



SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



Secretaría de
Educación Pública



Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Reporte de Residencia Profesional

“Análisis, diseño y simulación del comportamiento de las variables características durante el proceso de lavado en una planta de producción de biodiesel”.

Autores:

Esau Cruz Tovilla

Alfonso Constantino Constantino

Asesor:

Dr. Héctor Ricardo Hernández de León

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; Junio del 2011

Índice de Figuras.

<i>Figura 1. Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913)</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2. El biodiesel puede ser producido a base de aceites vegetales</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3. Reacciones presentes durante el proceso de Transesterificación</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Estructura química del metanol</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5. Diagrama del proceso para producir biodiesel simulado en Aspen Plus.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6. El simulador está listo para correr la simulación.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7. La simulación fue exitosa.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 8. Etapa de lavado. Se muestran las salidas BIO y DIRTW de salida.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 9. Lavado del biodiesel. El vaso de precipitación de la derecha es una mezcla de biodiesel impuro y agua. El embudo de separación de la izquierda es un lote de biodiesel separándose del agua.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 10. El embudo de separación que se entra al lado derecho tiene 3 lavados mientras el embudo de separación que se encuentra al lado izquierdo posee solo 2, de esta manera gráfica se puede observar cómo influyen los lavados en la muestra.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 11. Biodiesel luego del tercer lavado, nótese que el agua de lavado se encuentra incolora.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 12. Diagrama de un control de temperatura ON-OFF serial.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 13. Diagrama de la planta de producción de biodiesel ubicada en Girona, Catalunya, España.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 14. Equipo de destilación fraccionada. Destilación de metanol.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 15. Agregación del metanol al biodiesel. Se colocó papel wrap para evitar la hidratación del metanol con la humedad ambiental.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 16. Preparación del metóxido de sodio.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 17. Transesterificación del aceite vegetal.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 18. Luego de una hora de reacción, se observa una mezcla homogénea.</i>	<i>46</i>

Figura 19. Separación del biodiesel de la glicerina, se puede observar el biodiesel (primera fase, arriba) y la glicerina impura (segunda fase, abajo) 47

Índice de Tablas.

<i>Tabla. Tabla de resultados de la simulación en unidades de flujo de masa (kg/hr)</i>	<i>26</i>
<i>Tabla. Tabla de resultados totales de la simulación.</i>	<i>26</i>
<i>Tabla. Resultados de la primera simulación en unidades de flujo de masa (kg/hr)</i>	<i>28</i>
<i>Tabla. Resultados de la segunda simulación en unidades de flujo de masa (kg/hr)</i>	<i>28</i>
<i>Tabla. Resultados de la tercera simulación en flujo de masa (kg/hr)</i>	<i>29</i>
<i>Tabla. Tabla que indica el porcentaje de contenido de algunas propiedades en el biodiesel después del lavado, según la Norma UNIT 1100.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla. Aquí se muestra la cantidad de metanol recuperado.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla. Resultados de las pruebas físico-químicas realizadas al aceite residual.</i>	<i>35</i>
<i>Tabla. Resultados de las pruebas físico-químicas realizadas al biodiesel después del lavado.</i>	<i>35</i>
<i>Tabla. Tabla de fracciones másicas.</i>	<i>40</i>

Índice General.

INDICE DE FIGURAS	I
INDICE DE TABLAS	II
1 Introducción.....	5
2 Planteamiento del problema.....	5
2.1 Objetivos.....	6
2.2 Justificación.....	6
3 Estado del arte.....	7
4 Marco teórico.....	7
4.1 Orígenes del biodiesel.....	7
4.2 ¿Qué es el biodiesel?.....	9
4.2.1 Definición.....	9
4.2.2 Transesterificación.....	10
4.2.3 Ventajas del uso del biodiesel.....	11
4.2.4 Desventajas del uso del biodiesel.....	12
4.3 Propiedades físico-químicas del aceite.....	13
4.4 Propiedades físico-químicas del biodiesel.....	13
4.5 Metanol.....	14
4.5.1 Propiedades.....	14
4.5.2 El metanol en el biodiesel.....	15
4.6 Catalizador.....	16
4.7 Proceso de lavado con agua.....	17
4.7.1 Lavado con burbujas.....	17
4.7.2 Lavado de atomización/rocío.....	19
4.7.3 Lavado estático.....	20
4.7.4 Lavado de agitación.....	21
4.8 Aspen Plus User Interface.....	22
5 Metodología.....	23
5.1 Investigación bibliográfica.....	23
5.2 Simulación.....	24
5.3 Proceso de lavado experimental.....	29
6 Resultados.....	34
6.1 Pruebas físico-químicas del aceite (antes del lavado).....	35
6.2 Pruebas físico-químicas del biodiesel (después del lavado).....	35
6.3 Variables.....	35
7 Alcances.....	36
8 Conclusiones.....	40
9 Bibliografía.....	41
10 Anexo.....	42

1. Introducción.

Desde las últimas dos décadas, el biodiesel ha tomado gran renombre debido a su excelente habilidad de complementar (en diferentes porcentajes) o reemplazar al diesel convencional derivado de fósiles. Además, es capaz de reducir hasta en un 48% la emisión de gases dañinos. El biodiesel se puede obtener de aceites vegetales y/o grasas animales mediante un proceso llamado: “transesterificación”, el cual consiste en una serie de reacciones químicas reversibles y consecutivas, es decir, de triglicéridos (aceites y/o grasas animales) son convertidos a monoglicéridos y glicerina. Por cada reacción, un mol de éster metílico es liberado.

Una vez terminado el proceso de transesterificación el producto obtenido será una mezcla homogénea compuesto por éster metílico, glicerol y residuos de metanol y catalizador. El glicerol debe ser separado del biodiesel y el remanente tendrá que ser sometido a un proceso de purificación, lo cual se logra mediante un proceso de lavado con agua.

Hay diversos tipos de procesos de lavado, cada uno tiene sus ventajas y desventajas. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó el método de lavado con burbujas, las bases para elegir este método en particular se explicarán en el apartado correspondiente.

Existen normas de calidad nacionales e internacionales y organismos como la ASTM (*American Society for Testing and Material*) que se encargan de promulgar regulaciones para la purificación de biodiesel. Por lo tanto, es necesario que el biodiesel posea con cierto nivel de purificación, lo cual se logra con el lavado.

La utilización de biodiesel como combustible sustentable requiere controlar el impacto ambiental de todas las etapas del proceso de producción, en especial la etapa de lavado, la cual definirá el nivel de calidad del biodiesel. La etapa de lavado con agua tiene el objetivo de remover los remanentes de catalizador, metanol y otros.

2. Planteamiento del Problema.

En nuestra época, los niveles de contaminación se han elevado de manera sorprendente. Algunos países han tomado la iniciativa para buscar energías renovables y capaces de reducir estos niveles de polución.

El biodiesel como combustible, presenta muchas ventajas que lo hacen ser la principal opción para poder reemplazar al diesel. El proceso de su elaboración requiere de regular ciertos parámetros para que la reacción química culmine con éxito pero, también es

importante efectuar un tratamiento de purificación para que el producto final cumpla con las normas nacionales e internacionales.

En base a lo anterior, la problemática consiste en ejecutar un análisis durante y después del proceso de lavado de biodiesel para cerciorar que el combustible cumpla con los requerimientos.

2.1. OBJETIVOS.

- ◆ Análisis y verificación del comportamiento de las variables características en el proceso de lavado con agua en el bioreactor, donde se remueven los remanentes de metanol y catalizador presentes en una planta de producción de biodiesel.
- ◆ Simulación, implementación pruebas de un circuito digital basado en microcontroladores que permita medir las variables características en el proceso de lavado con agua con la finalidad de eliminar concentraciones de contaminantes.

2.2. JUSTIFICACIÓN.

El uso de los automóviles se ha convertido en una necesidad fundamental para el ser humano pero, la mayoría no mide los alcances de los agentes contaminantes que se emiten al medio por el inadecuado uso de los combustibles de origen fósil. Una de las principales fuentes de polución, son precisamente los automóviles.

En la actualidad es elemental y conveniente luchar contra la enorme contaminación y los efectos de esta misma debido a la emisión de los gases de efecto invernadero.

La utilización del biodiesel como combustible alternativo y sustentable requiere controlar el impacto ambiental de todas las etapas del proceso de producción.

La etapa de lavado con agua tiene el objetivo de remover remanentes de catalizador y metanol presentes, es decir, la purificación del biodiesel. La eliminación del catalizador y el metanol tendrá un importante impacto ambiental en el proceso de producción de biodiesel. Este proceso será comprobado mediante una medición comparada con las variables asociadas al agua limpia empleada en el proceso de lavado.

3. Estado del Arte.

Numerosos documentos como libros, reportes, artículos, revistas, abordan el tema del biodiesel, en particular, el mecanismo de la reacción de transesterificación, cantidades de los reactivos, ventajas del biodiesel y descripción de cómo producirlo.

Sin embargo, en lo referente a un análisis del proceso de purificación, es decir, la manera en cómo se eliminan los remanentes de metanol y catalizador son pocos. La planta de producción de biodiesel ubicada en la provincia de Girona, Catalunya al noreste de España con una capacidad de producción de 150, 000 Tn/año obtuvo una tabla de fracciones másicas [ANEXO 1] a través del proceso IDAE-UCM¹ en la que muestra las cantidades de metanol y catalizador durante el proceso de producción y de lavado con la cual se comprueba que la remoción de estas sustancias es posible, consiguiendo un 97% de purificación del biodiesel.

Algunos productores de biodiesel utilizan los diferentes métodos de lavado que existen pero, no especifican las variables que se involucran durante este proceso tan importante.

4. Marco Teórico

4.1. ORÍGENES DEL BODIESEL.

El uso del aceite como combustible, se remonta al año de 1900, en aquella “Exposición Universal de París”, cuando el inventor alemán Rudolf Diesel presentó un motor que funcionaba a base de aceite de cacahuate. Esta invención llamó la atención de muchos, pero debido al fuerte desarrollo de la petroquímica no se lograron avances relevantes.

¹ Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía – Universidad Complutense de Madrid.

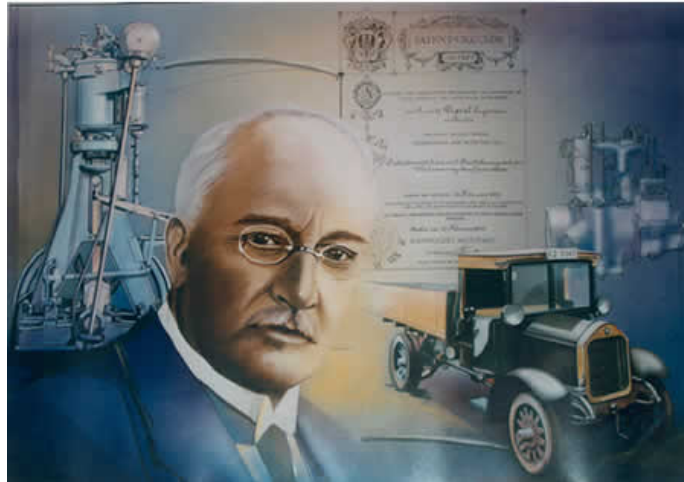


Figura 1. Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913).

Sin embargo, durante la primera y segunda guerra mundial, se recurrió a esta opción a causa del desabastecimiento de productos petrolíferos que se presentó. Después de la segunda guerra mundial, el avance tecnológico del campo de los motores diesel se intensifica y el uso de los aceites se vuelve a dejar en el olvido.

En el año de 1973, cuando se presenta la primera crisis de petróleo, se plantea el ahorro de energía y la utilización de recursos energéticos renovables. Entonces, se reinician las investigaciones sobre los biocombustibles derivados de aceites.

Como solución a estos problemas, se analizaron varias alternativas, las cuales fueron:

- ◆ Crear motores completamente nuevos para los combustibles alternativos
- ◆ Modificar los motores actuales para que se adapten a los combustibles alternativos.
- ◆ Utilizar los motores actuales, modificando los combustibles alternativos.

La tercera opción es la que se ha difundido mayormente, teniendo como objetivo principal reducir la viscosidad de los aceites vegetales hasta valores cercanos de los combustibles de origen fósil y poder utilizarlos en motores diesel.

4.2. ¿QUÉ ES EL BIODIESEL?

4.2.1. Definición.

*“Ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y grasas animales”.*²



Figura 2. El biodiesel puede ser producido a base de aceites vegetales.

El aceite para producir biodiesel puede provenir de varias fuentes:

- ◆ Frutos y semillas oleaginosas: maíz, algodón, cáñamo, linaza, mostaza, girasol, cacahuate, colza, ricino, jojoba, coco, palma africana y piñón³.
- ◆ Aceite comercial sin usar.
- ◆ Aceite utilizado en restaurantes y cocina (el cual debe someterse a un pretratamiento para eliminar los restos de comida, humedad y otros).

Los aceites vegetales usualmente contienen ácidos grasos libres, fosfolípidos, esteroides, agua y otras impurezas. A causa de esto, el aceite no puede ser usado como combustible directamente en el motor. Para solucionar estos problemas, el aceite requiere una modificación química principalmente por transesterificación, pirólisis o emulsificación. Entre ellas, la transesterificación es el proceso más importante para producir un combustible a partir de aceite vegetal, que sea limpio y no ocasione daños ambientales.

² Definición según la *American Society for Testing and Material (ASTM)*.

³ Nombre científico: *Jatropha Curcas*.

4.2.2. Transesterificación.

El proceso de convertir el aceite o grasas en biodiesel, es llamado Transesterificación o alcoholólisis. En términos más técnicos, es el desplazamiento del grupo alcoxi (grupo alquilo unido a un átomo de oxígeno, RO* donde R es el grupo alquilo) de un tipo de éster por otro alcohol, en un proceso similar a la hidrólisis, excepto, que el alcohol es usado en lugar de agua.

A través del proceso de transesterificación de los aceites vegetales y su reacción con un alcohol (normalmente, metanol), se obtienen los ésteres metílicos derivados, que son compuestos oxigenados con características similares en su comportamiento a las del diesel, principalmente en lo referente a la viscosidad, temperatura de ebullición, residuo carbonoso, número de cetano, etcétera.

La reacción química de transesterificación consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas (Figura 1). El triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción un mol de éster metílico es liberado.

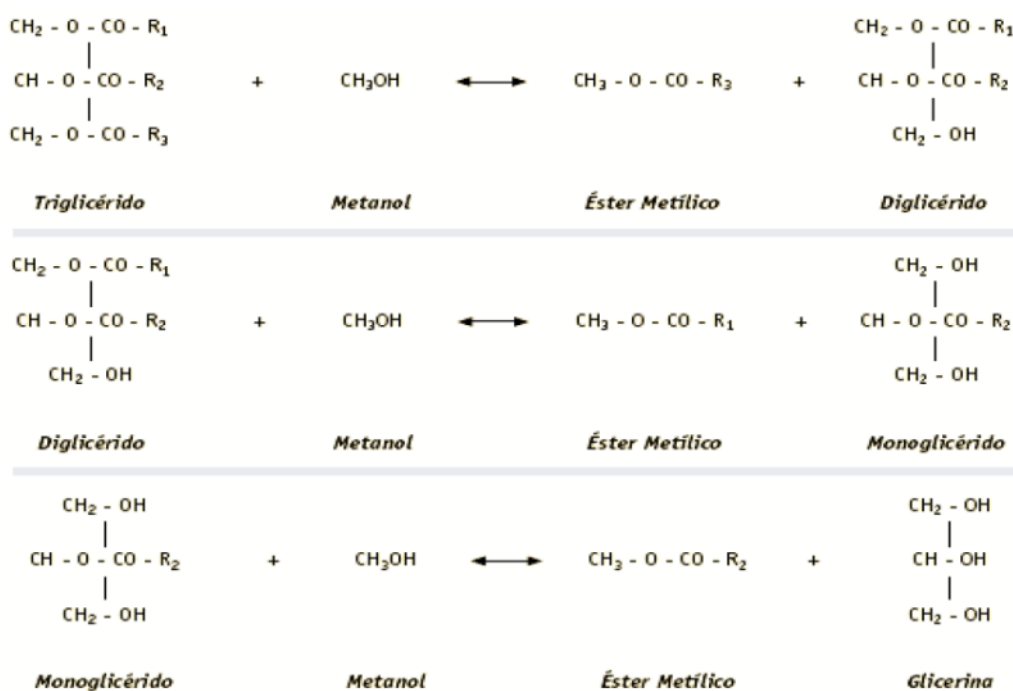
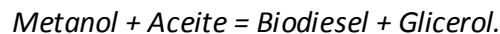


Figura 3. Reacciones presentes durante el proceso de Transesterificación.

En general, el proceso químico para la obtención del biodiesel es el siguiente:



O también:



Al terminar el proceso de transesterificación se obtiene una mezcla heterogénea de biodiesel y glicerol, los cuáles son separados por un método apropiado. Debido a la diferencia de densidades el glicerol se asentará en el fondo. El método fácil y sencillo para separarlos puede ser la decantación.

4.2.3. Ventajas de uso del Biodiesel.

El biodiesel ha tomado gran renombre debido a que es capaz de complementar (en diferentes porcentajes⁷) o reemplazar al diesel convencional derivado de fósiles.

La gran diferencia entre estos dos es la cantidad de emisión de gases dañinos, entre los cuáles, los más importantes son:

- ◆ Monóxido de carbono (CO): con el uso del biodiesel en los motores, se alcanza a reducir hasta en un 50% de lo que produce el diesel. Éste agente contaminante se concentra principalmente en las ciudades.
- ◆ Dióxido de Carbono (CO₂): toda emisión de esta polución es reabsorbido por los vegetales. Por lo tanto, es considerado como renovable.

⁴ El Hidróxido de Potasio (KOH) también puede ser utilizado como catalizador.

⁵ El porcentaje del Metanol debe ser del 30% del volumen total del aceite.

⁶ Las moléculas lineales del éster resultante reciben el nombre de biodiesel y están formadas por el éster de ácido graso y el alcohol.

⁷ BX, donde "X" toma el valor de porcentaje. Ejemplo: B20, B50, B80, etc.

- ◆ Dióxido de Azufre (SO₂): la manifestación de este agente contaminante se descarta totalmente debido a que, el biodiesel no contiene azufre. Cabe mencionar que el Dióxido de Azufre es altamente nocivo para la salud del ser humano así como para la vegetación.
- ◆ Hidrocarburos⁸.
- ◆ Benceno: altamente cancerígeno. El biodiesel no contiene ningún porcentaje.

Se ha demostrado que el uso del biodiesel logra reducir hasta en un 48% la emisión de estos gases.

Además, posee otras características que lo hacen la mejor alternativa en energía renovable:

- ◆ Es compatible con la mayoría de los motores diesel.
- ◆ Condiciones de almacenamiento más seguras (punto de inflamación 100°C más elevado que el diesel).
- ◆ Producción a partir de una fuente renovable.

4.2.4. Desventajas del uso del biodiesel.

Aunque su utilización es compatible con la mayoría de los motores diesel, los inconvenientes de su uso son:

- ◆ Debido a que el biodiesel libera una menor cantidad de energía en la combustión (aproximadamente 10%), el consumo de carburante se ve incrementado y la potencia del vehículo reducida.
- ◆ La calidad del arranque en frío se degrada, puesto que la densidad y la viscosidad del biodiesel es mayor.
- ◆ La cantidad de óxidos de nitrógeno emitida es superior y por tanto se necesita un sistema de postratamiento especial para respetar las normas europeas de depollución.
- ◆ Actualmente, este combustible no es reconocido como una alternativa por los constructores y por tanto los motores no han sido optimizados para su uso.
- ◆ El costo de la producción del litro de biodiesel (0,5€⁹) es más elevado que del litro de diesel (0,2-0,25€), lo que constituye un handicap muy importante.

⁸ También llamados Hidrocarburos.

⁹ 1€ = 17.38 Pesos.

4.3. PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS DEL ACEITE.

Densidad: Es una constante que puede ser afectada por la edad, rancidez y cualquier tratamiento especial que se le haga al aceite. Esta es la medida que ocupa determinado peso de aceite que se expresa en g/mL.

Índice de refracción: el índice de refracción depende de la composición de la muestra. Generalmente se mide a 20, 25 o 40°C, tomando como referencia la línea D del sodio, realizando como mínimo dos mediciones. Se denota como n_D^t .

Humedad: se define como la relación de masa del agua presente en el aceite y la masa dada de material respecto a su peso anhidro.

Acidez: se entiende por índice de acidez, o valor ácido, los mg de KOH necesarios para saturar los ácidos grasos libres contenidos en un gramo de muestra.

Índice de saponificación: es el número de mg de KOH requeridos para saponificar 1 g de aceite.

Índice de Yodo: se define como el número de gramos de Yodo absorbidos por 100 g de aceite, permite caracterizar la muestra dando una base para saber si es pura o se encuentra mezclada e indica el grado de insaturación que tienen las cadenas de los ácidos grasos del aceite.

Índice de peróxidos: esta prueba es empleada para cuantificar la alteración del aceite causada por el enranciamiento, este valor se expresa en metilequivalentes de peróxido por kilogramo de muestra.

4.4. PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS DEL BIODIESEL.

Densidad: la densidad absoluta expresa la masa por unidad de volumen, da idea del contenido en energía del combustible. Se mide en g/cm³.

Índice de refracción: el índice de refracción depende de la composición de la muestra. Generalmente se mide a 20, 25 o 40°C, tomando como referencia la línea D del sodio, realizando como mínimo dos mediciones. Se denota como n_D^t .

Punto de inflamación: se define como la mínima temperatura a la cual los vapores originados en el calentamiento a una cierta cantidad de muestra de combustible se inflama cuando se ponen en contacto con una llama piloto.

Poder calorífico: es la cantidad de calor producida por la combustión completa de 1 kg de combustible.

Viscosidad cinemática: para medir este parámetro se puede utilizar un viscosímetro de Ostwald, es uno de los métodos más sencillos.

Contenido de agua: se define como la relación de masa del agua presente en el aceite y la masa dada de material respecto a su peso anhidro.

4.5. METANOL.

También conocido como *alcohol metílico* o *alcohol de madera*, es el alcohol más sencillo. A temperatura ambiente se presenta como un líquido ligero (de baja densidad), incoloro, inflamable y tóxico que se emplea como anticongelante, disolvente y combustible. Su fórmula química es CH₃OH.

4.5.1. Propiedades.

La estructura química del metanol es muy similar a la del agua, con la diferencia de que el ángulo del enlace C-O-H en el metanol (108.9°) es un poco mayor que en el agua (104.5°), porque el grupo metilo es mucho mayor que un átomo de hidrógeno.

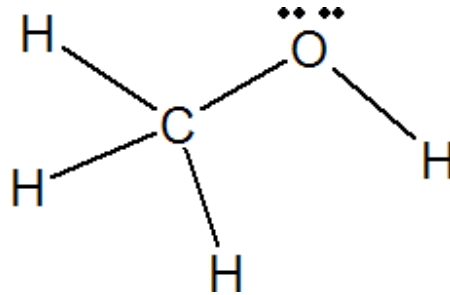


Figura 4. Estructura química del metanol.

En condiciones normales es un líquido incoloro, de escasa viscosidad y de olor y sabor frutal penetrante, miscible en agua y con la mayoría de los solventes orgánicos, muy tóxico e inflamable. El olor es detectable a partir de los 2 ppm.

Es considerado como un producto petroquímico básico, a partir del cual se obtienen varios productos secundarios.

Las propiedades físicas más relevantes del metanol, en condiciones normales de presión y temperatura, se listan en la siguiente tabla:

Peso Molecular	32 g/mol
Densidad	0.79 kg/l
Punto de fusión	-97 °C
Punto de ebullición	65 °C

De los puntos de ebullición y de fusión se deduce que el metanol es un líquido volátil a temperatura y presión atmosféricas. Esto es destacable ya que tiene un peso molecular similar al del etano (30 g/mol), y éste es un gas en condiciones normales.

La causa de la diferencia entre los puntos de ebullición entre los alcoholes y los hidrocarburos de similares pesos moleculares es que las moléculas de los primeros se atraen entre sí con mayor fuerza. En el caso del metanol estas fuerzas son de puente de hidrógeno, por lo tanto esta diferencia es más remarcada.

El metanol es considerado como un producto o material inflamable de primera categoría; ya que puede emitir vapores que mezclados en proporciones adecuadas con el aire, originan mezclas combustibles. El metanol es un combustible con un gran poder calorífico, que arde con llama incolora o transparente y cuyo punto de inflamación es de 12.2°C.

Para finalizar con las propiedades y características podemos decir que el metanol es un compuesto orgánico muy importante ya que el grupo hidroxilo se convierte con facilidad en cualquier otro grupo funcional. Así el metanol se oxida para obtener formaldehído (formol) y ácido fórmico; mientras que por su reducción obtenemos metano. Igualmente importantes son las reacciones de éter y esterificación.

4.5.2. El metanol en el biodiesel.

Para producir biodiesel, el alcohol es el que reacciona con el aceite, separando los ésteres del glicerol. El alcohol comúnmente más usado en la obtención de biodiesel es el metanol, aunque otros alcoholes, tales como etanol, isopropanol y butil pueden ser empleados. Un factor de calidad clave para elegir el alcohol es el contenido de agua. El agua interfiere con la reacción de transesterificación y puede resultar en una pobre conversión y altos niveles de jabón, ácidos grasos libres y triglicéridos en el combustible final. Desafortunadamente los alcoholes más puros son más costosos. Sin embargo, el

metanol, que no forma azeótropos¹⁰ con el agua, puede tener un precio bajo y cumplir con un bajo contenido de agua también.

El proceso de transesterificación para producir biodiesel, dependiendo del alcohol usado, se le puede nombrar de manera diferente. Haciendo uso de metanol se le conoce como *metanólisis*, en el caso del etanol, es conocido como *etanólisis*. De la misma forma el resultado de la reacción de transesterificación puede llamarse éster metílico, si metanol es usado, o bien éster etílico si se utiliza etanol.

La formación de éster etílico comparativamente es más difícil que la de éster metílico, especialmente la formación de una emulsión estable durante la etanólisis es un problema. El etanol y el metanol no se disuelven con los triglicéridos a temperatura ambiente y la mezcla debe ser agitada mecánicamente para que haya un mayor contacto entre las moléculas reaccionantes. Durante la reacción generalmente se forma una emulsión, en la metanólisis esta emulsión desciende rápidamente formándose una capa rica en glicerol, quedándose en la parte superior otra zona rica en éster metílico. En cambio en la etanólisis esta emulsión no es estable y complica mucho la separación y purificación de los ésteres etílicos. La emulsión está causada en parte por la formación de monoglicéridos y diglicéridos intermedios, que contienen tanto grupos hidróxidos polares como cadenas de hidrocarburos no polares.

La presencia del metanol en el biodiesel tiene una gran influencia sobre la calidad final, ya que disminuye su poder calorífico, punto de inflamación, aumenta los depósitos carbonosos, etc.

4.6. CATALIZADOR.

Un catalizador propiamente dicho es una sustancia que está presente en una reacción química en contacto físico con los reactivos, y acelera, induce o propicia dicha reacción sin actuar en la misma. Por ejemplo, los que reducen la velocidad de la reacción son denominados *catalizadores negativos o inhibidores*. A su vez, las sustancias que

¹⁰ Es una mezcla líquida de dos o más componentes que posee un único punto de ebullición constante y fijo, y que al pasar al estado vapor (gaseoso) se comporta como un compuesto puro, o sea como si fuese un solo componente.

aumentan la actividad de los catalizadores son denominados catalizadores *positivos o promotores*, y las que los desactivan son denominados *venenos catalíticos*.

Los catalizadores son empleados en la transesterificación para iniciar con la reacción y en aumentar la cinética de la reacción. Los catalizadores usados para la transesterificación de los triglicéridos se pueden clasificar en alcalinos, ácidos, enzimáticos o catalizadores heterogéneos, siendo los básicos homogéneos y en particular los hidróxidos los más utilizados.

Catalizadores homogéneos básicos, NaOH (también llamado soda cáustica) y KOH (también llamado potasa cáustica), son recomendados esencialmente para aceites vegetales sin usar, debido a que el contenido de agua y de ácidos grasos libres son generalmente bajo. Si el aceite presenta altos porcentajes de ácidos grasos libres, el uso de catalizadores básicos durante el proceso de transesterificación originaría la formación de jabón y agua.

La cantidad de soda cáustica necesaria para que se produzca la reacción de transesterificación, según reportes de experimentos realizados, es de 0.35% del volumen de aceite. Por su parte, la cantidad de KOH es de 0.9% del volumen de aceite.

4.7. PROCESO DE LAVADO CON AGUA.

Después de haber obtenido el biodiesel, viene la etapa de lavado. El lavado es muy importante porque define el nivel de calidad del biodiesel, el cual es regularizado por las normas nacionales e internacionales: ASTM, EN14214, IRAM.

4.7.1. Lavado con burbujas.

El lavado con burbujas consiste en añadir agua gentilmente al biodiesel (generalmente en proporciones de 1/3 de agua y 2/3 de biodiesel o 1/2 de cada uno). Diferentes proporciones requieren diferentes duraciones de lavado), agregar una piedra de aire de acuario y colocar una bomba de aire en la porción de agua (localizada bajo una capa flotante de biodiesel) que burbujee el aire a través del agua.

Las burbujas de aire recogen una diminuta cantidad de agua y la transportan a través del biodiesel, creando una agitación indirecta de los dos líquidos y recogiendo jabones y otros contaminantes en el camino. Cuando la burbuja explota en la superficie, deja caer el agua recogida, la cual absorbe más jabones y otros contaminantes a medida que se hunde. El tiempo de saturación dependerá de la cantidad de agua que se utilice, de cuántos lavados se han hecho y del sistema de burbujeo. Debes continuar lavando con burbujas hasta que el agua de lavado se mantenga transparente durante un lavado. También puedes ver el

pH de tu agua antes y después de un lavado. Si el pH del agua se queda igual antes y después del lavado, significa que no hay más contaminantes siendo extraídos, así que tu proceso de lavado está completo. El agua usada para lavar puede ser reutilizada para lavar lotes de biodiesel subsiguientes

Para los productores de biodiesel casero frecuentemente es problemático lavar con burbujas, ya que el biodiesel lentamente corroe la mayoría de los burbujeadores de acuario en unos pocos días. Para lidiar con este inconveniente, algunos de los productores artesanales utilizan burbujeadores de cerámica, madera o metal. Otros cuidadosamente se aseguran de añadir su agua primero y luego agregar su biodiesel para evitar el contacto entre el biodiesel y los burbujeadores. Para recobrar sus piedras de burbujeo, ellos atraviesan la capa de biodiesel con una bolsa de plástico, cubren las piedras y luego las sacan a través del biodiesel.

Una manera de aumentar la efectividad del lavado con burbujas es incrementar su agresividad. Cambiar de una bomba de acuario a un compresor de aire y de piedras de burbujeo a tubería de cobre con pequeñas perforaciones producirá un sistema más potente y al mismo tiempo evitará el problema de la corrosión de las piedras de burbujeo. Puedes utilizar este sistema solamente para los últimos lavados (cuando tu biodiesel puede aguantar un lavado de burbujas fuerte) o puedes encontrar un compresor de aire ajustable para que puedas incrementar su poder lentamente a medida que laves. Las pruebas de “sacudida” son una buena manera de determinar cuando tu biodiesel está listo para un lavado con burbujas más fuerte. Al final del último lavado el agua debe estar cristalina, con pH 7 aproximadamente.

Ventajas:

1. Efectividad. El lavado con burbujas es el método más limpio para lavar tu biodiesel. Comparado con otros métodos de lavado, la agitación constante y completa de las burbujas tiene una mayor habilidad de remover contaminantes. Por ende, frecuentemente el lavado final del biodiesel consiste en un lavado con burbujas.
2. Eficiencia. Sólo el lavado con agitación utiliza menos agua que el lavado con burbujas. La mayoría de las bombas de acuario usan menos de 5 watts de electricidad.
3. Costo: La instalación del sistema de lavado con burbujas es barata ya que solamente requiere una bomba de aire pequeña, tubería y un aparato que produzca burbujas. Aunque sea nuevo, todo el equipo puede ser comprado por menos de \$30 (E.E.U.U.).

4. Automatización: El lavado con burbujas puede automatizarse fácilmente o hacerse sin supervisión. Esto puede facilitarse aún más usando un cronómetro.

Desventajas.

1. Emulsiones. Si ha producido biodiesel de mala calidad o está lavando un lote muy pequeño, el lavado con burbujas puede agitar el agua y el biodiesel demasiado vigorosamente, causando la emulsión de ambos líquidos. La emulsión es uno de los más grandes problemas de lavado, pero también puede ser un indicador de la calidad de su proceso. Las reacciones incompletas aumentan drásticamente la probabilidad de crear una emulsión, así que si surge una emulsión, debe realizar pruebas para determinar la calidad de su biodiesel. Sin embargo, una emulsión no necesariamente significa que algo anda mal ya que el lavado vigoroso de biodiesel bien reaccionado también puede

El lavado con este método suele tardar entre 12 y 24 horas. Cuando está terminado, el agua se drena y se quitan los residuos que floten en la superficie. Se repite el lavado dos veces más. De la misma forma que en los otros métodos, se puede usar el agua del tercer lavado para el primer lavado del siguiente lote.

4.7.2. Lavado de atomización/rocío.

El lavado de atomización fue desarrollado como una manera de afrontar los problemas relacionados con las emulsiones. Este sistema utiliza más agua y un equipo más complicado. Use un atomizador (generalmente de una tienda de suministros para jardines) suspendido sobre un recipiente de biodiesel. Las minúsculas gotas de agua que rocía el atomizador caen y pasan lentamente por el biodiesel, agitando el combustible menos que el lavado con burbujas y removiendo los contaminantes gradualmente. Una agitación más gentil da menos lugar a que los jabones y los monos- y di-glicéridos formen una emulsión.

Ventajas.

1. Gentileza: El lavado de atomización es mucho más gentil que el lavado de burbujas, así que es más difícil que cause una emulsión. Por ende, el lavado de atomización es un excelente lavado inicial.

Desventajas y Soluciones.

1. Consumo de Agua: El lavado de atomización usa mucho más agua que el lavado con burbujas. Este problema puede ser resuelto parcialmente al reciclar el agua utilizando un lavado de contra corriente (descrito abajo) aunque esto depende en la calidad de los atomizadores. Otra solución es comenzar con un lavado de atomización y luego utilizar otra estrategia de lavado.
2. Automatización y equipo: El lavado de atomización es más difícil de automatizar que el lavado con burbujas—dejar abierto un atomizador por mucho tiempo hará que su biodiesel se desborde de su tanque. Para afrontar este problema, la comunidad del biodiesel toma el tiempo de los lavados de atomización para asegurarse de que no haya inundaciones o utiliza una tecnología automática de drenaje. A medida que el nivel del líquido en su tanque sube, un flotador abre una válvula localizada en la base del tanque y drena una parte del agua. A medida que el flotador baja de nuevo, la válvula se cierra y su lavado de atomización continúa. Todo esto refuerza el hecho de que el lavado de atomización generalmente requiere más equipo y complicaciones que el lavado con burbujas. También requiere una fuente de agua (tal como una manguera) que proporcione una presión constante. Una posible solución sería usar un balde o una bolsa con una boquilla atomizadora adherida a la base. La gravedad crearía la presión necesaria para que una cantidad determinada de agua escape, eliminando la necesidad de un sistema para control de derrames y para una presión de agua constante.
3. Saturación: Frecuentemente nos hemos dado cuenta de que el rocío extremadamente fino satura nuestro biodiesel y por consiguiente toma bastante tiempo para que las gotitas pasen a través del biodiesel. Esto representa un problema si intenta secar su biodiesel después de un lavado de atomización. Para el lavado inicial, calentar el biodiesel o utilizar agua caliente ayuda mucho. Para los demás lavados, una buena solución es combinar cada lavado de atomización con un lavado de burbujas. Las burbujas proveerán suficiente agitación para mover el rocío a través del biodiesel.
4. Lavados incompletos: Ninguno de los lavados mencionados puede compararse con un lavado de burbujas final. El lavado de atomización no es lo suficientemente violento para remover los últimos residuos de contaminantes. Es recomendable finalizar con un lavado con burbujas.

4.7.3. Lavado estático.

El lavado estático es la forma de lavado más gentil, no requiere equipo y necesita muy poco trabajo. Consiste en verter agua (preferiblemente caliente) en un tanque de biodiesel y dejar que los líquidos reposen juntos. El contacto entre la capa de agua en la

base y la capa de biodiesel arriba crea un efecto de limpieza lento y gentil debido a la polaridad del agua y a las gentiles corrientes de convección creadas a medida que la temperatura se equilibra. Por ello, el lavado estático es un lavado inicial excelente.

El tiempo que tomará para que el agua se sature depende principalmente de su temperatura, la cantidad de agua y el tipo de tanque de lavado que se utilice (el área de la superficie de contacto entre el agua y el biodiesel). Nosotros utilizamos agua a 35C, 20 galones de agua por cada 30 galones de biodiesel y un tonel de acero como nuestro tanque de lavado. Nuestros lavados estáticos necesitaron cerca de 8 horas para alcanzar el grado de saturación. Ya que no tiene agitación, el lavado estático es más que todo útil solamente como un lavado primario o secundario y como una manera de encargarse de las emulsiones. El lavado estático puede lavar totalmente un lote de biodiesel, pero esto quizás tomaría varias semanas por cada lote.

4.7.4. Lavado de agitación.

El lavado de agitación consiste en mezclar el biodiesel y el agua y agitar (normalmente al transportar el biodiesel y el agua a través de una bomba u otro aparato para mezclar). Los tiempos de lavado son de 5 a 30 minutos.

Encontramos que una agitación por 30 minutos funciona mucho mejor que un lavado de agitación por 5-10 minutos; sin embargo, esto estaba basado en un sistema de mezcla que usaba una bomba en un clima helado. El tiempo de agitación necesario variará dependiendo del clima y la estrategia de mezclar. Además, entre más violenta y más larga es tu agitación, es más probable que 60 cause una emulsión. La mayoría de las personas dejan que el agua y el biodiesel se separen durante 10-20 minutos antes de drenar el agua y continuar con su siguiente lavado.

En el primer lavado es mejor añadir un poco de vinagre (ácido acético) al agua. Con el ácido acético se consigue que el pH del biodiesel sea casi neutro, porque se une a los restos de lejía y los neutraliza.

La agitación puede ser el método de lavado más rápido, pero tiene algunos peligros. Primero, el lavado es fuerte y tiene la más alta probabilidad de producir una emulsión. Las personas que generalmente usan lavado de agitación tienen un biodiesel muy bien reaccionado y con un bajo contenido de jabones. Ya que el calor hace que el lavado sea más fácil, ellos también tienden a mantener su biodiesel y su agua de lavado a una alta temperatura (hasta 40C). En segundo lugar, como todos los otros tipos de lavado, el lavado de agitación nos ha demostrado poder eliminar tantos jabones como el lavado final con burbujas. Por esta razón, el lavado de agitación generalmente es seguido por un

lavado de burbujas. Se ha experimentado realizar un lavado de agitación con un agitador manual. Para fabricar el agitador, se deslizo un pedazo de madera a través del mango de un cajón de leche y atornillamos una barra (nuestro agarradero) al centro de ese pedazo de madera.

4.8. ASPEN PLUS USER INTERFACE.

Aspen Plus es una herramienta de modelado de procesos líder en el mercado para el diseño conceptual, optimización y supervisión del rendimiento para la industria química, polímeros, productos químicos de especialidad, los metales y minerales, y las industrias de carbón. Aspen Plus es un elemento central de AspenONE AspenTech® aplicaciones de ingeniería.

Características

- *En su clase, las propiedades físicas, métodos y mejores datos.* Aspen Plus incluye la mayor base de datos del mundo de los componentes puros y el equilibrio datos de la fase de los productos químicos convencionales, electrolitos sólidos, y los polímeros. Datos que se actualizan de los EE.UU. Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) asegura el acceso fácil a los datos de las propiedades mejor experimentales disponibles, permitiendo a los ingenieros de procesos para ahorrar meses de esfuerzo en el desarrollo de modelos de procesos químicos. AspenTech y NIST han obtenido el prestigio de I + D 100 Award por la innovación en software de reconocimiento de la importancia y el impacto de nuestra colaboración para el procesamiento de las industrias químicas.
- *Aspen Mobile Properties* proporciona acceso a rigurosos cálculos de las propiedades físicas y datos cuando y donde usted lo necesita - en un sitio del cliente, en una sala de conferencias, desde el hogar, en el camino - en cualquier lugar que puede tener acceso remoto a su red corporativa.
- *Conceptual de flujo de trabajo de diseño mejorado.* Aspen Plus ha sido integrado estrechamente con líderes de la industria de AspenTech software de análisis de costes y del intercambiador de calor de diseño de software. Los ingenieros de proceso rápidamente puede estimar los costos relativos de los diseños propuestos y tomar decisiones basadas en los costos operativos y de capital estimados usando tecnología probada modelo de costes. equipos clave, como intercambiadores de calor y las columnas de destilación puede ser rigurosamente tamaño o nominal en el entorno de simulación. La estrecha integración de software de diseño y cálculo de costos con la simulación de procesos elimina costosas iteraciones manual y promueve diseños más óptima basada en las estimaciones de costos rigurosos.
- *Para los grandes complejos procesos.* y escalabilidad Plus única Aspen ecuación Orientada (EO) jerárquica y el flujo de láminas de la capacidad de modelado

permite simular incluso los de gran escala y la mayoría de procesos complejos, e incluso los procesos altamente integrados con múltiples reciclo. Los clientes pueden construir modelos que abarcan sitios enteros para encontrar las condiciones óptimas de operación a nivel mundial.

- *Estado de la columna de arte internos cálculos de caída de presión y las inundaciones.* Aspen Plus incluye una biblioteca de más de 300 envases, 5 tipos diferentes, con bandeja de parámetros de ajuste para el cálculo de la bandeja internos.
- Aspen Plus proporciona a los usuarios basados en la tecnología de destilación de cambio, que permite a los cálculos de la destilación, mientras que la contabilidad de la transferencia de masa rigurosa en bandejas o envases. Esta tecnología se ha utilizado para la captura de carbono modelo basado en aminas y otras separaciones.
- *emisiones de gases de efecto invernadero equivalentes informe de carbonos generados en el proceso o por el consumo de servicios públicos proceso.* Impuesto sobre el carbono anuales también se puede calcular.
- Aspen Plus también permite a los usuarios a la destilación por lotes del modelo de manera rigurosa.
- Además, Aspen Plus también permite a los usuarios para identificar azeótropes y las curvas de residuo que puede ayudar a los usuarios a diseñar y sintetizar las columnas de destilación no ideal.
- Aspen Plus también proporciona a los usuarios un conjunto completo de la termodinámica de polímeros métodos y datos, los modelos de polimerización basados en el tipo de reacción, y una biblioteca de modelos de procesos industriales.

5. Metodología.

La importancia de manejar un método es fundamental para lograr cualquier objetivo.

Para la realización de este proyecto se llevaron a cabo una serie de pasos lógicos para alcanzar los objetivos. A continuación se referirá a cada uno de los puntos:

5.1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Dentro de esta sección se obtuvo toda la información posible relacionada con el título de nuestro proyecto, es decir, se estudiaron conceptos importantes como: biodiesel, transesterificación, catálisis, procesos de lavado con agua, simuladores (Aspen Plus User Interface). También se leyeron artículos, revistas, libros, reportes, sitios web en la web,

etcétera. Además, se consultaron a ingenieros, maestros y doctores especializados en la materia de estudio.

5.2. SIMULACIÓN.

Un simulador es una herramienta muy importante para poder predecir resultados. Con él es posible diseñar el modelo de un sistema real basado en relaciones matemáticas y lógicas, además, se pueden realizar experimentos a prueba y error con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias.

Existen varios simuladores especializados en procesos químicos e industriales pero para poder cumplir con nuestro propósito de simular el proceso de lavado con agua de biodiesel se empleo el simulador Aspen Plus User Interface.

Como primer paso se diseñó el proceso de transesterificación, es decir, se convirtió el aceite en biodiesel. En la figura de abajo podemos observar en una de las entradas el aceite (OIL-01). En las otras dos entradas, tenemos el metanol (MEOH-01) y el catalizador¹¹ (NAOH) que son enviados a un mezclador (M101). Los tres componentes llegan hasta el reactor (R-101), donde se lleva a cabo la reacción química de transesterificación ($3 \text{ Alcohol} + 1 \text{ Triglicérido} = 3 \text{ Éster} + 1 \text{ Glicerol}$). Después, mediante un separador (S101) se logra recuperar la mayor parte del metanol y por medio de un retroceso (MEOH-2) se puede volver a utilizar. Por otra parte, el biodiesel y el glicerol (BIO-GLI) son enviados a un tanque de lavado (B3) para que posteriormente sean separados. En la salida marcada con la etiqueta BIO obtendremos el biodiesel y en la que está marcada con la etiqueta DIRTYW obtendremos los remanentes (agua sucia).

¹¹ Hidróxido de Sodio (NaOH).

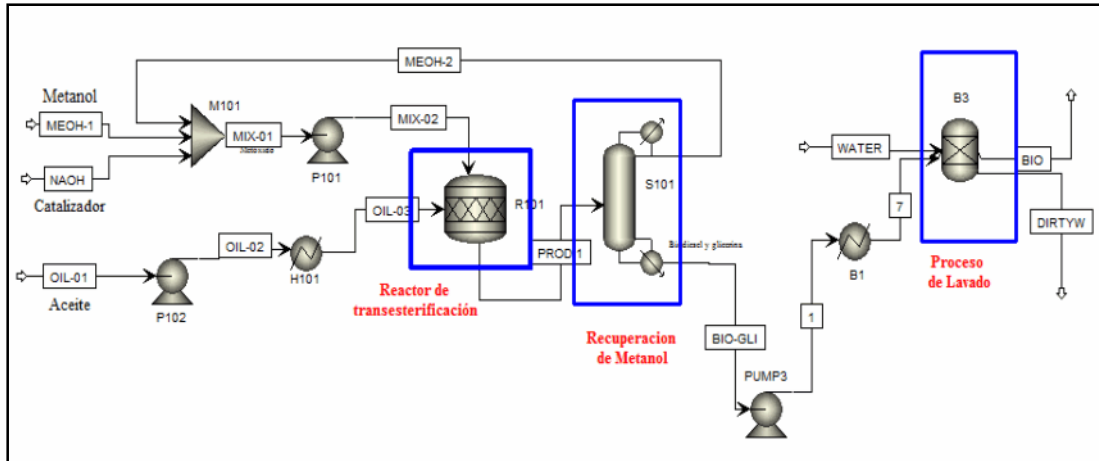


Figura 5. Diagrama del proceso para producir biodiesel simulado en Aspen Plus.

Una vez terminado el diseño se procedió a correr la simulación (Figura).

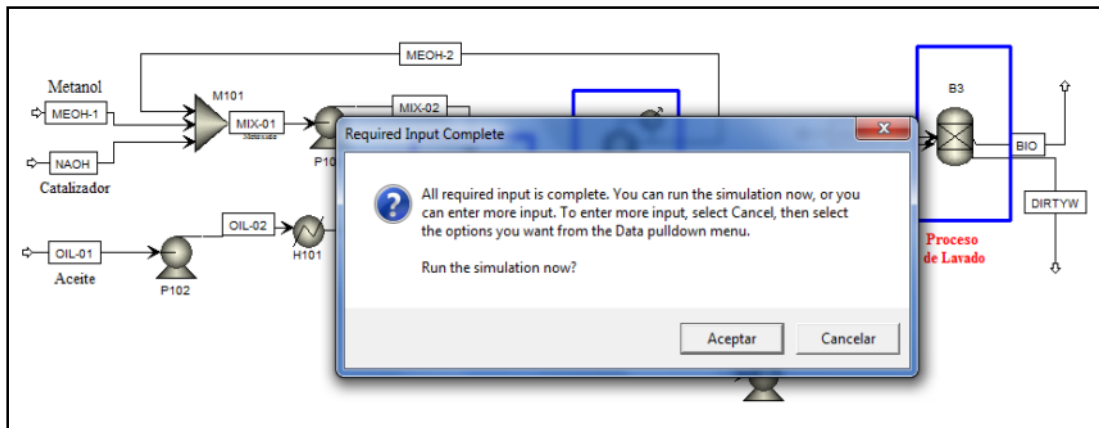


Figura 6. El simulador está listo para correr la simulación.

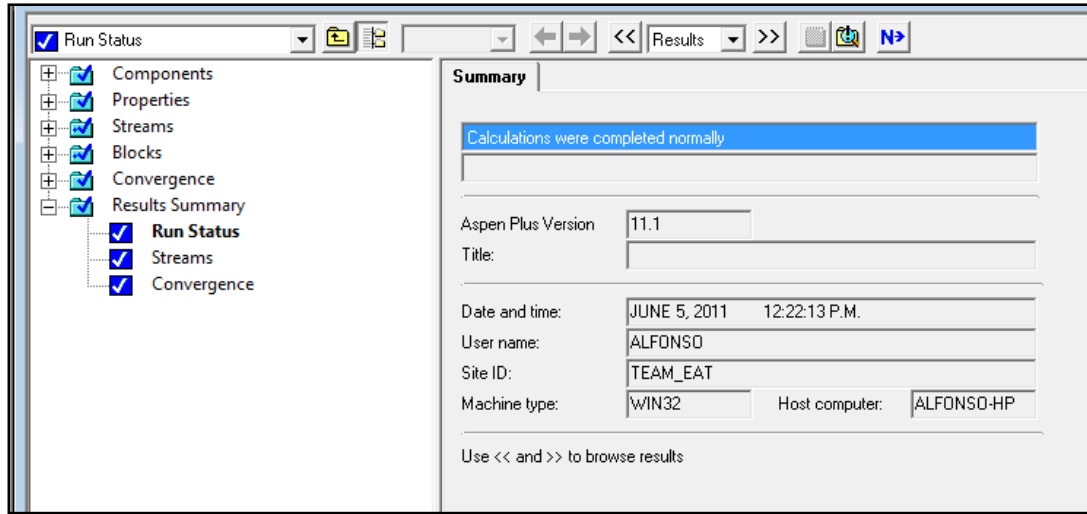


Figura 7. La simulación fue exitosa.

	PROD-1	BIO-GLI	BIO	DIRTYW	
Mass Flow kg/hr					
TRIOLEIN	225.0000	225.0000	225.0000	0.0	
MEOH	464.2858	153.0958	153.0958	0.0	
OLEATE	4294.466	4294.466	4294.466	0.0	
GLYCEROL	444.6387	444.6387	0.0	444.6387	
NAOH	50.00000	50.00000	0.0	50.00000	
H2O	0.0	0.0	0.0	18.01528	
H3PO4	0.0	0.0	0.0	0.0	

Tabla 1. Tabla de resultados de la simulación en unidades de flujo de masa (kg/hr).

Total Flow kmol/hr	35.30587	25.59398	19.51623	7.077746
Total Flow kg/hr	5478.390	5167.200	4672.561	512.6539
Total Flow l/min	112.6998	116.6621	93.94308	7.763643
Temperature K	333.1500	430.7796	302.8844	303.1500
Pressure atm	3.947693	3.947693	1.001727	10.01727

Tabla 2. Tabla de resultados totales de la simulación.

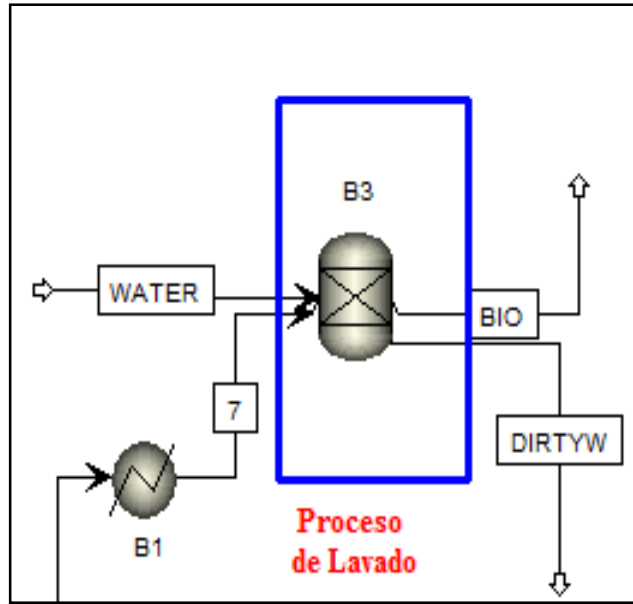


Figura 8. Etapa de lavado. Se muestran las salidas BIO y DIRTYW de salida.

Para el proceso de lavado se realizaron varias pruebas. A continuación se muestra las tablas de resultados.

Si tenemos que para un flujo de entrada de aceite de 1000 kg/hr obtenemos 954.325683 kg/hr. Entonces el porcentaje de conversión de aceite a biodiesel es:

1000 kg/hr ----- 100%

954.325683 kg/hr ----- x = 95.43%

También podemos calcular el porcentaje de salida del metanol:

130 kg/hr -----100%

26.8657263 kg/hr ----- x = 20.66%

	Entrada	Salida
	Flujo de masa (kg/hr)	Flujo de masa (kg/hr)
Aceite	1000	
Metanol	130	26.8657263
Catalizador	11.1	11.1
Biodiesel		954.325683
Glicerol		98.8085911

Tabla 3. Resultados de la primera simulación en unidades de flujo de masa (kg/hr).

Para la segunda tabla podemos realizar el mismo procedimiento:

Para el biodiesel:

3000 kg/hr ----- 100%

2862.97705 kg/hr ----- x = 95.43%

Para el metanol:

390 kg/hr ----- 100%

80.5971782 kg/hr ----- x = 20.66%

	Entrada	Salida
	Flujo de masa (kg/hr)	Flujo de masa (kg/hr)
Aceite	3000	
Metanol	390	80.5971782
Catalizador	33.3	33.3000001
Biodiesel		2862.97705
Glicerol		296.425774

Tabla 4. Resultados de la segunda simulación en unidades de flujo de masa (kg/hr).

Para la tercera tabla:

En la parte del biodiesel.

4500 kg/hr ----- 100%

4294.46558 kg/hr ----- x = 95.43

Para el metanol.

617.2 kg/hr ----- 100%

153.095768 kg/hr ----- x = 24.80

	Entrada	Salida
	Masa (kg/hr)	Flujo de masa (kg/hr)
Aceite	4500	
Metanol	617.2	153.095768
Catalizador	50	50.0000001
Biodiesel		4294.46558
Glicerol		444.638661

Tabla 5. Resultados de la tercera simulación en flujo de masa (kg/hr).

Con base en los resultados podemos afirmar que el aceite tiene un porcentaje total de conversión de 95.43% y para el metanol de 22.04%.

5.3. PROCESO DE LAVADO EXPERIMENTAL.

Para esta etapa, contamos con la ayuda y asesoría del Ingeniero Biólogo José Daniel Martínez. Él estuvo encargado de asesorarnos para realizar las reacciones químicas a nivel laboratorio (ubicado en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez).

Llevamos a cabo un proceso de titulación¹² y transesterificación para un litro de aceite hasta quedar listo para ser lavado.

Se estudiaron los métodos de lavado existentes y con base a sus ventajas y desventajas se eligió el lavado de agitación, el cual consiste básicamente en:

- ◆ Mezclar el agua (1/3 del volumen del biodiesel) y el biodiesel por 5 min hasta lograr una mezcla homogénea.
- ◆ Dejar reposar por 1 hora.
- ◆ Se retira el combustible y se repiten los pasos 1 y 2 un par de veces más.
- ◆ Se deja secar el combustible. Elevar la temperatura a 48°C puede ayudar a evaporar el agua y acelerar el proceso.

Debido a que la prueba fue hecha con una cantidad muy pequeña de aceite (300 ml), se decidió realizar el lavado a nivel laboratorio, empleando embudos de separación. Los pasos a seguir fueron los siguientes:

Paso 1. Antes de lavarlo, es importante asegurarse de que la reacción fue completada, para evitar la formación de emulsiones.

En un embudo de separación se colocaron 300 ml de biodiesel impuro y 200 ml de agua destilada, se agitó magnéticamente durante 30 minutos.

Paso 2. Pasados los 30 minutos, se colocó la mezcla en un embudo de separación y se dejó reposar durante un día.

Paso 3. Después de transcurrir las 24 horas, se puede ver que la fase acuosa contiene una gran cantidad de impurezas.

Paso 4. Se repite el mismo procedimiento 3 ó 4 veces más hasta obtener un agua de lavado incolora.

Al final, en el ANEXO 2, se pueden observar imágenes del proceso experimental.

¹² Es un proceso para eliminar los residuos y agua cuando el aceite ya fue utilizado para cocinar.



Figura 9. Lavado del biodiesel. El vaso de precipitación de la derecha es una mezcla de biodiesel impuro y agua. El embudo de separación de la izquierda es un lote de biodiesel separándose del agua.

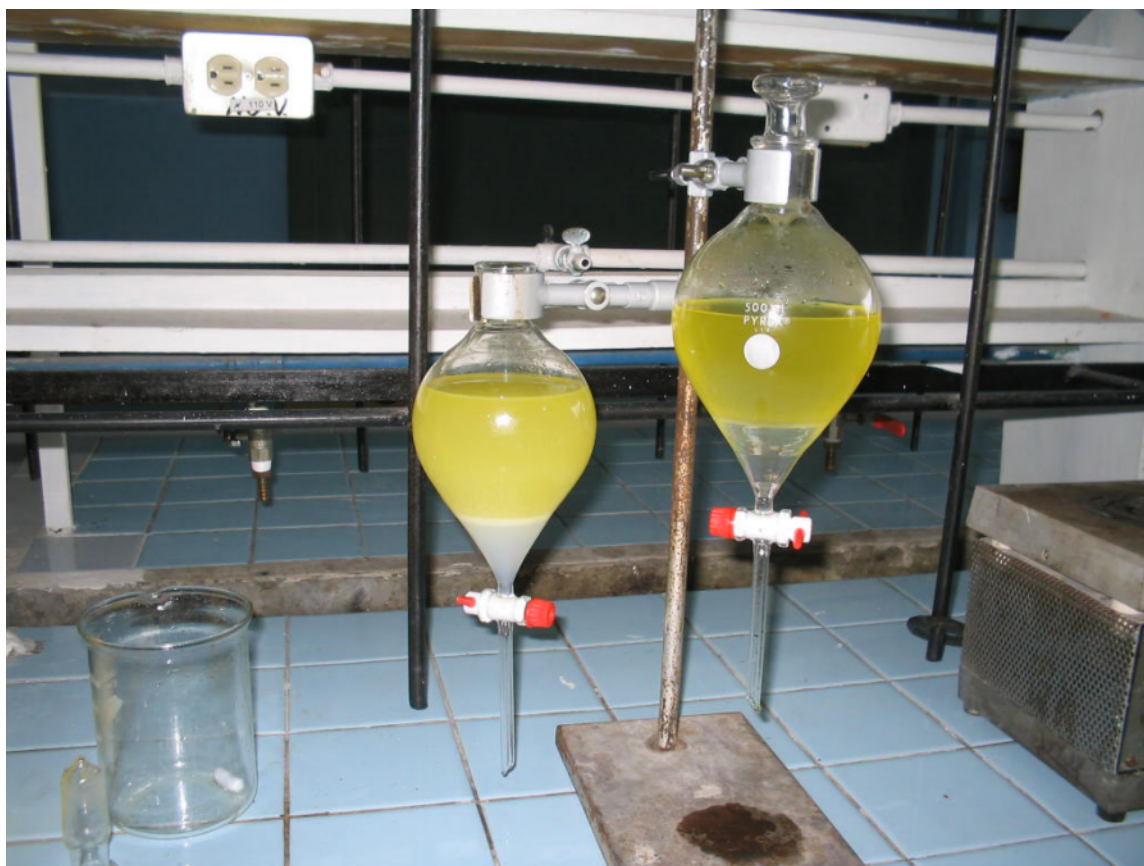


Figura 10. El embudo de separación que se encuentra al lado derecho tiene 3 lavados mientras el embudo de separación que se encuentra al lado izquierdo posee solo 2, de esta manera gráfica se puede observar cómo influyen los lavados en la muestra.



Figura 11. Biodiesel luego del tercer lavado, nótese que el agua de lavado se encuentra incolora.

La norma UNIT establece cantidades mínimas y máximas para los remanentes que debe contener el biodiesel después del lavado.

Propiedades	Límites	Mínimo	Máximo
Contenido de ésteres	96.5%	X	
Contenido de monoglicéridos	0.80%		X
Contenido de diglicéridos	0.20%		X
Contenido de triglicéridos	0.20%		X
Glicerol total	0.25%		X
Contenido de alcohol	0.20%		
Punto de inflamación	100°C	X	
Glicerol libre	0.02%		X
Contenido de agua y sedimentos	0.05%		X
Contenido de agua (Karl Fisher)	500mg/kg		X

Tabla 6. Tabla que indica el porcentaje de contenido de algunas propiedades en el biodiesel después del lavado, según la Norma UNIT 1100.

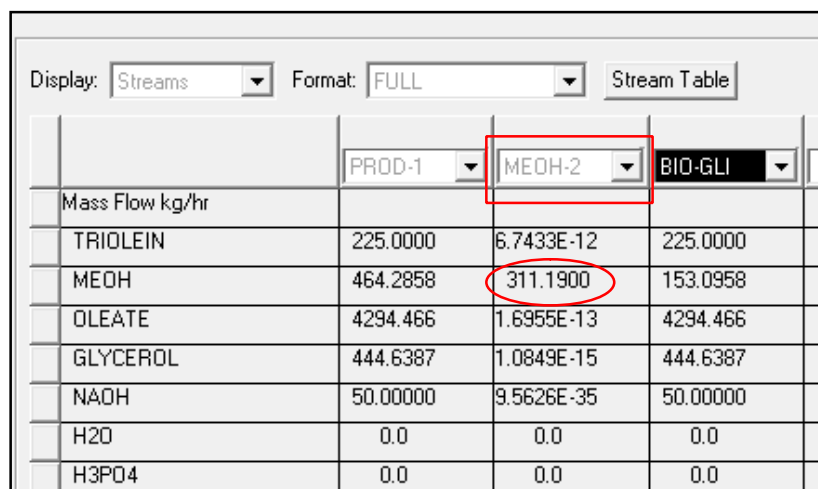
Para finalizar, se procedió a realizar pruebas fisicoquímicas para comprobar que la limpieza fue exitosa, es decir, que el metanol y el catalizador fueron retirados.

6. Resultados.

En la parte de la simulación, los resultados indican que el metanol es el reactivo más fácil de retirarlo del biodiesel, debido a su bajo punto de ebullición (64°C). Podemos observar en la tabla () que la etiqueta MEOH-2 es donde se mide el metanol recuperado y realizando una regla de tres podemos obtener el porcentaje.

617.2 kg/hr ----- 100%
311.1900 kg/hr ----- x = **50.41%**

Tenemos que el flujo de entrada fue de 617.2 kg/hr y la cantidad que se recupera es de 311.1900 kg/hr. Por lo tanto, el porcentaje de recuperación es de 50.41%. Además, puede ser reutilizado.



	PROD-1	MEOH-2	BIO-GLI
Mass Flow kg/hr			
TRIOLEIN	225.0000	6.7433E-12	225.0000
MEOH	464.2858	311.1900	153.0958
OLEATE	4294.466	1.6955E-13	4294.466
GLYCEROL	444.6387	1.0849E-15	444.6387
NaOH	50.00000	9.5626E-35	50.00000
H2O	0.0	0.0	0.0
H3PO4	0.0	0.0	0.0

Tabla 7. Aquí se muestra la cantidad de metanol recuperado.

También podemos observar en la figura de arriba que existe la presencia de metanol (153.0958kg/hr) aún mezclado con el biodiesel. Este se puede retirar elevando la temperatura por arriba de 65°C (punto de ebullición del metanol).

Uno de los objetivos del proyecto era poder medir la presencia de metanol y catalizador en el biodiesel pero, debido a que las concentraciones de estas sustancias son a niveles muy pequeños, no es posible medirlo con algún dispositivo electrónico. Solamente realizando pruebas fisicoquímicas en un laboratorio.

Como se menciona al inicio, el catalizador es una sustancia que acelera el proceso de reacción sin modificar las propiedades químicas de la reacción principal. Por lo tanto, su

extracción no es de mucha importancia, ya que no modifica en nada las características del combustible obtenido.

6.1. PRUEBAS FÍSICO-QUÍMICAS PARA EL ACEITE RESIDUAL (ANTES DEL LAVADO CON AGUA).

Se realizaron las pruebas físico-químicas para el aceite residual y en la tabla se muestran los resultados.

Densidad	0.9146 g/ml
Índice de refracción	1.4670 n_D^{25}
Humedad	1.260%
Acidez	2.59% ácido oléico
Índice de saponificación	199.5 mg KOH/g aceite
Índice de Yodo	109.39 g I/100 g aceite
Índice de peróxidos	11.4668 meq O ₂ /kg aceite

Tabla 8. Resultados de las pruebas físico-químicas realizadas al aceite residual.

6.2. PRUEBAS FÍSICO-QUÍMICAS PARA EL BIODIESEL (DESPUÉS DEL LAVADO CON AGUA).

Se realizaron las pruebas físico-químicas para el biodiesel una vez finalizado el lavado y en la tabla se muestran los resultados.

Densidad	0.8759 g/ml
Índice de refracción	1.4490 n_D^{25}
Punto de inflamación	170°C
Poder calorífico	46911.77 KJ/kg
Viscosidad cinemática	3.91426 mm ² /s
Humedad	0.27%

Tabla 9. Resultados de las pruebas físico-químicas realizadas al biodiesel después del lavado.

6.3. VARIABLES.

Basados en el experimento, se lograron identificar las siguientes variables:

Humedad. El agua es la variable más importante involucrada en el proceso de lavado porque es la que se encarga de limpiar el biodiesel. Se deben realizar de 3 a 4 lavados

(según se requiera). Después del último lavado, el agua asentada debe ser incolora a simple vista y el pH debe ser de 7.

Temperatura. Cuanto más frío hace, menos efectivo es el lavado, porque tarda más y necesita más agua. La temperatura mínima con la que se debe efectuar el lavado es de 40 - 45°C. Es muy importante no salirse de ese rango porque se podría dar lugar a complicaciones durante el lavado.

Emulsiones (saponificación). Si hay un exceso de agua durante el lavado la presencia de ácidos grasos libres podría reaccionar con los iones de Na⁺ del NaOH en presencia de agua y formar jabones.

Acidez (pH). Para el primer lavado es conveniente agregar vinagre (ácido acético) al agua. Con esto se consigue que el pH del biodiesel sea casi neutro, porque se une a los restos de lejía y los neutraliza. El pH del biodiesel final debe de ser de 7.

7. Alcances.

Se construyó un prototipo basado en microcontroladores (Atmega 328P, Arduino) para controlar la temperatura del agua durante el proceso de lavado y que se implementará en la segunda fase del proyecto que consistirá en diseñar un prototipo para el proceso de lavado.

El diagrama es el siguiente:

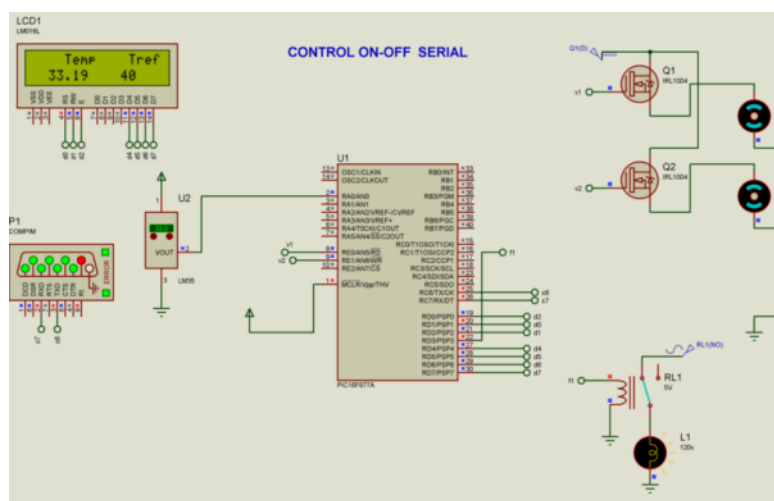


Figura 12. Diagrama de un control de temperatura ON-OFF serial.

El funcionamiento del circuito es el siguiente.

El circuito recibe alimentación de la fuente a través de las culcas con una tensión de 12 v, que luego el regulador de tensión L7805 repartirá entre los diferentes componentes. En caso de que la alimentación sea correcta se encenderá un LED verde puesto para tal efecto.

El sensor LM35, capta la temperatura, esta información pasa al atmega328, el obtiene la información captada por el sensor. Por otro lado, el cristal con sus dos condensadores de desacoplo, le indica al PIC que la frecuencia a la que habrá que trabajar será de 16 Mhz, lo cual nos condicionará incluso el programa.

Ahora llegamos a la zona importante del circuito, el Micro controlador y la parte del puerto serial-usb que es el que controla, mediante el programa, todas las funciones que le hayamos introducido al programa.

Para comenzar debemos estudiar el PIC y según nuestro diseño distinguir entre entradas y salidas. Por supuesto, hay que saber las diferentes zonas del mismo según la numeración de sus puertos. Por ello, lo primero que haremos será activar un pin en concreto el A0 que corresponden a una de las entradas analógicas del micro.

Por su parte, el display nos marcará en todo momento la temperatura a la que nos encontramos, leyendo la información obtenida directamente del micro y la temperatura enviada a través del puerto serie-usb captada y ajustada según el diseño del programa basado en visual-basic 2010.

Hay dos circuitos diferentes, el de apagado y encendido de una resistencia. Al llegar a una de las temperaturas activamos uno de los dos circuitos pero siempre y cuando nosotros modifiquemos el rango a controlar.

- Si la temperatura es baja, accionamos el circuito de calentamiento y se activará un LED rojo (simulando calor) y el relé conectado a esta parte del circuito dará corriente permitiendo la activación de la resistencia.
- Si la temperatura es alta, activamos el circuito de refrigeración, el cual activará un LED verde y el relé conectado a esta parte del circuito dará corriente permitiendo la conexión de un ventilador (apagamos la resistencia)

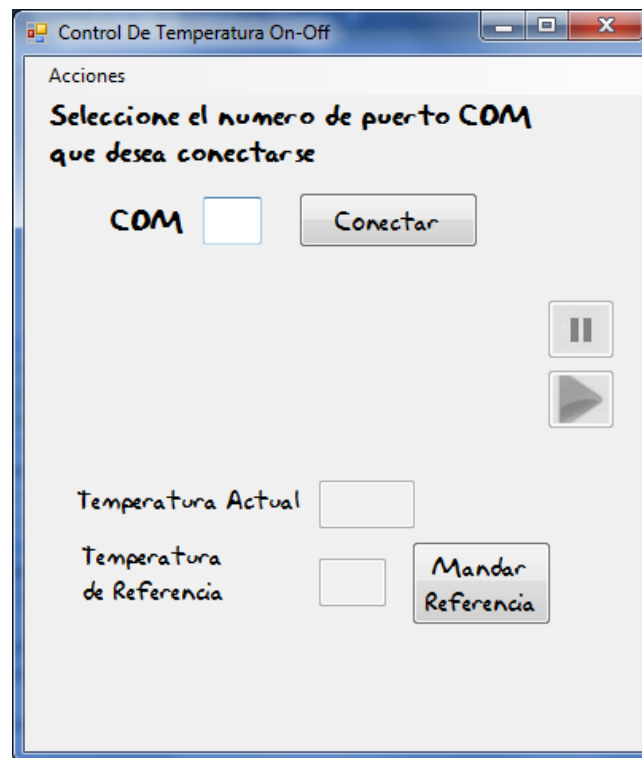
El programa ya fue otro mundo, fue cambiar de lenguajes, pues se programo en una base datos llamadas MySQL, Microsoft visual 2010 y lenguaje en arduino y olvidarse del circuito como algo físico y pensar en ella como "un aparato que hace algo".

Bueno, con ayuda de los manuales de la asignatura empezamos a entender lo que había que hacer, a separar las entradas de las salidas en el micro, a insertar bucles en el código.

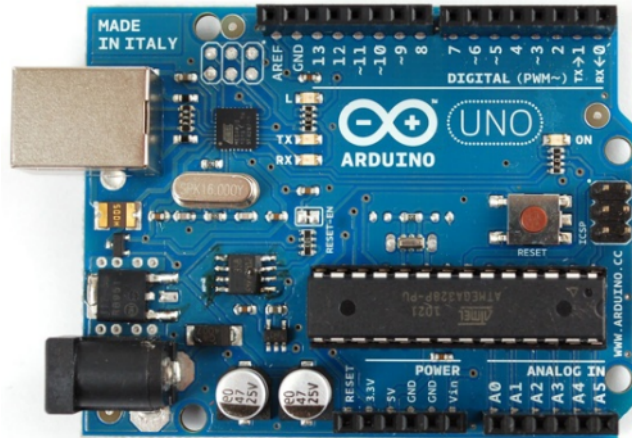
Así nuestro programa empezaba a hacer algo ya. Luego solo era cuestión de ir optimizando el código para conseguir lo que queríamos.

El código fuente de la programación se puede observar al final en el ANEXO 2.

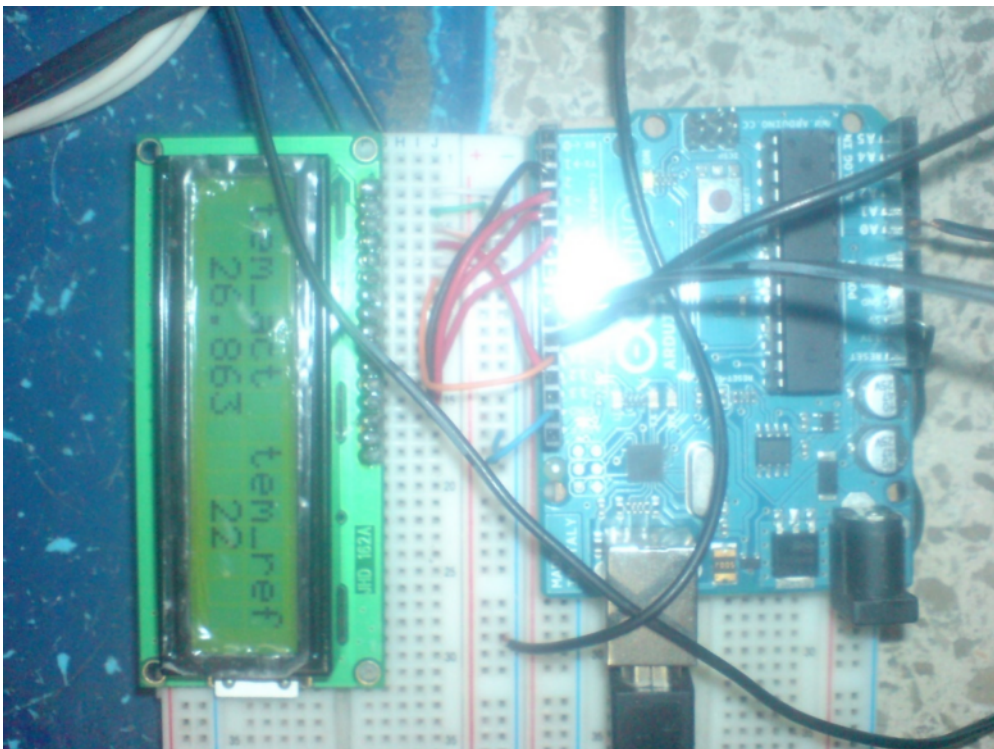
En el apartado COM nosotros indicamos el numero de puerto en que se conecta el puerto serial usb, en este caso es el COM 8. Una ves realizado esto le damos clic en conectar, automáticamente aparecerá una pantalla indicando el mensaje “la conexión fue correcta”, y nos mostrara los valores reales que se muestran en el circuito con arduino.



Presentamos la placa arduino uno que contiene el microcontrolador Atmega328, el cual realizamos las conexiones necesarias.



Circuito que muestra la temperatura actual y la temperatura de referencia mediante el LCD



8. Conclusiones.

Se realizaron pruebas simuladas y experimentales para el proceso de lavado con agua del biodiesel. Los resultados obtenidos fueron comprobados mediante pruebas físico-químicas; densidad, índice de refracción, viscosidad cinemática, punto de inflamación, poder calorífico, contenido de agua, índice de yodo, para saber que el biodiesel cumplía con las normas de calidad.

La presencia del metanol se puede retirar elevando la temperatura por arriba de los 64°C (punto de ebullición). El catalizador es un elemento que no altera en nada las propiedades del biodiesel, por lo tanto, su remoción no es de gran importancia.

Con base a todo lo anterior podemos concluir que el análisis del comportamiento de las variables durante el proceso de lavado del biodiesel nos lleva a 4 aspectos importantes: humedad, temperatura, emulsiones y acidez.

La humedad es la variable más importante debido a que el agua es la que se encargará de todo el proceso de limpieza. La temperatura a la cual se debe realizar el lavado es en el rango de 40 a 45 °C. Controlando la humedad y el agua se pueden evitar las complicaciones, de lo contrario, se daría paso a la formación de emulsiones. La acidez del agua después del último lavado y del biodiesel final debe ser de 7.

Bibliografía.

- Whitman Direct Action, “Biodiesel: Producción y Aplicaciones”, pp 55-77.
- Journeytoforever.org. “Lavado del Biodiesel.
- Ferrer S., Albert, “Estudio Técnico – Económico de una Planta de Obtención de Biodiesel y de su Impacto Medioambiental”, p 107, archivo pdf.
- Torres del Carmen, Felipe de J., “Diseño, Construcción y Pruebas de un Prototipo para la Producción de Biodiesel a Partir de Aceites Provenientes de Recursos renovables”
- O. Probst, “El biodiesel como alternativa limpia y renovable para el transporte,” Energía, No. 56, Instituto Tecnológico de Monterrey.
- R. J. Larosa, “Proceso Para la Producción de Biodiesel,” (Mayo, 2006) [En línea]. Disponible: <http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biod-rev2.pdf>.
- L.C. Meher, D. Vidya Sagar and S.N. Naik, “Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification—A review,” Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India. September 2004.
- N. Kondamudi, J. Strull, M. Misra and S. K. Mohapatra, “A Green Process for Producing Biodiesel from Feather Meal”, Journal of Agricultural and Food Chemistry Article.
- R. Urbano, J. Ríos, “Aprovechamiento del Aceite Vegetal Usado para la Obtención de Biocombustible (Biodiesel) como Fuente de Energía en una Empresa de Frituras”.
- W. Calero Cáceres, E. Chicaiza, W. Chicaiza, D. Vizuite, “Síntesis y Refinación de Biodiesel y Glicerina Obtenidos a partir de Grasa Vegetal”, Escuela de Bioquímica y Farmacia Química de Alimentos de la Universidad de Ecuador

Anexos.

ANEXO 1. Tabla de fracciones másicas, obtenida por la planta de producción de biodiesel ubicada en la provincia de Girona, Catalunya en España a través del proceso IDAE-UCM.

FRACCIONES MÁSICAS								
Corriente	Aceite	Metanol	Éster	Glicerol	Aigua	NaOH	AGL10	Jabón
101	953,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,040	0,000
102	953,000	0,000	0,000	0,000	0,070	0,000	0,040	0,000
103	953,000	0,000	0,000	0,000	0,070	0,000	0,040	0,000
104	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
105	0,000	0,995	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000
106	0,000	0,995	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000
201	0,928	0,026	0,000	0,000	0,007	0,000	0,039	0,000
202	0,928	0,022	0,040	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000
203	0,928	0,022	0,040	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000
204	0,000	0,677	0,000	0,000	0,323	0,000	0,000	0,000
205	0,956	0,002	0,042	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
301	0,000	0,995	0,000	0,000	0,005	1,000	0,000	0,000
302	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,019	0,000	0,000
303	0,000	0,976	0,000	0,000	0,005	0,019	0,000	0,000
304	0,000	0,976	0,000	0,000	0,005	0,019	0,000	0,000
305	0,000	0,976	0,000	0,000	0,005	0,019	0,000	0,000
306	0,118	0,102	0,703	0,072	0,001	0,003	0,000	0,000
307	0,133	0,065	0,796	0,004	0,000	0,002	0,000	0,000
308	0,000	0,389	0,000	0,589	0,008	0,013	0,000	0,000
309	0,013	0,066	0,901	0,017	0,000	0,002	0,000	0,000
310	0,000	0,451	0,000	0,528	0,003	0,016	0,000	0,000
401	0,013	0,057	0,923	0,005	0,000	0,002	0,000	0,000
402	0,013	0,057	0,923	0,005	0,000	0,002	0,000	0,000
403	0,000	0,926	0,074	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
404	0,014	0,003	0,975	0,005	0,000	0,002	0,000	0,000
405	0,014	0,003	0,975	0,005	0,000	0,002	0,000	0,000

Tabla. Tabla de fracciones másicas.



Figura 14. Equipo de destilación fraccionada. Destilación de metanol



Figura 15. Agregación del metanol al biodiesel. Se colocó papel wrap para evitar la hidratación del metanol con la humedad ambiental.



Figura 16. Preparación del metóxido de sodio.



Figura 17. Transesterificación del aceite vegetal.



Figura 18. Luego de una hora de reacción, se observa una mezcla homogénea.



Figura 19. Separación del biodiesel de la glicerina, se puede observar el biodiesel (primera fase, arriba) y la glicerina impura (segunda fase, abajo)

ANEXO 3. Código fuente de programación del sistema de control de temperatura.

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
int analogPin = 0; // Pin analogico 0 de Arduino
int temperature = 0;
int lm35read;
int pin10=10;
int pin9=9;
int pin8=8;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pin10, OUTPUT);
  pinMode(pin9, OUTPUT);
  pinMode(pin8, OUTPUT);
}
```

```

lcd.begin(16, 2);
lcd.setCursor(4,0);
lcd.print("tem_act");
lcd.setCursor(13,0);
lcd.print("tem_ref");
}
char cadena[24];
byte contador=0;
int valor=0;
void loop(){
  lm35read = analogRead(analogPin);
  temperature = (5.0 * lm35read * 100.0)/1024.0;
  Serial.println(temperature);
  lcd.setCursor(6,1);
  lcd.print(temperature);
  delay (500);
  if(Serial.available())
  {
    memset(cadena, 0, sizeof(cadena));
    while (Serial.available()>0)
    {
      delay(5);
      cadena[contador]=Serial.read();
      contador++;
    }
    valor=atoi(cadena);
    Serial.println(valor);
    lcd.setCursor(15,1);
    lcd.print(valor);
    contador=0;
    if (valor>temperature)
    {
      digitalWrite(pin9,HIGH);//pin 10 ventilador
      digitalWrite(pin10,LOW);//pin 9 foko
    }
    if (valor<temperature)
    {
      digitalWrite(pin10,HIGH);
      digitalWrite(pin9,LOW);
    }
    if (valor==temperature)
    {
      digitalWrite(pin10,LOW);
      digitalWrite(pin9,LOW);    }    }    }

```