidido trabajar a presión a vacío de 2 torr principalmente para evitar el craqueo térmico.

3. *El tipo de condensador.*

4. *El número de plato que se encuentran arriba del de alimentación y que incluye a este último/a.*

5. *El número total de platos o etapas.*

Para los puntos 4, 5 se suelen usar métodos aproximados entre ellos se encuentra el método de *Fenske-Underwood-Gilliland*, en este caso se estimaran mediante la ayuda del software PRO/II, metodología que se describirá más adelante.

6. *Otras dos especificaciones que usualmente son la relación de reflujo y el gasto del destilado.*

El reflujo mínimo se calculara mediante PRO/II, usualmente el reflujo real se suele estimar 1,5 veces el reflujo mínimo este tiene importancia ya que influye en el número total de etapas/platos y en el plato de alimentación, lo cual se ve reflejado en un coste económico, para ello se establecerán diferentes flujos reales con la finalidad de ver la influencia de este valor en el cálculo del número de platos y plato de alimentación, en base a ello se decidirá el flujo real para cada una de las columnas de destilación.

Las variables que se incluyen en los números 1, 2 y 3 señalados con anterioridad, siempre son fijas, y por conveniencia se les denomina colectivamente como las “*especificaciones usuales*”. El resto de las variables se les denomina “*especificaciones adicionales*”.

### 5.3. Metodología de Cálculo en el Software de Simulación Procesos de Ingeniería PRO/II.

#### 5.3.1. Planteamiento del problema


Se desea diseñar una columna de destilación para cada uno de los FAME's (coco, palmiste y babasu), con la finalidad de obtener una fracción ligera compuesta principalmente por  $C8:0$ ,  $C10:0$ ,  $C12:0$  y  $C14:0$ , con víperas a ser utilizado como bioqueroseno. La columna tendrá una presión de trabajo de 2 torr, con la finalidad de evitar el craqueo térmico. La alimentación a la columna y composiciones deseadas para el FAME de coco, palmiste y babasu se presenta en el capítulo 4 en las Tablas 4.2, 4.3 y 4.5 respectivamente. Se desea en particular encontrar el número más pequeño de platos requeridos para llevar a efecto la separación.

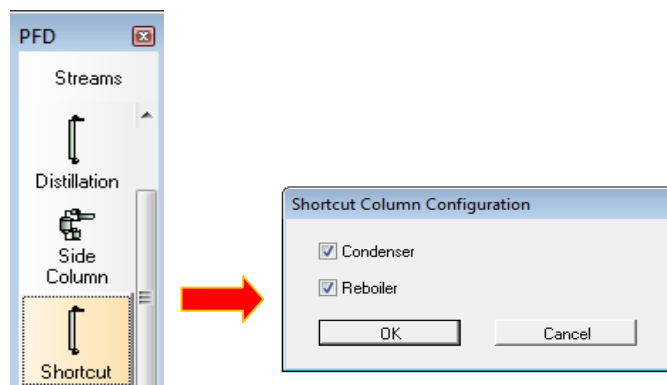
#### 5.3.2. Metodología de solución

El diseño de la columna de destilación se propuso mediante el uso de la herramienta de diseño PRO/II. La solución está dividida en dos secciones. En la primera se usa el método **Shortcut** que tiene como objetivo determinar, como primera aproximación, el número de platos teóricos, el plato de alimentación y los efluentes de la columna. Para ello se debe trabajar con la relación de reflujo mínima que requerirá de un número infinito de platos para llevar a cabo la separación. Una vez estimado este reflujo se procede a trabajar con el reflujo real para determinar el número de platos teóricos y el plato de alimentación y la nueva composición de los productos.

En la segunda parte de la solución se emplea el método riguroso, **Distillation**, para obtener resultados más confiables, a partir de las deducciones obtenidas en el método *Shortcut*. A continuación se describen los dos métodos de solución ocupando como ejemplo el FAME de coco.

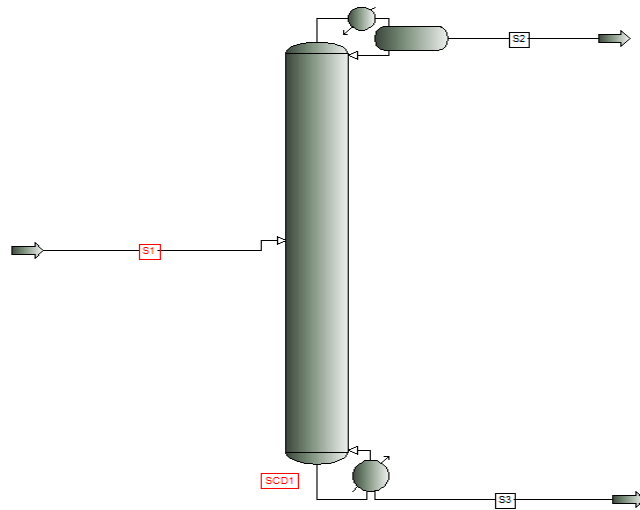
#### - Método *Shortcut* (PRO/II)

1. Al estar en la pantalla de trabajo de PRO/II, no dirigimos al icono  (*Show or Hide PFD Palette*), en ese momento se abre la barra PFD que contiene todas las unidades de proceso. Seleccionamos *Shortcut*, hacemos clic en la pantalla para que aparezca la columna de destilación seleccionando una columna de configuración con *Condenser* y *Reboiler* (Ver Figura 5.6).




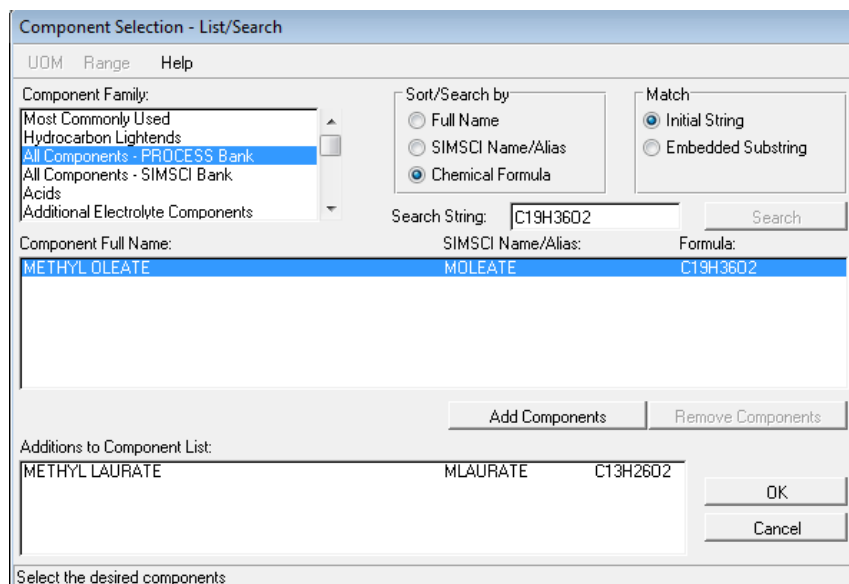
**Figura 5.6.-Elección del método Shortcut en PRO/II.**

2. A continuación nos dirigimos al icono **Streams**, en la barra de unidades de proceso y dibujamos la corriente de entrada a la columna de destilación (*alimentación S1*) y las dos de salida, una en la parte superior (*destilado, S2*) e inferior (*fondo, S3*), tal como se muestra en la siguiente *Figura 5.7*.



**Figura 5.7.-Columna de destilación por el método Shortcut en PRO/II.**


3. Nos dirigimos al icono , para seleccionar todas las sustancias de trabajo. Cuando aparezca la ventana de nombre *SIMSCI-Component Selection*, damos clic en *Select from list*, elegimos las sustancias (*Add Components*) y luego *OK* (Ver *Figura 5.8*).



**Figura 5.8.-Selección de componentes en PRO/II.**

En este caso solo encontramos dos de las sustancias deseadas (*C12:0* y *C18:1*), para el resto de la sustancias es necesario crearlas de acuerdo a lo descrito en el apartado 5.1. Como primer paso se

entra en el icono antes mencionado (*component selection*), se da clic en *User-defined*, se asigna el nombre del componente nuevo a agregar (*component name*) → Add → OK. En seguida aparecerá una leyenda donde indica que es un compuesto nuevo y que las propiedades deberán de agregarse en la sección correspondiente “*Properties of newly added components must be supplied in component property section*”.

Posteriormente se selecciona el icono , para agregar las propiedades termodinámicas de los compuestos nuevos creados, en esta sección se cuenta con dos tipos de propiedades, las llamadas fijas (*Fixed*) y las dependientes de la temperatura (*Temperature Dependent*), estas propiedades se describen con más detalle en el apartado 5.1. Como ejemplo de las propiedades fijas tenemos el *peso molecular, densidad estándar, punto normal de ebullición*, etc., las cuales, se agregan para cada uno de los compuestos creados, tal como se muestra en la siguiente *Figura 5.9*.

Component Properties - Fixed Properties			
UOM Range Help			
	Molecular Weight	Standard Liquid Density	Normal Boiling Point
Methyl Caprylate	158.2430	839.35 kg/m <sup>3</sup>	466.69 K
Methyl Caprate	186.2970	909.40 kg/m <sup>3</sup>	505.41 K
Methyl Myristate	242.4050	955.60 kg/m <sup>3</sup>	572.08 K
Methyl Palmitate	270.4560	973.50 kg/m <sup>3</sup>	600.41 K
Methyl Stearate	298.5140	811.19 kg/m <sup>3</sup>	625.97 K
Methyl Linoleate	294.4830	1316.2 kg/m <sup>3</sup>	620.41 K
MLAURATE	214.3482	1029.9 kg/m <sup>3</sup>	540.00 K
MOLEATE	296.4936	876.88 kg/m <sup>3</sup>	617.00 K

**Figura 5.9.**-Adición de propiedades fijas para componentes nuevos creados en PRO/II.

Para el caso de las propiedades dependientes de la temperatura se agregan en forma de tabulación (Ver *Figura 5.10*) de acuerdo a los datos obtenidos en el apartado 5.1 (Ver anexo 9.1).

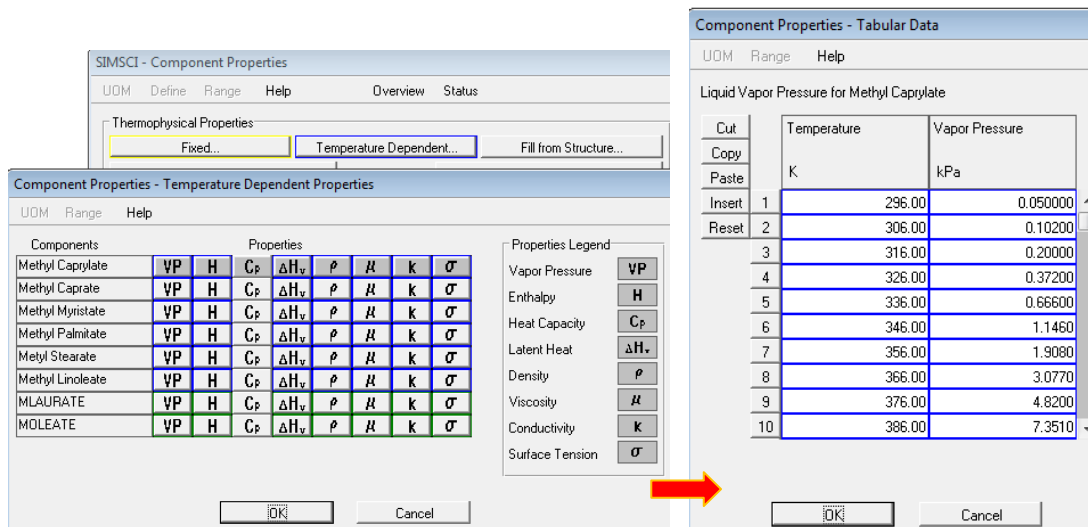



Figura 5.10.-Adición de propiedades dependientes de la temperatura en PRO/II.

4. Con el icono , seleccionamos el método termodinámico adecuado para las sustancias de trabajo y según las condiciones de operación. Para nuestro caso el modelo termodinámico elegido es el de *Soave-Redlich-Kwong* (Ver Figura 5.11).

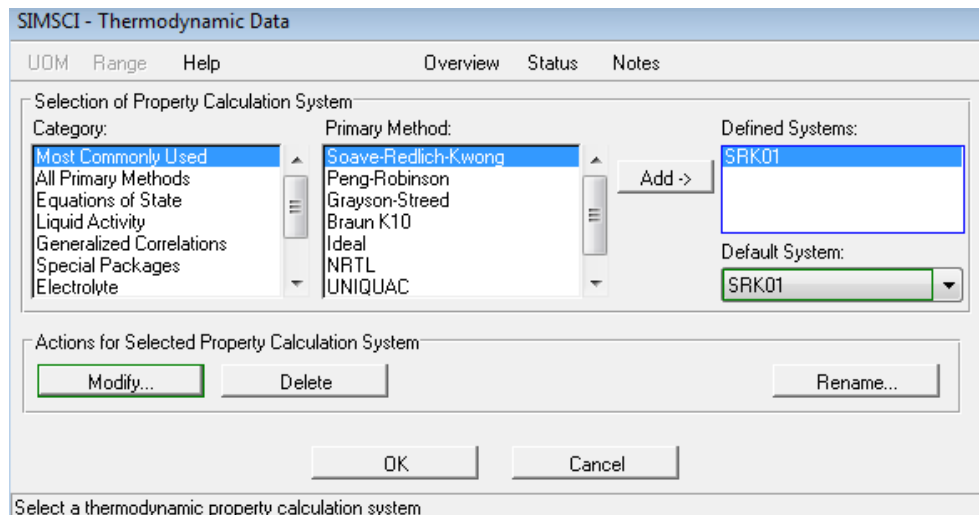


Figura 5.11.-Selección del modelo termodinámico en PRO/II.

5. Al hacer doble clic en la corriente **S1**, seleccionamos *Flowrate and Composition* → *Individual Component Flowrates* e ingresamos los valores de flujos de cada sustancia en la alimentación. Después en la condición térmica se selecciona como primera especificación la *Temperatura* y como segunda especificación la *Presión* (Ver Figura 5.12).

Component	Component Flowrate (kg/hr)
Methyl Caprylate	8.3000
Methyl Caprate	3.0000
Methyl Myristate	14.9000
Methyl Palmitate	6.4000
Methyl Stearate	2.5000
Methyl Linoleate	1.9000
MLAURATE	55.5000
<b>Compositions</b>	<b>Total: 100.00</b>

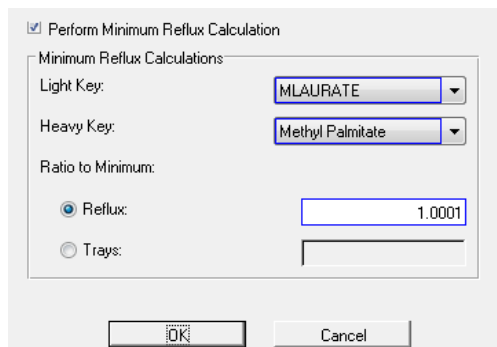
Thermal Condition	
First Specification:	Temperature 298.15 K
Second Specification:	Pressure 0.26664 kPa

Figura 5.12.-Composición y condiciones térmicas de la corriente de alimentación S1 en PRO/II.

6. Al hacer doble clic en la columna **SCD1**, seleccionamos *Minimum Reflux* → *Perform Minimum Reflux Calculation* e ingresamos el componente clave liviano (C12:0) y el clave pesado (C16:0). Trabajamos con una relación de reflujo de 1.00001, para especificar que estamos trabajando con el reflujo mínimo.

Después seleccionamos *Performance Specifications* en este apartado se colocan dos especificaciones para cada una de las corrientes de salida S2 y S3. Con la finalidad de introducir en el programa valores deseados de productos. Para el caso de la corriente de destilado S2 se ha elegido especificar la composición másica en kg/h del componente clave pesado (*Palmitato de metilo*, C16:0) que se desea obtener en esta corriente, basándonos en los datos tomados como referencia de trabajos experimentales (Ver apartado 4.1). En la segunda especificación se introducen la composición másica en kg/h del componente clave ligero (*Laureato de metilo* C12:0). La manera de introducir estas especificaciones en PRO/II es de la siguiente manera: en **SC1SPEC1**, seleccionamos *Parameter* → *Stream* → **S2** → *Parameter* → *Flowrate* → *Dry Basis* → *Starting component*, (C16:0), → OK. Después *value* → **0,1 kg/h**. En la especificación **SC1SPEC2**, seleccionamos *Parameter* → *Stream* → **S2** → *Parameter* → *Flowrate* → *Dry Basis* → *Starting component*, (C12:0), →OK. Luego *value* → **5 kg/h**.

Después seleccionamos *Products*, en la corriente **S2** vamos a ingresar un valor arbitrario de flujo de salida con el cual comenzaran los cálculos *Estimate* → **40 kg/h** →OK (Ver Figura 5.13).





Specifications:

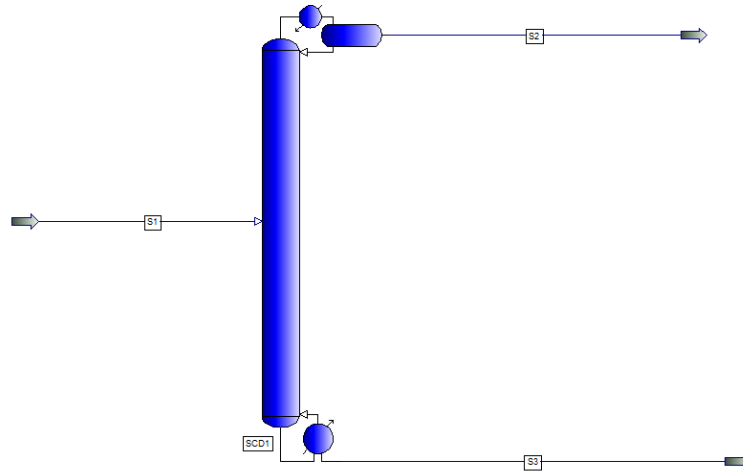
1	SC1SPEC1 - Stream S2 Flowrate of component Methyl Palmitate on a Dry basis in kg/hr = 0.10000 within the default tolerance
2	SC1SPEC2 - Stream S3 Flowrate of component MLAURATE on a Dry basis in kg/hr = 5.0000 within the default tolerance

Product	Est. Type	Estimate	UOM	Phase	Pres. Type	Pressure	UOM
1 S2	Rate	40.000	kg/hr	Liquid	Delta P	0.00000	kPa
2 S3			kg-mol/hr	Liquid	Delta P	0.00000	kPa

**Figura 5.13.-**Determinación de componentes clave liviano, pesado y especificaciones, método Schortcut en PRO/II.

7. Corremos el programa  y seleccionamos generación de datos, *Output* → *Generate Text Report* ó mediante el icono , la columna deberá ponerse en color azul (Ver Figura 5.14), lo cual, indica que no existen errores en el cálculo.



**Figura 5.14.-**Columna de destilación por el método Shortcut en PRO/II.

En la *Figura 5.15* se muestra una parte del reporte generado en PRO/II, donde nos indica los flujos molares y máxicos de las corrientes de salida, así como el valor calculado de las especificaciones que indicamos en el número 6. En la siguiente *Figura 5.16* se muestra el radio mínimo de reflujo y el número de platos mínimo por Fenske. Por ultimo en la *Figura 5.17* se muestran las composiciones de las tres corrientes con sus condiciones térmicas correspondientes.

STREAM + PHASE		MOLES KG-MOL/HR	WEIGHT KG/HR	LIQUID VOL M3/HR	NORM VAPOR(1) M3/HR	SECTION	NUM TRAYS
S2	L	0.32	65.73	0.07	7.18	1	2.37
S3	L	0.13	34.27	0.04	2.97		
<b>TOTALS</b>		<b>0.45</b>	<b>100.00</b>	<b>0.10</b>	<b>10.15</b>		<b>2.37</b>

PARAMETER TYPE	COMP. NUM	SPECIFICATION TYPE	SPECIFIED VALUE	CALCULATED VALUE
STRM S2	4	WT RATE	1.000E-01	9.995E-02
STRM S3	7	WT RATE	5.000E+00	5.000E+00

**Figura 5.15.-**Flujos totales de las corrientes de salida y cálculo de especificaciones en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II.



SUMMARY OF UNDERWOOD CALCULATIONS

MINIMUM REFLUX RATIO	0.02351
FEED CONDITION 0	1.29391
FENSKE MINIMUM TRAYS	2.37213

OPERATING REFLUX RATIO 1.00 \* R-MINIMUM

TOTAL TRAYS	FEED TRAY	R/R-MIN	M/M-MIN	REFLUX RATIO	DUTY, M*KJ/HR CONDENSER	REBOILER
33	26	1.000	13.792	2.4E-02	-9.426E-05	1.671E-04
33	26	1.000	13.792	2.4E-02	-9.426E-05	1.671E-04
33	26	1.000	13.791	2.4E-02	-9.426E-05	1.671E-04
33	26	1.000	13.790	2.4E-02	-9.426E-05	1.671E-04
33	26	1.000	13.789	2.4E-02	-9.426E-05	1.671E-04

(1) NORMAL VAPOR VOLUME IS 22.414 M<sup>3</sup>/KG-MOLE (273.15 K AND 1 ATM)

Figura 5.16.-Reflujo mínimo,  $R_{min}$  en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II.

STREAM ID	NAME	S1	S2	S3
PHASE		LIQUID	LIQUID	LIQUID
THERMO ID		SRK01	SRK01	SRK01
FLUID RATES, KG-MOL/HR				
1	Methyl Caprylate	0.0525	0.0524	6.3211E-06
2	Methyl Caprate	0.0161	0.0160	5.6521E-05
3	Methyl Myristate	0.0615	0.0158	0.0457
4	Methyl Palmitate	0.0237	3.6958E-04	0.0233
5	Methyl Stearate	8.3748E-03	2.4921E-05	8.3498E-03
6	Methyl Linoleate	6.4520E-03	1.0204E-11	6.4519E-03
7	MLAURATE	0.2589	0.2356	0.0233
8	MOLEATE	0.0253	1.0380E-05	0.0253
TOTAL RATE, KG-MOL/HR				
		0.4527	0.3203	0.1324
TEMPERATURE, K				
		298.1500	348.1150	400.5478
PRESSURE, KPA				
		0.2666	0.2666	0.2666
ENTHALPY, M*KJ/HR				
		5.5389E-03	0.0114	0.0143
MOLECULAR WEIGHT				
		220.8810	205.2158	258.7720
MOLE FRAC VAPOR				
		0.0000	0.0000	0.0000
MOLE FRAC LIQUID				
		1.0000	1.0000	1.0000

Figura 5.17.-Composiciones y propiedades térmicas de las corrientes S1, S2 y S3 en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II.

La relación mínima de reflujo,  $R_{min}$  calculada mediante PRO/II es **0,02351** (Ver Figura 5.16), este valor se emplea en la ecuación  $z=R/R_{min}$ , usualmente el reflujo real es 1,5 veces más que el reflujo mínimo con este valor de  $z=1,5$  corregimos la razón de reflujo indicada en el número 6 y ejecutamos nuevamente el programa. En la Figura 5,18 se puede observar que aparecen los mismos resultados de flujos de corrientes y el valor calculado de las especificaciones descritos anteriormente. El cambio se observa en la Figura 19, donde ya no aparece un número infinito de platos, se observa que para un determinado reflujo se establece una cantidad de número platos así como el plato de alimentación. En primera instancia señalando el reflujo que hemos escogido de 1,5 tenemos ya definido un número de platos teóricos y el plato de alimentación. Al aumentar el reflujo disminuye el número de platos, esto influye en costes de operación y de instalación por ello se debe llevar a una relación de reflujo optima con la finalidad de minimizar costes en base esto se decidirá una relación de reflujo que minimice el número de

platos pero que no sea excesivamente mayor al fijado en un principio. Por último en la *Figura 20*, podemos observar nuevamente las composiciones y propiedades termodinámicas de las tres corrientes.

STREAM + PHASE	TOTAL STREAM RATES				SECTION	NUM TRAYS
	MOLES KG-MOL/HR	WEIGHT KG/HR	LIQUID VOL M3/HR	NORM VAPOR(1) M3/HR		
S2 L	0.32	65.73	0.07	7.18	1	2.37
S3 L	0.13	34.27	0.04	2.97		
TOTALS	0.45	100.00	0.10	10.15		2.37

SPECIFICATIONS

PARAMETER TYPE	COMP. NUM	SPECIFICATION TYPE	SPECIFIED VALUE	CALCULATED VALUE
STRM S2	4	WT RATE	1.000E-01	9.995E-02
STRM S3	7	WT RATE	5.000E+00	5.000E+00

*Figura 5.18.*-Flujos totales de las corrientes de salida y cálculo de especificaciones para un reflujo de  $1,5 \cdot R_{min}$ , en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II.

SUMMARY OF UNDERWOOD CALCULATIONS

MINIMUM REFLUX RATIO 0.02351  
 FEED CONDITION Q 1.29391  
 FENSKE MINIMUM TRAYS 2.37213

OPERATING REFLUX RATIO **1.50 \* R-MINIMUM**

TOTAL TRAYS	FEED TRAY	R/R-MIN	M/M-MIN	REFLUX RATIO	DUTY, M*KJ/HR	
					CONDENSER	REBOILER
21	17	1.250	8.694	2.9E-02	-9.480E-05	1.676E-04
17	14	1.375	7.317	3.2E-02	-9.507E-05	1.679E-04
15	12	1.500	6.307	3.5E-02	-9.534E-05	1.682E-04
13	11	1.625	5.534	3.8E-02	-9.561E-05	1.684E-04
12	9	1.750	4.923	4.1E-02	-9.588E-05	1.687E-04


(1) NORMAL VAPOR VOLUME IS 22.414 M3/KG-MOLE (273.15 K AND 1 ATM)

*Figura 5.19.*-Número de platos y plato de alimentación para un reflujo de  $1,5 \cdot R_{min}$ , en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II.

STREAM ID		S1	S2	S3
NAME				
PHASE		LIQUID	LIQUID	LIQUID
THERMO ID		SRK01	SRK01	SRK01
<b>FLUID RATES, KG-MOL/HR</b>				
1	Methyl Caprylate	0.0525	0.0524	6.3211E-06
2	Methyl Caprate	0.0161	0.0160	5.6521E-05
3	Methyl Myristate	0.0615	0.0158	0.0457
4	Methyl Palmitate	0.0237	3.6958E-04	0.0233
5	Methyl Stearate	8.3748E-03	2.4921E-05	8.3498E-03
6	Methyl Linoleate	6.4520E-03	1.0204E-11	6.4519E-03
7	MLAURATE	0.2589	0.2356	0.0233
8	MOLEATE	0.0253	1.0380E-05	0.0253
<b>TOTAL RATE, KG-MOL/HR</b>				
		0.4527	0.3203	0.1324
<b>TEMPERATURE, K</b>				
		298.1500	348.1150	400.5478
<b>PRESSURE, KPA</b>				
		0.2666	0.2666	0.2666
<b>ENTHALPY, M*KJ/HR</b>				
		5.5389E-03	0.0114	0.0143
<b>MOLECULAR WEIGHT</b>				
		220.8810	205.2158	258.7720
<b>MOLE FRAC VAPOR</b>				
		0.0000	0.0000	0.0000
<b>MOLE FRAC LIQUID</b>				
		1.0000	1.0000	1.0000

Figura 5.20.-Composiciones y propiedades térmicas de las corrientes S1, S2 y S3 para un reflujo de  $1,5 \cdot R_{min}$  en el reporte de resultados del método Shortcut en PRO/II.

- **Método Distillation (PRO/II)**

- Al estar en la pantalla de PRO/II, nos dirigimos nuevamente al icono  (Show or Hide PFD Palette), en ese momento se abre la barra PFD que contiene todas las unidades de proceso. Seleccionamos Distillation (Ver Figura 5.21), hacemos clic en la pantalla para que aparezca la columna de destilación seleccionando una columna con un número de platos igual a  $N+1$  ó  $N+2$ , donde N es el número de platos teóricos hallados con el método anterior Condenser y Reboiler.

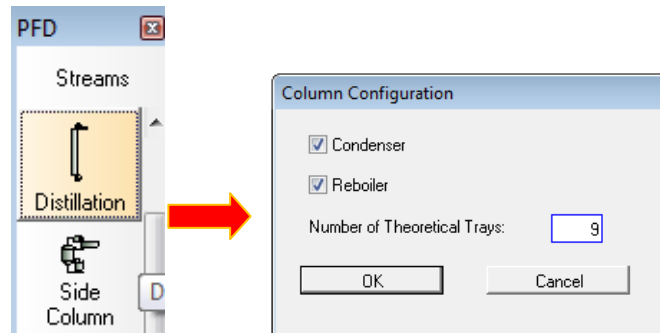





Figura 5.21.-Elección del método Distillation en PRO/II.

- A continuación nos dirigimos al icono  Streams, en la barra de unidades de proceso y dibujamos la corriente de entrada a la columna de destilación (alimentación S1) y las dos de salida, una en la parte superior (destilado, S2) e inferior (fondo, S3).
- Nos dirigimos al icono , para seleccionar todas las sustancias de trabajo, al igual que en el método anterior.
- Con el icono , seleccionamos el método termodinámico adecuado, el mismo que se utilizó en el método del Shortcut.

5. Al hacer doble clic en la columna  $T1$ , seleccionamos *Condenser* → *Bubble Temperature* indicando que el condensador es total. Luego seleccionamos *Initial Estimates* → *Reflux Estimate* → 0,035265 Posteriormente seleccionamos *Feeds and Products*, en la corriente  $S1$  vamos a ingresar el valor del plato de alimentación, que debe ser  $N_F+1$  ó  $N_F+2$ . También ingresamos un valor arbitrario de flujo de salida  $S2$  ó  $S3$  con el cual comenzaran los cálculos, pero en este caso se recomienda ingresar el valor obtenido por el método *Shortcut*, para nuestro caso,  $S2$  es igual a **65,73 kg/h**.

Al igual que en el método *Schortcut* seleccionamos dos especificaciones para cada una de las corrientes de salida siendo estas similares a las descritas anteriormente. Para el caso de la corriente de destilado  $S2$  se ha elegido especificar la composición másica en kg/h del componente clave pesado (*Palmitato de metilo, C16:0*) que se desea obtener en esta corriente y en la segunda especificación se introducen la composición másica en kg/h del componente clave ligero (*Laureato de metilo C12:0*).

En *PRO/II* seleccionamos *Performance Specifications*, en ***COL1SPEC1***, seleccionamos *Parameter* → *Stream* →  $S2$  → *Parameter* → *Flowrate* → *Dry Basis* → *Starting component, C16:0* → *OK*. Luego *value* → **0,01**. En ***COL1SPEC1***, seleccionamos *Parameter* → *Stream* →  $S2$  → *Parameter* → *Flowrate* → *Dry Basis* → *Starting component, C12:0* → *OK*. Luego *value* → **5**, (Ver *Figura 22*).

The figure shows a sequence of software settings in PRO/II. It starts with a 'Condenser Type' dialog box where 'Bubble Temperature' is selected. This leads to a 'Reflux Estimate' dialog box where the 'Bulk Liquid/Distillate (L/D) Ratio' is set to 0.035265. Next, a 'Feed' table shows 'S1' at 'Tray 8'. Below this is a table of product streams:

Product	Type of Product	Phase	Tray	Rate
S2	Overhead	Liquid	1	65.730 kg/hr
S3	Bottoms	Liquid	8	kg/hr

Finally, the 'Specifications' dialog box shows two active specifications:

- 1. **COL1SPEC1** - Stream S2 Flowrate of component Methyl Palmitate on a Wet basis in kg/hr = 0.010000 within the default tolerance
- 2. **COL1SPEC2** - Stream S3 Flowrate of component MLAUATE on a Wet basis in kg/hr = 5.0000 within the default tolerance

**Figura 5.22.-**Determinación de componentes clave liviano, pesado y especificaciones, método *Distillation* en *PRO/II*.

6. Para el cálculo de diámetro de la columna se debe especificar en la sección *Tray Hydraulics/Packing* (Ver *Figura 5.23*) el número de platos a evaluar, en este caso se inicia en 2 y se termina en 8 no se cuenta la etapa del rehervidor y condensador, posteriormente se indica

Tray y finalmente Sizing, para que en el reporte de resultados se genere el dimensionamiento hidráulico de la columna.

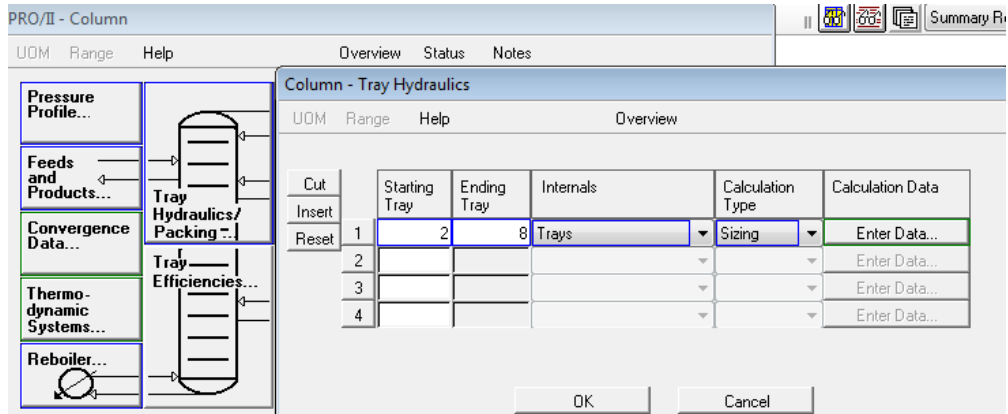




Figura 5.23.-Composiciones y propiedades térmicas de las corrientes S1, S2 y S3 por el método Distillation en el reporte de resultados en PRO/II.

- Corremos el programa  y seleccionamos generación de datos, *Output* → *Generate Text Report* ó mediante el icono , la columna deberá ponerse en color azul (Ver Figura 5.24), lo cual, indica que no existen errores en el cálculo.

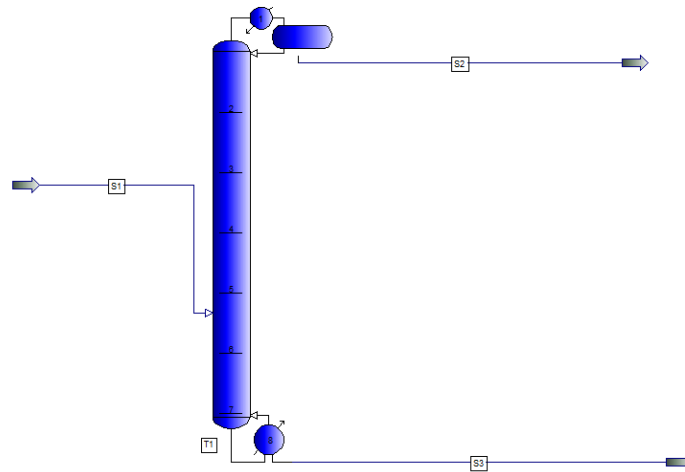


Figura 5.24.-Columna de destilación por el método Distillation en PRO/II.

En las Figuras 5.25 y 5.26 se muestra parte del reporte de resultados obtenidos por el método *Distillation*, estos resultados se comentaran más adelante, pero en forma general se han resaltado los valores de interés tales como flujos molares de las corrientes de productos S2 y S3, reflujo real, temperaturas de destilado y fondo, etc.

FEED AND PRODUCT STREAMS

TYPE	STREAM	PHASE	FROM TRAY	TO TRAY	LIQUID FRAC	FLOW RATES KG-MOL/HR	HEAT RATES M*KJ/HR
FEED	S1	LIQUID		8	1.0000	0.45	0.0055
PROD	S2	LIQUID	1			0.33	0.0120
PROD	S3	LIQUID	9			0.13	0.0135
OVERALL MOLE BALANCE, (FEEDS - PRODUCTS)						-4.8789E-17	
OVERALL HEAT BALANCE, (H(IN) - H(OUT) )							9.3471E-07

SPECIFICATIONS

SPECIFICATION NUMBER	PARAMETER TYPE	TRAY NO	COMP NO	SPECIFICATION TYPE	SPECIFIED VALUE	CALCULATED VALUE
1 (ACTIVE)	STRM S2	1	4	WT RATE	1.000E-01	9.999E-02
2 (ACTIVE)	STRM S3	9	7	WT RATE	5.000E+00	5.001E+00

REFLUX RATIOS

	REFLUX RATIOS		
	MOLAR	WEIGHT	STD L VOL
REFLUX / FEED STREAM S1	0.0536	0.0500	0.0494
REFLUX / LIQUID DISTILLATE	0.0742	0.0742	0.0742

Figura 5.25.-Cálculo de especificaciones y reflujo por el método Distillation en PRO//I.

STREAM ID	S1	S2	S3
NAME			
PHASE	LIQUID	LIQUID	LIQUID
THERMO ID	SRK01	SRK01	SRK01
FLUID RATES, KG-MOL/HR			
1 Methyl Caprylate	0.0525	0.0524	1.9283E-05
2 Methyl Caprate	0.0161	0.0160	9.8378E-05
3 Methyl Myristate	0.0615	0.0227	0.0388
4 Methyl Palmitate	0.0237	3.6970E-04	0.0233
5 Metyl Stearate	8.3748E-03	2.6561E-06	8.3722E-03
6 Methyl Linoleate	6.4520E-03	0.0000	6.4520E-03
7 MLAURATE	0.2589	0.2356	0.0233
8 MOLEATE	0.0253	1.4259E-08	0.0253
TOTAL RATE, KG-MOL/HR	0.4527	0.3271	0.1257
TEMPERATURE, K	298.1500	348.4950	400.2833
PRESSURE, KPA	0.2667	0.2666	0.2667
ENTHALPY, M*KJ/HR	5.5389E-03	0.0120	0.0135
MOLECULAR WEIGHT	220.8810	205.9914	259.6400
MOLE FRAC VAPOR	0.0000	0.0000	0.0000
MOLE FRAC LIQUID	1.0000	1.0000	1.0000

Figura 5.26.-Composiciones y propiedades térmicas de las corrientes S1, S2 y S3 por el método Distillation en el reporte de resultados en PRO//I.

## 6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para cada uno de los FAME's. Así mismo una comparativa de estos valores frente a los resultados reportados en trabajos experimentales.

### 6.1. Columna de Destilación FAME de Coco

- *Reflujo mínimo y reflujo real*

El reflujo mínimo ha sido calculado mediante el método de *Shortcut* en el programa de PRO/II dando como resultado  $R_{min}=0,02351$ , para el caso del reflujo real se indicó 1,5 veces el reflujo mínimo con este valor se calcula el número de platos y el plato de alimentación y el resultado se muestra en la *Tabla 6.1*. Como se ha mencionado anteriormente al aumentar la relación de reflujo disminuye el número de platos necesarios para la separación de la mezcla dada. Para observar dicha variación se ha establecido distintos valores de  $z$  en el método *Shortcut* y los resultados se muestran en la *Tabla 6.1*. A partir de estos resultados se ha elegido una relación de reflujo de  $z=2,5$ , con la finalidad de disminuir la cantidad de platos, pero a su vez manteniendo la calidad de productos deseados, de este modo obtenemos un reflujo de  $R=0,05878$ .

**Tabla 6.1.-**Calculo del número total de platos y plato de alimentación en función del reflujo por el método de *Shortcut* en la destilación de FAME de coco.

$z=R/R_{min}$	Número total de platos	Plato de alimentación
1,5	15	12
2	10	8
2,5	8	7
3,	7	6

- *Número de platos teóricos y plato de alimentación*

Con el método de *Schortcut* se ha obtenido el número de platos teóricos  $N_T=8$  y el plato de alimentación  $N_F=7$ , para una relación de reflujo de 2,5. Para el diseño de la columna se ha decidido  $N_T +1$  y  $N_F+1$ . Una vez establecido el número de platos, el plato de alimentación y la relación de reflujo a continuación se describen los resultados obtenidos.

- *Temperatura de destilado y fondo por el método *Shortcut*.*

En la *Tabla 6,2* se muestran los resultados de las temperaturas de destilación de la corriente 2 correspondiente al destilado y de la corriente 3 correspondiente al fondo. Encontrándose la temperatura de destilado en el rango establecido en trabajos experimentales de 47-114°C (Ver *Tabla 4.1*).

**Tabla 6.2.-**Temperatura de las corrientes de destilado y fondo por el método de *Shortcut* en la destilación de FAME de coco.

Temperatura de Destilado	Temperatura de Fondo
348,12 K	400,55 K
74,97 °C	127,40 °C

- *Productos por el método *Shortcut**

En la *Tabla 6.3*, se muestran las tasas globales para las corrientes 2 y 3. Las composiciones másicas y molares de la corriente de destilado y fondo se observan en las *Tabla 6.4* y *6.5* respetivamente.

Encontrándose la composición del destilado mayoritaria para el rango de compuestos C8:0 al C14:0, siendo el compuesto mayoritario el Laurato de metilo, C12:0 con una composición másica de 76,85%. En el caso de la corriente de fondo los compuestos mayoritarios son del C12:0 al C18:0, siendo el compuesto mayoritario el Miristato de metilo C14:0 con una composición másica de 32,32%.

**Tabla 6.3.-Tasas globales de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de coco.**

Corriente	Flujo molar, kg-mol/hr	Flujo másico, kg/hr	Flujo líquido, m <sup>3</sup> /hr	Flujo normal de vapor, m <sup>3</sup> /hr	Número de platos teóricos
<b>s2, Destilado</b>	0,32	65,73	0,07	7,18	2,37
<b>s3, Fondo</b>	0,13	34,27	0,04	2,97	
<b>Total</b>	0,45	100	0,1	10,15	2,37

**Tabla 6.4.-Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de coco.**

<b>Destilado, S2 (Método Shortcut )</b>				
Compuesto	Flujo molar kg-mol/hr	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	0,0524	16,3645	8,2919	<b>12,6182</b>
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	0,016	4,9968	2,9808	<b>4,5359</b>
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,2356	73,5779	50,5011	<b>76,8495</b>
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	1,58E-02	4,9343	3,8300	<b>5,8283</b>
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	3,70E-04	0,1154	1,00E-01	1,52E-01
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	2,49E-05	0,0078	7,44E-03	1,13E-02
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	1,04E-05	0,0032	3,08E-03	4,68E-03
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	1,02E-11	3,19E-09	3,0049E-09	4,57268E-09
<b>Total</b>	<b>0,3202</b>	<b>100</b>	<b>65,7143</b>	<b>100</b>

**Tabla 6.5.-Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de coco.**

<b>Bottom, S3 (Método Shortcut )</b>				
Compuesto	Flujo molar kg-mol/hr	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	6,32E-06	4,77E-03	1,00E-03	2,92E-03
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	5,65E-05	4,27E-02	1,05E-02	3,07E-02
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,0233	17,5896	4,9944	<b>14,5696</b>
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	4,57E-02	34,4998	11,0779	<b>32,3165</b>
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	2,33E-02	17,5896	6,3016	<b>18,3831</b>
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	8,35E-03	6,3034	2,4925	<b>7,2712</b>
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	2,53E-02	19,0995	7,5014	<b>21,8832</b>
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	6,45E-03	4,8707	1,9000	<b>5,5426</b>
<b>Total</b>	<b>0,1325</b>	<b>100</b>	<b>34,2794</b>	<b>100</b>



- *Productos por el método Distillation*

Una vez calculado el número de platos y el plato de alimentación por el método *Shortcut*, se realiza un cálculo más riguroso de la columna de destilación a través del método *Distillation*. Los resultados de composiciones másicas y molares para las corrientes de destilado y fondo se muestran en las *Tablas 6.6* y *6.7* respetivamente, donde se puede observar que los valores son similares a los calculados previamente por el método *Shorcut*. Sin embargo el reflujo real es diferente teniendo de este modo un reflujo final de  **$R=0,0742$** . La temperatura obtenida en la destilación es de **348,50K** y la temperatura en la corriente de fondo es de **400,28K**.

**Tabla 6.6.-Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Distillation en la destilación de FAME de coco.**

<b>Destilado, S2 (Método Distillation )</b>				
Compuesto	Flujo molar kg- mol/hr	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	0,0524	16,0209	8,2919	<b>12,6182</b>
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	0,016	4,8919	2,9808	<b>4,5359</b>
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,2356	72,0330	50,5011	<b>76,8495</b>
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	0,0227	6,9404	5,5026	<b>5,8283</b>
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	3,70E-04	0,1130	1,00E-01	1,52E-01
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	2,66E-06	0,0008	7,93E-04	1,13E-02
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	1,43E-08	0,0000	4,23E-06	4,68E-03
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	3,69E-26	1,13E-23	1,09E-23	4,57268E-09
<b>Total</b>	<b>0,3271</b>	<b>100</b>	<b>67,3772</b>	<b>100</b>

**Tabla 6.7.-Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Distillation en la destilación de FAME de coco.**

<b>Fondo, S3 (Método Distillation)</b>				
Compuesto	Flujo molar kg- mol/hr	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	1,93E-05	1,53E-02	3,05E-03	2,92E-03
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	9,84E-05	7,83E-02	1,83E-02	3,07E-02
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,0233	18,5448	4,9944	<b>14,5696</b>
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	0,0388	30,8814	9,4053	<b>32,3165</b>
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	0,0233	18,5448	6,3016	<b>18,3831</b>
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	8,37E-03	6,6635	2,4992	<b>7,2712</b>
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	0,0253	20,1366	7,5014	<b>21,8832</b>
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	0,006452	5,1352	1,9000	<b>5,5426</b>
<b>Total</b>	<b>0,1256</b>	<b>100</b>	<b>32,6233</b>	<b>100</b>

- *Diámetro de la columna*

El diseño hidráulico de la columna determina el diámetro y la separación entre los platos. Los resultados se muestran en la *Tabla 6.8*. Cabe hacer mención que el programa de simulación supone un tipo de platos que en este caso corresponde al plato tipo válvulas.

El requisito principal de un plato es el de proporcionar una mezcla íntima entre las corrientes líquido y vapor, ser capaz de tratar las cantidades adecuadas de vapor y de líquido sin un arrastre o inundación excesivos, ser estable en el funcionamiento y resultar razonablemente simple en cuanto a instalación y mantenimiento. Los tipos de platos más utilizados son platos de campana de borboteo, platos perforados, platos de válvulas, etc. Algunas de las ventajas principales atribuidas a los platos de válvulas son:

- Funcionamiento con la misma capacidad y eficacia que los platos perforados.
- Construcción relativamente sencilla.
- Rendimiento superior al de campana con un coste más bajo.

En forma general se ha dejado este tipo de platos pero en un diseño riguroso de la columna se tendría que realizar una evaluación de coste, rendimientos, parámetros hidráulicos de los platos, como es el caso de la inundación, etc. Para el diámetro de la columna se ha considerado el máximo que corresponde a **610 mm**, tal como se muestra en la *Tabla 6.8* teniendo un porcentaje de inundación mínimo de 26,7%, la inundación es una condición inestable que implica una acumulación excesiva del líquido dentro de la columna. Finalmente el espacio entre platos es de **609 mm**.

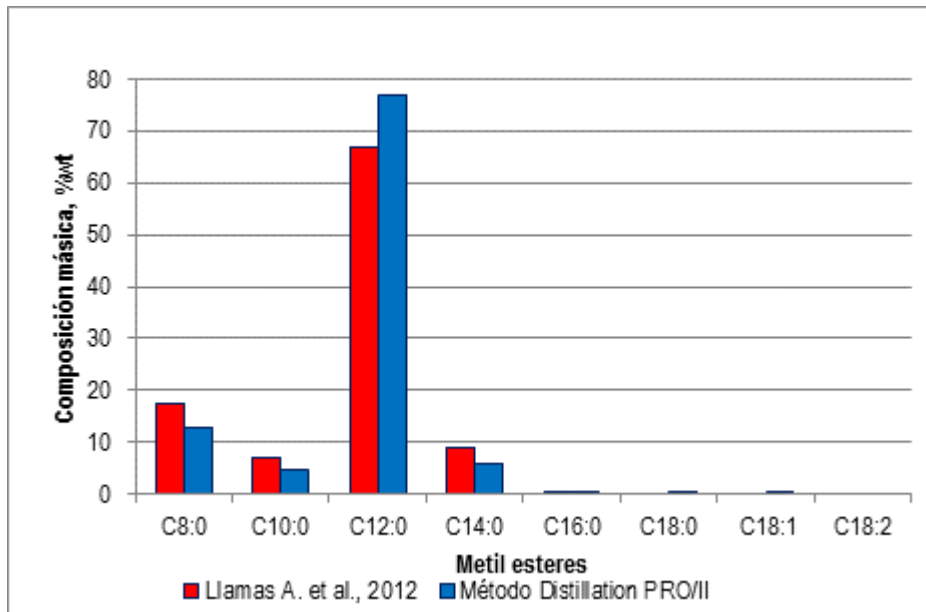
**Tabla 6.8.- Dimensiones del diámetro de la columna de destilación de FAME de coco.**

Número de Platos	Espacio entre platos, mm	Tipo de platos	Número total de válvulas	Diámetro de válvula, mm	Diámetro mínimo, mm	
2 al 8	609,6	Válvula	37	47,625	381	
Plato	Diámetro diseño, mm	Factor inundación FF, %	Diámetro siguiente mínimo, mm	Factor inundación FF, %	Diámetro siguiente máximo, mm	Factor inundación FF, %
2	528,8	35,5	457	47,5	<b>610</b>	<b>26,7</b>
3	529,0	35,5	457	47,5	<b>610</b>	<b>26,7</b>
4	528,9	35,5	457	47,5	<b>610</b>	<b>26,7</b>
5	528,8	35,5	457	47,4	<b>610</b>	<b>26,7</b>
6	528,6	35,5	457	47,4	<b>610</b>	<b>26,7</b>
7	528,2	35,4	457	47,3	<b>610</b>	<b>26,6</b>
8	570	52,5	457	81,7	<b>610</b>	<b>46</b>

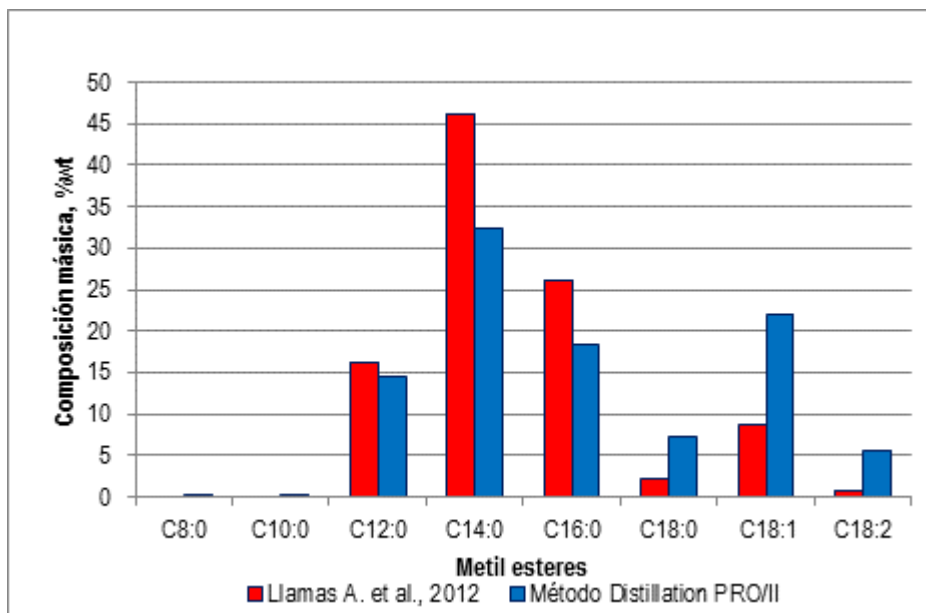
En las *Figura 6.1*, se muestra los resultados de composición másica del destilado, obtenidos de la simulación por el método Distillation en PRO/II, frente a los resultados que se han tomado de referencia de trabajos experimentales. Los resultados son muy similares presentado una fracción de destilado más rica en compuestos que comprenden el rango de C8:0 a C14:0, para el caso de la simulación PRO/II se puede observar una mayor concentración del compuesto *Laurato de metilo*, C12:0.

En la *Figura 6.2*, se muestra los resultados para el caso de la fracción de fondo de la destilación. Donde se observa mayores composiciones en los compuestos C18:0, C18:1 y C18:2, existiendo en mejora de separación en comparación a los resultados obtenidos experimentalmente. La temperatura de destilado

se mantiene dentro del rango obtenido en trabajos experimentales, sin embargo el porcentaje másico de la corriente de destilado en la simulación resulto menor, tal como se muestra en la *Tabla 6.9*.



**Figura 6.1.**-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de destilado, S2 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de coco.



**Figura 6.2.**-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de fondo, S3 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de coco.

**Tabla 6.9.**-Condiciones terminas y fracciones másicas de las corrientes S2 y S3 en la destilación de FAME de coco por el método Distillation (PRO/II) y artículo de referencia.

Condiciones de operación	FAME de Coco	FAME de Coco (PRO/II)
Temperatura de destilado, °C a presión de 2 torr	47-114	75,35
Fracción de ligera, % másico	81,8	67,4
Fracción pesado, % másico	12,6	32,6



## 6.2. Columna de Destilación FAME de Palmiste

- *Reflujo mínimo y reflujo real*

El reflujo mínimo ha sido calculado mediante el método de Shortcut en el programa de PRO/II dando como resultado  $R_{min} = 0,07916$ . Al igual que el FAME de Coco, se ha elegido una relación de reflujo óptima (Ver *Tabla 6.10*). Con la finalidad de minimizar el número total de platos, obteniendo un reflujo real de  $R = 0,1583$ .

**Tabla 6.10.-**Calculo del número total de platos y plato de alimentación en función del reflujo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de palmiste.

$z=R/R_{min}$	Número total de platos	Plato de alimentación
1,5	11	10
1,75	10	9
2,0	9	8
2,5	8	8

- *Número de platos teóricos y plato de alimentación*

Con el método de *Schortcut* se ha obtenido el número de platos teóricos  $N_T=9$  y el plato de alimentación  $N_F=8$ , para una relación de reflujo de  $z = 2,0$ . Para el diseño de la columna se ha decidido  $N_T + 1$  y  $N_F + 1$ . En base a esto se han obtenido los siguientes resultados:

- *Temperatura de destilado y bottom por el método Shortcut.*

En la *Tabla 6.11* se muestran los resultados de las temperaturas de destilación de la corriente 2 correspondiente al destilado y de la corriente 3 correspondiente al fondo. Encontrándose la temperatura de destilado en el rango establecido en trabajos experimentales de 35-113 °C (Ver *Tabla 4.1*).

**Tabla 6.11.-**Temperatura de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de palmiste.

Temperatura de Destilado	Temperatura de Fondo
373,34 K	402,97 K
104,19°C	129,82°C

- *Productos método Shortcut.*

En la *Tabla 6.12*, se muestran las tasas globales para las corrientes 2 y 3. Las composiciones másicas y molares de la corriente de destilado y fondo se observan en las *Tabla 6.13* y *6.14* respetivamente. Encontrándose la composición del destilado mayoritaria para el rango de compuestos C8:0 al C14:0, siendo el Laurato de metilo, C12:0 el componente mayoritario con una composición másica de 97,78%. En el caso de la corriente de fondo los compuestos mayoritarios son del C12:0 al C18:0 siendo el compuesto mayoritario el Oleato de metilo, C18:1 con una composición másica de 35,44%.

**Tabla 6.12.-Tasas globales de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de palmiste.**

Corriente	Flujo molar, kg-mol/hr	Flujo másico, kg/hr	Flujo líquido, m <sup>3</sup> /hr	Flujo normal de vapor, m <sup>3</sup> /hr	Número de platos teóricos
<b>s2, Destilado</b>	0,24	51,75	0,05	5,40	3,35
<b>s3, Bottom</b>	0,18	48,25	0,05	4,12	
<b>Total</b>	0,42	100	0,1	9,51	3,35

**Tabla 6.13.-Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de palmiste.**

<b>Destilado, S2 (Método Shortcut)</b>					
Compuesto	Flujo molar kg-mol/hr	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt	
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	0	0	0	0	0
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	0	0	0	0	0
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,2361	98,0305	50,6083	97,7764	
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	4,71E-03	1,9537	1,1406	2,2036	
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	3,69E-05	0,0153	9,99E-03	1,93E-02	
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	6,19E-07	0,0003	1,85E-04	3,57E-04	
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	4,67E-07	0,0002	1,39E-04	2,68E-04	
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	1,34E-15	5,55E-13	3,93842E-13	7,60912E-13	
<b>Total</b>	<b>0,2408</b>	<b>100</b>	<b>51,7592</b>	<b>100</b>	

**Tabla 6.14.-Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de palmiste.**

<b>Fondo, S3 (Método Shortcut)</b>					
Compuesto	Flujo molar kg-mol/hr	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt	
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	0	0	0	0	0
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	0	0	0	0	0
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,028	15,2398	6,0018	12,4345	
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	5,72E-02	31,1327	13,8656	28,7265	
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	3,14E-02	17,0903	8,4923	17,5943	
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	5,69E-03	3,0993	1,6998	3,5217	
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	5,77E-02	31,4048	17,1080	35,4441	
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	3,74E-03	2,0331	1,1000	2,2790	
<b>Total</b>	<b>0,1837</b>	<b>100</b>	<b>48,2675</b>	<b>100</b>	

- *Productos por el método Distillation.*

Una vez calculado el número de platos y el plato de alimentación por el método *Shortcut*, se realiza un cálculo más riguroso de la columna de destilación a través del método *Distillation*. Los resultados de composiciones másicas y molares para las corrientes de destilado y fondo se muestran en las *Tablas 6.15* y *6.16* respetivamente, donde se puede observar que los valores son similares a los calculados previamente por el método *Shorcut*. El reflujo estimado es de  **$R=0,1804$** , La temperatura obtenida en la destilación es de  **$378,11K$**  y la temperatura en la corriente de fondo es de  **$403,03K$** . Prácticamente la fracción de destilado esta compuesta principalmente por *Laurato de metilo, C12:0*.

**Tabla 6.15.-Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Distillation en la destilación de FAME de palmiste.**

<b>Destilado, S2 (Método Distillation)</b>					
Compuesto	Flujo molar mol/hr	kg-	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	0		0	0	0
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	0		0	0	0
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,2361		92,5748	50,61	97,7764
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	0,0189		7,4107	5	2,2036
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	3,70E-05		0,0145	1,00E-02	1,93E-02
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	3,03E-08		0,0000	9,04E-06	3,57E-04
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	2,26E-10		0,0000	6,69E-08	2,68E-04
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	0,00E+00		0,00E+00	0,00E+00	7,60912E-13
<b>Total</b>	<b>0,2550</b>		<b>100</b>	<b>55,1997</b>	<b>100</b>

**Tabla 6.16.-Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Distillation en la destilación de FAME de palmiste.**

<b>Fondo, S3 (Método Distillation)</b>					
Compuesto	Flujo molar mol/hr	kg-	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	0		0	0	0
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	0		0	0	0
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,028		16,5162	6,0018	12,4345
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	0,043		25,3642	10,4234	28,7265
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	0,0314		18,5218	8,4923	17,5943
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	0,0057		3,3592	1,7000	3,5217
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	0,0577		34,0352	17,1080	35,4441
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	0,0037		2,2034	1,1000	2,2790
<b>Total</b>	<b>0,1695</b>		<b>100</b>	<b>44,8255</b>	<b>100</b>

- *Diámetro de la columna*

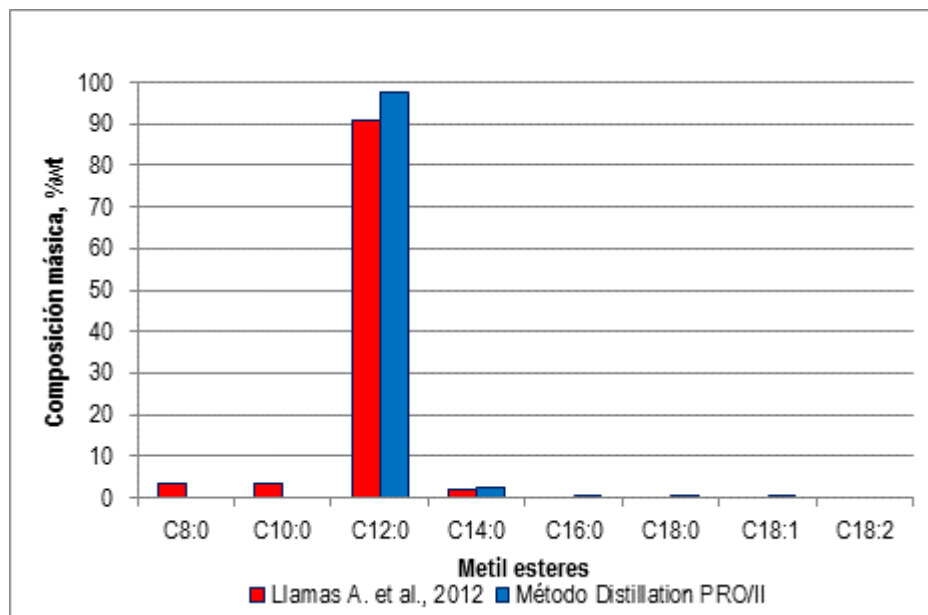
El diseño hidráulico de la columna determina el diámetro y la separación entre los platos. Los resultados se muestran en la *Tabla 6,17*. Al igual que la simulación de destilación de FAME de coco se suponen los platos del tipo válvulas y se establece el diámetro máximo que corresponde a **610 mm**, tal como se

muestra en la *Tabla 6.8* teniendo un porcentaje de inundación mínimo de 23,1%. Finalmente el espacio entre platos es de **609,9 mm**.

**Tabla 6.17.-Dimensiones de diámetro de la columna de destilación de FAME de palmiste.**

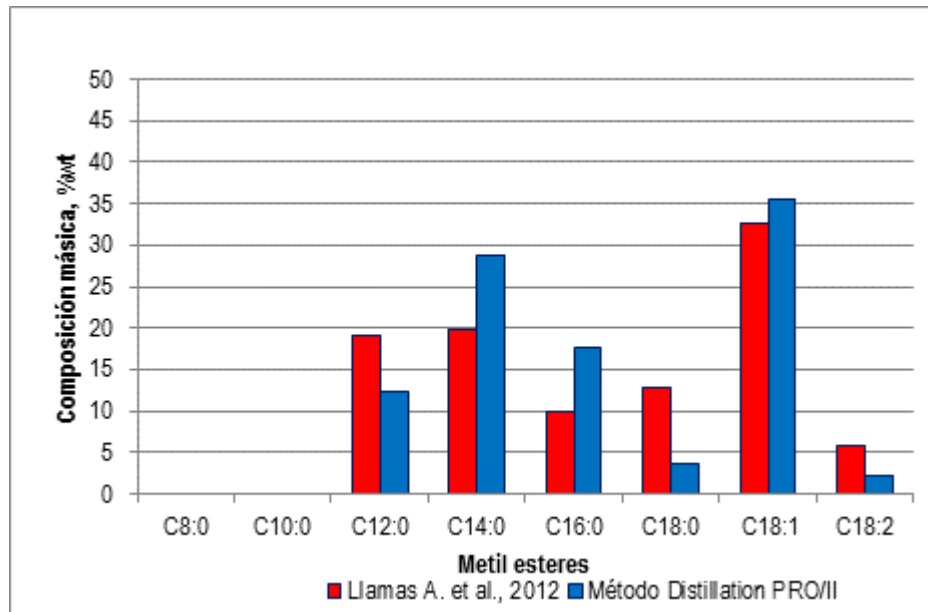
Número de Platos	Espacio entre platos, mm	Tipo de platos	Número total de válvulas	Diámetro de válvula, mm	Diámetro mínimo, mm	
2 - 9	609,9	Válvula	37	47,625	381	
Plato	Diámetro diseño, mm	Factor inundación FF, %	Diámetro siguiente mínimo, mm	Factor inundación FF, %	Diámetro siguiente máximo, mm	Factor inundación FF, %
2	502,4	34	457	41,1	<b>610</b>	<b>23,1</b>
3	502,7	34	457	41,1	<b>610</b>	<b>23,1</b>
4	502,7	34	457	41,1	<b>610</b>	<b>23,1</b>
5	502,6	34	457	41,1	<b>610</b>	<b>23,1</b>
6	502,4	34	457	41	<b>610</b>	<b>23,1</b>
7	502	33,9	457	40,9	<b>610</b>	<b>23</b>
8	500,7	33,9	457	40,6	<b>610</b>	<b>22,9</b>
9	562,1	52,3	457	79	<b>610</b>	<b>44,5</b>

En las *Figura 6.3*, se muestra los resultados de composición másica del destilado, obtenidos de la simulación por el método Distillation en PRO/II, frente a los resultados que se han tomado de referencia de trabajos experimentales. Los resultados son muy similares teniendo ambos casos una composición mayoritaria de Laurato de metilo C12:0. En la *Figura 6.4*, se muestra los resultados para el caso de la fracción de fondo de la destilación donde se observa una mayor composición para el palmitato de metilo C16:0 en el caso se la simulación en comparación a los resultados obtenidos experimentalmente. La temperatura de destilado se mantiene dentro del rango obtenido en trabajos experimentales, a diferencia de la destilación de FAME de coco, la fracción másica del destilado es mayor en la simulación, tal como se muestra en la *Tabla 6.18*.



**Figura 6.3.-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de destilado, S2 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de palmiste.**





**Figura 6.4.**-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de fondo, S3 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de palmiste.

**Tabla 6.18.**-Condiciones terminas y fracciones másicas de las corrientes S2 y S3 en la destilación de FAME de palmiste por el método Distillation (PRO/II) y artículo de referencia.

<b>Condiciones de operación</b>	<b>FAME de Palmiste</b>	<b>FAME de Palmiste(PRO/II)</b>
Temperatura de destilado, °C a presión de 2 torr	35-113	105
Fracción de ligera, % másico	40,8	55,2
Fracción pesado, % másico	58,6	44,8

### 6.3. Columna de Destilación FAME de Babasu

#### - Reflujo mínimo y reflujo real

El reflujo mínimo ha sido calculado mediante el método de Shortcut en el programa de PRO/II dando como resultado  $R_{min} = 0,0963$ . Al igual que el FAME de Coco, se ha elegido una relación de reflujo óptima (Ver Tabla 6.19). Con la finalidad de minimizar el número total de platos, obteniendo un reflujo final de  $R = 0,1685$ .

**Tabla 6.19.**-Cálculo del número total de platos y plato de alimentación en función del reflujo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de babasu.

$z=R/R_{min}$	Número total de platos	Plato de alimentación
1,5	9	7
1,75	8	6
2,0	8	6
2,5	7	5

#### - Número de platos teóricos y plato de alimentación

Con el método de *Schortcut* se ha obtenido el número de platos teóricos  $N_T=8$  y el plato de alimentación  $N_F=6$ , para una relación de reflujo de 1,75. Para el diseño de la columna se ha decidido  $N_T + 1$  y  $N_F+1$ .

#### - Temperatura de destilado y fondo por el método Shortcut.

En la Tabla 6.20 se muestran los resultados de las temperaturas de destilación de la corriente 2 correspondiente al destilado y de la corriente 3 correspondiente al fondo.

**Tabla 6.20.**-Temperatura de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de babasu.

Temperatura de Destilado	Temperatura de fondo
353,0401 K	416,2262 K
79,8901°C	143,0762°C

#### - Productos método Shortcut

En la Tabla 6.21, se muestran las tasas globales para las corrientes 2 y 3. Las composiciones másicas y molares de la corriente de destilado y fondo se observan en las Tabla 6.22 y 6.23 respetivamente. Encontrándose la composición del destilado mayoritaria para el rango de compuestos C8:0 al C14:0, siendo el Laurato de metilo, C12:0 el componente mayoritario con una composición másica de 45,77%. En el caso de la corriente de fondo los compuestos mayoritarios son del C12:0 al C18:0 siendo el compuesto mayoritario el *Palmitato de metilo*, C16:0 con una composición másica de 32,01%.

**Tabla 6.21.**-Tasas globales de las corrientes de destilado y fondo por el método de Shortcut en la destilación de FAME de babasu.

Corriente	Flujo molar, kg-mol/hr	Flujo másico, kg/hr	Flujo líquido, m³/hr	Flujo normal de vapor, m³/hr	Número de platos teóricos
<b>S2, Destilado</b>	0,21	44,59	0,05	4,65	2,83
<b>S3, Bottom</b>	0,20	54,30	0,05	4,50	
<b>Total</b>	0,41	98,89	0,1	9,15	2,83

**Tabla 6.22.-Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de babasu.**

<b>Destilado, S2 (Método Shortcut)</b>				
Compuesto	Flujo molar kg- mol/hr	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	0,0247	11,9130	3,9086	<b>8,7665</b>
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	0,0177	8,5368	3,2975	<b>7,3958</b>
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,0952	45,9157	20,4062	<b>45,7686</b>
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	6,74E-02	32,5075	16,3381	<b>36,6444</b>
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	2,22E-03	1,0705	0,6003	1,3463
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	8,97E-05	0,0433	0,0268	0,0601
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	2,75E-05	0,0133	8,15E-03	0,0183
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	0	0	0	0
C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> (C18:3)	7,42E-12	3,58E-09	2,17011E-09	4,86728E-09
<b>Total</b>	<b>0,2073</b>	<b>100</b>	<b>44,5856</b>	<b>100</b>

**Tabla 6.23.-Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Shortcut en la destilación de FAME de babasu.**

<b>Fondo, S3 (Método Shortcut)</b>				
Compuesto	Flujo molar kg- mol/hr	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	2,9451E-07	1,47E-04	4,66041E-05	8,5795E-05
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	9,0648E-06	4,52E-03	1,69E-03	3,11E-03
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,0020421	1,0172	0,4377	<b>0,8058</b>
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	6,19E-02	30,8341	15,0049	<b>27,6229</b>
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	6,43E-02	32,0297	17,3903	<b>32,0144</b>
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	1,84E-02	9,1656	5,4927	<b>10,1116</b>
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	4,23E-02	21,0708	12,5419	<b>23,0888</b>
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	0,00E+00	0,0000	0,0000	<b>0,0000</b>
C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> (C18:3)	1,18E-02	5,8779	3,4511	<b>6,3533</b>
<b>Total</b>	<b>0,2008</b>	<b>100</b>	<b>54,3203</b>	<b>100</b>

- *Productos por el método Distillation*

Una vez calculado el número de platos y el plato de alimentación por el método *Shortcut*, se realiza un cálculo más riguroso de la columna de destilación a través del método *Distillation*. Los resultados de composiciones másicas y molares para las corrientes de destilado y fondo se muestran en las *Tablas 6.24y 6.25* respetivamente, donde se puede observar que los valores son similares a los calculados previamente por el método *Shorcut*. El reflujo estimado es de **R=0,12**, La temperatura obtenida en la destilación es de **353,05K** y la temperatura en la corriente de fondo es de **416,34K**.

**Tabla 6.24.-Composiciones molares y másicas de la corriente de destilado, S2 por el método de Distillation en la destilación de FAME de babasú.**

<b>Destilado, S2 (Método Distillation)</b>				
Compuesto	Flujo molar kg- mol/hr	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	0,0247	11,9058	3,9086	<b>8,7665</b>
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	0,0177	8,5317	3,2975	<b>7,3958</b>
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	0,0954	45,9842	20,4491	<b>45,7686</b>
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	0,0674	32,4878	16,3381	<b>36,6444</b>
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	2,22E-03	1,0694	0,6000	1,3463
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	4,28E-05	0,0206	0,0128	0,0601
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	1,17E-06	0,0006	0,0003	0,0183
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	0	0	0	0
C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> (C18:3)	7,42E-12	3,58E-09	2,17E-09	4,87E-09
<b>Total</b>	<b>0,2075</b>	<b>100</b>	<b>44,6064</b>	<b>100</b>

**Tabla 6.25.-Composiciones molares y másicas de la corriente de fondo, S3 por el método de Distillation en la destilación de FAME de babasú.**

<b>Fondo, S3 (Método Distillation)</b>				
Compuesto	Flujo molar kg- mol/hr	Composición molar, %	Flujo másico kg/hr	Composición másica, %wt
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> (C8:0)	1,90E-07	9,48E-05	3,00899E-05	8,5795E-05
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> (C10:0)	7,02E-06	3,50E-03	0,001307973	3,11E-03
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> (C12:0)	1,88E-03	0,9352	0,4021	<b>0,8058</b>
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> (C14:0)	6,19E-02	30,8600	15,0049	<b>27,6229</b>
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C16:0)	6,43E-02	32,0566	17,3903	<b>32,0144</b>
C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (C18:0)	1,84E-02	9,1733	5,4927	<b>10,1116</b>
C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> (C18:1)	4,23E-02	21,0885	12,5419	<b>23,0888</b>
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> (C18:2)	0,00E+00	0,0000	0,0000	<b>0,0000</b>
C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> (C18:3)	1,18E-02	5,8829	3,4511	<b>6,3533</b>
<b>Total</b>	<b>0,2006</b>	<b>100</b>	<b>54,2843</b>	<b>100</b>

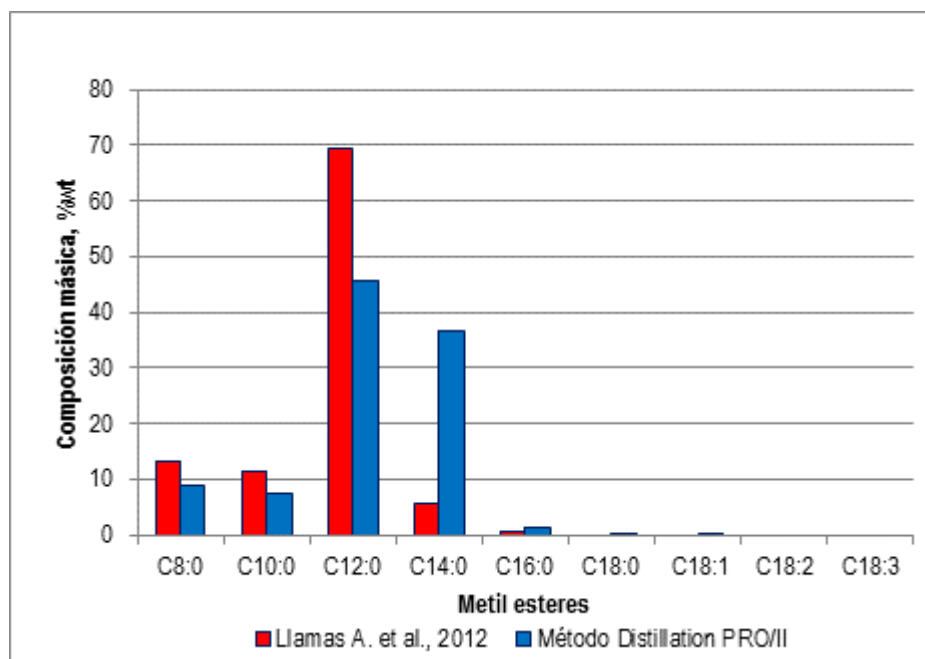
- *Diámetro de la columna*

El diseño hidráulico de la columna determina el diámetro y la separación entre los platos. Los resultados se muestran en la *Tabla 6.26*. Al igual que la simulación de destilación de FAME de coco se suponen los platos del tipo válvulas y se establece el diámetro máximo que corresponde a **610 mm**, tal como se muestra en la *Tabla 6.26* teniendo un porcentaje de inundación mínimo de 18,8%. Finalmente el espacio entre platos es de **609,6 mm**.

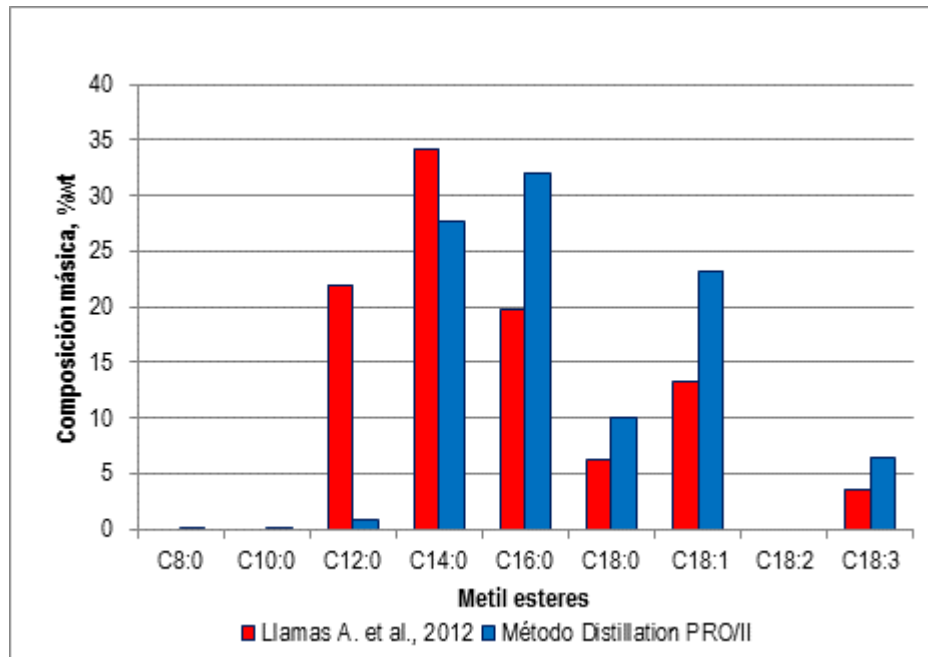
**Tabla 6.26.-Dimensiones de diámetro de la columna de destilación de FAME de babasú.**

Número de Platos	Espacio entre platos, mm	Tipo de platos	Número total de válvulas	Diámetro de válvula, mm	Diámetro mínimo, mm	
2 -8	609,6	Válvula	37	47,625	381	
Plato	Diámetro diseño, mm	Factor inundación FF, %	Diámetro siguiente mínimo, mm	Factor inundación FF, %	Diámetro siguiente máximo, mm	Factor inundación FF, %
2	468,3	31,8	457	33,4	610	18,8
3	468,4	31,9	457	33,4	610	18,8
4	468,2	31,8	457	33,4	610	18,8
5	467,9	31,8	457	33,3	610	18,8
6	467,2	31,8	457	33,2	610	18,7
7	593,0	53,1	457	89,4	610	50,4
8	605,3	53,4	457	93,7	610	52,8

En las *Figura 6.5*, se muestra los resultados de composición másica del destilado, obtenidos de la simulación por el método Distillation en PRO/II, frente a los resultados que se han tomado de referencia de trabajos experimentales. Las composiciones másicas de los compuesto principales que componen a la fracción del destilado C12:0 al C14:0 obtenidas por la simulación son menores en comparación a los trabajos experimentales. En la *Figura 6.4*, se muestra los resultados para el caso de la fracción de fondo de la destilación donde se observa una mayor composición para el palmitato de metilo C16:0 en el caso de la simulación en comparación a los resultados obtenidos experimentalmente. La temperatura de destilado se mantiene dentro del rango obtenido en trabajos experimentales, al igual que la destilación de FAME de coco, la fracción másica del destilado es mayor en trabajos experimentales en comparación a la simulación tal como se muestra en la *Tabla 6.27*.



**Figura 6.5.-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de destilado, S2 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de babasú.**



**Figura 6.6.**-Comparativa de resultados de composiciones másicas de la corriente de fondo, S3 por el método Distillation (PRO/II) y los de referencia de proyectos de investigación en la destilación de FAME de babasú.

**Tabla 6.27.**-Condiciones terminas y fracciones másicas de las corrientes S2 y S3 en la destilación de FAME de babasú por el método Distillation (PRO/II) y artículo de referencia.

<b>Condiciones de operación</b>	<b>FAME de Babasú</b>	<b>FAME de Babasú(PRO/II)</b>
Temperatura de destilado, °C a presión de 2 torr	47-124	79,9
Fracción de ligera, % másico	73,3	44,61
Fracción pesado, % másico	19,4	54,3

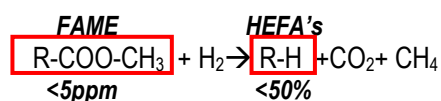
La simulación es una herramienta confiable que proporciona información útil para el diseño conceptual de un proceso. En base a la simulación llevada a cabo para la destilación a vacío para cada uno de los FAME's se concluye lo siguiente:

- Se ha logrado la separación deseada para los FAME's de coco, palmiste y babasú, siendo estos valores reproducibles con datos tomados de referencia de trabajos experimentales.
- Las columnas presentan similares diámetros y espaciado entre platos, pudiendo ocupar un diseño de una misma columna para los tres casos de FAME's.
- Los porcentajes másicos de fracción ligera obtenida resultaron menores en comparación con los datos obtenidos en trabajos experimentales. A excepción del FAME de palmiste. Estos valores son una referencia en rendimientos esperados, pudiéndose tomar los valores simulados más puntuales en comparación con los experimentales.

- La simulación se ha llevado a cabo con un tipo de platos, pero en un diseño más riguroso se debe de evaluar el tipo de plato, la eficiencia de cada plato, la caída de presión, comparar costes entre usar platos o empaques, etc.

Pese a la gran aceptación de los biocombustibles en la industria aeronáutica, todavía existen diversos inconvenientes que dificultan su implementación continua en aerolíneas y en diferentes operaciones ya que la baja producción de estos combustibles alternativos en comparación con los combustibles fósiles, no permite la factibilidad económica de su implementación. Además, muchos de estos biocombustibles representan una competencia con los cultivos de alimentos, lo cual, tiene una importante repercusión sobre todo social. Por tal motivo, es necesario que para la pronta implementación de estas energías alternativas para la aviación, se tenga una colaboración global entre los gobiernos, las empresas y la sociedad para crear un equilibrio entre su uso y la explotación de los campos de cultivo.

En un contexto energético se ha planteado el siguiente esquema mostrado en la *Figura 6.13*, en el cual, se realiza un análisis de la posibilidad de sustitución de biocombustibles en el sector de la aviación. En primera estancia tenemos los aceites estudiados en este proyecto *coco*, *palmiste* y *babasú*, los cuales, son sometidos a un proceso de *transesterificación*, es decir, el aceite se mezcla con metanol en presencia de un catalizador. De este modo se obtiene el *FAME* que comúnmente es conocido como biodiesel y la glicerina un subproducto de gran aplicación. Como se ha mencionado anteriormente la composición de *FAME* varía en un rango de compuestos de C8:0 a C20:0 de acuerdo a la materia prima, por ello el *FAME* obtenido es alimentado a una columna de destilación a vacío, simulación realizada en este proyecto. Cuyo principal objetivo es obtener una fracción similar al queroseno fósil, siendo la fracción ligera compuesta principalmente en el rango de compuestos C8:0 al C14:0, denominada *bioqueroseno*, en el fondo de la destilación se obtiene la fracción pesada cuya composición mayoritaria esta comprendida en el rango de C14:0 a C20:0. Actualmente la normativa ASTM D7566 establece un porcentaje de mezcla con queroseno fósil Jet-A1 de hasta 50% v/v para ésteres grasos o ácidos grasos hidroprocesados **HEFA's**, y un máximo de 5 ppm para ésteres metílicos de ácidos grasos **FAME**, esto se expresa mejor en la siguiente reacción:



En base a ello se realiza un análisis y se describen las siguientes conclusiones:

- El aceite de babasú, palmiste y coco como tal, no existiría la posibilidad de mezclarlo con queroseno fósil, principalmente por la alta viscosidad con la que cuenta y por el rango de compuestos que presenta que varía en función de la materia prima, siendo mayor al del queroseno fósil.

- Para el caso de FAME no presenta el problema de la alta viscosidad ya que el proceso de transesterificación consiste principalmente en remplazar el glicerol por un alcohol simple, como el metanol o el etanol, de forma que se produzcan ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos, lo cual disminuye la viscosidad del aceite, ocasionada principalmente por la presencia de glicerina en la molécula. El principal inconveniente de mezclar este tipo de FAME con queroseno fósil es la longitud de la cadena de sus compuestos mismo caso que los aceites.
- Para ello se ha planteado la destilación a vacío, con la finalidad de obtener la fracción ligera similar al queroseno como la norma establece hasta un 50% v/v pero solo para hidroprocesados se ha planteado en el esquema la posibilidad de aprovechar el proceso de hidrosulfuración del queroseno fósil para el hidroprocesado de FAME, siendo esta una alternativa para cumplir con la normativa. El principal propósito de la hidrosulfuración en la refinería del petróleo es la eliminación del contenido de azufre, los procesos de hidrosulfuración usan catalizadores en presencia de cantidades sustanciales de hidrógeno, bajo altas presiones y temperaturas, con el fin de promover la reacción del hidrógeno con las impurezas de la carga.
- Otra opción planteada es el mezclar el bioqueroseno obtenido de la columna de destilación a vacío con combustible fósil Jet-A1, esta podría ser otra opción factible ya que estudios de investigación han demostrado cumplir con la mayoría de las propiedades descritas en la norma ASTM D1655 para combustibles fósiles con mezclas de hasta un porcentaje de 20% v/v, solo teniendo una mínima variación en el PCI. Sin embargo esta opción se ve limitada la concentración de hasta 5 ppm como máximo de FAME de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM D7566.
- Por ultimo la fracción obtenida en el fondo de la columna de destilación, puede ser utilizada como combustible de calefacción mezclado con otros biodiesel o diesel fósil. De acuerdo a proyectos de investigación donde han evaluado sus propiedades en base lo descrito en el estándar EN 14213



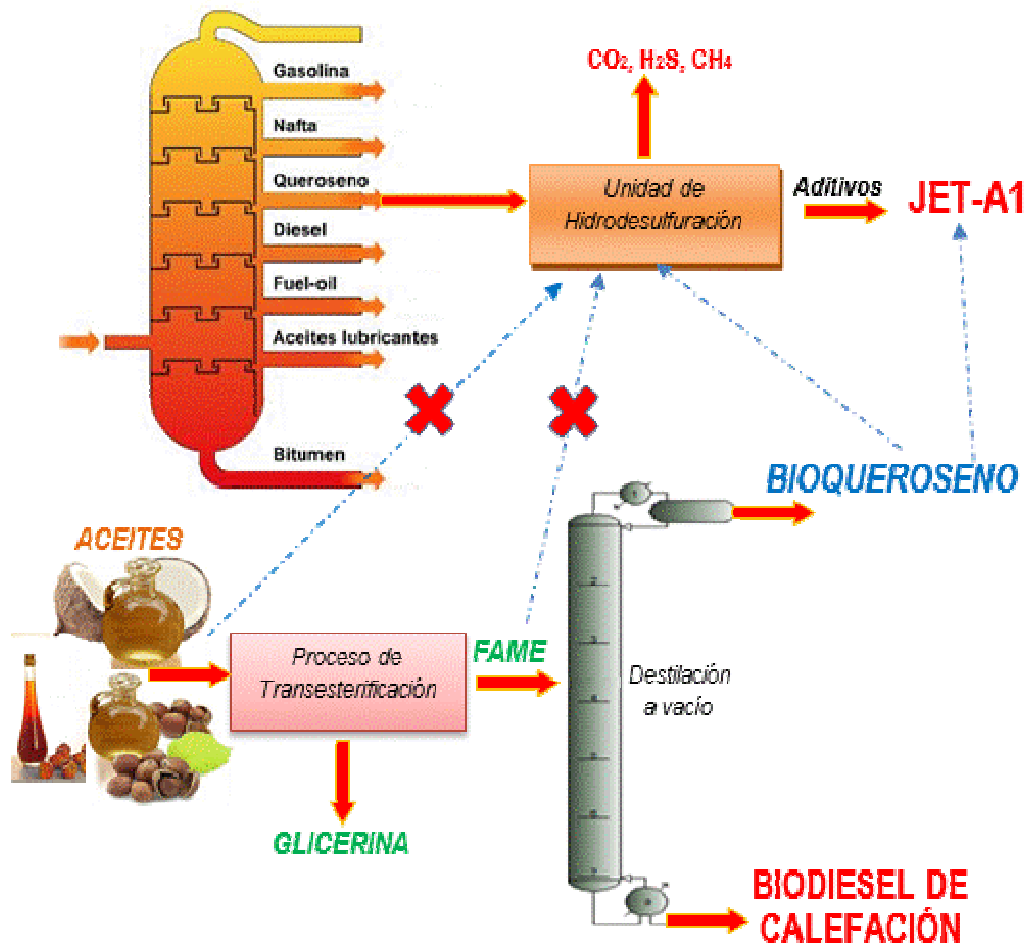


Figura 6.7.-Análisis de la alternativa de sustitución del combustible fósil de aviación JET-A1 por bioqueroseno de FAME de coco, palmiste y babasú.

## 7. NOMENCLATURA

### Abreviaturas

<i>BtL:</i>	Biomasa a líquido, por su siglas en ingles <i>Biomass to liquid</i> .
<i>CtL:</i>	Carbón a líquido, por su siglas en ingles <i>Coals to liquid</i> .
<i>EU ETS:</i>	Régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea, por sus siglas en ingles de <i>The EU Emissions Trading System</i> .
<i>FAME:</i>	Esteres metílicos de ácidos grasos, por sus siglas en ingles <i>Fatty acid methyl esters</i> .
<i>GEI:</i>	Gases de Efecto Invernadero.
<i>GtL:</i>	Gas a líquido, por su siglas en ingles <i>Gas to liquid</i> .
<i>HEFA's:</i>	Esteres y ácidos grasos hidroprocesados, por sus siglas en ingles <i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids</i> .
<i>HRJ:</i>	Combustibles renovables hidroprocesados, por sus siglas en ingles <i>Hydroprocessed Renewable Jet</i> .
<i>HVO:</i>	Aceite vegetal hidroprocesado, por sus siglas en ingles <i>Hydrotreated Vegetable Oil</i> .
<i>IATA:</i>	Asociación Internacional del Transporte Aéreo, por sus siglas en ingles <i>International Air Transport Association</i> .
<i>SPK:</i>	Queroseno parafínico sintetizado, por sus siglas en ingles <i>Synthesized Paraffinic Kerosene</i> .
<i>XtL:</i>	Combustibles Fischer Tropsch.

### Simbología

$N_T$ :	Número de plato teóricos.
$N_F$ :	Plato de alimentación.
$R_{min}$ :	Reflujo mínimo de la columna de destilación.
$R$ :	Reflujo real de la columna de destilación.
$S_1$ :	Corriente de alimentación a la columna de destilación.
$S_2$ :	Corriente de destilado.
$S_3$ :	Corriente de fondo de la destilación.
$z$ :	Relación de reflujo.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.swafea.eu/LinkClick.aspx?fileticket=e54MoDYRbPs%3d&tabid=77>
- [2] **Llomas, A.; Al-Lal, A.M.; Hernández, M.; Lapuerta, M.; Canoira, L.** “*Biokerosene from babassu and camelina oils: production and properties of their blends with fossil kerosene*”, *Energy and Fuel*, Vol. 26 (9), Pág.5968-5976, (2012) American Chemical Society, USA.
- [3] **OBSA**, “*Combustibles alternativos*”, [http://www.obsa.org/PaginasOBSA/Navegacion/EnDetalle-CombustiblesAlternativos\\_Tipos.aspx](http://www.obsa.org/PaginasOBSA/Navegacion/EnDetalle-CombustiblesAlternativos_Tipos.aspx), 2011.
- [4] **Hileman, J., Wong, H. M., Donohoo, P., Weiss, M., Waitz, I.**, “*Alternative Jet Fuels, Transportation Research Board Environmental Impacts of Aviation Mid-Year Meeting*”, 2008. [http://www.trbav030.org/pdf2008/TRB08my\\_Hileman\\_AltFuels.pdf](http://www.trbav030.org/pdf2008/TRB08my_Hileman_AltFuels.pdf)
- [5] **Manual** serie “C” N°18 “*Para la manipulación de los combustibles de aviación*”, <http://kimerius.com/app/download/5780664596/Manual+para+la+manipulaci%C3%B3n+de+los+combustibles+de+aviaci%C3%B3n.pdf>; 1984.
- [6] **OBSA**, Observatorio de la Sostenibilidad en Aviación, “*Combustibles Alternativos para Aviación*”, [www.obsa.org](http://www.obsa.org), 2010.
- [7] **Ibarrola Armendáriz I.**, “*Análisis de Viabilidad Económica del Queroseno Alternativo y su Impacto en los Derechos de Emisiones para las Aerolíneas*”, 2011.
- [8] <http://www.virgin-atlantic.com/en/gb/allaboutus/environment/biofuel.jsp>
- [9] [http://www.geaviation.com/press/other/other\\_20080224.html](http://www.geaviation.com/press/other/other_20080224.html)
- [10] <http://www.airnewzealand.com/press-release-2009-biofuel-test-flight-report-shows-significant-fuel-saving-28may09>
- [11] <http://green.blogs.nytimes.com/2008/12/30/air-new-zealand-flies-on-engine-with-jatropha-biofuel-blend/>
- [12] <http://www.snecma.com/continental-airlines-flight,2034.html>
- [13] <http://press.jal.co.jp/en/release/200901/001108.html>
- [14] [http://www.navy.mil/submit/display.asp?story\\_id=52768](http://www.navy.mil/submit/display.asp?story_id=52768)
- [15] <http://www.af.mil/news/story.asp?id=123197415>
- [16] <http://www.rechargenews.com/energy/biofuels/article209802.ece>
- [17] [http://www.diamondaircraft.com/media/uploads/files/IW\\_ILA\\_Biofuel\\_eng.pdf](http://www.diamondaircraft.com/media/uploads/files/IW_ILA_Biofuel_eng.pdf)
- [18] [http://www.naval-technology.com/projects/mh\\_60s/](http://www.naval-technology.com/projects/mh_60s/)
- [19] <http://www.gizmag.com/biofuel-airbus-a320/17123/>
- [20] <http://www.flightglobal.com/news/articles/paris-747-8f-biofuel-pilot-takes-landmark-flight-in-his-358518/>
- [21] <http://www.gizmag.com/honeywell-gulstream-g450-transatlantic-biofuel/18998/>
- [22] <http://atwonline.com/eco-aviation/news/air-china-conducts-first-biofuel-test-flight-china-1031>

- [23] [http://www.chinadaily.com.cn/bizchina/2011-10/29/content\\_14000985.htm](http://www.chinadaily.com.cn/bizchina/2011-10/29/content_14000985.htm)
- [24] <http://www.etihadairways.com/sites/Etihad/global/en/aboutetihad/mediacenter/newslisting/newsdetails/Pages/etihad-operate-first-biofuel-powered-delivery-flight-jan12.aspx?fromNewsListing=false>
- [25] <http://www.klm.com/csr/en/climate/footprint/biofuels/index.html>
- [26] <http://www.businessgreen.com/bg/news/2094319/lufthansas-biofuel-trial-takes-air-commercial-flight>
- [27] [http://www.consensos.com.mx/consensos/index.php?option=com\\_k2&view=itemlist&task=tag&tag=ASTM+D7566&Itemid=121](http://www.consensos.com.mx/consensos/index.php?option=com_k2&view=itemlist&task=tag&tag=ASTM+D7566&Itemid=121)
- [28] <http://www.aeromexico.com/us/ExperienceAeromexico/AeromexicoCorporate/PressRoom/Green-flight.html>
- [29] **León Jorge**, Botánica de cultivos tropicales, 1987.
- [30] **CODEX STAN 210-1999**, “Norma del CODEX para aceites vegetales específicos”, <http://www.uclm.es/profesorado/mdsalvador/58119/practicas/Codex%20Stan%20210%20Aceites%20vegetales.pdf>
- [31] **Holland Charles D.**, “Fundamentos de Destilación de Mezclas Multicomponente”; 1988 Editorial Limusa.
- [32] **Kirschbaum Emil**, “Destilación y Rectificación” Editorial Aguilar, S.A. de Ediciones Madrid, 1954, pág. 105.
- [33] **Llamas Alberto, García Martínez María Jesús, Al-Lal Ana-María, Canoira Laureano, Lapuerta Magín**; “Biokerosene from coconut and palm kernel oils: Production and properties of their blends with fossil kerosene”, Fuel 102 (2012) 483–490.
- [34] **H. An, W.M. Yang., A. Maghbouli, S.K. Chou, K.J. Chua** “Detailed physical properties prediction of pure methyl esters for biodiesel combustion modeling”, Applied Energy (2012).

## 9. ANEXOS

### 9.1. Propiedades Dependientes de la Temperatura

**Tabla 9.1.-**Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, calor latente de vaporización, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Capilato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.

Temperatura, $T[K]$	Presión de Vapor, $P_v [kPa]$	Calor latente de vaporización, $\Delta H_v$ [kJ/kg-mol]	Capacidad calorífica líquida, $C_{pL}$ [kJ/kg-mol K]	Entalpía, $H$ [kJ/kg-mol]
296	0,05	54009,59	224,7	66511,2
306	0,102	53845,05	230,38	70496,28
316	0,2	53633,01	236,1	74607,6
326	0,372	53372,08	241,86	78846,36
336	0,666	53060,87	247,63	83203,68
346	1,146	52698	253,4	87676,4
356	1,908	52282,11	259,17	92264,52
366	3,077	51811,85	264,91	96957,06
376	4,82	51285,9	270,63	101756,88
386	7,351	50702,94	276,3	106651,8
396	10,94	50061,68	281,92	111640,32
406	15,914	49360,83	287,48	116716,88
416	22,666	48599,12	292,98	121879,68
426	31,655	47775,29	298,4	127118,4
436	43,408	46888,06	303,74	132430,64
446	58,517	45936,15	308,99	137809,54
456	77,636	44918,27	314,15	143252,4
466	101,471	43833,06	319,21	148751,86
476	130,771	42679,11	324,18	154309,68
486	166,315	41454,88	329,03	159908,58
496	208,895	40158,72	333,79	165559,84
506	259,294	38788,71	338,43	171245,58
516	318,268	37342,68	342,97	176972,52
526	386,522	35817,97	347,4	182732,4
536	464,683	34211,33	351,72	188521,92
546	553,272	32518,61	355,94	194343,24
556	652,683	30734,36	360,05	200187,8
566	763,151	28851,16	364,06	206057,96
576	884,73	26858,58	367,97	211950,72
586	1017,268	24741,3	371,79	217868,94
596	1160,385	22475,65	375,52	223809,92
605	1297,727	20277,78	378,8	229174

**Tabla 9.2.-Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, calor latente de vaporización, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Caprato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.**

Temperatura, $T[K]$	Presión de Vapor, $P_v [kPa]$	Calor latente de vaporización, $\Delta H_v [kJ/kg-mol]$	Capacidad calorífica líquida, $C_{pL}$ $[kJ/kg-mol K]$	Entalpía, $H [kJ/kg-$ $mol]$
308	0,014	63675,38	287,8	88642,4
319	0,032	63140,59	297,2	94806,8
330	0,071	62570,53	306,86	101263,8
341	0,148	61964,52	316,8	108028,8
352	0,291	61321,9	327,01	115107,52
363	0,545	60641,94	337,53	122523,39
374	0,977	59923,86	348,36	130286,64
385	1,685	59166,85	359,53	138419,05
396	2,8	58370,01	371,07	146943,72
407	4,503	57532,4	383	155881
418	7,025	56652,96	395,36	165260,48
429	10,66	55730,56	408,19	175113,51
440	15,767	54763,94	421,52	185468,8
451	22,781	53751,68	435,4	196365,4
462	32,21	52692,21	449,88	207844,56
473	44,642	51583,75	465	219945
484	60,739	50424,27	480,83	232721,72
495	81,243	49211,45	497,41	246217,95
506	106,964	47942,58	514,82	260498,92
517	138,781	46614,49	533,11	275617,87
528	177,633	45223,43	552,35	291640,8
539	224,516	43764,91	572,62	308642,18
550	280,476	42233,48	593,98	326689
561	346,605	40622,41	616,53	345873,33
572	424,036	38923,24	640,34	366274,48
583	513,946	37125,15	665,49	387980,67
594	617,552	35213,91	692,08	411095,52
605	736,119	33170,24	720,2	435721
616	870,967	30966,98	749,94	461963,04
627	1023,479	28563,89	781,41	489944,07
638	1195,121	25897,08	814,71	519784,98

**Tabla 9.3.**-Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, calor latente de vaporización, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Miristato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.

Temperatura, <b>T[K]</b>	Presión de Vapor, <b>Pv</b> <b>[kPa]</b>	Calor latente de vaporización, <b><math>\Delta H_v</math></b> <b>[kJ/kg-mol]</b>	Capacidad calorífica líquida, <b>CpL</b> <b>[kJ/kg-mol K]</b>	Entalpía, <b>H [kJ/kg-</b> <b>mol]</b>
356	0,014	78731,39	439,07	156308,92
367	0,031	77687,43	452,76	166162,92
378	0,065	76617,89	466,8	176450,4
389	0,129	75524,02	481,21	187190,69
400	0,244	74407,03	496,04	198416
411	0,441	73268,04	511,31	210148,41
422	0,766	72108,1	527,05	222415,1
433	1,284	70928,18	543,33	235261,89
444	2,081	69729,14	560,17	248715,48
455	3,271	68511,74	577,63	262821,65
466	5,002	67276,59	595,77	277628,82
477	7,453	66024,17	614,64	293183,28
488	10,848	64754,77	634,3	309538,4
499	15,447	63468,48	654,83	326760,17
510	21,559	62165,19	676,29	344907,9
521	29,538	60844,48	698,76	364053,96
532	39,785	59505,64	722,32	384274,24
543	52,75	58147,57	747,05	405648,15
554	68,934	56768,73	773,03	428258,62
565	88,89	55367,03	800,36	452203,4
576	113,231	53939,68	829,13	477578,88
587	142,626	52483,08	859,44	504491,28
598	177,817	50992,54	891,4	533057,2
609	219,626	49461,99	925,11	563391,99
620	268,968	47883,54	960,67	595615,4
631	326,873	46246,84	998,22	629876,82
642	394,508	44538,14	1037,85	666299,7
653	473,212	42738,79	1079,71	705050,63
664	564,534	40822,9	1123,91	746276,24
675	670,285	38753,17	1170,59	790148,25
686	792,602	36473,41	1219,87	836830,82
692	867,193	35111,19	1247,91	863553,72

**Tabla 9.4.-Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, calor latente de vaporización, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Palmitato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.**

Temperatura, $T[K]$	Presión de Vapor, $P_v$ [kPa]	Calor latente de vaporización, $\Delta H_v$ [kJ/kg-mol]	Capacidad calorífica líquida, $C_{pL}$ [kJ/kg-mol K]	Entalpía, $H$ [J/kg-mol]
376	0,014	85012,44	521,2	195971,2
387	0,031	83749,07	537,11	207861,57
398	0,063	82469,75	553,43	220265,14
409	0,123	81175,97	570,21	233215,89
420	0,228	79869,17	587,48	246741,6
431	0,405	78550,7	605,29	260879,99
442	0,695	77221,8	623,68	275666,56
453	1,15	75883,62	642,71	291147,63
464	1,845	74537,15	662,43	307367,52
475	2,875	73183,3	682,92	324387
486	4,361	71822,8	704,22	342250,92
497	6,453	70456,22	726,41	361025,77
508	9,333	69083,94	749,57	380781,56
519	13,218	67706,15	773,77	401586,63
530	18,359	66322,76	799,1	423523
541	25,05	64933,45	825,64	446671,24
552	33,62	63537,54	853,49	471126,48
563	44,444	62133,98	882,74	496982,62
574	57,938	60721,28	913,48	524337,52
585	74,57	59297,39	945,83	553310,55
596	94,859	57859,57	979,89	584014,44
607	119,383	56404,29	1015,78	616578,46
618	148,791	54926,92	1053,6	651124,8
629	183,814	53421,51	1093,49	687805,21
640	225,279	51880,3	1135,57	726764,8
651	274,137	50293,15	1179,97	768160,47
662	331,486	48646,65	1226,82	812154,84
673	398,608	46922,71	1276,26	858922,98
684	477,017	45096,4	1328,43	908646,12
695	568,513	43132,25	1383,48	961518,6
706	675,262	40977,76	1441,56	1017741,36
714	763,953	39246,14	1485,8	1060861,2



**Tabla 9.5.-Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, calor latente de vaporización, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Estearato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.**

Temperatura, $T[K]$	Presión de Vapor, $P_v$ [kPa]	Calor latente de vaporización, $\Delta H_v$ [kJ/kg-mol]	Capacidad calorífica líquida, $C_{pL}$ [kJ/kg- mol K]	Entalpía, $H$ [kJ/kg- mol]
394	0,014	90851,39	607,3	239276,2
405	0,03	89445,36	625,55	253347,75
416	0,06	88027,04	644,31	268032,96
427	0,114	86597,08	663,61	283361,47
438	0,209	85156,08	683,52	299381,76
449	0,368	83704,52	704,08	316131,92
460	0,624	82242,8	725,35	333661
471	1,026	80771,19	747,39	352020,69
482	1,635	79289,88	770,28	371274,96
493	2,532	77798,87	794,08	391481,44
504	3,823	76298,07	818,88	412715,52
515	5,633	74787,18	844,75	435046,25
526	8,119	73265,73	871,78	458556,28
537	11,464	71733,01	900,07	483337,59
548	15,882	70188,09	929,7	509475,6
559	21,619	68629,73	960,78	537076,02
570	28,954	67056,37	993,41	566243,7
581	38,202	65466,04	1027,7	597093,7
592	49,711	63856,3	1063,77	629751,84
603	63,868	62224,14	1101,73	664343,19
614	81,1	60565,88	1141,71	701009,94
625	101,882	58876,97	1183,84	739900
636	126,736	57151,81	1228,24	781160,64
647	156,246	55383,45	1275,06	824963,82
658	191,065	53563,22	1324,43	871474,94
669	231,934	51680,16	1376,51	920885,19
680	279,695	49720,25	1431,44	973379,2
691	335,322	47665,22	1489,38	1029161,6
702	399,944	45490,79	1550,48	1088437
713	474,891	43163,68	1614,92	1151438
724	561,738	40636,71	1682,86	1218390,6
735	662,368	37839,63	1754,48	1289542,8

**Tabla 9.6.-Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Linoleato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.**

Temperatura, T[K]	Presión de Vapor, P <sub>v</sub> [kPa]	Capacidad calorífica líquida, C <sub>pL</sub> [kJ/kg-mol K]	Entalpía, H [J/kg- mol]	Temperatura, T[K]	Calor latente de vaporización, ΔH <sub>v</sub> [J/kg-mol]
390	0,014	569,82	222229,8	470	113773
401	0,03	586,66	235250,66	474	113150
412	0,06	603,94	248823,28	478	112522
423	0,115	621,7	262979,1	482	111889
434	0,212	640	277760	486	111251
445	0,374	658,87	293197,15	490	110609
456	0,637	678,37	309336,72	494	109961
467	1,049	698,56	326227,52	498	109309
478	1,674	719,5	343921	502	108651
489	2,597	741,26	362476,14	506	107988
500	3,924	763,91	381955	510	107319
511	5,786	787,52	402422,72	514	106645
522	8,343	812,18	423957,96	518	105965
533	11,784	837,96	446632,68	522	105279
544	16,331	864,95	470532,8	526	104587
555	22,24	893,24	495748,2	530	103889
566	29,802	922,93	522378,38	534	103184
577	39,347	954,13	550533,01	538	102473
588	51,249	986,93	580314,84	542	101755
599	65,926	1021,44	611842,56	546	101031
610	83,849	1057,77	645239,7	550	100299
621	105,549	1096,05	680647,05	554	99561
632	131,629	1136,39	718198,48	558	98815
643	162,777	1178,92	758045,56	562	98061
654	199,788	1223,76	800339,04	566	97299
665	243,584	1271,06	845254,9	570	96530
676	295,25	1320,94	892955,44	574	95752
687	356,074	1373,56	943635,72	578	94965
698	427,599	1429,06	997483,88	582	94170
709	511,688	1487,58	1054694,2	586	93366
720	610,614	1549,29	1115488,8	590	92552
729	704,521	1602,25	1168040,3	594	91728

**Tabla 9.7.-Propiedades dependientes de la temperatura: presión vapor, capacidad calorífica líquida y entalpía para el Linolenato de metilo, de la base de datos del programa PhysProps.**

Temperatura, $T[K]$	Presión de Vapor, $P_v [kPa]$	Capacidad calorífica líquida, $C_{pL}$ [kJ/kg-mol K]	Entalpía, $H$ [J/kg-mol]	Temperatura, $T[K]$	Calor latente de vaporización, $\Delta H_v$ [J/kg-mol]
393	0,014	558,74	219584,82	480	386,16
404	0,029	575,07	232328,28	487	382,41
415	0,058	591,83	245609,45	494	378,62
426	0,111	609,06	259459,56	501	374,78
437	0,205	626,81	273915,97	508	370,88
448	0,362	645,12	289013,76	515	366,92
459	0,616	664,05	304798,95	522	362,91
470	1,016	683,65	321315,5	529	358,84
481	1,622	703,99	338619,19	536	354,7
492	2,518	725,13	356763,96	543	350,5
503	3,806	747,14	375811,42	550	346,23
514	5,614	770,1	395831,4	557	341,89
525	8,098	794,07	416886,75	564	337,48
536	11,441	819,15	439064,4	571	332,98
547	15,855	845,41	462439,27	578	328,41
558	21,587	872,94	487100,52	585	323,74
569	28,912	901,85	513152,65	592	318,98
580	38,142	932,22	540687,6	599	314,13
591	49,622	964,16	569818,56	606	309,17
602	63,735	997,78	600663,56	613	304,11
613	80,905	1033,17	633333,21	620	298,93
624	101,6	1070,46	667967,04	627	293,62
635	126,339	1109,77	704703,95	634	288,19
646	155,701	1151,21	743681,66	641	282,61
657	190,34	1194,91	785055,87	648	276,88
668	230,996	1241	828988	655	270,98
679	278,516	1289,61	875645,19	662	264,91
690	333,884	1340,89	925214,1	669	258,64
701	398,25	1394,96	977866,96	676	252,17
712	472,972	1451,99	1033816,88	683	245,46
723	559,669	1512,11	1093255,53	690	238,49
734	660,288	1575,48	1156402,32	697	231,24
736	680,255	1587,37	1168304,32	700	228,03

**Tabla 9.8.-Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Caprilato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.**

Temperatura, $T[K]$	Densidad Líquida, $\rho_L[kg/m^3]$	Viscosidad Líquida, $\mu_L[CP]$	Viscosidad Vapor, $\mu_V$ [CP]	Conductividad Líquida, $k_L$ [W/m-C]	Conductividad Vapor, $k_G$ [W/m-C]	Superficie de Tensión, $\sigma$ [N/m]
298	839,476	0,4857	0,005412	0,1276	0,006582	0,02605
306	832,774	0,4699	0,005554	0,1259	0,007222	0,02532
314	826,03	0,4543	0,005696	0,1242	0,007864	0,02459
322	819,239	0,4391	0,005839	0,1226	0,008508	0,02386
330	812,402	0,424	0,005982	0,1209	0,009156	0,02314
338	805,513	0,4093	0,006126	0,1193	0,009807	0,02242
346	798,572	0,3948	0,00627	0,1176	0,01046	0,02171
354	791,575	0,3805	0,006415	0,116	0,01112	0,021
362	784,52	0,3666	0,006559	0,1143	0,01179	0,02029
370	777,402	0,3529	0,006705	0,1126	0,01245	0,01959
378	770,218	0,3394	0,00685	0,111	0,01313	0,0189
386	762,964	0,3262	0,006996	0,1093	0,0138	0,01821
394	755,636	0,3133	0,007141	0,1077	0,01448	0,01752
402	748,23	0,3006	0,007287	0,106	0,01517	0,01684
410	740,74	0,2882	0,007433	0,1043	0,01586	0,01616
418	733,16	0,2761	0,007579	0,1026	0,01656	0,01549
426	725,486	0,2642	0,007725	0,1009	0,01725	0,01483
434	717,709	0,2526	0,007871	0,09917	0,01796	0,01416
442	709,824	0,2413	0,008017	0,09742	0,01866	0,01351
450	701,82	0,2302	0,008163	0,09565	0,01937	0,01286
458	693,691	0,2194	0,008308	0,09386	0,02009	0,01222
466	685,424	0,2088	0,008454	0,09205	0,0208	0,01158
474	677,01	0,1985	0,008599	0,0902	0,02153	0,01095
482	668,436	0,1885	0,008744	0,08832	0,02225	0,01032
490	659,686	0,1787	0,008889	0,0864	0,02298	0,00971
498	650,745	0,1692	0,009034	0,08445	0,02371	0,00909
506	641,594	0,1599	0,009179	0,08245	0,02444	0,00849
514	632,211	0,1509	0,009323	0,08039	0,02518	0,0079
522	622,57	0,1422	0,009467	0,07828	0,02592	0,00731
530	612,643	0,1338	0,009611	0,0761	0,02666	0,00673
538	602,393	0,1256	0,009754	0,07385	0,0274	0,00616
546	591,778	0,1176	0,009898	0,07152	0,02815	0,0056
550	586,318	0,1138	0,009969	0,07031	0,02852	0,00532

**Tabla 9.9.-Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Caprato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.**

Temperatura, $T[K]$	Densidad Líquida, $\rho_L[kg/m^3]$	Viscosidad Líquida, $\mu_L[CP]$	Viscosidad Vapor, $\mu_V$ [CP]	Conductividad Líquida, $k_L$ [W/m-C]	Conductividad Vapor, $k_G$ [W/m-C]	Superficie de Tensión, $\sigma$ [N/m]
298	909,402	0,5756	0,005197	0,1213	0,005715	0,02844
306	902,54	0,5582	0,005332	0,1198	0,006371	0,00384
314	895,642	0,541	0,005466	0,1183	0,007026	0,00374
322	888,707	0,5241	0,005602	0,1169	0,00768	0,00364
330	881,732	0,5074	0,005738	0,1154	0,008337	0,00354
338	874,716	0,491	0,005875	0,1139	0,008995	0,00344
346	867,657	0,4749	0,006012	0,1125	0,009657	0,00334
354	860,553	0,4591	0,006149	0,111	0,01032	0,00325
362	853,401	0,4435	0,006287	0,1096	0,01099	0,00315
370	846,2	0,4282	0,006426	0,1081	0,01166	0,00305
378	838,945	0,4132	0,006564	0,1067	0,01234	0,00296
386	831,635	0,3984	0,006703	0,1052	0,01302	0,00286
394	824,267	0,3839	0,006843	0,1038	0,0137	0,00277
402	816,837	0,3697	0,006982	0,1023	0,01439	0,00267
410	809,341	0,3557	0,007122	0,1009	0,01508	0,00258
418	801,777	0,342	0,007261	0,09942	0,01578	0,00249
426	794,139	0,3286	0,007401	0,09795	0,01648	0,0024
434	786,423	0,3154	0,007541	0,09647	0,01719	0,0023
442	778,624	0,3025	0,007681	0,09498	0,01789	0,00221
450	770,738	0,2899	0,007821	0,09348	0,01861	0,00212
458	762,757	0,2776	0,007961	0,09197	0,01932	0,00203
466	754,675	0,2655	0,0081	0,09044	0,02004	0,00194
474	746,486	0,2537	0,00824	0,0889	0,02076	0,00186
482	738,182	0,2421	0,00838	0,08733	0,02149	0,00177
490	729,753	0,2308	0,008519	0,08575	0,02222	0,00168
498	721,19	0,2198	0,008659	0,08414	0,02295	0,0016
506	712,483	0,2091	0,008798	0,0825	0,02368	0,00151
514	703,618	0,1986	0,008937	0,08084	0,02442	0,00143
522	694,583	0,1884	0,009076	0,07914	0,02516	0,00135
530	685,361	0,1785	0,009215	0,07741	0,02591	0,00126
538	675,935	0,1688	0,009353	0,07564	0,02665	0,00118
546	666,284	0,1594	0,009491	0,07382	0,0274	0,0011
550	661,367	0,1548	0,00956	0,07289	0,02777	0,00106

**Tabla 9.10.-Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Miristato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.**

Temperatura, T[K]	Densidad Líquida, $\rho_L$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidad Líquida, $\mu_L$ [CP]	Viscosidad Vapor, $\mu_V$ [CP]	Conductividad Líquida, kL [W/m-C]	Conductividad Vapor, kG [W/m-C]	Superficie de Tensión, $\sigma$ [N/m]
298	955,729	0,6979	0,004636	0,1027	0,003934	0,02993
306	949,024	0,6789	0,004753	0,1015	0,004597	0,00197
314	942,295	0,6602	0,00487	0,1004	0,005248	0,00192
322	935,54	0,6417	0,004989	0,09926	0,005891	0,00188
330	928,758	0,6235	0,005108	0,09814	0,006531	0,00183
338	921,949	0,6055	0,005227	0,09702	0,00717	0,00179
346	915,11	0,5878	0,005347	0,0959	0,007807	0,00175
354	908,241	0,5704	0,005468	0,0948	0,008446	0,0017
362	901,339	0,5532	0,005589	0,0937	0,009086	0,00166
370	894,405	0,5363	0,00571	0,0926	0,009729	0,00162
378	887,436	0,5196	0,005832	0,09151	0,01037	0,00158
386	880,43	0,5032	0,005954	0,09042	0,01102	0,00153
394	873,387	0,4871	0,006077	0,08934	0,01167	0,00149
402	866,303	0,4712	0,0062	0,08825	0,01233	0,00145
410	859,177	0,4556	0,006323	0,08717	0,01298	0,00141
418	852,007	0,4403	0,006446	0,08608	0,01364	0,00137
426	844,791	0,4252	0,00657	0,08499	0,01431	0,00133
434	837,526	0,4104	0,006694	0,08391	0,01497	0,00128
442	830,209	0,3958	0,006818	0,08281	0,01564	0,00124
450	822,837	0,3815	0,006942	0,08172	0,01632	0,0012
458	815,408	0,3674	0,007066	0,08062	0,01699	0,00116
466	807,918	0,3537	0,00719	0,07952	0,01767	0,00112
474	800,364	0,3401	0,007314	0,0784	0,01835	0,00108
482	792,742	0,3269	0,007438	0,07729	0,01904	0,00104
490	785,047	0,3139	0,007563	0,07616	0,01973	0,001
498	777,274	0,3012	0,007687	0,07502	0,02042	0,00096
506	769,42	0,2887	0,007811	0,07388	0,02111	0,00093
514	761,478	0,2765	0,007935	0,07272	0,02181	0,00089
522	753,442	0,2645	0,008059	0,07155	0,02251	0,00085
530	745,306	0,2528	0,008183	0,07036	0,02321	0,00081
538	737,063	0,2414	0,008307	0,06916	0,02391	0,00077
546	728,704	0,2302	0,008431	0,06794	0,02461	0,00074
550	724,478	0,2247	0,008492	0,06733	0,02497	0,00072

**Tabla 9.11.-Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Palmitato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.**

Temperatura, <b>T[K]</b>	Densidad Líquida, <b><math>\rho_L</math>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	Viscosidad Vapor, <b><math>\mu_V</math> [CP]</b>	Conductividad Líquida, <b>kL [W/m-C]</b>	Conductividad Vapor, <b>kG [W/m-C]</b>	Superficie de Tensión, <b><math>\sigma</math> [N/m]</b>	Temperatura, <b>T[K]</b>	Viscosidad Líquida, <b><math>\mu_L</math>[CP]</b>
298	973,62	0,00443	0,106	0,003166	0,03031	330	0,6696
306	966,974	0,004541	0,1049	0,003846	0,00135	337	0,6534
314	960,308	0,004652	0,1037	0,004505	0,00132	344	0,6375
322	953,619	0,004764	0,1026	0,005151	0,00129	351	0,6218
330	946,907	0,004876	0,1015	0,005789	0,00127	358	0,6062
338	940,172	0,004989	0,1004	0,006422	0,00124	365	0,5909
346	933,411	0,005103	0,09925	0,007053	0,00121	372	0,5757
354	926,625	0,005217	0,09815	0,007683	0,00118	379	0,5607
362	919,812	0,005332	0,09706	0,008313	0,00115	386	0,546
370	912,97	0,005447	0,09597	0,008944	0,00113	393	0,5314
378	906,099	0,005563	0,09489	0,009577	0,0011	400	0,517
386	899,198	0,005679	0,09381	0,01021	0,00107	407	0,5029
394	892,264	0,005795	0,09274	0,01085	0,00104	414	0,4889
402	885,297	0,005912	0,09167	0,01149	0,00101	421	0,4751
410	878,294	0,006029	0,0906	0,01213	0,00099	428	0,4615
418	871,254	0,006146	0,08953	0,01278	0,00096	435	0,4481
426	864,176	0,006264	0,08846	0,01342	0,00093	442	0,4349
434	857,056	0,006382	0,08739	0,01408	0,00091	449	0,4219
442	849,894	0,006499	0,08632	0,01473	0,00088	456	0,4091
450	842,687	0,006617	0,08525	0,01539	0,00085	463	0,3965
458	835,432	0,006736	0,08417	0,01605	0,00083	470	0,384
466	828,127	0,006854	0,08309	0,01671	0,0008	477	0,3718
474	820,769	0,006972	0,08201	0,01738	0,00077	484	0,3598
482	813,356	0,007091	0,08092	0,01804	0,00075	491	0,3479
490	805,883	0,007209	0,07983	0,01872	0,00072	498	0,3363
498	798,347	0,007327	0,07873	0,01939	0,0007	505	0,3249
506	790,745	0,007446	0,07762	0,02007	0,00067	512	0,3136
514	783,072	0,007564	0,0765	0,02074	0,00065	519	0,3026
522	775,325	0,007683	0,07537	0,02143	0,00062	526	0,2917
530	767,497	0,007801	0,07423	0,02211	0,0006	533	0,2811
538	759,584	0,007919	0,07308	0,02279	0,00057	540	0,2706
546	751,58	0,008037	0,07192	0,02348	0,00055	547	0,2603
550	747,541	0,008097	0,07133	0,02383	0,00054	550	0,256

**Tabla 9.12.-Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Estearato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.**

Temperatura, T[K]	Densidad Líquida, $\rho_L$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidad Vapor, $\mu V$ [CP]	Conductividad Líquida, kL [W/m-C]	Conductividad Vapor, kG [W/m-C]	Superficie de Tensión, $\sigma$ [N/m]	Temperatura, T[K]	Viscosidad Líquida, $\mu L$ [CP]
298	811,292	0,003818	0,1017	0,002185	0,02534	330	0,6032
306	806,004	0,003912	0,1006	0,002824	0,00047	337	0,5894
314	800,7	0,004007	0,09954	0,00343	0,00046	344	0,5757
322	795,38	0,004103	0,09849	0,004016	0,00045	351	0,5621
330	790,042	0,004199	0,09744	0,00459	0,00044	358	0,5487
338	784,686	0,004295	0,09641	0,005157	0,00043	365	0,5355
346	779,311	0,004392	0,09538	0,005719	0,00042	372	0,5225
354	773,917	0,00449	0,09436	0,006278	0,00041	379	0,5096
362	768,502	0,004588	0,09335	0,006836	0,0004	386	0,4968
370	763,066	0,004687	0,09234	0,007394	0,0004	393	0,4842
378	757,609	0,004786	0,09134	0,007953	0,00039	400	0,4718
386	752,128	0,004885	0,09034	0,008513	0,00038	407	0,4596
394	746,624	0,004984	0,08935	0,009074	0,00037	414	0,4475
402	741,094	0,005084	0,08836	0,009637	0,00036	421	0,4355
410	735,539	0,005185	0,08737	0,0102	0,00035	428	0,4237
418	729,956	0,005285	0,08639	0,01077	0,00034	435	0,4121
426	724,344	0,005386	0,0854	0,01134	0,00033	442	0,4007
434	718,703	0,005487	0,08442	0,01191	0,00032	449	0,3894
442	713,031	0,005588	0,08344	0,01249	0,00031	456	0,3782
450	707,325	0,005689	0,08245	0,01306	0,00031	463	0,3672
458	701,585	0,00579	0,08147	0,01364	0,0003	470	0,3564
466	695,809	0,005892	0,08048	0,01422	0,00029	477	0,3458
474	689,994	0,005993	0,07949	0,01481	0,00028	484	0,3353
482	684,14	0,006095	0,07849	0,01539	0,00027	491	0,3249
490	678,243	0,006197	0,07749	0,01598	0,00026	498	0,3148
498	672,301	0,006299	0,07649	0,01657	0,00025	505	0,3047
506	666,313	0,0064	0,07548	0,01716	0,00024	512	0,2949
514	660,274	0,006502	0,07447	0,01776	0,00024	519	0,2852
522	654,183	0,006604	0,07345	0,01836	0,00023	526	0,2757
530	648,035	0,006706	0,07242	0,01895	0,00022	533	0,2663
538	641,828	0,006808	0,07138	0,01955	0,00021	540	0,2571
546	635,558	0,00691	0,07033	0,02016	0,0002	547	0,248
550	632,398	0,00696	0,0698	0,02046	0,0002	550	0,2442



**Tabla 9.13.-Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Linoleato de metilo por métodos de contribución de grupos PhysProps.**

Temperatura, <b>T[K]</b>	Densidad Líquida, <b><math>\rho_L</math>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	Viscosidad Vapor, <b><math>\mu_V</math> [CP]</b>	Conductividad Líquida, <b>kL [W/m-C]</b>	Conductividad Vapor, <b>kG [W/m-C]</b>	Superficie de Tensión, <b><math>\sigma</math> [N/m]</b>	Temperatura, <b>T[K]</b>	Viscosidad Líquida, <b><math>\mu_L</math>[CP]</b>
298	1316,378	0,003916	0,1018	0,002305	0,02599	330	1,039
306	1304,257	0,004013	0,1007	0,002922	0,02547	337	1,014
314	1292,155	0,004111	0,09963	0,003512	0,02495	344	0,9887
322	1280,073	0,004209	0,09857	0,004086	0,02443	351	0,9639
330	1268,01	0,004308	0,09751	0,00465	0,02391	358	0,9393
338	1255,965	0,004407	0,09647	0,005209	0,02339	365	0,915
346	1243,938	0,004507	0,09543	0,005763	0,02288	372	0,8911
354	1231,928	0,004607	0,0944	0,006316	0,02237	379	0,8675
362	1219,934	0,004708	0,09338	0,006868	0,02186	386	0,8441
370	1207,955	0,004809	0,09236	0,007419	0,02135	393	0,8211
378	1195,99	0,004911	0,09135	0,007972	0,02085	400	0,7984
386	1184,038	0,005013	0,09034	0,008525	0,02034	407	0,776
394	1172,099	0,005115	0,08934	0,00908	0,01984	414	0,7539
402	1160,169	0,005218	0,08834	0,009637	0,01934	421	0,7322
410	1148,249	0,005321	0,08734	0,01019	0,01885	428	0,7107
418	1136,337	0,005424	0,08635	0,01075	0,01835	435	0,6896
426	1124,431	0,005528	0,08535	0,01132	0,01786	442	0,6687
434	1112,53	0,005631	0,08435	0,01188	0,01737	449	0,6482
442	1100,631	0,005735	0,08336	0,01245	0,01689	456	0,628
450	1088,732	0,005839	0,08236	0,01301	0,0164	463	0,608
458	1076,832	0,005943	0,08136	0,01358	0,01592	470	0,5884
466	1064,928	0,006047	0,08036	0,01415	0,01544	477	0,5691
474	1053,018	0,006152	0,07936	0,01472	0,01497	484	0,5502
482	1041,099	0,006256	0,07835	0,0153	0,01449	491	0,5315
490	1029,167	0,006361	0,07734	0,01587	0,01402	498	0,5131
498	1017,22	0,006465	0,07632	0,01645	0,01355	505	0,4951
506	1005,254	0,00657	0,0753	0,01703	0,01309	512	0,4773
514	993,266	0,006674	0,07427	0,01761	0,01263	519	0,4599
522	981,251	0,006779	0,07323	0,01819	0,01217	526	0,4428
530	969,205	0,006883	0,07218	0,01877	0,01171	533	0,426
538	957,124	0,006988	0,07113	0,01936	0,01126	540	0,4095
546	945,001	0,007092	0,07006	0,01994	0,01081	547	0,3933
550	938,922	0,007144	0,06952	0,02023	0,01059	550	0,3864

**Tabla 9.14.-Propiedades dependientes de la temperatura: densidad líquida, viscosidad líquida/vapor, conductividad líquida/vapor y superficie de tensión para el Linolenato de metilo, por métodos de contribución de grupos PhysProps.**

Temperatura, $T[K]$	Densidad Líquida, $\rho_L[kg/m^3]$	Viscosidad Líquida, $\mu_L[CP]$	Viscosidad Vapor, $\mu_V$ [CP]	Conductividad Líquida, $k_L$ [W/m-C]	Conductividad Vapor, $k_G$ [W/m-C]	Superficie de Tensión, $\sigma$ [N/m]
330	1305,924	1,072	0,004401	0,09939	0,004518	0,0255
337	1295,299	1,046	0,00449	0,09846	0,005014	0,02502
344	1284,685	1,021	0,004579	0,09755	0,005506	0,02455
351	1274,083	0,9952	0,004668	0,09664	0,005996	0,02408
358	1263,493	0,9703	0,004758	0,09573	0,006485	0,02361
365	1252,913	0,9456	0,004848	0,09483	0,006973	0,02314
372	1242,343	0,9213	0,004938	0,09394	0,007461	0,02268
379	1231,782	0,8972	0,005029	0,09305	0,00795	0,02221
386	1221,23	0,8735	0,00512	0,09216	0,008439	0,02175
393	1210,686	0,8501	0,005212	0,09127	0,008928	0,02129
400	1200,15	0,827	0,005303	0,09039	0,009419	0,02083
407	1189,619	0,8042	0,005395	0,08951	0,00991	0,02038
414	1179,094	0,7817	0,005487	0,08863	0,0104	0,01992
421	1168,573	0,7595	0,005579	0,08776	0,0109	0,01947
428	1158,055	0,7377	0,005672	0,08688	0,01139	0,01902
435	1147,539	0,7161	0,005764	0,086	0,01189	0,01857
442	1137,025	0,6949	0,005857	0,08513	0,01238	0,01812
449	1126,509	0,674	0,00595	0,08425	0,01288	0,01768
456	1115,992	0,6533	0,006043	0,08337	0,01338	0,01723
463	1105,472	0,633	0,006136	0,08249	0,01388	0,01679
470	1094,947	0,613	0,006229	0,08161	0,01438	0,01635
477	1084,415	0,5933	0,006322	0,08073	0,01489	0,01592
484	1073,874	0,574	0,006415	0,07984	0,01539	0,01548
491	1063,324	0,5549	0,006509	0,07895	0,01589	0,01505
498	1052,761	0,5361	0,006602	0,07806	0,0164	0,01462
505	1042,183	0,5177	0,006695	0,07716	0,0169	0,01419
512	1031,588	0,4995	0,006789	0,07626	0,01741	0,01376
519	1020,974	0,4817	0,006882	0,07535	0,01792	0,01334
526	1010,337	0,4642	0,006976	0,07444	0,01842	0,01292
533	999,675	0,447	0,007069	0,07352	0,01893	0,0125
540	988,985	0,4301	0,007162	0,07259	0,01944	0,01209
547	978,262	0,4135	0,007256	0,07166	0,01995	0,01167
550	973,656	0,4065	0,007296	0,07126	0,02017	0,0115