



FACULTAD DE AGRONOMÍA

MAESTRÍA EN AGRONEGOCIOS

**SIMULACIÓN DE PARÁMETROS EN LA ELABORACIÓN DE
BIODIESEL A PARTIR DEL ACEITE DE ALGODÓN
(GOSSYPIUM HERBACEUM) Y SU ANALISIS
ECONÓMICO – AMBIENTAL IQUITOS 2011**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN AGRONEGOCIOS**

AUTOR: MANUEL VELASQUEZ VASQUEZ.

ASESOR: DR. JUAN ARTURO DÍAZ RENGIFO.

IQUITOS – PERÚ

2018



FACULTAD DE AGRONOMÍA
MAESTRÍA EN AGRONEGOCIOS

**SIMULACIÓN DE PARÁMETROS EN LA ELABORACIÓN DE
BIODIESEL A PARTIR DEL ACEITE DE ALGODÓN
(GOSSYPIUM HERBACEUM) Y SU ANALISIS
ECONÓMICO – AMBIENTAL IQUITOS 2011**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN AGRONEGOCIOS**

AUTOR: MANUEL VELASQUEZ VASQUEZ.

ASESOR: DR. JUAN ARTURO DÍAZ RENGIFO.

IQUITOS – PERÚ

2018



UNAP

Escuela de Post Grado
Oficina de Asuntos Académicos

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Con Resolución Directoral N° 0521-2011-EPG-UNAP, se designa como Jurado evaluador y dictaminador del proyecto de tesis: “SIMULACIÓN DE PARÁMETROS EN LA ELABORACIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DEL ACEITE DE ALGODÓN (*Gossypium herbaceum*) Y SU ANÁLISIS ECONÓMICO – AMBIENTAL – IQUITOS 2011”, a los siguientes profesionales:

Dr. Pedro Antonio Grately Silva	Presidente
Dr. Armando Vásquez Matute	Miembro
MSc. Jorge Enrique Bardales Manrique	Miembro

A los catorce días del mes de agosto del 2014, a horas 05:00 p.m., en el Auditorio de la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, se constituyó el Jurado evaluador y dictaminador, para presenciar y evaluar la exposición de la tesis titulada: “SIMULACIÓN DE PARÁMETROS EN LA ELABORACIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DEL ACEITE DE ALGODÓN (*Gossypium herbaceum*) Y SU ANÁLISIS ECONÓMICO – AMBIENTAL – IQUITOS 2011”, presentado por el egresado: MANUEL VELÁSQUEZ VÁSQUEZ, como requisito para optar el grado de MAGÍSTER EN AGRONEGOCIOS, que otorga la UNAP de acuerdo al Estatuto General y la Ley Universitaria 23733.

Después de haber escuchado la sustentación y luego de formuladas las preguntas, éstas fueron:
RESPONDIDAS EN FORMA REGULAR

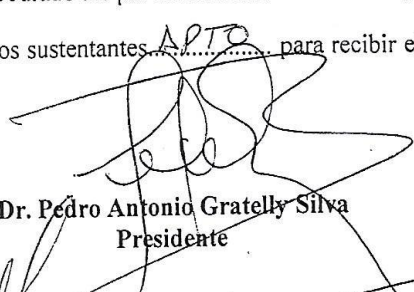
El Jurado, después de la deliberación correspondiente en privado, llegó a las siguientes conclusiones:

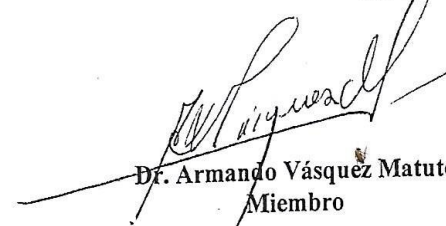
1. La Sustentación es: APROBADA POR MAYORIA
2. Observaciones : - REFORZAR METODOLOGIA
- SIMULAR CON DATOS REALES.

En fe de lo actuado los miembros del Jurado suscriben la presente acta por cuadruplicado.

Seguidamente, el Presidente de Jurado dio por concluida la sustentación, siendo las 7:15 p.m.

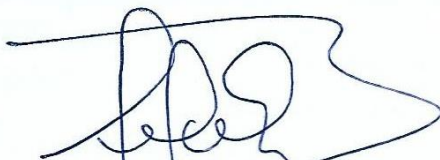
Con lo cual, se les declara a los sustentantes APTO para recibir el Grado Académico de Magíster en Agronegocios


Dr. Pedro Antonio Grately Silva
Presidente

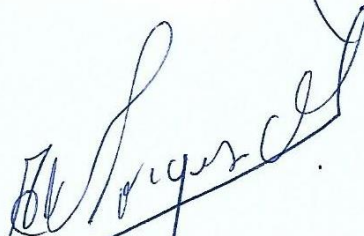

Dr. Armando Vásquez Matute
Miembro


MSc. Jorge Enrique Bardales Manrique
Miembro

TESIS APROBADA EN SUSTENTACIÓN PÚBLICA DEL DÍA 14 DE
AGOSTO DEL 2014, EN EL AUDITORIO DE LA ESCUELA DE POST
GRADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA
PERUANA, EN LA CIUDAD DE IQUITOS – PERÚ.



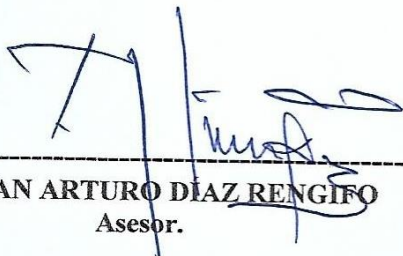
DR. PEDRO ANTONIO GRATELLO SILVA
Presidente



DR. ARMANDO VÁSQUEZ MATUTE
Miembro.



MSC. JORGE ENRIQUE BARDALES MANRIQUE
Miembro.



DR. JUAN ARTURO DÍAZ RENGIFO
Asesor.

DEDICATORIA

El presente estudio dedico a mi esposa Rocío del Carmen Ríos Pinedo; asimismo, a mis hijos: Rosa Beula, Priscila Manuela y Manuel Fernando y a mi sobrina Teresa Cristina respectivamente, por ser ellos el conjunto de personas muy significativas en mi vida, porque diariamente brindan amor, alegría, dinámica y solidez en mi hogar; también, porque es el grupo humano familiar que Dios me ha dado como una fuerza impulsora para continuar esforzándome y superándome en mi desempeño profesional, académico y científico en la región y el país para el servicio de la sociedad.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a mi esposa Rocío, por haber sido la ayuda idónea en este gran propósito académico y científico logrado; puesto que su apoyo moral y económico fue parte de los grandes factores efectivos que hicieron posible la elaboración del presente estudio.

Así mismo, expreso mi total agradecimiento al Dr. Juan Arturo Díaz Rengifo, asesor principal de la presente tesis, por su valorable apoyo de asesoramiento en todo el desarrollo de la estructura del presente estudio, por disponer su conocimiento, experiencia y tiempo para atender a mis consultas y solicitudes profesionales en todo momento y por su amistad sincera.

SIMULACIÓN DE PARÁMETROS EN LA ELABORACIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DEL ACEITE DE ALGODÓN (*GOSSYPIUM HERBACEUM*) Y SU ANÁLISIS ECONÓMICO - AMBIENTAL - IQUITOS 2011

Autor: Manuel Velásquez Vásquez

RESUMEN

El presente documento, básicamente trata sobre el estudio de un software aplicativo para simular parámetros en la elaboración de Biodiesel a partir del aceite de algodón (*Gossypium herbaceum*) y su análisis económico - ambiental en la ciudad de Iquitos basado en la plataforma de Superpro designer V 0,6.

En la elaboración se tuvo en cuenta las características físicas y químicas de la materia prima, el proceso y las características del producto principal (biodiesel) así como también, el producto secundario como es la glicerina.

La elaboración del biodiesel consta de tres etapas: etapa de la sección primaria la etapa de la sección de refinación y la etapa de la sección de purificación del glicerol.

El diseño fue elaborado para una producción de 38 945 Ton/año, operando 330 días al año y un flujo de masa de 4917.36 kg/h. obteniéndose 4261.05 kg/h de biodiesel y 481.53 kg/h de glicerol con un porcentaje de conversión del 90.29 %.

El capital de inversión total es de 10 297 000 dólares, con una tasa de retorno de la inversión de 40.66 %, y la recuperación del capital empleado al poner en operatividad el proyecto es de 2.46 años.

Respecto a análisis ambiental solamente se tiene como residuo volátil el metanol con un porcentaje de 6.24 % anual muy bajo y como producto poco dañino al ambiente, logrando el objetivo propuesto.

Palabras claves:

Biodiesel, Software, Simular, Parámetros, Económico, Ambiental, Semilla, Algodón.

**SIMULATION OF PARAMETERS IN THE ELABORATION OF
BIODIESEL FROM THE COTTON AREA (GOSSYPIMUM HERBACEUM)
AND ITS ECONOMIC - ENVIRONMENTAL ANALYSIS - IQUITOS 2011.**

Author: Manuel Velásquez Vásquez

ABSTRACT

This document, basically deals with the study of an application software to simulate parameters in the production of Biodiesel from cotton oil (*Gossypium herbaceum*) and its economic – environmental analysis in the city of Iquitos, based on the Superpro designer platform V 0.6.

The elaboration took into account the physical and chemical characteristics of the raw material, the process and the characteristics of the main product (biodiesel) as well as the secondary product such as glycerin.

The production of biodiesel consists of three stages: stage of the primary section, the stage of the refining section and the stage of the glycerol purification section.

The design was developed for a production of 38 945 Ton/year, operating 330 days a year and a mass flow of 4917.36 kg/h obtaining 4261.05 kg/h of biodiesel and 481.53 kg/h of glycerol with a conversion percentage of 90.29%.

The total investment capital is US \$ 10 297 000 with an investment return rate of 40.66%, and the recovery of the capital employed to put the project into operation is 2.46 years.

With regard to environmental analysis, only methanol with a low annual percentage of 6.24% and as a product that is not very harmful to the environment is achieved as a volatile waste, achieving the proposed objective.

Keywords:

Biodiesel, Software, Simulate, Parameters, Economic, Environmental, Seed, Cotton.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO	Pag.
Dedicatoria.	v
Agradecimiento.	vi
Resumen.	vii
Abstract.	viii
Índice de contenidos.	ix
Índice de cuadros.	xii
Índice de gráficos.	xiii
Índice de figuras.	xiv
Capítulo I: Introducción	
1.1.0 Generalidades	1
1.2.0 Antecedentes del estudio	1
1.3.0 Identificación y formulación del problema	3
1.4.0 Hipótesis	3
1.5.0 Objetivos	3
1.5.1 Objetivo General	3
1.5.2 Objetivos específicos	3
1.6.0 Justificación	4
1.7.0 Alcance y limitaciones	6
Capítulo II: Marco teórico	
2.1.0 Producción de biodiesel en el mundo	7
2.2.0 Fundamentos en el proceso de elaboración del biodiesel	12
2.3.0 Proceso Batch o por lotes.	13
2.4.0 Proceso continuo.	14
2.5.0 Materia prima	15
2.5.1 Definición.	15
2.5.2 Propiedades nutritivas	15

2.5.3 Aceite de algodón	16
2.5.4 Cultivo y cosecha	16
2.5.5 Requisitos climáticos y edafológicos	16
2.5.6 Rendimientos	16
2.5.7 Obtención del aceite	17
2.6.0 Proceso y operaciones	20
2.6.1 El proceso industrial	20
2.6.2 Catálisis homogénea y heterogénea	21
2.6.3 Transesterificación	23
2.6.4 Separación y lavado	25
2.6.5 Centrifugación y secado	26
2.7.0 El producto	26
2.8.0 Características del producto	28
Capítulo III: Metodología.	
3.1.0 El tipo de investigación	29
3.2.0 El diseño de la investigación	29
3.3.0 Variables de estudio	29
3.4.0 Indicadores	29
3.4.1 De la variable independiente	29
3.4.2 De la variable dependiente	30
3.5.0 Operacionalidad de las variables	30
3.6.0 Población y muestra	39
3.7.0 Materiales e instrumentos	39
3.8.0 Sistema de simulación	40
3.9.0 Definición del modelo matemático	40
3.10.0 Diagrama de flujos	40
3.11.0 Descripción de los equipos	41
3.12.0 Verificación	45

3.13.0 Validación	45
3.14.0 Ensayos simulados o experimentación virtual	45
3.15.0 Procesamiento de la información	45
Capítulo IV: Resultados.	
4.1.0 Presentación del proceso de producción	46
4.1.1 Sección de reacción primarias	46
4.1.2 Sección de refinación de biodiesel	48
4.1.3 Sección de purificación del glicerol	50
4.1.4 Balance de materia	52
Capítulo V: Análisis e interpretación de los resultados.	
5.1.0 Discusión técnica	57
5.2.0 Discusión económica.	60
5.3.0 Discusión ambiental.	62
Capítulo VI: Propuesta	65
Capítulo VII: Conclusiones.	66
Capítulo VIII: Recomendaciones.	68
Capítulo IX: Referencia Bibliográfica.	69
Anexo.	72

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	Pag.
Cuadro 01. Producción de biodiesel en algunos países de Europa	8
Cuadro 02. Resumen producción de vegetales oleaginosos en el Perú	11
Cuadro 03. Características físicas y químicas de aceite de algodón	18
Cuadro 04. Características físicas de tipos de aceites e algodón en la industria.	19
Cuadro 05. Parámetros comparativos entre el Biodiesel y Diesel.	28
Cuadro 06. Densidad de las sustancias.	52
Cuadro 07. Balance de materiales sección de reacción primaria.	52
Cuadro 08. Balance de materiales sección de refinación de biodiesel.	53
Cuadro 09. Balance de materiales sección de purificación de glicerol.	54
Cuadro 10. Balance de materia para la obtención de biodiesel en Kg/h.	55
Cuadro 11. Resumen del balance de materiales.	56
Cuadro 12. Composición a la salida diésel.	58
Cuadro 13. Composición de la salida ácidos grasos.	58
Cuadro 14. Composición de la salida Glicerol.	59
Cuadro 15. Composición de la salida Vapor	59
Cuadro 16. Resumen ejecutivo del análisis económico.	60
Cuadro 17. Algunos precios de equipos por unidad como referencia	61
Cuadro 18. Residuos Acuoso	62
Cuadro 19. Residuos Orgánicos	62
Cuadro 20. Residuos Sólidos	62
Cuadro 21. Emisiones	63
Cuadro 22. Residuos Totales	63

ÍNDICE DE GRAFICOS

GRAFICO	Pag.
GRAFICO 01. Balance de materiales: Entrada &Salida	56
GRAFICO 02. Resumen costo operativo anual	61
GRAFICO 03. Residuos totales	64

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Pag.
FIGURA 01. Reacción de transesterificación	12
FIGURA 02. Reacción química del proceso de transesterificación	23
FIGURA 03. Equipos de la sección de reacción primaria	47
FIGURA 04. Equipos de la sección de reacción de refinación	49
FIGURA 05. Equipos de la sección de purificación de glicerol	51

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.0 GENERALIDADES

El objetivo del proyecto es simular los parámetros en la elaboración de Biodiesel a partir del aceite de algodón (*Gossypium herbaceum*) y su análisis económico - ambiental en la ciudad de Iquitos.

La metodología del estudio es del tipo experimental (ensayo y error) y el diseño a emplear es descriptivo. En la variable independiente (Simular los parámetros en la elaboración), se incluyen los indicadores del estudio como son: presión, temperatura, concentración de los reactantes, estequiometría, cinética de la reacción bioquímica, concentración de los productos y el rendimiento.

Respecto a la variable dependiente (análisis económico - ambiental) se incluyen los indicadores, en el aspecto económico: capital de inversión (S/.), costo operativo (S/año), velocidad de producción (S/ MP/año, costo por unidad de producción (S/Kg de MP), ingresos (S/.año), margen bruto (%), retorno de la inversión (años), tasa interna de retorno (%), valor neto presente (entre el 10% al 12% de interés) (S/.) y en el aspecto ambiental: los residuos sólidos, líquidos, gaseosos (emisiones) y orgánicos.

Cabe mencionar, que parte del propósito de este estudio es estimar los costos de producción de biodiesel a partir de aceite de algodón.

Excluye de este estudio los costos de capital de trabajo, sistemas de control ambiental, análisis de laboratorio y todas las facilidades del área de proceso para la obtención de biodiesel. También se excluyen los costos de capital, de incentivos gubernamentales, capital de trabajo y la carga de transporte y distribución.

Para la simulación de los parámetros en la elaboración del Biodiesel se ha empleado la plataforma del programa de SuperPro Designer V6.0 así como para conocer el análisis económico y ambiental.

1.2.0. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.

HONTY, G. (2007), afirma en su publicación que, de la misma manera que el etanol de celulosa presenta mejores indicadores de balance energético, de uso del

suelo y de emisiones gaseosas que el etanol “tradicional”, las algas presentan mejores indicadores en cada una de esas variables para la producción de biodiesel que los que presentan las tecnologías tradicionales a partir de cultivos como el girasol, la soja y la colza. Se trata de pequeñas plantas unicelulares o pluricelulares con capacidad de duplicarse en un período entre 1 y 5 días y cuya cosecha a diferencia de los tradicionales cultivos energéticos no se hace una vez al año sino todos los días. Las algas (o microalgas como suele llamárseles) podrían ser una nueva opción de biocombustible para el futuro. Si bien aún falta desarrollar mucha investigación ya hay algunos proyectos productivos en ejecución y datos que muestran las ventajas de esta tecnología: costos relativamente bajos de cosecha y transporte, menor gasto de agua, mayor eficiencia fotosintética que los otros vegetales, utilización de agua de residuos orgánicos, cultivos aún en agua salada, fijadoras de CO₂ lo que puede contribuir a reducir el efecto invernadero. Además, también puede utilizarse en forma seca como si fuera polvo de carbón, con un poder calorífico similar a éste.

CHANCHARI D. et al, (2008) realizó un proyecto de prefactibilidad para la instalación de una planta de biodiesel a partir de aceite de palma aceitera (*Elaeis guineensis jacq*), en el cual, estima la viabilidad técnica y económica da nivel de prefactibilidad la instalación de la planta de biodiesel, donde señalan que para el año 2012 se requería cubrir una demanda insatisfecha de 64 046 barriles por año y basándose en esta información, determinaron una capacidad de planta de 19 086 barriles/año de biodiesel con un VAN de 626 549.96 y un TIR de 54.88 % , una relación de costo beneficio de 1.96 y un periodo de recuperación de 2.15 años.

LLERENA, T. eta al, (2009), en su trabajo de tesis de modelado y simulación del sistema de destilación de la planta piloto de alcohol de la Facultad de Ingeniería Química, mediante el uso del CHEMCAD desarrollo un software aplicativo, en donde compara el proceso virtual con el proceso real en situaciones donde es imposible realizar por los altos costos operativos y lo no practico, poniendo énfasis en la predicción mediante el ensayo lógico para pronosticar el proceso de destilación.

NOLORBE J, et. al (2011), desarrollo un trabajo de tesis de modelado y simulación de un reactor químico con convección forzada en la UNAP, utilizó el software CHEMCAD con el cual ensayo diferentes modelos termodinámicos para un mismo sistema que proporciona el software.

MASS S. et al (2012), desarrollo la posibilidad de obtener a nivel virtual biodiesel a partir del Piñón blanco (*Jatropha curcas*) mediante el software de **CHEMCAD**, basándose en la información de los estudios realizado por **REPPETO L, et al (2011)**.

1.3.0. IDENTIFICACIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Ante estas observaciones encontradas en los diversos antecedentes de estudios realizados en diferentes países por encontrar mejoras en el proceso de obtención de biodiesel como una alternativa de biocombustibles, desde el punto de vista tecnológico, económico y ambiental formulamos la siguiente interrogante: ¿Qué parámetros en la elaboración de Biodiesel a partir del aceite de algodón (*Gossypium herbaceum*) influyen en el análisis económico – ambiental en la ciudad de Iquitos 2011?

1.4.0. HIPÓTESIS.

La simulación de los parámetros en la elaboración de Biodiesel a partir del aceite de algodón (*Gossypium herbaceum*) influye en el análisis económico – ambiental en la ciudad de Iquitos 2011.

1.5.0. OBJETIVOS.

1.5.1. OBJETIVO GENERAL.

Simular los parámetros en la elaboración de Biodiesel a partir del aceite de algodón (*Gossypium herbaceum*) y su análisis económico - ambiental en la ciudad de Iquitos.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Determinar que parámetros son relevantes en la elaboración de biodiesel a partir del aceite de la semilla de algodón (*Gossypium herbaceum*).

2. Determinar que indicadores económicos y ambientales son los más significativos en la elaboración de biodiesel.
3. Determinar el nivel de relación existente entre los parámetros de elaboración de biodiesel y su análisis económico y ambiental.
4. Analizar e interpretar los parámetros en la elaboración de biodiesel y las alternativas económicas y ambientales en el modelo virtual propuesto.

1.6.0. JUSTIFICACIÓN.

Los biocombustibles sustituyen esencialmente dos tipos de combustibles líquidos fósiles, las gasolinas (naftas) y el diesel (diesel N° 2 para el Perú). En la Amazonía se dispone de gran variedad de materias primas para la elaboración de estos biocombustibles, entre las que podemos destacar: caña brava, caña de azúcar, maíz, yuca, arroz, sorgo dulce (elaboración de etanol para motores de ciclo Otto, en su presentación anhidro e hidratado), piñón blanco, higuera, palma aceitera, coco, soya, algodón, girasol, polvillo de arroz (elaboración de biodiesel para motores de ciclo Diesel o su uso directo como aceite vegetal carburante).

Las ventajas ambientales y económicas en el consumo de biodiesel se describen a continuación:

1. No contiene sulfuros, por lo que disminuye las emisiones de partículas sólidas, y mejora la lubricidad del combustible, incluso en mezclas con proporciones muy pequeñas de biodiesel, lo cual incrementa la vida de los motores.
2. Tiene un punto de inflamación relativamente alto (150°C), lo que lo hace menos volátil y más seguro de transportar y manipular que el diesel de petróleo.
3. Se puede producir a partir de insumos locales, como cultivos oleaginosos o aceites vegetales reciclados, contribuyendo a reducir la dependencia de importaciones de petróleo, ahorrando divisas y generando puestos de trabajo.
4. Es altamente biodegradable en el agua, por lo que en caso de derrame se degradaba a un ritmo muy superior al del diesel convencional e incluso tan rápido como el azúcar. Esto hace del biodiesel un combustible ideal para embarcaciones fluviales y ambientes acuáticos sensibles o protegidos.
5. No es tóxico en caso de ingestión, tanto en peces como en mamíferos. Su toxicidad es tan baja que una persona de 80 Kg tendría que tomar alrededor de

1,6 litros de biodiesel para que tenga efectos mortales. La sal común (NaCl) es aproximadamente diez veces más tóxica.

6. Contribuye a la reducción del calentamiento global, ya que emite menos CO₂ en su ciclo de vida que el fijado mediante el proceso de fotosíntesis por las plantas usadas para producirlo. Por otro lado, evita liberar el carbono que fue fijado hace millones de años en los combustibles fósiles.
7. Reduce substancialmente la emisión de la mayoría de agentes contaminantes. Al ser un combustible oxigenado, el biodiesel tiene una combustión más completa que el diesel, reduciendo las emisiones de SO₂, CO, materia particulado e hidrocarburos no quemados. Por eso su combustión produce menos humo visible y menos olores nocivos y su uso contribuye a disminuir la polución del aire.
8. Con respecto al monóxido de carbono (CO), la emisión durante la combustión del biodiesel en motores diesel es del orden del 50% inferior (comparada con aquella que produce el mismo motor con combustible diesel).
9. No se produce emisión de dióxido de azufre (SO₂) por cuanto el biodiesel no contiene azufre. El dióxido de azufre es nocivo para la salud humana así como para la vegetación.
10. El material particulado con el empleo del biodiesel se reduce al 65% respecto del combustible diesel. Las partículas finas son nocivas para la salud.
11. El biodiesel no contiene productos aromáticos (benceno y derivados) siendo conocida la elevada toxicidad de los mismos para la salud.
12. El dióxido de carbono (CO₂) emitido durante la combustión del biodiesel es totalmente reabsorbido por los vegetales. Por lo tanto el biodiesel puede ser considerado un combustible renovable.
13. El balance energético del biodiesel, considerando la diferencia entre la energía que produce 1 kg de biodiesel y la energía necesaria para la producción del mismo, desde la fase agrícola hasta la fase industrial es positivo al menos en el 30%. Por lo tanto, desde el punto de vista energético no agota los recursos de la naturaleza.
14. Además de las consideraciones favorables desde el punto de vista ecológico y energético merece destacarse la posibilidad del empleo inmediato en los motores.

15. El biodiesel tiene una muy buena combustión, no requiere ningún tipo de modificación en motores existentes pudiendo alimentarse alternativamente con este o combustible diesel o la mezcla de ambos. Esta es una diferencia importante respecto de otras experiencias de sustitución de combustibles como la brasileña con el etanol, donde era necesario efectuar en los motores ciertas modificaciones.
16. El empleo de biodiesel aumenta la vida de los motores debido a que posee un poder lubricante mayor; además, el auto ignición, la potencia y el torque del motor permanecen inalterados.

1.7.0. ALCANCE Y LIMITACIONES.

El alcance es con fines exclusivamente educativos dentro del campo de las ciencias e ingeniería, el software producto es de uso prohibido para otros fines sin la autorización expresa de la UNAP, el autor y el asesor del presente trabajo. Las limitaciones está sujeto a las condiciones establecidas para realizar la simulación al no considerar los costos de las instalaciones, laboratorios y lo que corresponde a la ingeniería de un proyecto de inversión entre otros, por lo que solamente nos genera un estudio preliminar de la factibilidad para la obtención de biodiesel a partir del aceite de semillas de algodón.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.0. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN EL MUNDO.

El uso por primera vez de aceites vegetales como combustibles, se remontan al año de 1900, siendo Rudolph Diesel, quien lo utilizara por primera vez en su motor de ignición - compresión y quien predijera el uso futuro de biocombustibles.

Durante la segunda guerra mundial, y ante la escasez de combustibles fósiles, se destacó la investigación realizada por Otto y Vivacqua en el Brasil, sobre diesel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970, que el biodiesel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética que se sucedía en el momento, y al elevado costo del petróleo.

Las primeras pruebas técnicas con biodiesel se llevaron a cabo en 1982 en Austria y Alemania, pero solo hasta el año de 1985 en Silberberg (Austria), se construyó la primera planta piloto productora de RME (Rapeseed Methyl Ester - metil éster de aceite de semilla de colza).

Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiesel en automóviles.

El biodiesel - en comparación con el diesel de recursos fósiles- puede producirse a partir de aceites vegetales de diferentes orígenes, como soya, maní y otros aceites vegetales, tales como el aceite para cocinar usado, o incluso, excremento animal.

Para producir el biodiesel, el aceite se extrae de la semilla cultivada, dejando atrás harina de semilla que puede usarse como forraje animal. El aceite es refinado y sometido a la transesterificación, lo que produce glicerina como un derivado. El biodiesel puede usarse en su forma pura (100% biodiesel) o mezclado en cualquier proporción con diesel regular para su uso en motores de ignición a compresión.

El biodiesel puro es biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos, sin importar significativamente el alcohol y el aceite vegetal que se utilice en la transesterificación.

En Europa, es producido principalmente a partir del aceite de la semilla de canola (también conocida como colza o rapeseed) y el metanol, denominado comercialmente como RME (Rapeseed Methyl Ester), el cual es utilizado en las máquinas diesel puro o mezclado con aceite diesel, en proporciones que van desde un 5% hasta un 20%, generalmente. En Alemania y Austria se usa puro para máximo beneficio ambiental. Además de la colza, en los últimos años se ha producido biodiesel a partir de soya, girasol y palma, siendo esta última la principal fuente vegetal utilizada en Malasia para la producción de biodiesel PME y PEE (Palm Methyl Ester y Palm Ethyl Ester), **INTRACORP, (2007)**.

Cuadro N° 01: Producción de biodiesel en algunos países de Europa.		
País	Capacidad instalada (TM/año 2000)	Producción (TM/año 2000)
Alemania	550 000	415 000
Francia	290 000	286 000
Italia	240 000	160 000
Bélgica	110 000	86 000
Inglaterra	2 000	2 000
Austria	20 000	20 000
Suecia	11 000	6 000
Checoslovaquia	47 000	32 000
Total	1 270 000	1 005 000

Fuente: INTRACORP, (2007).

En la Unión Europea se estipuló que para 2005, el 5% de los combustibles debe ser renovable, porcentaje que deberá duplicarse para 2010: En Francia, todos los combustibles diesel poseen un mínimo del 1% de biodiesel. En Alemania, el

biocombustible se comercializa en más de 350 estaciones de servicio y su empleo es común en los cruceros turísticos que navegan en sus lagos.

En Europa y los EE UU, el biodiesel es producido y utilizado en cantidades comerciales. En 1998, la DOE designó al biodiesel puro ("B100" - 100%), como un combustible alternativo y estableció un programa de créditos para el uso de biodiesel. Sin embargo el biodiesel mezclado, cuya forma más común se llama B20 (20% biodiesel, 80% diesel convencional), no ha sido designado como un combustible alternativo.

En los EE UU, flotas de carga mediana y liviana que son centralmente llenadas de combustible en el medio oeste y en el este son actualmente las principales usuarias del combustible biodiesel. Las porciones del mercado total son bajas: por ejemplo, en Alemania, donde el biodiesel está disponible en cerca de 1 000 de un total de 16 000 estaciones de llenado de combustible, la participación del biodiesel está en el orden de 0,3% del diesel vendido, lo cual equivale a 100 000 t. Se espera que esto se eleve a quizás 300.000 en el futuro, pero incluso los optimistas no esperan que la participación se eleve por sobre un 5% a 10% como máximo.

Varias flotas de buses escolares y de transporte público están usando biodiesel en los EE UU. Según, el uso del biodiesel como un combustible alternativo (esto es, en su forma pura) no se espera que sea importante, pero como una mezcla puede aumentar en los EE UU y en otras partes, aunque quizá principalmente en flotas cautivas con llenado de combustible central o nicho de mercado en áreas ambientales sensibles.

Además de Brasil y Estados Unidos, que son los dos mayores productores de biocombustibles en el continente americano y en el mundo, se producen en Canadá (800 ML en 2007), Colombia (284 ML), El Salvador (277 ML), Costa Rica (149 ML), Perú (30 ML), Argentina (20 ML) y Paraguay (18 ML). Otros países como Guatemala (79 ML en 2006), Cuba (45 ML), Ecuador (45 ML), México (49 ML) y Nicaragua (30 ML).

En el primer conjunto de países destaca Argentina por haber comenzado a promover el uso de biocombustibles desde hace mucho tiempo (1922) a la par que Brasil. En 1928, fue realizada una prueba con éxito moviendo un Ford T con una mezcla de gasolina-etanol a 80% (E80). En 1979, varios fabricantes de automóviles ayudaron a crear el primer programa de uso de etanol denominado Programa Alconafta. En 1985, la totalidad de la región noroeste de Argentina fue parte de este programa, y se iniciaría una segunda fase con la promoción de exportaciones de azúcar. Tras una serie de cosechas perdidas, un alto precio internacional del azúcar y condiciones desfavorables de mercado, el Programa Alconafta se extinguió a principios de la década de 1990. En 2001, el gobierno argentino estableció el Programa Nacional de Biocombustibles (Resolución 1076/2001), junto con el Plan de Competitividad del Biodiesel (Decreto 1396/2001), con lo cual se buscaba restablecer al extinto Programa Alconafta pero con una mayor amplitud de espectro. En 2006, el gobierno decidió englobar todos estos programas y planes en una sola Ley de Biocombustibles 26-093/2006, para promover un modelo de industria de estos energéticos semejante al modelo brasileño. En 2007, Argentina además produjo 180 ML de biodiesel para su mercado interno.

Costa Rica inició el desarrollo de una industria de los biocombustibles en 1974 con su Programa de Energías Renovables, cuyo objetivo principal era disminuir la dependencia energética del exterior. En 1978, fue instalada la primera destilería de etanol a base de jugo de caña. Desde entonces, el gobierno costarricense ha fomentado la producción y uso de etanol. En cuanto al biodiesel, será producido en el corto plazo a partir de aceite de palma, el cual se usa para cocinar. Además, en Costa Rica se ha desarrollado tecnología de producción de biodiesel a partir de algas verdes.

El Salvador fue seleccionado en 2007 por Brasil y Estados Unidos para que este último contara con un suministro de etanol producido con tecnología brasileña pero con un menor costo de transporte, por estar más cerca El Salvador a Estados Unidos que Brasil. Además, este proyecto pretende desarrollar el mercado salvadoreño del etanol con la sustitución completa de los petrolíferos a mediano y largo plazos. La industria salvadoreña del biodiesel es incipiente, y tiene como insumos la soya, jatropha (piñón), higuera y semilla de algodón.

En América Latina, el biodiesel es obtenido de canola y otros productos residuales agrícolas, así como de las grasas animales. Existen otros países americanos con un potencial de desarrollo de los biocombustibles como Bolivia, Chile, Ecuador, México, Uruguay, Venezuela, Cuba, República Dominicana, Guatemala, Haití, Honduras, Jamaica, Nicaragua, Panamá, Trinidad y Tobago. En pleno conocimiento de ese potencial, los gobiernos de estos países han comenzado a implementar programas para producir y usar biocombustibles mezclados con la gasolina y diesel o en su efecto biodiesel.

En el PERU, las materias primas disponibles para producir biodiesel son muy variadas como son: los aceites vegetales, las grasas animales, el aceite de pescado usado. Sin embargo la cantidad no es suficiente como para abastecer el mercado como materia prima.

Otras alternativas se tienen en el cultivo de productos oleaginosos en la producción nacional. Los que despertaron mayor interés en el Perú, para la producción de biodiesel son sin duda, la palma aceitera en la selva y la colza canola en la sierra y como alternativas los productos residuales en diferentes procesos como: el aceite de las semillas de algodón en la fabricación de jabón como producto principal, **INTRACOR, (2007).**

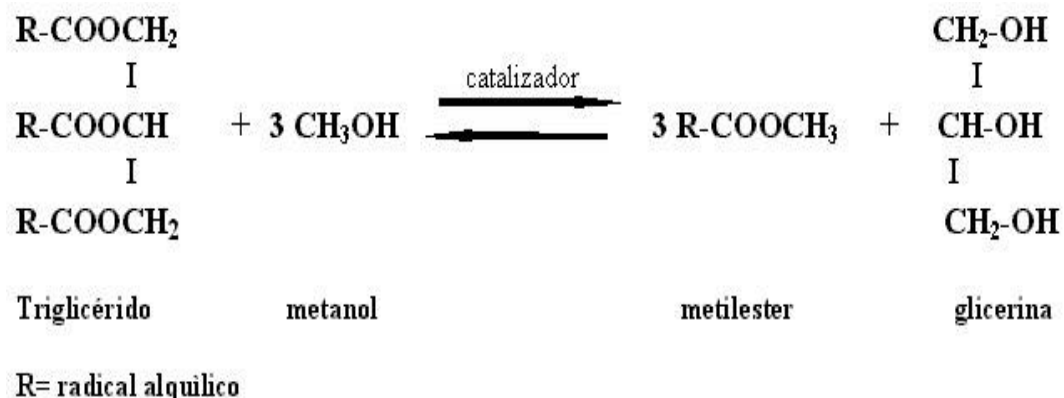
El cuadro N° 02 contiene el resumen de la producción de vegetales oleaginosos en el Perú.

Cuadro N 02: Resumen producción de vegetales oleaginosos en el Perú		
	Producción por año (TM)	
PRODUCTO (Aceite)	2006	2007
Palma aceitera	180 446	208 538
Colza canola	104 230	113 240
Semilla de algodón	80 000	69 672
Olivo	38 089	42 198
Semillas de piñón blanco	23 000	24 507
Coco	35 000	42 000
Girasol	8 000	9 400
Soya	1 928	2 581
Fuente: INTRACORP, (2007).		

2.2.0. FUNDAMENTOS EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL BIODIESEL.

Desde el punto de vista químico el biodiesel es una mezcla de los esteres metílicos de los ácidos grasos triglicéridos de los aceites vegetales y o grasas animales empleados como materia prima; **KIRRK OTHMER, (2006)**.

FIGURA 01: Reacción de transesterificación.



Fuente: KIRK OTHMER, (2006).

Para la producción de 1 tonelada de biodiesel son necesarios: 1 tonelada de aceites vegetales y/o grasas animales, 0,1 tonelada de alcohol metílico. Otros productos necesarios en menor medida para su producción son productos químicos de fácil obtención en el mercado local o internacional.

Es importante subrayar que la planta de biodiesel produce además glicerol bruto como subproducto (10 % aprox. de la producción de biodiesel). La glicerina producida una vez refinada puede ser empleada en distintos campos como son: industria química (plásticos, pinturas, conservantes), cosmética, farmacéutica, explosivos.

Como se mencionara precedentemente los esteres metílicos de los ácidos grasos son además un valioso intermedio útil para preparar:

Alcoholes grasos (materias primas para la preparación de detergentes aniónicos, emulsionantes, plastificantes, retardantes en la evaporación del agua en cosméticos).

Esteres de ácidos grasos que no es posible obtener por esterificación directa. Representando por lo tanto un producto muy valioso para producir derivados oleoquímicos. Desde el punto de vista del impacto ambiental y seguridad el proceso no es contaminante.

Una elevada productividad, a bajos costos de inversión hacen que sea factible encarar este emprendimiento teniendo en cuenta además la posibilidad de construir localmente aquello que la industria del país en condiciones de competitividad y calidad pueda fabricar (tanques, reactores, bombas, instrumental, etc).

2.3.0. PROCESO BATCH O POR LOTES.

Los antiguos procesos de producción de biodiesel eran esencialmente procesos por lotes (BATCH). El aceite era suministrado a un reactor de tipo tanque agitado en presencia de una gran cantidad de metanol y un catalizador básico, preferiblemente hidróxido de sodio o de potasio señala; **LANG X, (2001).**

Un exceso de metanol es necesario para asegurar una alta solubilidad del triglicérido y mantener una viscosidad de la mezcla de reacción baja, así como para asegurar el equilibrio químico. Una relación molar mínima metanol: triglicérido de 6:1 es generalmente aceptada. La reacción toma lugar a temperaturas entre 60 y 80 grados centígrados, es decir, por debajo del punto de ebullición de mezcla a la presión de operación. Previamente el aceite, debe ser neutralizado por un tratamiento acuoso de hidróxido de sodio para la remoción de ácidos grasos libres. Esto puede estar comprendido entre 0.5 y 5% en los aceites vegetales, quizás más en la grasa animal. Así como también, hasta en un 30% en aceite de cocina usado.

La reacción de transesterificación puede considerarse terminada cuando la conversión rebasa el 98%, o bien, cuando la composición de mezcla cumpla las especificaciones de calidad requeridas para biodiesel. El exceso de metanol es recuperado para el siguiente proceso *batch*. La mezcla remanente es sometida a procesos para separar los esterres del glicerol formado. Esta puede tomar lugar ya sea por decantación o por centrifugación. Puede adherirse agua para provocar una separación de fases; **CLEMENTS et al, (1998).**

La fase aceitosa, que contiene ésteres grasos se manda entonces a un proceso final de neutralización con ácido, seguido por un proceso de lavado y secado. El ácido fosfórico es comúnmente utilizado para la neutralización debido a que el fosfato de sodio y de potasio, pueden ser recuperados y vendidos como fertilizantes.

Después de mezclar las corrientes de glicerol el resultado es una solución de 50% w/w glicerol en agua, con algo de metanol, residuos de catalizador básico y jabones. Entonces primeramente se lleva a cabo la recuperación de metanol por destilación flash o por evaporación de película. Posteriormente, la adición de ácido permite la transformación de los jabones en ácidos grasos libres para ser separados y evaluados por esterificación con metanol.

Finalmente el glicerol pasa por un proceso de purificación hasta tenerlo en composición de 85% y es vendido a refinerías especializadas, donde se purifica hasta un 99.7% aplicando procesos de intercambio iónico.

Los procesos *batch* presentan gran flexibilidad con respecto a la composición de alimentación, pero en términos económicos son bajos, debido a la baja productividad del equipo y los costos de operación.

La productividad puede ser aumentada en gran manera con la implementación de operaciones continuas y el uso de técnicas de proceso intensificadas, como la destilación reactiva o el reemplazo de catálisis homogéneas por heterogénea.

2.4.0. PROCESO CONTINUO.

En un proceso continuo, trabajando a baja presión, es capaz de procesar una alimentación con una gran cantidad de ácidos grasos libres, como aceites vegetales no refinados. En un primer reactor la esterificación de los ácidos grasos libres se hace presente, preferiblemente en un reactor con catalizador; **FUKUDA et al, (2001)**.

La cantidad de los ácidos grasos libres se debería reducir por debajo el 1%, pero preferiblemente, por debajo del 0.5%. Después, la reacción de transesterificación continúa en el siguiente reactor. Un catalizador homogéneo es entonces utilizado. La conversión debería ser entonces más alta, en general arriba del 98.5%. Para

asegurar alto rendimiento en monoésteres y mínimas cantidades de mono/ di/ triglicérido se deben emplear como mínimo dos reactores en serie con separación intermedia de glicerol. La mezcla de separación es entonces sometida a separación de fases en esteres crudos y glicerol en la unidad de separación. La separación puede tomar lugar por decantación o centrifugación. La fase de glicerol es tratada con ácido para la remoción de los jabones y recuperación de ácidos grasos libres. Entonces, el metanol se recupera por evaporación y es reciclado. Los ésteres crudos siguen la ruta de separación del metanol en la siguiente unidad de separación, la neutralización del catalizador, así como el acondicionamiento del biodiesel es lavado y secado; **FREEDMAN et al, (1998)**.

El ciclo del balance de materia es cerrado para la recuperación del exceso de metanol de la solución acuosa por medio de destilación.

2.5.0. LA MATERIA PRIMA.

2.5.1. Definición.

El algodón es una planta de la familia de las malváceas. Esta planta posee un fruto que se abre a la madurez y que contiene las semillas de algodón en su interior. Estas semillas presentan una cobertura dura rodeada por fibras ricas en celulosa.

Después de la cosecha, las fibras del algodón son separadas de la semilla por un proceso llamado desmotado para luego ser utilizadas en la industria textil. El subproducto resultante del desmotado es la semilla de algodón entera con fibras cortas (aspecto parecido a una pelusa). La presencia de fibras cortas hace que las semillas de algodón enteras tiendan a apelmazarse. Debido a este apelmazamiento, la tendencia a "fluir" de la semilla de algodón entera puede verse reducida, lo que puede traer problemas operativos al momento de transporte y almacenamiento de la misma. Para eliminar las fibras remanentes (y de esta forma mejorar la capacidad de manejo), la semilla de algodón entera puede ser sometida a un proceso de desfibrado por quemado o por tratamiento químico.

2.5.2. PROPIEDADES NUTRITIVAS.

La composición química de la semilla de algodón entera hace que éste sea un ingrediente ampliamente utilizado en raciones para vacas lecheras. El contenido de

proteína cruda es medio a alto (22-24% PC) lo que la hace un ingrediente interesante al momento de suministrar una fuente proteica. Sin embargo, cabe destacar que la degradabilidad de la proteína en el rumen (DPR) es alta ($\geq 70\%$ DPR), lo que debe ser considerado al momento de formular dietas para vacas de alta producción.

2.5.3. ACEITE DE ALGODÓN.

Su cultivo está dirigido estrictamente a la producción de algodón y no se considera la obtención de aceite como actividad importante, pero como un producto agregado hoy en día si se considera.

2.5.4. CULTIVO Y COSECHA.

La semilla de algodón se obtiene de la planta de algodón, que comprende 40 especies. Alrededor del 94% de la producción mundial corresponde a la variedad de tierras altas (*Gossypium hirsutum*). En el Perú se cultiva en la costa y la sierra la variedad de *G. barbadense* L. que pertenece a los algodones originarios del Perú Pima y Tangüis, así como el algodón criollo, nativo de Sudamérica tropical, también se tiene, otras variedades en menor cuantía como el *G. arboreum* L. – Árbol del algodón, nativo de Asia meridional, *G. herbaceum* L. – algodón de levante, nativo de África del sur y el *G. hirsutum* L. – Nativo de América Central, el Caribe y Florida meridional.

2.5.5. REQUISITOS CLIMÁTICOS Y EDAFOLÓGICOS.

El algodón se da mejor en regiones con días calurosos y noches poco frías y es conocido por su capacidad de resistir períodos de sequía una vez que la raíz y sus bifurcaciones están bien implantadas. La temperatura óptima para el crecimiento de la raíz es de 28°C a 35°C. La planta necesita un suelo fértil, profundo, poroso y de buen drenaje. Considerando que el algodón agota a la tierra más a prisa que muchos otros cultivos, es conveniente utilizar un sistema de rotación para incrementar la fertilidad y combatir enfermedades y malas hierbas.

2.5.6. RENDIMIENTOS.

Los rendimientos de semilla de algodón suelen oscilar entre unos 280 kg/Ha en regiones de poca lluvia hasta más de 1,680 kg/Ha en zonas de regadío y cultivo intensos.

2.5.7. OBTENCIÓN DEL ACEITE

Después de eliminar la cáscara, la pepita se acondiciona o se somete a cocción con vapor, para pasar luego por una o más series de laminadoras para romper las glándulas del aceite y producir escamas de 0.25 mm a 0.35 mm de espesor. Hay varios métodos para extraer el aceite; **KIRK OTHMER, (2006):**

Molturación en prensas hidráulicas.

Este método de extracción es útil cuando el factor trabajo es barato y escasea el capital. El rendimiento requiere mucha mano de obra y es poco eficiente.

Extracción directa por solvente.

Se utilizan dos procedimientos de extracción: continua y por lotes. En el procedimiento continuo, la extracción se lleva a cabo por contacto entre el solvente que fluye en una dirección y las escamas que fluyen a contracorriente. En el proceso por lotes, se adiciona el solvente a las escamas en un recipiente estático, y permanecen en contacto durante un periodo de tiempo determinado.

Luego, se filtra la mezcla y se separa los excedentes de solvente de la harina con vapor. Este método requiere de una operación de destilación para la recuperación del solvente utilizado y el cual puede ser reciclado.

Extracción con preensado mediante solvente.

Se trata de una combinación de los procedimientos anteriores. Suprime una porción del aceite de la parte carnosa con expellers y extrae el aceite restante con solvente. El procedimiento también se usa para extraer aceite de otras semillas con un contenido muy alto de aceite.

Refinación de la mezcla.

El aceite se extrae con solvente y se refina en estado de miscela. Este proceso presenta la ventaja de impedir los incrementos de calor que a veces ocurren en el aceite en bruto entre las fases de extracción y refinado

Características físicas y químicas.

En el siguiente cuadro N° 03, se puede apreciar las características físicas y químicas del aceite de algodón, y el Cuadro N° 04, muestra las características físicas de diferentes tipos de aceites de algodón en la industria.

Cuadro N° 03: Características físicas y químicas de aceite de algodón.

ACIDO GRASO	ACEITE DE ALGODÓN PARA COCINAR	ACEITE de ALGODÓN PARA ENSALADAS	*PARCIALMENTE HIDROGENADO
Mistérico (14:0)	0.8	0.8	0.9
Palmítico (16:0)	24.4	22.3	22.5
Palmitoleico (16:1)	0.4	0.4	0.0
Estearico (18:0)	2.2	2.0	5.5
Oleico (18:1)	17.2	16.7	50.0
**Linoleico (18:2)	55.0	57.6	20.3
**Linolénico (18:3)	0.3	0.3	0.3
SUMARIO			
% Saturados	27	25	29
% Monoinsaturados	18	17	50
% Poliinsaturados	55	58	21
Fuente: http://espanol.cottonseed.com/default.asp. (2014)			

Cuadro N° 04: Características físicas de diferentes tipos de aceites de algodón en la industria

	Aceite de Algodón Para Cocinar	Aceite de Algodón Comestible	Manteca de Aceite de Algodón Hidrogenada	Aceite de Algodón Hidrogenado en "Escamas"
Lovibond Color (Rojo Máx.)	2.0-6.0	2.0-4.0	2.0-2.5	2.0-2.5
Acidos Grasos Libres (Máx % de Oleico)	0.05	0.05	0.05	0.05
Valor de Peróxido (Meq/kg. Máx.)	1.0	0.5	0.5	0.5
Valor Yodado	103-116	103-116	50-70	2-5
Estabilidad AOM (hrs.)	15	15-25	100-200+	350+
Punto de Turbidez (°F)	30-38	-	-	-
Punto de Fusión (°F)	50-60	-	100-118	140
Punto de Fluidez (°F)	-	25-30	102-140	140+
Punto de Humo (°F)	430	430	-	-
Prueba en Frío (hrs.)	-	5.5-12	-	-
Sabor	Suave	Suave	Suave	Suave
Densidad (g/L a 108°C)	-	8.99	8.97	-

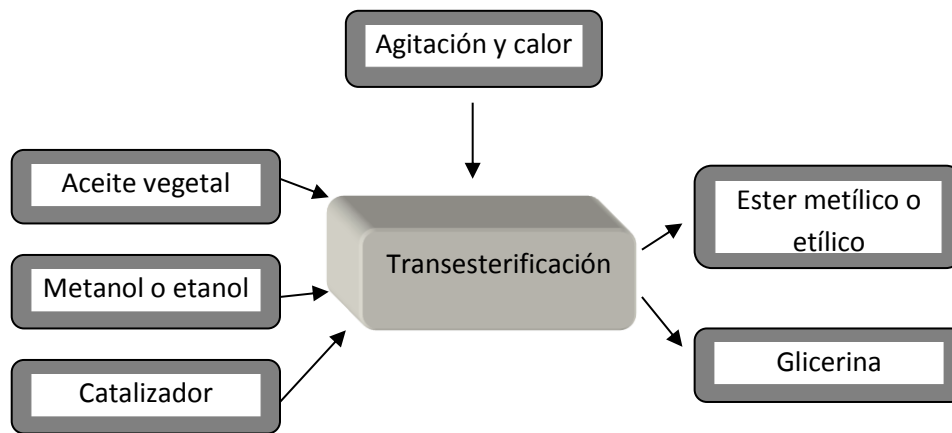
Fuente: <http://espanol.cottonseed.com/default.asp>. (2014).

2.6.0. PROCESOS Y OPERACIONES.

2.6.1. EL PROCESO INDUSTRIAL.

El proceso de producción industrial de biodiesel se basa en la reacción de transesterificación del aceite. Los aceites están compuestos principalmente por moléculas denominadas triglicéridos, las cuales se componen de tres cadenas de ácidos grasos unidas a una molécula de glicerol. La transesterificación consiste en reemplazar el glicerol por un alcohol simple, como el metanol o el etanol, de forma que se produzcan esteres metílicos o etílicos de ácidos grasos. Este proceso permite disminuir la viscosidad del aceite, la cual es principalmente ocasionada por la presencia de glicerina en la molécula. La alta viscosidad del aceite impide su uso directo en motores diesel, desventaja que se supera mediante este proceso. Para lograr la reacción se requieren temperaturas entre 40 y 60°C, así como la presencia de un catalizador, que puede ser la soda o potasa cáustica (NaOH o KOH, respectivamente); **KIRK OTHMER, (2006)**.

Obtención de Biodiesel simplificado.



Fuente: **KIRK OTHMER, (2006)**.

Las características fisicoquímicas del biodiesel son muy similares a las del diesel de petróleo. Gracias a esto, su utilización no requiere mayores cambios en los motores diesel convencionales. Así, puede emplearse directamente en los motores diesel, pudiéndose también utilizar como aditivo, mezclado en cualquier proporción con el diesel. El biodiesel puede ser bombeado, almacenado y manipulado con los mismos procedimientos, infraestructura y equipos empleados con el diesel. El

encendido, rendimiento, torque y potencia de los motores no varía significativamente, pero el consumo puede verse levemente incrementado hasta en un 5%.

2.6.2. CATÁLISIS HOMOGÉNEA Y HETEROGÉNEA.

A. La catálisis homogénea.

Este tipo de catálisis todavía hoy en día se emplea, debido a que asegura tecnología simple y robusta, así como también tasas de reacciones altas. Aunque también ofrece dos desventajas importantes, tanto económica y ambientalmente. Para la producción de biodiesel por transesterificación pueden ser utilizadas ambos tipos de catálisis, básica y ácida, pero la básica resulta mucho más eficiente. La diferencia entre ambas puede ser explicada por los mecanismos de reacciones siguientes:

A.1. Catálisis ácida.

El primer paso consiste en la activación del triglicérido por protonación en el grupo CO donde el oxígeno es más activo, seguido por formación de complejos carbocatiónicos. Por ataque nucleofílico con metanol se forma un complejo de carbono tetraédrico el cual al perder el protón se descompone nuevamente en ésteres grasos de metilo y diglicéridos. La metanolisis procede similarmente con diglicéridos y monoglicéridos. Se puede observar que si hay agua presente producirá ácidos grasos por hidrólisis y como consecuencia decrecerá el rendimiento de ésteres grasos. Por esta razón la concentración de agua en los triglicéridos debe ser reducida abajo del 0.5%.

A.2. Catálisis básica.

La catálisis básica envuelve un mecanismo completamente distinto. Las especies activas en este caso son el alcóxido llamado metóxido. Este puede ser producido in situ por reacción del metanol con el hidróxido liberando agua. El metóxido puede ser introducido como pre-procesamiento desde un alcohol y un metal alcalino. En este caso, la ausencia de agua favorece la tasa de reacción, para después pasar a un pos tratamiento. El primer paso consiste en un ataque nucleofílico del metóxido al grupo carbonilo para dar lugar a la formación de un complejo carboaniónico

tetraédrico. Después, este complejo en transición se descompone en ésteres grasos u anión diglicerol, el cual reacciona con una molécula de alcohol reformando las especies catalíticas. Las otras etapas de transesterificación toman lugar de manera similar. El proceso de reacción global es controlado por el equilibrio químico.

Como se mencionaba anteriormente, la tasa de reacción de catálisis básica comparada a la ácida es mucho mayor en tres órdenes de magnitud. La transesterificación de triglicéridos con metanol a ésteres grasos de metilo implica tres etapas de reacción pasando por la formación de un diglicérido y un monoglicérido intermedios. Para cada etapa la constante de equilibrio puede ser expresada como la relación entre las reacciones directa e inversa.

B) Catálisis heterogénea.

El reemplazo de catalizadores homogéneos por catalizadores sólidos presenta ventajas económicas y tecnológicas obvias. Por esta razón, una considerable investigación se desarrolla en esta área. Una primera aplicación recae en las reacciones de esterificación; **FOGLER, H. S. (1992)**.

Aquí, los catalizadores sólidos con carácter ácido pueden ser utilizados, como las zeolitas, resinas de intercambio iónico, óxido de metales sulfatados, fibras de carbón sulfatadas, etc., sin embargo, solo una pequeña parte de estas pueden ser utilizadas para los fines propuestos.

La segunda área de catálisis heterogénea en la manufactura de biodiesel es la reacción de transesterificación. Aquí nuevamente los catalizadores básicos exhiben mucha más actividad que los catalizadores ácidos, pero encontrar catalizadores efectivos es todavía un gran problema.

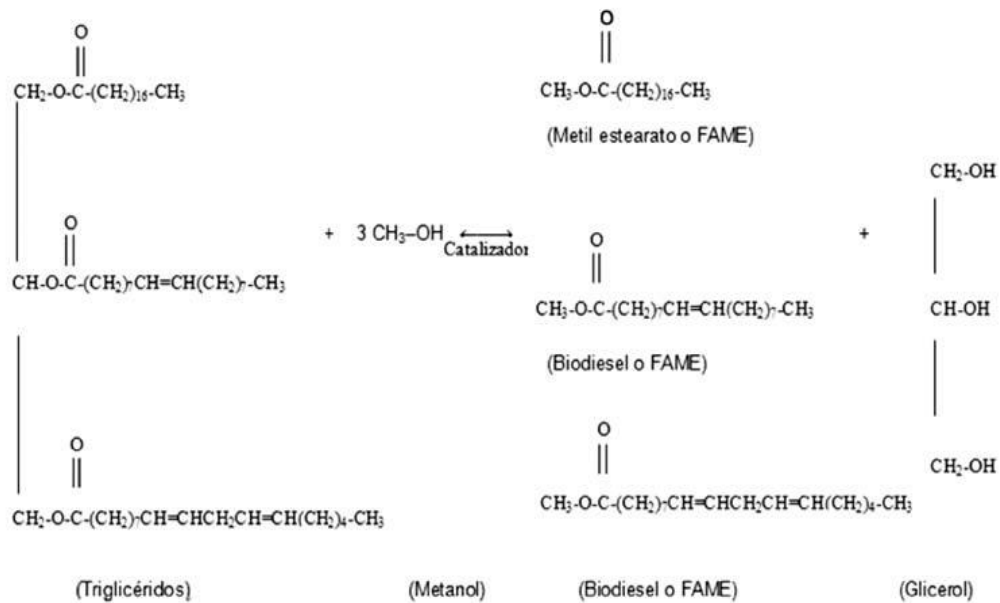
Algunos óxidos de metales sólidos como el magnesio y el zinc pueden ser utilizados directamente pero actúan principalmente por medio de un mecanismo homogéneo, produciendo una gran cantidad de jabones o gliceratos. Una variedad de catalizadores sintéticos basados en óxidos de metales alcalinotérreos (Ca, Mg, Zn, Sn) han sido estudiados mucho pero su robustez y actividad resultan ser insuficientes, **GONZALO A. (2011)**. Como se mencionó anteriormente, se ha

reportado una satisfactoria aplicación industrial en catálisis heterogénea básica, pero no ha sido confirmada por otros estudios.

2.6.3. TRANSESTERIFICACIÓN.

Químicamente, los aceites vegetales se pueden expresar como triglicéridos los cuales reaccionan con un alquilalcohol en presencia de un catalizador, produciendo alquil éster y glicerina. Esta reacción recibe el nombre de transesterificación, que implica la conversión de un éster en otro éster, los alcoholes más recomendados son metanol, etanol y butanol, debido a su bajo costo, el más usado comúnmente es el metanol. Los ésteres resultantes de la reacción reciben el nombre de ácidos grasos y metil-ésteres (FAME o Biodiesel); **PERRY J., (2001)**.

Figura N° 02: Reacción química del proceso de transesterificación.



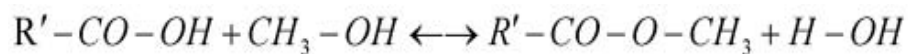
Fuente: Perry J., (2001)

Por otro lado, los triglicéridos están compuestos de tres largas cadenas de ácidos grasos, cuando éstos reaccionan con el alcohol tres cadenas de ácidos grasos son liberadas, éstas se unen con el metanol y forman el Biodiesel. En general, para obtener un equilibrio del lado derecho de la reacción se requiere una gran cantidad

de alcohol. La reacción se lleva a cabo muy cerca del punto de ebullición del alcohol y a una presión ligeramente superior a la atmosférica, con lo cual se asegura que la reacción se lleve a cabo en estado líquido. El catalizador utilizado puede ser hidróxido de sodio, hidróxido de potasio o ácido sulfúrico.

Con respecto a la transesterificación, hay tres aspectos que vale la pena resaltar. Primero, los aceites vegetales usualmente contienen de 2 al 10% de ácidos grasos libres, los cuales pueden reaccionar con alcohol en presencia del catalizador y producir alquil-éster y agua, esta reacción recibe el nombre de esterificación y se describe en la ecuación 1; **KIRK OTHMER, (2006)**.

Ecuación 1

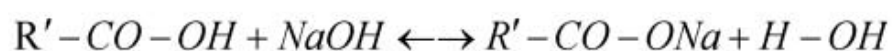


Ambas reacciones, esterificación y transesterificación son reversibles y suceden simultáneamente bajo ciertas condiciones.

Según su polaridad, los ácidos grasos libres se disuelven fácilmente en el alcohol, la esterificación de los ácidos grasos es más rápida que la de los triglicéridos. Una diferencia entre la transesterificación y la esterificación es que la primera reacción puede ser catalizada por catalizadores ácidos o alcalinos, mientras que la esterificación solo puede ser catalizada por medio de catalizadores ácidos.

Los alquil-ésteres solo pueden ser producidos bajo condiciones ácidas. Es decir el sistema catalizador ácido es insensible a los ácidos grasos libres. Segundo, cuando se usan catalizadores alcalinos para llevar a cabo la transesterificación, los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador alcalino, en una reacción conocida como neutralización, produciendo jabón y agua, en esta reacción el catalizador alcalino es consumido como reactante, la neutralización se muestra en la ecuación 2; **KIRK OTHMER, (2006)**.

Ecuación 2

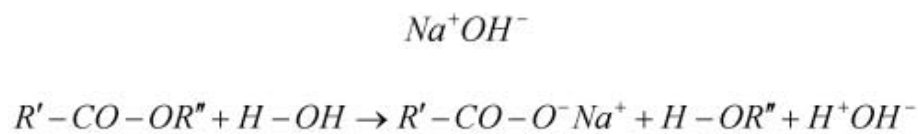


Los productos intermedios resultantes de la transesterificación deben ser eliminados de ser posible completamente ya que estos influyen en la eficiencia del metil-éster (Biodiesel) producto final de la reacción de transesterificación.

En tercer lugar es importante destacar que la presencia de agua interfiere tanto en la esterificación como en la transesterificación.

En presencia de un catalizador ácido, el éster una vez formado puede ser hidrolizado, este proceso se describe en la ecuación (3); **KIRK OTHMER, (2006).**

Ecuación 3.



Esta reacción es reversible. Las ecuaciones 2 y 3, son conocidas como saponificación. Por esta razón, en presencia de agua el sistema de un catalizador alcalino promueve la formación de jabón, en otras palabras, el sistema de catalizador alcalino es más sensible al agua que un sistema de catalizador ácido.

2.6.4. SEPARACIÓN Y LAVADO.

La mezcla de reacción proveniente del cuarto reactor y que contiene el producto (metil éster), el exceso de metanol y la glicerina (subproductos de la reacción) así como una cantidad limitada de jabones (formados en la reacción de saponificación de metilester) es transferida a un separador por gravedad, después de un flash parcial para donde la mayor parte del exceso de metanol es separada de ambos productos.

Antes de entrar en el separador el metilester es calentado en un intercambiador y después enviado a un tanque flash, donde aproximadamente el 60% del metanol contenido es evaporado facilitando la sucesiva operación de separación de glicerina de la fase metilester.

La glicerina (fase pesada) en el fondo del separador (contiene glicerina, parte del exceso de metanol y casi la totalidad de los jabones) es finalmente enviada a la unidad de tratamiento de glicerina, por medio de un tanque y una bomba.

La fase metilester proveniente del separador de metilester – glicerina, contiene trazas de glicerina, jabones y catalizador; estas impurezas son eliminadas a través de dos lavados con agua y ácido y retiradas en un separador centrífugo.

2.6.5. CENTRIFUGACIÓN Y SECADO.

El metilester lavado es enviado, previamente calentado parcialmente en el intercambiador de metilester a la centrífuga.

La fase agua / glicerina que sale de la centrífuga es enviada a la unidad de glicerina.

El metilester proveniente del separador centrífugo, libre de glicerina, catalizador y jabones tiene que ser secado para eliminar los restos de agua y metanol.

El metilester entonces es calentado a través del intercambio térmico con vapor en el calentador de metilester, antes de ir a la columna de destilación de metanol (condiciones de trabajo 130°C aprox. y 0,1 bar donde el agua contenida y el metanol son eliminados).

El metilester proveniente de la columna es transferido a almacenamiento a través de una bomba de extracción, después de ser enfriado hasta 40 – 50 °C en un precalentador y en un intercambiador final de agua de enfriamiento.

El metanol húmedo evaporado dentro de la columna es condensado en un condensador y es enviado a la unidad de rectificación de metanol.

2.7.0. EL PRODUCTO.

El biodiesel es un combustible renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales. La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) define al biodiesel como esterres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de insumos grasos renovables, como los aceites vegetales o grasas animales. El término *bio* hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diesel tradicional derivado del petróleo; mientras que *diesel* se refiere a su uso en motores de este tipo. Como combustible, el biodiesel puede ser usado en forma pura o mezclado con diesel de petróleo.

El biodiesel tiene muchas ventajas sobre el diesel convencional, como son:

- No contiene sulfuros, por lo que disminuye las emisiones de partículas sólidas, y mejora la lubricidad del combustible, incluso en mezclas con proporciones muy pequeñas de biodiesel, lo cual incrementa la vida de los motores.
- Tiene un punto de inflamación relativamente alto (150°C), lo que lo hace menos volátil y más seguro de transportar y manipular que el diesel de petróleo.
- Se puede producir a partir de insumos locales, como cultivos oleaginosos o aceites vegetales reciclados, contribuyendo a reducir la dependencia de importaciones de petróleo, ahorrando divisas y generando puestos de trabajo.
- Es altamente biodegradable en el agua, por lo que en caso de derrame se degradaba a un ritmo muy superior al del diesel convencional e incluso tan rápido como el azúcar. Esto hace del biodiesel un combustible ideal para embarcaciones fluviales y ambientes acuáticos sensibles o protegidos.
- Prácticamente no es tóxico en caso de ingestión, tanto en peces como en mamíferos. Su toxicidad es tan baja que una persona de 80 Kg tendría que tomar alrededor de 1,6 litros de biodiesel para que tenga efectos mortales. La sal común (NaCl) es aproximadamente diez veces más tóxica.
- Contribuye a la reducción del calentamiento global, ya que emite menos CO₂ en su ciclo de vida que el fijado mediante el proceso de fotosíntesis por las plantas usadas para producirlo. Por otro lado, evita liberar el carbono que fue fijado hace millones de años en los combustibles fósiles.
- Reduce substancialmente la emisión de la mayoría de agentes contaminantes. Al ser un combustible oxigenado, el biodiesel tiene una combustión más completa que el diesel, reduciendo las emisiones de SO₂, CO, materia particulado e hidrocarburos no quemados. Por eso su combustión produce menos humo visible y menos olores nocivos y su uso contribuye a disminuir la polución del aire.

Algunas desventajas que pueden darse en su uso son:

- A bajas temperaturas puede empezar a solidificar y formar cristales, que pueden obstruir los conductos del combustible.
- Por sus propiedades solventes, puede ablandar y degradar ciertos materiales, tales como el caucho natural y la espuma de poliuretano. Es por esto que puede ser necesario cambiar algunas mangueras y retenes del motor antes de usar biodiesel en él, especialmente con vehículos antiguos.

2.8.0. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO.

El Cuadro N° 05 muestra los parámetros comparativos físicos y químicos del Biodiesel frente al Diesel.

Cuadro N° 05: Parámetros comparativos del Biodiesel y Diesel		
Combustible	Biodiesel	Los Diesel
Ácidos grasos.	$C_{12} - C_{22}$	$C_{18} - C_{21}$
Poder Calorífico (Kcal/mol)	9 500	10 800
Viscosidad Cin. (cst 40°C)	3.5 – 5.0	3.0 – 4.5
Densidad (g/cm ³)	0.875 – 0.900	0.850
Azufre (%p/p)	0	0.02
Punto de Ebullición (°C)	190 - 340	180 – 335
Punto de Inflamación (°C)	120 – 170	60 – 80
Numero de cetanos	48 – 64	44 - 52
Relación aire/combustible	13 -14	14 - 16
Fuente: KNOTHE, G. DUNN, R. y BAGBY, M. (2006).		

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1.0. EL TIPO DE INVESTIGACIÓN.

El estudio de investigación, es experimental propiamente dicho (dentro de lo virtual) y el diseño del estudio es descriptivo simple (caracterización de la materia prima, el proceso, el producto y los residuos)

3.2.0. EL DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

El esquema del diseño es descriptivo simple y tiene la siguiente estructura:

$$M \rightarrow O$$

Donde:

M: Es el modelo virtual propuesto en el estudio.

O: Es la observación en general

3.3.0. VARIABLES DE ESTUDIO.

VARIABLE INDEPENDIENTE

Simulación de parámetros en la elaboración de Biodiesel

VARIABLE DEPENDIENTE

Análisis económico – ambiental

3.4.0. INDICADORES.

3.4.1. DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE:

Simulación de parámetros en la elaboración de biodiesel

1. Presión
2. Temperatura
3. Concentración de los reactantes
4. Estequiometria
5. Cinética de la reacción bioquímica
6. Concentración de los productos

7. Catalizador.

8. Conversión

3.4.2. DE LA VARIABLE DEPENDIENTE.

Análisis económico y ambiental:

Análisis económico

1. Capital de inversión (\$)
2. Costo operativos (\$/año)
3. Velocidad de producción (\$/ MP/año)
4. Costo por unidad de producción (\$/Kg de MP)
5. Ingresos (\$/.año)
6. Margen bruto (%)
7. Retorno de la inversión (años)
8. Tasa interna de retorno (%)
9. Valor neto presente (entre el 10% al 12% de interés) (\$)

Análisis ambiental

1. Residuos sólidos
2. Residuos líquidos
3. Residuos orgánicos
4. Residuos gaseosos (emisiones)

3.5.0. OPERACIONALIDAD DE LAS VARIABLES.

Análisis Ambiental.

Se entiende por análisis ambiental la comparación de los valores o índices de contaminación que produce un determinado proceso físico o químico al medio ambiente en sus distintos aspectos. El estado a través del Ministerio del Medio Ambiente regula las leyes ambientales y norma los índices de contaminación mediante estándares o niveles de referencia permitidos sean estos nacionales o internacionales; **MINAN, (2011).**

Análisis Económico.

Es la evolución o consecuencia de los principales indicadores que afectan a los mercados y la economía en general a mediano y largo plazo. Para el caso del

proyecto los indicadores son: Capital de inversión, costos operativos, velocidad de producción, costo por unidad de producción, ingresos, margen bruto, retorno de la inversión, tasa interna de retorno y valor neto presente, así como el costo beneficio; **ECONOMIC ANALYSIS OF PROJECTS, (2011).**

Análisis Técnico.

Es el procedimiento que consiste en estudiar las partes de la elaboración de un producto que la integran y sus relaciones en el proceso industrial.

Capital de inversión.

Es una forma de financiamiento proporcionada por la mayor parte de las instituciones financieras, e incluso por las financieras más pequeñas, siendo aplicable a todas las situaciones donde exista un crecimiento potencial. Como fuente de financiamiento, el capital de inversión es bienvenido tanto para las pequeñas como medianas empresas, porque puede atenuarles la pesada carga del costo de financiamiento en su desarrollo empresarial; **ECONOMIC ANALYSIS OF PROJECTS, (2011).**

Catalizador.

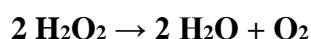
Es el proceso por el cual se aumenta o disminuye la velocidad de una reacción química. Por ejemplo, los que reducen la velocidad de la reacción son denominados “catalizadores negativos” o inhibidores. A su vez, las sustancias que aumentan la actividad de los catalizadores son denominados catalizadores positivos o promotores, y las que los desactivan son denominados venenos catalíticos.

La “producción” de los productos químicos industriales más importantes implica a la catálisis. Por ejemplo, en la reducción del etino a eteno, el catalizador paladio (Pd) es "envenenado" parcialmente con acetato de plomo (II) ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$). Sin la desactivación del catalizador, el eteno producido se reducirá posteriormente a etano.

La catálisis es importante para muchos aspectos de las ciencias del medio ambiente, por ejemplo, el convertidor catalítico de los automóviles y la dinámica del agujero de ozono. Las reacciones catalíticas son las preferidas en la química verde para un

medioambiente amigable debido a la reducida cantidad de residuos que genera en lugar de las reacciones estequiometrias en las que se consumen todos los reactivos y se forman más productos secundarios. El catalizador más común es el protón (H^+). Muchos de los metales de transición y los complejos de los metales de transición se utilizan en la catálisis. Los catalizadores llamados enzimas son importantes en Biología.

El catalizador funciona proporcionando un camino de reacción alternativo al producto de reacción. La velocidad de la reacción aumenta a medida que esta ruta alternativa tiene una menor energía de activación que la ruta de reacción no mediada por el catalizador. La descomposición del peróxido de hidrógeno para dar agua y oxígeno es una reacción que está fuertemente afectada por los catalizadores:



Esta reacción está favorecida, en el sentido de que los productos de reacción son más estables que el material de partida, sin embargo, la reacción no catalizada es lenta. La descomposición del peróxido de hidrógeno es de hecho tan lenta que las soluciones de peróxido de hidrógeno están disponibles comercialmente. Tras la adición de una pequeña cantidad de dióxido de manganeso, el peróxido de hidrógeno reacciona rápidamente de acuerdo a la ecuación anterior. Este efecto se ve fácilmente por la efervescencia del oxígeno. El dióxido de manganeso puede ser recuperado sin cambios, y volver a utilizarse de forma indefinida, y por lo tanto no se consume en la reacción. En consecuencia, el dióxido de manganeso cataliza esta reacción; **GONZALES ANGEL, (2001)**.

Cinética química.

Velocidad con el cual se lleva a cabo una transformación química de sustancias iniciales (reactantes) en sustancias finales (productos). La cinética química es un área de la fisicoquímica que estudia la rapidez de la reacción, cómo cambia la rapidez de reacción bajo condiciones variables y qué eventos moleculares se efectúan mediante la reacción general. La cinética química es un estudio puramente

empírico y experimental; la química cuántica nos permite conocer los mecanismos de la reacción, lo que se conoce como dinámica química.

El objeto de la cinética química es medir las velocidades de las reacciones químicas y encontrar ecuaciones que relacionen la velocidad de una reacción con variables experimentales.

Se encuentra experimentalmente que la velocidad de una reacción depende mayormente de la temperatura y las concentraciones de las especies involucradas en la reacción. En las reacciones simples, sólo la concentración de los reactivos afecta la velocidad de reacción, pero en reacciones más complejas la velocidad también puede depender de la concentración de uno o más productos. La presencia de un catalizador también afecta la velocidad de reacción; en este caso puede aumentar su velocidad. Del estudio de la velocidad de una reacción y su dependencia con todos estos factores se puede conocer los mecanismos en detalle para la transformación de los reactivos a productos.

Las reacciones se pueden clasificar cinéticamente en homogéneas y heterogéneas. La primera ocurre en una fase y la segunda en más de una fase. La reacción heterogénea depende del área de una superficie ya sea la de las paredes del vaso o de un catalizador sólido; **GONZALES ANGEL, (2001)**.

Concentración.

En química, la concentración de una sustancia es la proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolvente, donde el soluto es la sustancia que se disuelve, el disolvente la sustancia que disuelve al soluto y la disolución es el resultado de la mezcla homogénea de las dos anteriores. A menor proporción de soluto disuelto en el disolvente, menos concentrada está la disolución y a mayor proporción del soluto mayor concentración. Su unidad viene expresada en mol/l, mg/l o ppm; **GONZALES ANGEL, (2001)**.

Convergencia del sistema.

Es la acción o efecto que en sucesiones y series numéricas. Un sistema posee un límite de interacciones para encontrar una solución. Una sucesión es convergente cuando existe y es finito. Si dicho límite es infinito, la sucesión es divergente, y si no existe, la sucesión es oscilante; **HIMMELBLAU D. Y BISCHOFF K., (2001).**

Costo por unidad de producción.

Expresa la magnitud de los recursos materiales, laborales y monetarios necesarios para alcanzar una unidad de volumen de producción con una determinada calidad.

El costo por unidad de producción, está constituido por el conjunto de los gastos relacionados con la utilización de los activos fijos tangibles, las materias primas y materiales, el combustible, la energía y la fuerza de trabajo en el proceso de producción, así como otros gastos relacionados con el proceso de fabricación, expresados todos en términos monetarios. Su unidad de medida Dólares por Kilogramo de materia prima; **ECONOMIC ANALYSIS OF PROJECTS, (2011).**

Costos operativos.

Se llaman costos operativos de un proyecto a aquellos que empiezan a gastarse una vez implementado el proyecto lo que significa que los gastos tienen que ser lo suficiente capaces de mantenerse durante la vida programada, es decir, los costos operativos sirven para poner el funcionamiento durante la vida útil del proyecto, su unidad de medida es Dólares por año; **ECONOMIC ANALYSIS OF PROJECTS, (2011).**

Estequiometria.

La estequiometria es la ciencia que mide las proporciones cuantitativas o relaciones de masa de los elementos químicos que están implicados en una reacción química. La estequiometria, es el cálculo de las relaciones cuantitativas entre los reactivos y productos en el transcurso de una reacción química. Estas relaciones se pueden deducir a partir de la teoría atómica, aunque históricamente se enunciaron sin hacer referencia a la composición de la materia, según distintas leyes y principios; **GONZALES ANGEL, (2001).**

Índices de contaminación.

Son indicadores propuestos por organismos internacionales o nacionales que regulan las normas y las cantidades que no sean nocivos para la naturaleza y que ponga en peligro la vida y la calidad de vida; **MINAN, (2011).**

Ingresos anuales.

Son todos los ingresos anuales de la producción de un producto determinado. Su unidad de medida es dólares por año; **ECONOMIC ANALYSIS OF PROJECTS, (2011).**

Margen bruto.

Es la diferencia entre el precio de venta (sin IVA) de un producto elaborado y el precio de elaboración del ese mismo producto. Este margen bruto, que suele ser unitario, es un margen de beneficio antes de impuestos. Se expresa en unidades monetarias/unidad vendida. Su unidad de medida es porcentual; **ECONOMIC ANALYSIS OF PROJECTS, (2011).**

Porcentaje de conversión.

Es la relación existente entre la masa del producto principal de una reacción química y la masa total multiplicado por cien. Se expresa mediante la ecuación siguiente; **OXFORD – COMPLUTENSE, (2001):**

$\% \text{ Conversión} = (\text{Masa del producto principal} / \text{Masa total}) (100).$

Presión.

Definida como la fuerza que ejerce una sustancia sólida, líquida o gaseosa sobre un área determinada.

En física, la presión (símbolo p) es una magnitud física escalar que mide la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, y sirve para caracterizar como se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie.

En el Sistema Internacional la presión se mide en una unidad derivada que se denomina pascal (Pa) que es equivalente a una fuerza total de un newton actuando uniformemente en un metro cuadrado. En el Sistema Inglés la presión se mide en una unidad derivada que se denomina libra por pulgada cuadrada (pound per square

inch) psi, que es equivalente a una fuerza total de una libra actuando en una pulgada cuadrada; **OXFORD - COMPLUTENSE, (2001).**

Proceso a presión constante.

El calor intercambiado en el proceso es equivalente a la variación de entalpía de la reacción. $Q_p = \Delta H$; **OXFORD - COMPLUTENSE, (2001).**

Proceso a volumen constante.

El calor que se intercambia en estas condiciones equivale a la variación de energía interna de la reacción. $Q_v = \Delta U$. "En una reacción química expresada como la suma (o diferencia) algebraica de otras reacciones químicas, puesto que es función de estado, la entalpía de reacción global es también la suma (ó diferencia) algebraica de las entalpías de las otras reacciones; **OXFORD - COMPLUTENSE, (2001).**

Reactantes.

Es el conjunto de sustancias químicas que participarán en una reacción química al combinarse entre sí; **COTT FOGLER H. (2008).**

Productos.

Es toda sustancia que interactúa con otra en una reacción química que da lugar a otras sustancias de propiedades, características y conformación distinta, denominadas productos de reacción o simplemente productos; **COTT FOGLER H. (2008).**

Reactivo en exceso.

Sustancia que se encuentra en mayor cantidad y que cuando reacciona con la sustancia limitante una cantidad no participa en la reacción; **COTT FOGLER H. (2008).**

Reactivo limitante.

El que se encuentra en menor cantidad en una reacción química y de ella depende la cantidad de producto obtenido; **COTT FOGLER H. (2008).**

Residuos Industriales.

En el proceso de manufactura de algún producto se generan residuos de tres tipos: residuos sólidos, líquidos y gaseosos. La industria genera una gran cantidad de

residuos muchos de los cuales son recuperables, reusables y reciclables; **GOMEZ OREA DOMINGO, (2003).**

Retorno de la inversión.

Es un indicador económico que nos señala en cuantos años se recuperara el capital empleado al poner en operatividad un proyecto de inversión que puede ser una empresa manufacturera o de servicios; **WESTCOTT RUSS, (2003).**

Simulación.

Es una técnica para analizar y estudiar sistemas complejos. Nos permite reunir información pertinente sobre el comportamiento del sistema porque simula un modelo computarizado. Según Winston (1994) se puede definir la simulación como la técnica que imita el funcionamiento de un sistema del mundo real cuando evoluciona con el tiempo- la simulación no es una técnica de optimización, sino una técnica para estimar las medidas de desempeño del sistema modelado. Un modelo de simulación toma la forma de un conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema, expresado como relaciones matemáticas o lógicas entre los objetos de interés del sistema. En contraste con las soluciones matemáticas la simulación influye en la ejecución del modelo en una computadora, que genera muestras representativas de las mediciones de desempeño como un experimento de muestreo para un sistema real; **G. HONTY, CLAES (2007).**

Tasa interna de retorno.

Definida como la tasa de interés con la cual el valor actual neto o valor presente neto (VAN o VPN) es igual a cero. El VAN o VPN es calculado a partir del flujo de caja anual, trasladando todas las cantidades futuras al presente. Es un indicador de la rentabilidad de un proyecto, a mayor TIR, mayor rentabilidad.

Se utiliza para decidir sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión. Para ello, la TIR se compara con una tasa mínima o tasa de corte, el coste de oportunidad de la inversión (si la inversión no tiene riesgo, el coste de oportunidad utilizado para comparar la TIR será la tasa de rentabilidad libre de riesgo). Si la tasa de rendimiento del proyecto - expresada por la TIR- supera la tasa de corte, se acepta la inversión; en caso contrario, se rechaza. Su unidad de medida es porcentual; **WESTCOTT RUSS, (2003).**

Temperatura.

Medida de la intensidad del calor. La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente o frío. Por lo general, un objeto más "*caliente*" que otro puede considerarse que tiene una temperatura mayor, y si es frío, se considera que tiene una temperatura menor. En física, se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica.

Dicho lo anterior, se puede definir la temperatura como la cuantificación de la actividad molecular de la materia.

Multitud de propiedades fisicoquímicas de los materiales o las sustancias varían en función de la temperatura a la que se encuentren, como por ejemplo su estado (sólido, líquido, gaseoso, plasma), su volumen, la solubilidad, la presión de vapor, su color o la conductividad eléctrica. Así mismo es uno de los factores que influyen en la velocidad a la que tienen lugar las reacciones químicas.

La temperatura se mide con termómetros, los cuales pueden ser calibrados de acuerdo a una multitud de escalas que dan lugar a unidades de medición de la temperatura. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura es el kelvin (K), y la escala correspondiente es la escala Kelvin o escala absoluta, que asocia el valor "cero kelvin" (0 K) al "cero absoluto", y se gradúa con un tamaño de grado igual al del grado Celsius. Sin embargo, fuera del ámbito científico el uso de otras escalas de temperatura es común. La escala más extendida es la escala Celsius (antes llamada centígrada); y, en mucha menor medida, y prácticamente sólo en los Estados Unidos, la escala Fahrenheit. También se usa a veces la escala Rankine (°R) que establece su punto de referencia en el mismo punto de la escala Kelvin, el cero absoluto, pero con un tamaño de grado igual al de la Fahrenheit, y es usada únicamente en Estados Unidos, y sólo en algunos campos de la ingeniería; **COOT FOGLER H. (2008).**

Termodinámica de la reacción.

Consiste en el estudio de las transformaciones que sufre la energía calorífica en las reacciones químicas, surgiendo como una aplicación de la termodinámica a la química; **COOT FOGLER H. (2008).**

Valor actual neto.

Es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto; **COSS BU, (2010).**

Velocidad de producción.

Es una medida que determina la conversión de los reactantes en productos bajo condiciones de parámetros físicos, químicos o biológicos. Su unidad de medida es Dólares por materia prima por año; **HIMMELBLAU D. Y BISCHOFF K., (1992).**

3.6.0. POBLACION Y MUESTRA.

La población que se estudiará en el presente estudio para el aceite de la semilla de algodón pertenece al género *Gossypium* y la muestra es la especie *Gossypium herbaceum*, cuya fórmula es $C_{18}H_{32}O_2$

3.7.0. MATERIALES E INSTRUMENTOS.

En el estudio se ha utilizado, material bibliográfico como tesis, libros, enciclopedias, manuales del software SuperPro Designer V6.0, **INTELLIGEN INC., (2009)** e información digital por internet.

El software de SuperPro Designer V6.0, es un programa desarrollado por Intelligen INC, y la computadora debe contar con un disco duro entre 150 MB para mínima instalación hasta 350 MB para una completa instalación que incluye la ayuda en línea y ejemplos.

Además se ha utilizado una computadora personal con velocidad de procesamiento de CORE-I 7, con 8 GB-RAM y sistema operativo Windows XP.

3.8.0. SISTEMA DE SIMULACIÓN.

En este acápite, se considera el desarrollo el modelo dentro del contexto del problema definido, a través de los diagramas de flujos, la estequiometria de la reacción, el equipamiento y su dimensionamiento para una carga de materia prima, la elaboración del software aplicativo, la introducción de los parámetros (carga másica, temperatura, presión, cinética química), la verificación o validación del proceso elaborado por medio de la experimentación o corrida de datos con un número de iteraciones y su convergencia (reproducibilidad).

3.9.0. DEFINICIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

El modelo está basado en las propiedades del Biodiesel, mezcla de ésteres de ácidos grasos, que varían según la materia prima a partir del cual, se obtuvo (aceites vegetales nuevos o usados de distinto origen o grasas animales). Es por ello, que las normas indican un rango admisible en el valor de sus propiedades. En la literatura, existen trabajos publicados recientemente sobre predicciones de propiedades del Biodiesel en función de las propiedades de los ésteres que lo constituyen, pero son válidas para un pequeño rango de temperatura. En este trabajo, se ha tomado como parámetros en los cálculos teóricos la estimación promedio de la densidad y la temperatura en base a su composición química, que varía desde la temperatura ambiente hasta la crítica. Los modelos obtenidos parten de las propiedades de los compuestos puros y se calculan las propiedades del Biodiesel usando reglas de mezclado, mediante las propias herramientas del software empleado. En el anexo 01 se presenta el modelo de la reacción estequiométrica siendo el proceso de tipo continuo.

3.10.0. DIAGRAMAS DE FLUJOS: OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE ALGODÓN.

Se ha definido el sistema en tres secciones: primaria y refinación del biodiesel y purificación del glicerol, como se aprecian en los diagramas 01, 02 y 03.

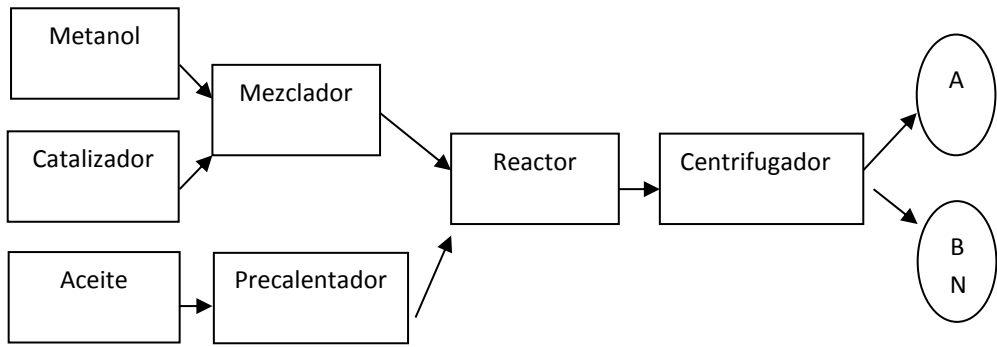


Diagrama 01 Sección de reacción primaria

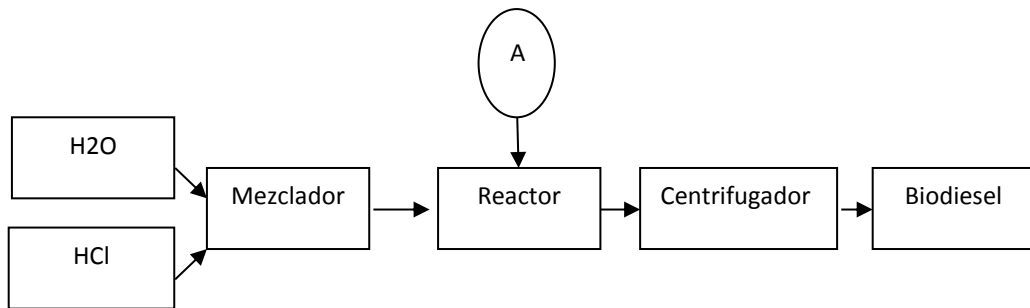


Diagrama 02 Sección de reacción de refinación

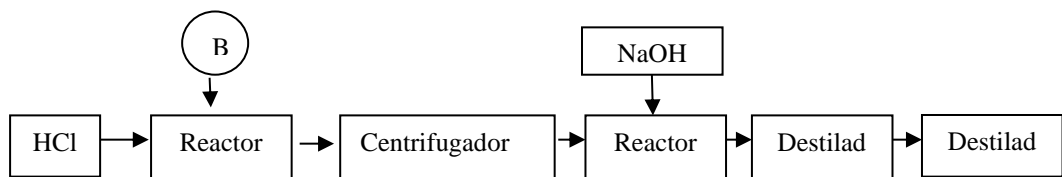


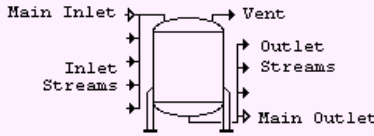
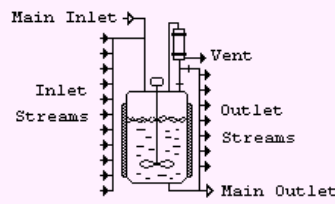
Diagrama 03: Sección de purificación de glicerol

Fuente: Elaboración propia, en base a los fundamentos de KIRK. OTHMER, (2006).

3.11.0. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.

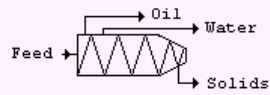
Todos los equipos que se describen se encuentran diseñados y construidos mediante materiales conocidos en la industria de manufactura con las siglas CS materiales y

el SS316 que en inglés significa materiales completamente semi acabados (CS) y stainless steel (acero inoxidable) respectivamente cuyas características son: no ferrosos, no magnéticos, con propiedades de elasticidad, baja densidad, resistentes a la corrosión, enrolado, presión, baja conductividad, entre otros. Son los siguientes:

Batch Storage in Vertical-on-Legs Tank Procedure	
<p>Icon</p> 	<p>General Description</p> <p>This unit procedure model simulates batch-wise storage in a vertical-on-legs tank. A number of other operations can be handled as part of this procedure.</p>
Vessel Procedure in a Reactor	
<p>Icon</p> 	<p>General Description</p> <p>This procedure simulates sets of operations that take place in a stirred tank reactor. The operations may take place sequentially, simultaneously, or relative to some reference operation or time.</p>

Decanter Centrifugation Procedure

Icon



General Description

This unit procedure simulates a decanter centrifuge for solid-liquid or liquid-liquid separation. The separation is based on density difference between the two phases.

2-Stream Bulk Flow Mixing Procedure

Icon

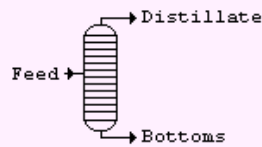


General Description

This procedure can represent any scheme that mixes two bulk flow streams and cannot be modeled (or is not necessary to be modeled) in more detail.

Distillation Column

Icon



1x1 Continuous Pass Through Generic Box Procedure

Icon



General Description

This unit procedure can be used to represent continuous processing steps that are not explicitly available in the current version of Pro-Designer. It can handle simple pass-through steps.

CF Pumping Procedure

Icon

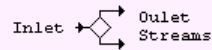


General Description

This unit procedure models transport of fluids using a centrifugal pump.

2-Way Bulk Flow Splitting Procedure

Icon

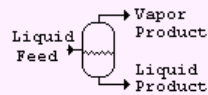


General Description

This procedure can represent any scheme that splits two bulk flow streams, and cannot be modeled (or is not necessary to be modeled) in more detail.

Flash Procedure

Icon



General Description

This unit procedure simulates separation of volatile compounds in a flash drum. Several thermo model options are available for handling the VLE calculations.

Cooling Procedure

Icon



General Description

This unit procedure models the decrease in temperature of a continuous flow or batch stream.

Heating Procedure

Icon



General Description

This unit procedure models the increase in temperature (heating) of a continuous flow or batch stream.

Fuente: INTELIGEN, INC (2009).

3.12.0. VERIFICACIÓN.

El proceso de verificación consiste en comprobar si el modelo para la simulación cumple con los requisitos del diseño establecido. Se trata de evaluar que el modelo mediante las interacciones converge en el sistema en un número finito de 500 interacciones.

3.13.0. VALIDACIÓN.

A través de esta etapa se ha valorado las diferencias entre el funcionamiento del simulador y el sistema real que se está tratando de simular. Los criterios para validar el modelo fueron:

1. La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación (Ing. Victor García Pérez, Mg. – FIQ – UNAP, Ing. Fernando Salas Barrera, Mg. – FISI-UNAP, Ing Carlos Avalos Ruiz, Mg. – FISI – UNAP)
2. La exactitud con los que se repiten los resultados.
3. La comprobación del modelo matemático mediante la corrida de los datos.
4. La aceptación de las personas que han intervenido en la verificación de los resultados del experimento de simulación.

3.14.0. ENSAYOS SIMULADOS O EXPERIMENTACIÓN VIRTUAL.

En esta etapa del estudio se interpreta los resultados que genera la simulación y en base a estos resultados se tomo una decisión. Es obvio que los resultados de una simulación ayudan a soportar decisiones en cada etapa de la estructura del sistema. Para comprobar se tuvo que verificar la repetitividad o congruencia de la información cada vez que se realizó la ejecución del programa.

3.15.0. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

En el tratamiento de los datos, se utilizó las propias herramientas que integran el programa SuperPro Designer V6 como son: Procesos, balance de materia y energía, descripción de equipos, programación del proceso, flujo de caja, análisis económico, análisis de rendimiento del proceso, análisis ambiental, entre otros.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1.0. PRESENTACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN.

El sistema de producción de biodiesel consiste en tres secciones que son: la sección de reacción primaria, la sección de refinación de biodiesel y la sección de purificación de glicerol.

4.1.1. Sección de reacción primaria.

Los equipos que integran la **sección de reacción primaria** son los siguientes:

Tres tanques de almacenamiento, el primero para el metanol (TNK 101), el segundo para el catalizador (TNK 102) y el tercero para el aceite de algodón (TNK 103).

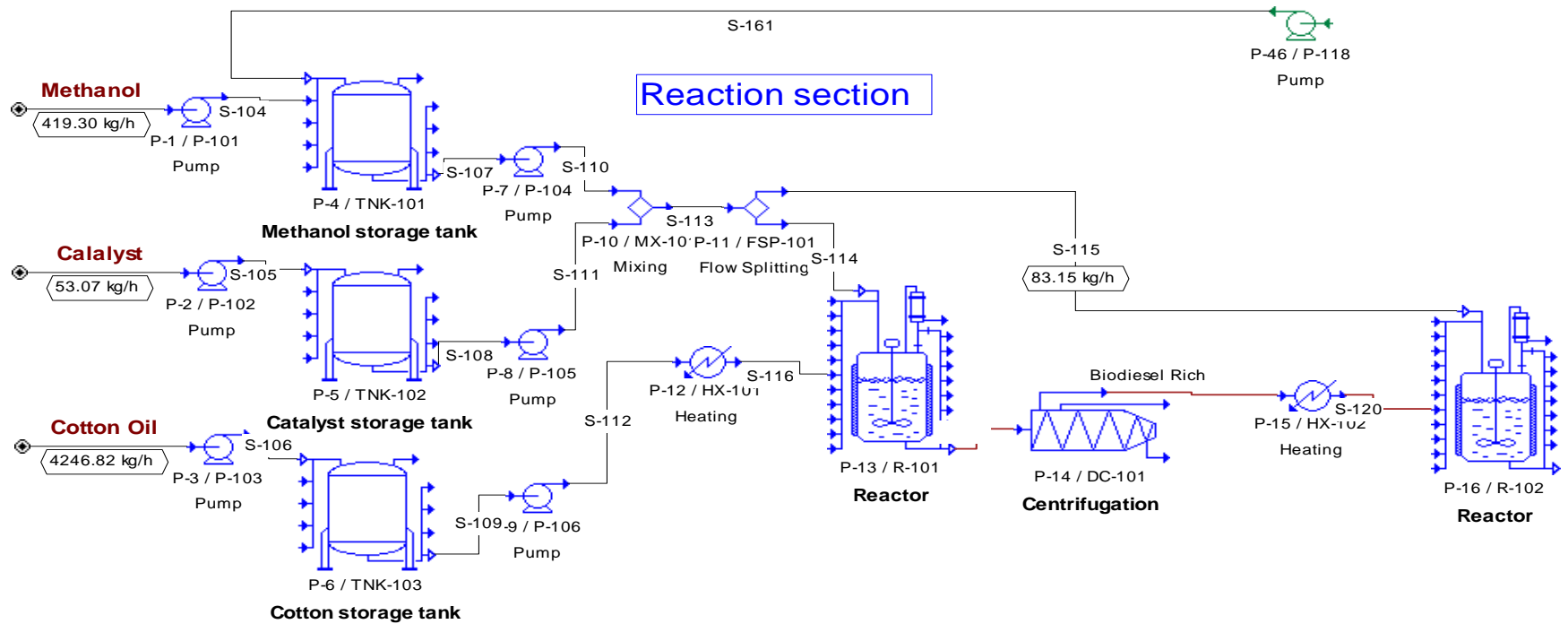
Dos reactores para la conversión (R-101 y R-102)

Una centrifuga (DC -101)

Otros equipos de operaciones como bombas, mezclado, separación y calentamiento

En esta sección (figura 03) el aceite de algodón con una densidad promedio de 897.8 g/l es calentado a 60 °C y directamente vertido al reactor R-101 la reacción es continua bajo condiciones adiabáticas a una presión de 65 psi. (62). El metanol y el catalizador son mezclados mediante el mezclador MX-101 y separado el flujo en el FSP 101. Un 90 % es vertido al primer reactor R-101 y el 10 % restante al segundo Reactor R-102. En este reactor también la reacción es continua bajo condiciones adiabáticas a una presión de 15 psi (62) y basado en el modelo estequiométrico, el metanol reacciona con el aceite de algodón produciendo biodiesel y glicerol. Los productos son removidos a la misma velocidad de carga de los reactantes y el catalizador. El tiempo promedio de residencia es de una hora. La carga de salida del reactor es transferido a una centrifuga (DC-101) para separar el biodiesel, el aceite de algodón que no ha reaccionado y el glicerol. Seguidamente se envía el glicerol a la unidad de tratamiento, que es la sección de purificación del glicerol. El biodiesel rico y el aceite de algodón no convertido son enviados al segundo reactor (R 102) para reaccionar con el 10% de metanol separado el flujo en el FSP 101. Las condiciones de reacción son los mismos.

Figura N° 03: Equipos y diagrama de flujo de la sección de reacción primaria.



Fuente: Elaboración propia, en base a la sección de reacción primaria (2014).

4.1.2. Sección de refinación de biodiesel.

En la **sección de reacción de refinación**, se cuenta con los siguientes equipos:

Dos centrifugas continuas (DC – 102 y el DC – 104)

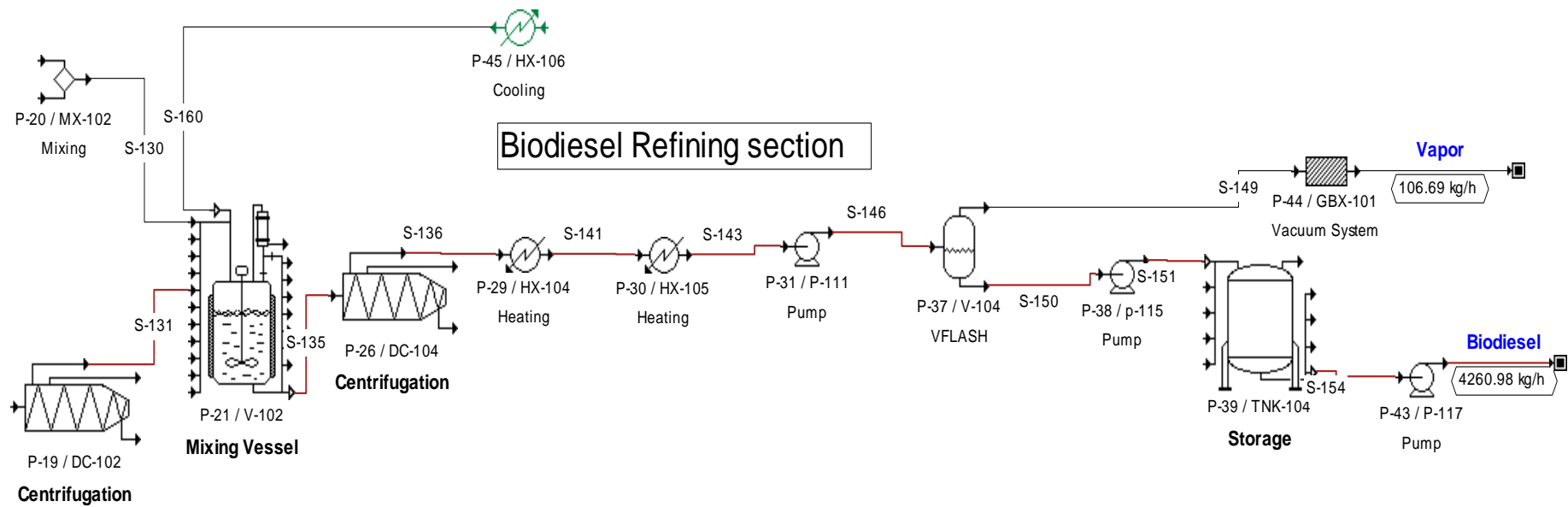
Un tanque mezclador (V -102)

Un sistema seco al vacio (V-104 y el GBX – 101)

Un tanque de almacenamiento del biodiesel (TNK-104)

El biodiesel impuro es lavado con agua acidificada a un pH de 4.5 en un tanque mezclador (V – 102) para neutralizar el catalizador y algo de acido graso libre. Luego el material es enviado a un centrifugador continuo (CD – 104) para separar el biodiesel de la fase acuosa y este enviado a la unidad de purificación del glicerol. El biodiesel impuro debe contener como máximo 0.05 % de W/W agua. Esto se consigue mediante el sistema de seco al vacio (V – 104 y GBX – 101). El contenido de agua debe estar comprendió entre 0.04 % y 2.3 %.

Figura N° 04: Equipos y diagrama de flujo de la sección de reacción de refinación de Biodiesel.



Fuente: Elaboración propia, en base a la sección de reacción de refinación de biodiesel (2014).

4.1.3. Sección de purificación del glicerol.

En la **sección de purificación del glicerol**, los equipos son;

Dos tanques de mezclado (V - 101 y V - 103)

Una centrifuga (CD – 103)

Dos columnas de destilación (C - 101 y C- 102)

Dos tanques de almacenamiento (TNK - 105 y TNK- 106)

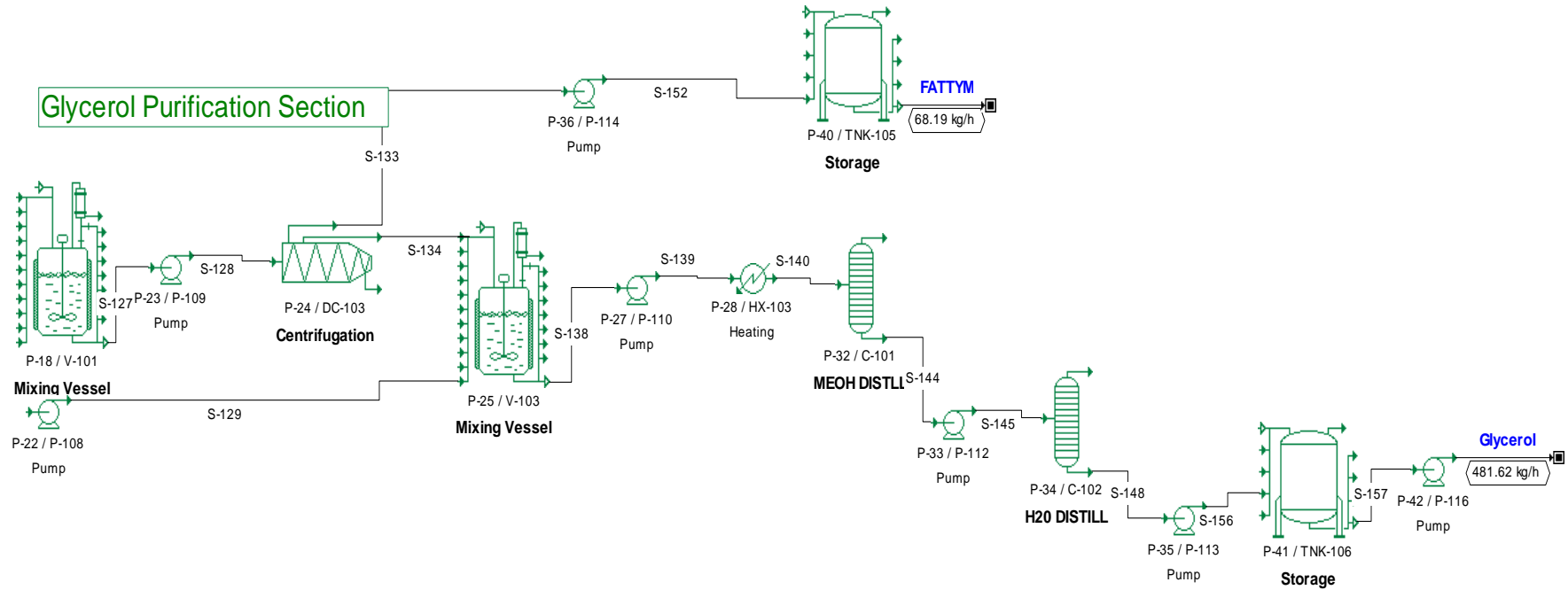
En esta sección se trata de recuperar el metanol para nuevamente entrar en la sección de reacción primaria. El glicerol producto de la reacción de trans-esterificación requiere una purificación al 80% de glicerol puro para uso industrial.

Los flujos de ácidos grasos (S - 137) y glicerol (S - 119 y S - 132) que salen de los reactores son mezclados y tratados con HCl en el tanque de mezclado (V -101) para obtener ácidos grasos libres que seguidamente son removidos por centrifugación (DC - 103) y los ácidos grasos separado y colocado en un depósito.

El glicerol es neutralizado con hidróxido de sodio (NaOH) en el tanque de mezclado V – 103. El metanol contenido en el glicerol es separado en el destilador (C - 101) y reciclado al primer reactor (R-

101). Finalmente el glicerol es concentrado a un 80 % de riqueza en el siguiente destilador (C - 102) y el agua es reciclada al tanque de mezclado (V- 102).

Figura N° 05: Equipos y diagrama de flujo de la sección de purificación de glicerol.



Fuente: Elaboración propia, en base a la sección de purificación del glicerol, (2014).

3.2.6. BALANCE DE MATERIALES.

Para la base de cálculo se ha tomado como criterio de 330 días de operación al año, con un tiempo de operación de 7920 h que equivale a 24 h por día en tres turnos, con un rendimiento anual de 38 945 toneladas de Biodiesel. Para efectos del balance de materiales en el siguiente cuadro N° 06 se encuentran las densidades de las sustancias reactantes.

Cuadro N° 06: Densidad de las sustancias.		
Sustancias		Densidad (g/L)
Metanol		694.12
Aceite de algodón		897.80
Catalizador	Metanol	694.12
	NaOCH ₃	231.37

Fuente: Elaboración propia, en base a la teoría, (2014).

En la **sección de reacción primaria**, el ingreso de la materia prima fue como se indica: 419.30 Kg/h de metanol, 53.07 Kg/h de catalizador (75% metanol y 25% Metóxido de sodio) y 4246.82 Kg/h de aceite de algodón. En el siguiente cuadro N° 07 se aprecian los flujos de masas de entrada y salida.

Cuadro N° 07: Balance de materiales sección de reacción primaria			
Código	Descripción	Carga (Kg/h)	
		Entrada	Salida
TNK-101	Tanque de almacenamiento metanol	419.30	
TNK-102	Tanque de almacenamiento Catalizador	53.07	
TNK- 103	Tanque de almacenamiento Aceite algodón	4 246.82	
P-118	Reflujo 1	351.05	
FSP- 101	Separador de flujo (metanol)		82.34
DC - 101	Centrifuga (Biodiesel rico)		4 410.19
DC - 101	Centrifuga (Glicerol pobre)		577.71
	Subtotal	5 070.24	5 070.24

Fuente: Elaboración propia, en base a la figura N° 03; (2014)

La carga másica a la entrada de la **sección de refinación de biodiesel**, es de 82.34 kg /h de metanol, 4 410. 18 Kg/h de biodiesel impuro, 7.07 Kg/h de HCl y 1 022.9 Kg/H de agua. A la salida se obtiene 4 261.08 Kg/h de Biodiesel rico, 1 154.78 Kg/h de glicerol y 106.63 Kg/h de agua. En el cuadro N° 08 se muestra el flujo de

entrada y salida de materiales. El porcentaje de conversión total es de 90.29 % que es el resultado de la relación entre la masa del biodiesel obtenido y la masa total (suma de masas de entrada al sistema sin contar el reflujo) que equivale a 4 719.19 Kg/h multiplicado por 100.

Cuadro N° 08: Balance de materiales sección de refinación de biodiesel			
Código	Descripción	Carga (Kg/h)	
		Entrada	Salida
FSP- 101	Separador de flujo metanol	82.34	
DC - 101	Biodiesel rico	4 410.18	
MX - 102	H2O	166.08	
MX -102	HCL	7.07	
HX - 106	H2O (Fría)	856.82	
P - 108	Bomba de Reflujo		
DC - 102	Centrifuga (Glicerol)		94.40
DC - 104	Centrifuga (Glicerol)		1 060.38
GBX - 101	Sistema al vacío H2O (vapor)		106.63
P - 117	Bomba (Biodiesel rico)		4 261.08
	Subtotal	5 522.49	5 522.49

Fuente: Elaboración propia, en base a la figura N° 04; (2014).

En la **sección de purificación de glicerol**, se tiene a la entrada 1 732.49 Kg/h glicerol impuro, una carga de 23.22 Kg/h HCl, para remover los ácidos grasos y 1.8 Kg/h de NaOH para neutralizar, de tal modo que a la salida de la sección se tiene 68.19 Kg/h de borra (ácido graso libre), 351.05 Kg/h de metanol, 856.82 Kg/h de agua en forma de vapor y 481.45 Kg/h de glicerol al 80% Kg/Kg de agua.

En el cuadro N° 09 se muestra ordenadamente el balance de materiales de la sección de purificación del glicerol, y en el cuadro N° 10 se tiene el balance de materia para la obtención de Biodiesel en kg/h.

Cuadro N° 09: Balance de materiales de la sección de purificación de glicerol			
Código	Descripción	Carga (Kg/h)	
DC -101	Centrifuga glicerol 1	577.71	
DC -102	Centrifuga glicerol 2	94.4	
DC -103	Centrifuga glicerol 3	1 060.38	
	Ácido Clorhídrico (gravedad)	23.22	
P - 108	Hidróxido de sodio	1.8	
TNK-105	Tanque de almacenamiento (FATTYM)		68.19
C - 101	Torre de destilación (Metanol)		351.05
C - 102	Torre de destilación (Vapor)		856.82
P - 116	Bomba glicerol		481.45
	Subtotal	1 757.51	1 757.51

Fuente: Elaboración propia, en base a la figura N° 05; (2014).

Cuadro N° 10: Balance de materia para la obtención de biodiesel en Kg/h			
Entrada		Salida	
Sección de Reacción primaria (R-101)			
Metanol	419.3	Metanol	82.34
Catalizador	53.07		
Aceite algodón	4 246.82		
Reflujo 1	351.05		
Biodiesel		Biodiesel	4 410.19
Glicerol pobre		Glicerol pobre	577.71
	5 070.24		5 070.24
Sección de refinación de biodiesel (R-102)			
Metanol	82.34	Glicerol	94.4
Biodiesel	4 410.18	Biodiesel	4 398.12
	4 492.52		4 492.52
Sección de refinación de biodiesel (V-102)			
H2O	166.08		
HCL	7.07	Glicerol	1 060.38
Reflujo 2	856.82	H2O (vapor)	106.63
Biodiesel	4 398.12	Biodiesel	4 261.08
	5 428.09		5 428.09
Sección de purificación del Glicerol			
Glicerol 1	577.71	FATTYM	68.19
Glicerol 2	94.4	Reflujo 1	351.05
Glicerol 3	1 060.38	reflujo 2	856.82
HCl	23.22	Glicerol	481.45
NaOH	1.8		
	1 757.51		1 757.51

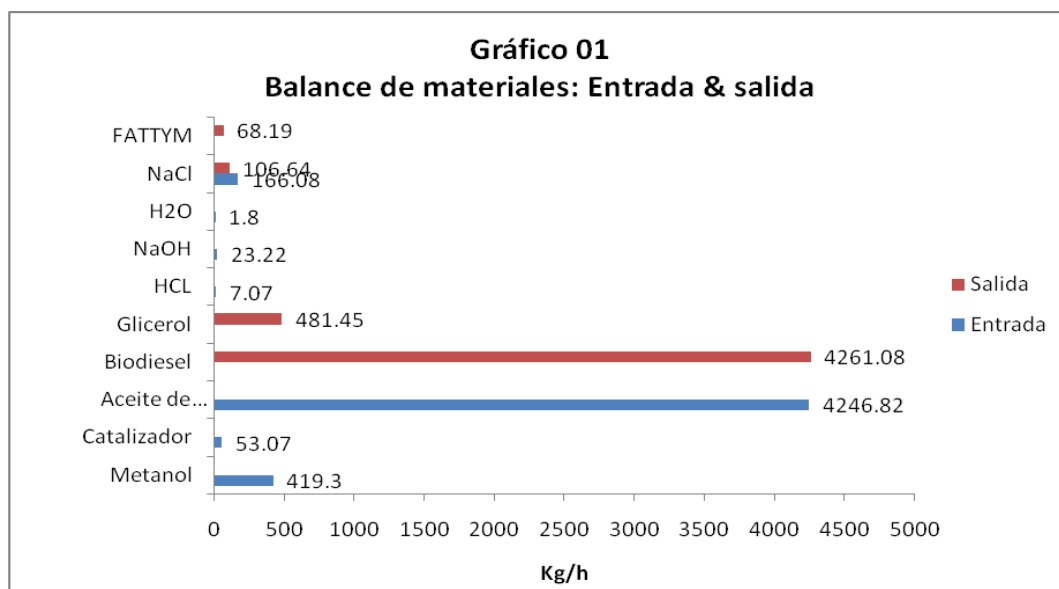
Fuente: Elaboración propia, en base las figuras N° 03, 04 y 05; (2014).

El Cuadro N° 11 resume la cantidad de materiales que suman un total de 4 917.36 Kg/h que representa en 7 929 h una producción de 38 945 Ton/año.

Cuadro N° 11: Resumen del balance de materiales (Kg/h)		
	ENTRADA	SALIDA
Metanol	419.30	
Catalizador	53.07	
Aceite de algodón	4 246.82	
Biodiesel		4 261.08
Glicerol		481.45
HCL	7.07	
HCl	23.22	
NaOH	1.80	
H2O	166.08	106.64
FATTYM		68.19
Total	4 917.36	4 917.36

Fuente: Elaboración propia, en base a los cuadros N° 10; (2014).

En el gráfico N° 01 se presenta el total del flujo de materiales de entrada en el proceso en kg por año, donde se destaca el aceite y el metanol como materiales principales.



Fuente: Elaboración propia, en base al cuadro N° 11; (2014)

CAPITULO V

DISCUSIÓN

5.1.0 Técnico.

La técnica utilizada para el proceso de producción industrial de biodiesel se basa en la reacción de transesterificación del aceite. Se ha utilizado un catalizador homogéneo, debido a que asegura tecnología simple, robusta y porque asegura un porcentaje alto de conversión de la reacción. Para la producción de biodiesel por transesterificación se ha utilizado un catalizador básico que resulta mucho más eficiente usando una mezcla de 75 % de metanol (CH_3OH) y 25 % de Metóxido de sodio (NaOCH_3), recomendado por **WINNIE et al, (2007)**.

El Metóxido es elaborado como un pre-procesamiento desde un alcohol como el metanol y un metal alcalino como el hidróxido de de sodio que al reaccionar produce el Metóxido de sodio y agua. La ausencia de agua favorece la tasa de conversión de la transesterificación. El proceso de reacción global es controlado por el equilibrio químico a una temperatura de 60 °C. Para obtener un equilibrio químico del lado derecho de la reacción se requiere una gran cantidad de alcohol. La reacción se lleva a cabo muy cerca del punto de ebullición del alcohol y a una presión ligeramente superior a la atmosférica, con lo cual se asegura que la reacción se lleve a cabo en estado líquido.

Al llevar a cabo la transesterificación, los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador alcalino, neutralizando la reacción química, para producir jabón y agua. Los productos intermedios resultantes de la transesterificación deben ser eliminados de ser posible completamente ya que estos influyen en la producción del metiléster (Biodiesel) producto final de la reacción de transesterificación. Con la finalidad de reducir el impacto ambiental de las sustancias químicas, se tuvo en cuenta en la elaboración del biodiesel, la recuperación, el reciclado y el reuso del metanol y el vapor de agua, así como, los subproductos de la reacción de transesterificación como la glicerina industrial a un 80% Kg/Kg de agua y los residuos orgánicos o borra depositado en un contenedor ambiental controlado.

En los siguientes cuadros 12, 13, 14 y 15 se aprecian la composición de los productos del biodiesel, ácidos grasos, glicerol, vapor de agua, a la salida del proceso de elaboración.

Cuadro N° 12: Composición a la salida diesel	
Diesel	4 220.25
Glicerina	6.58
Acido clorhídrico	0.09
Metanol	0.02
Cloruro de sodio	0.22
Aceite de algodón	32.18
Agua	1.71
	4 261.05

Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

Cuadro N° 13: Composición de la salida ácidos grasos	
Diesel	1.22
Glicerina	43.04
Acido clorhídrico	0.02
Metanol	5.14
Cloruro de sodio	0.20
Aceite de algodón	4.87
Agua	13.67
	68.16

Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

Cuadro N° 14: Composición de la salida Glicerol	
Diesel	0.00
Glicerina	387.39
Acido clorhídrico	0.09
Metanol	0.00
Cloruro de sodio	16.38
Hidróxido de sodio	0.13
Aceite de algodón	0.00
Agua	77.54
	481.53

Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

Cuadro N° 15: Composición de la salida vapor.	
Diesel	0.00
Glicerina	0.03
Acido clorhídrico	0.00
Metanol	5.66
Cloruro de sodio	0.00
Aceite de algodón	7.35
Agua	93.58
	106.62

Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

5.2.0. Económico.

En el siguiente cuadro N° 16, se presenta los indicadores de la variable económica que se tuvo en cuenta para fines del estudio. Cabe mencionar que en los estudios se excluyeron los costos de Ingeniería, sistemas de gestión y control ambiental, infraestructura del área de proceso, laboratorios de control de calidad, distribución y transporte, unidad de mantenimiento, almacenamiento de materiales, oficinas contables, entre otras, para la obtención de biodiesel.

Con respecto al análisis económico en las condiciones que se elaboró el sistema para la obtención de biodiesel a partir de aceite de algodón, se tiene un capital de inversión total de 10 297 000 dólares, un costo operativo para poner en funcionamiento durante la vida útil del proyecto de 21 724 000 dólares por año, a una velocidad de producción de 38 945 Ton de biodiesel por año y un costo por unidad de producción de 0.64 dólares por kg de biodiesel, una renta total de 24 882 000 dólares por año. El margen total cuya diferencia entre el precio de venta (sin IVA) del producto elaborado y el precio de elaboración del **producto** es de 12.69 %. La tasa de retorno de la inversión es de 40.66 %, y la recuperación del capital empleado al poner en operatividad el proyecto es de 2.46 años.

Cuadro N° 16: Resumen ejecutivo del análisis económico.	
Capital de inversión total	10 297 000 \$
Costo operativo	21 724 000 \$/año
Velocidad de producción	38 945 Kg Biodiesel/año
Costo por unidad de producción	0.64 \$ /kg Biodiesel
Renta total	24 882 000 \$ / año
Margen total	12.69 %
Retorno de la inversión	40.66 %
Tiempo de reembolso	2.46 año
IRR (después de las tasas)	51.95%
NPV (al 10% de interés)	20 225 000 \$

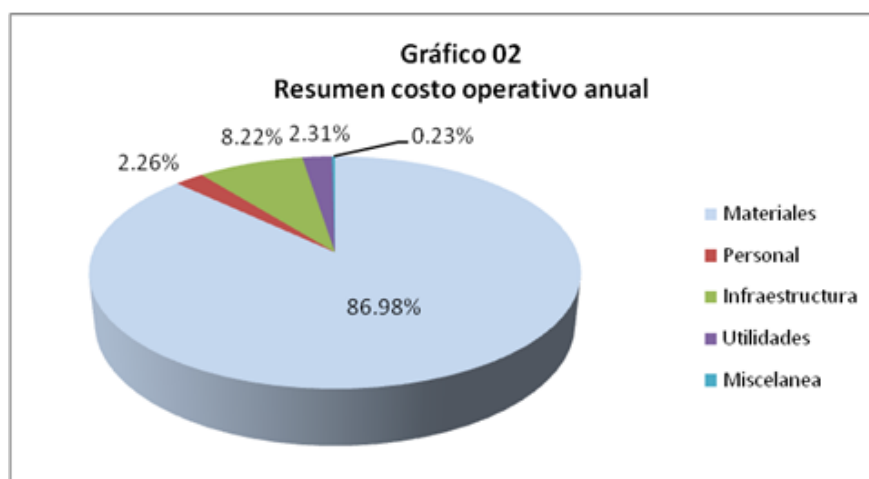
Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

En el Cuadro N° 17 se muestran algunos precios en dólares por unidad de equipo que conforman el sistema de obtención del biodiesel, y que dependen de la funcionalidad, la capacidad y el material de construcción.

Código	Descripción	\$/Unit
P	Bomba centrífuga	6 000
TNK	Tanque vertical	436 000
MX	Mezclador	6 000
FSP	Separador de flujo	4 000
R	Reactor	54 000
DC	Decantador centrífuga	193 000
V	Tanque mezclador	35 000
HX	Cambiador de calor	3 000
C	Destilador	143 000
GBX	Sistema al vacío	74 000

Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

El costo operativo anual se resume en la siguiente gráfica 03 donde se observa que los costos de materiales representan un 86.98%, seguido de infraestructura con un 8.22 % y la mano de obra con un 2.26 %. Las utilidades corresponden a un 2.31 % del costo operativo anual.



Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

5.3.0. Ambiental.

Las siguientes tablas muestran el resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los tipos de residuos generados en la elaboración del biodiesel.

El cuadro N° 18, corresponde a los residuos acuosos. Se aprecia la no existencia de algún residuo generado.

Cuadro N° 18: Residuos Acuosos.				
Componente	kg/kg MP	kg/h	kg/Año	%
TOTAL	0.000	0.000	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

Con respecto a los residuos orgánicos, Cuadro N° 19, se obtuvo 9 713 Kg/año (1.80%) de diesel no refinado, 341 019 Kg /año (63.15 %) de glicerina, 176 Kg/año (0.03%) de HCl, 41 320 Kg/año (7.65 %) de metanol, 1 604 kg/año (0.30 %) de cloruro de sodio, 38 625 Kg/año (7.15 %) de aceite de algodón y 107 593 kg/año (19.92 %) de agua, haciendo un total de 540 05 Kg/año de residuos orgánicos generados.

Cuadro N° 19: Residuos Orgánicos				
Componente	kg/kg MP	kg/h	kg/Año	%
Diesel	0.000	1.226	9 713	1.80
Glicerina	0.011	43.058	341 019	63.15
HCl	0.000	0.022	176	0.03
Metanol	0.001	5.217	41 320	7.65
Cloruro de sodio	0.000	0.203	1 604	0.30
Aceite de algodón	0.001	4.877	38 625	7.15
Agua	0.003	13.585	107 593	19.92
TOTAL	0.016	68.188	540 050	100.00

Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

En el cuadro N° 20, no se aprecia residuo sólido generado.

Tabla 20: Residuos Sólidos				
Componente	kg/kg MP	kg/h	kg/Año	%
TOTAL	0.000	0.000	0.000	0.00

Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

El cuadro N° 21, trata sobre las emisiones generadas en el proceso, por parte de la glicerina se tuvo 252 Kg/año que representa un 0.03% anual, el metanol 145 155 kg/año con un 5.34 % anual, el aceite de algodón con 58 245 Kg/año con un 6.89 % anual y como vapor de agua 741 360 kg/año con un 87.73 % anual, haciendo un total de 845 013 Kg/año.

Cuadro N° 21: Emisiones generales del proceso.				
Componente	kg/kg MP	kg/h	kg/Año	%
Glicerina	0.000	0.032	252	0.03
Metanol	0.001	5.701	45 155	5.34
Aceite de algodón	0.002	7.354	58 245	6.89
Agua	0.022	93.606	741 360	87.73
TOTAL	0.025	106.694	845 013	100.00

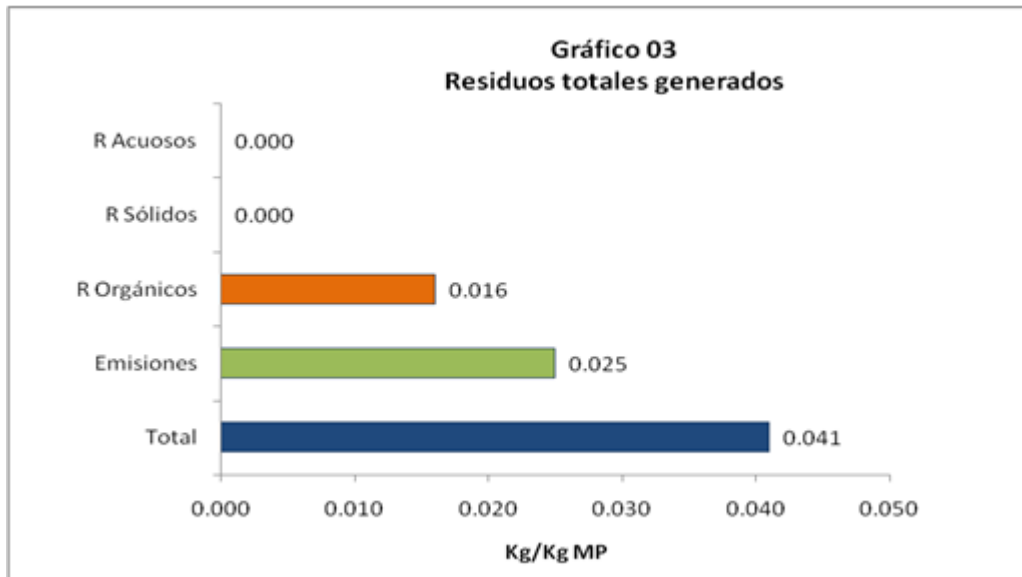
Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

En el siguiente cuadro N° 22, se aprecia el resumen de las cantidades de los residuos generados en el proceso para la obtención de biodiesel en el que el mayor porcentaje es el agua seguido de la glicerina.

Cuadro N° 22: Residuos Totales				
Componente	kg/kg MP	kg/h	kg/Año	%
Diesel	0.000	1.226	9 713	0.70
Glicerina	0.010	43.090	341 271	24.64
HCl	0.000	0.022	176	0.01
Metanol	0.003	10.919	86 475	6.24
Cloruro de sodio	0.000	0.203	1 604	0.12
Aceite de algodón	0.003	12.231	96 870	6.99
Agua	0.025	107.191	848 953	61.29
TOTAL	0.041	174.882	1 385 063	100.00

Fuente: Elaboración propia, en base al proceso de producción, (2014).

En el siguiente gráfico 03 se puede apreciar las cantidades de los residuos totales generados en kg por Kg de materia prima.



Fuente: Elaboración propia, en base a los cuadros 18; 19; 20; 21 y 22; (2014).

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

Ante las observaciones encontradas en los diversos antecedentes de estudios realizados en diferentes países y en el Perú, por encontrar mejoras en el proceso de obtención de biodiesel como una alternativa energética de biocombustible, y ante los resultados obtenidos en el presente estudio realizado, se propone: elaborar un software, mediante la plataforma de Super pro Designer, simulador de parámetros en la elaboración de Biodiesel a partir del aceite de algodón (*Gossypium herbaceum*) y su análisis económico - ambiental, el cual permite conocer la factibilidad técnica, económica y ambiental, con fines exclusivamente educativos dentro del campo de las ciencias e ingeniería.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

Las conclusiones con respecto a los objetivos específicos planteados son las siguientes:

1. Se ha determinado mediante los ensayos de elaboración del biodiesel que los parámetros relevantes en la elaboración de biodiesel a partir del aceite de la semilla de algodón (*Gossypium herbaceum*) es la densidad y la temperatura de ebullición, obteniendo un alto porcentaje de conversión con un valor de 90.29 %
2. Se ha encontrado que el indicador económico relevante es la tasa de retorno de la inversión 40.66 % y como indicador ambiental más significativo en la elaboración de biodiesel son las emisiones y dentro de los cuales se destaca el metanol con un porcentaje de 6.24 % anual ($0.0624 \times 694.12 \text{ g/L} = 43.313 \text{ g/L} = 43\,313 \text{ mg/L}$). Cabe precisar que el metanol como producto residual (compuesto orgánico volátil) hasta la fecha Enero 2011 no se encuentra regulado por el MINAM, solamente se tiene como referencia el benceno (como VOCs) con el límite máximo permisible anual equivalente a $4 \mu\text{g/m}^3$. **REPPETO L, (2011).**
3. El nivel de relación existente entre los parámetros de elaboración de biodiesel y su análisis económico y ambiental se observa tácitamente que, debido a que se agrego la sección de refinación del biodiesel y la sección de purificación del glicerol, se minimizaron los residuos en el proceso, tanto que no se tiene residuos acuosos ni sólidos. El hecho de realizar el reflujo del metanol y el agua después de su recuperación en la sección de purificación de glicerol, permite disminuir significativamente el contenido de residuos por emisiones gaseosas y en términos económicos el aprovechamiento del glicerol como un producto agregado que hace posible recuperar en pocos años el capital de inversión.
4. Al analizar e interpretar los parámetros en la elaboración de biodiesel y las alternativas económicas y ambientales en el modelo virtual propuesto, es que se tiene un software elaborado, con el cual se puede realizar ensayos de diferentes aceites vegetales considerando exclusivamente los parámetros de la

densidad y la temperatura de ebullición y por el diseño que tiene el software de recuperar, reciclar y reutilizar, se tendrá siempre una mínima generación de residuos.

Por lo tanto, la conclusión general logrado con el presente trabajo, es la obtención de un software elaborado mediante la plataforma de Super pro Designer para simular los parámetros en la elaboración de Biodiesel a partir del aceite de algodón (*Gossypium herbaceum*) y su análisis económico - ambiental en la ciudad de Iquitos, el cual, nos permite conocer la factibilidad técnica, económica y ambiental.

CAPÍTULO VIII

RECOMENDACIONES

- 8.1 Hacer uso de este software elaborado para la producción de biodiesel a partir de aceite de otras variedades de aceites que no tengan incompatibilidad con productos alimenticios.
- 8.2 Simular con otras variedades de aceite, haciendo uso del software elaborado, solamente es necesario introducir las características físicas y químicas de los aceites de interés en la simulación de datos de la línea de entrada de la materia prima principal.
- 8.3 Hacer uso del software con fines de enseñanza y aprendizaje en la asignatura de procesos en Ingeniería.

CAPITULO IX

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

CHANCHARI D. et al. (2008) Tesis Proyecto de prefactibilidad para la instalación de un planta industrial e biodiesel a partir de aceite de palma aceitera – FIQ – UNAP.

CLEMENTS L.D. HANNA L.A. (1998), The effects of catalyst free fatty acids and water on transesterification of beef tallow”, ASAE 41. Pp. 1261-1264.

COSS BU. Análisis Y Evaluación De Proyectos De Inversión. Limusa. 2010.

COTT FOGLER H. Elementos De Ingeniería De Las Reacciones Químicas. Cuarta Edición. Prentice Hall. México. 20008

ECONOMIC ANALYSIS OF PROJECTS (2011) bChoosing Between Alternative.mht. Asian Development Bank.

FOGLER, H. S. (1992). Elements of Chemical Reaction Engineering, 2nd edition, Prentice Hall.

FREEDMAN AND PRYDE E.H (1998), “Variables affecturg the yield of fatty ester from transesterified vegetable oirls” JAOS 61.Pp. 1638-1643.

FUKUDA H. KONDO A. (2001), Biodiesel fuel production by transesterification of oils”, Journal of Bioscience and Bioengineering 92. Pp. 405-416.

GOMEZ OREA DOMINGO. Evaluación Del Impacto Ambiental. Ediciones Mundi-Prensa España 2003.

GONZALEZ ANGEL. Cinética Química. Editorial Síntesis – España 2001.

GONZALO CALLEJO, ALBERTO (2011) Simulación del proceso industrial de producción de biodiesel y aprovechamiento de glicerina para la producción de acetatos. Universidad de Zaragoza, Centro Politécnico Superior.

HIMMELBLAU D. Y BISCHOFF K. Análisis y Simulación De Procesos- Editorial Reverte S.A. México 1992.

G. HONTY, CLAES (2007), Suplemento Energía de La Diaria, Montevideo, el 30 de octubre del 2007.

INTELIGEN INC, (2009), Manual Tutorial. Software Super pro Designer.

INTRACORP, (2007), Estudio de factibilidad de la producción nacional de biocombustibles. Informe final.

KIRK. OTHMER, Enciclopedia de Tecnología química. LIMUSA, Primera Reimpresión, México 2006.

KNOTHE, G. DUNN, R. y BAGBY, M.(2006) The Use of Vegetable Oils and Trhy Derivates as Alternative Diesel Fuels. American Chemical Society 36p.

LANG X. (2001), "Preparation and characterization of bio- diesels from various bio-oils", Bioresource Technology 80. Pp. 53-62.

LEY N° 27446: Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental

LLERENA T. et al. (2009) Tesis Modelado y simulación del sistema destilación de la planta piloto de alcohol de la FIQ – UNAP.

MASS J. et al. (2012) Tesis Simulación en la obtención de biodiesel a partir de aceite de piñón blanco utilizando software de CHEMCAD – FIQ – UNAP.

MINAN (2011) Compendio de la legislación Ambiental V 5– Perú.

NOLORBE J. et al. (2011) Tesis Modelado y simulación de un reactor químico con convección forzada – FIQ – UNAP.

OXFORD- COMPLUTENSE. Diccionario. Química - España 2001.

PERRY J. Manual de Ingeniero Químico. Sép Edi. Mc Graw Hill-España 2001.

REPPETO L. et al. (2011) Tesis Estudio de prefactibilidad para la instalación de un planta industrial de biodiesel a partir de semillas de algodón en la región Loreto – FIQ – UNAP.

WESTCOTT, RUSS, “Cómo demostrar un retorno de inversión para las mejoras de calidad,” Apéndice G, Rumbo a ISO 9004:2000, Paton Press, 2003.

WINNIE YEE AND MC ALOON. (2007) U.S. Departament of agriculture. Agricultural research service. Eastern Regional Research Center.

www.agrocombustibles.org/conceptos/HontyCelulosaAlgas.html, (2014).

<http://español.cottonseed.com/default.asp>, (2014).

ANEXO

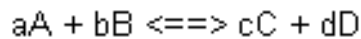
ANEXO N° 01

MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTEQUIOMETRIA DE LA TRANSESTERIFICACIÓN. PROCESO TIPO CONTINUO

Esta operación puede manejar cualquier número de reacciones de equilibrio y admite una amplia variedad de expresiones de equilibrio de reacción. Calcula la conversión para cualquier cantidad de reacciones simultáneas basadas en las constantes de equilibrio, los coeficientes estequiométricos y los exponentes de concentración de componentes que el usuario especifique.

Balances de materiales.

Considere la siguiente reacción de equilibrio.



Defina la extensión de la reacción, ξ , de la siguiente manera:

$$d\xi = -dn_A/a = -dn_B/b = dn_C/c = dn_D/d$$

Si v_i es el coeficiente estequiométrico del componente i (negativo para los reactivos, positivo para los productos), la ecuación anterior puede reescribirse como:

$$dn_i = v_i d\xi$$

y para reacciones múltiples, la ecuación anterior se convierte:

$$dn_i = \sum_{j=1}^q \nu_{ij} d\xi_j \quad \text{or} \quad n_i = n_{i0} + \sum_{j=1}^q \nu_{ij} \xi_j$$

donde q es el número de reacciones simultáneas, n_{i0} es la tasa de flujo molar del componente i en la alimentación, y n_i es la tasa de flujo molar del componente i en la corriente de salida (en equilibrio). Además, para cada reacción j tenemos la relación de equilibrio que se puede escribir como:

Si $\xi = Keq_j - \left[\prod_{i=1}^N (C_i)^{\alpha_i} \right]_j = 0.0$ for $j=1, \dots, q$ [$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_q$] se usa como un vector de variables

independientes con un valor inicial de cero, las ecuaciones anteriores se vuelven equivalentes a un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales que se resuelven numéricamente para ξ . La sustitución de los valores de calculated calculados en las ecuaciones anteriores produce la composición de la mezcla de reacción en equilibrio. Para el caso no isotérmico, la temperatura de la mezcla T es otra desconocida y la relación de balance de energía proporciona la ecuación adicional para resolver el sistema.

Para contabilizar las emisiones, el usuario puede especificar el porcentaje de cada componente que se emite. Tenga en cuenta que el porcentaje especificado se basa en la composición de la mezcla de reacción después de alcanzado el equilibrio.

Modo térmico.

El reactor de equilibrio puede funcionar isotérmicamente, adiabáticamente o con un servicio de calefacción o enfriamiento específico. Para el funcionamiento adiabático o para un servicio de calefacción o refrigeración específico, la temperatura de equilibrio es una variable desconocida calculada por el modelo. Para la operación isotérmica (temperatura de operación especificada), la ecuación del balance de energía se usa para calcular el requisito de calentamiento o enfriamiento.

El consumo de energía.

La potencia de agitación promedio se estima multiplicando la velocidad de agitación (kW / m³ de la mezcla líquida) por el volumen total de líquido del paso. Se supone que toda la potencia de agitación se disipa finalmente en calor que contribuye a los requisitos de calentamiento o enfriamiento del paso.

Tamaño del equipo

En el modo de cálculo de diseño, el usuario especifica el tiempo de residencia (t_R) y la relación de volumen entre trabajo y recipiente. El volumen de trabajo (líquido) (V_w) y el volumen del recipiente (V) se calculan usando las siguientes ecuaciones:

$$V_w = F * t_R$$

$$V = V_w / (\text{Working to Vessel Volume Ratio})$$

Donde (F) es el caudal volumétrico de alimentación. Si el volumen del recipiente calculado excede su valor máximo posible (especificado a través de la pestaña Equipo), el sistema asume unidades múltiples e idénticas que operan en paralelo con un volumen total del buque igual al calculado.

En el Modo de clasificación, el usuario especifica el volumen del recipiente, el número de unidades y el tiempo de residencia o la relación de volumen de trabajo a recipiente. Cuando se especifica el tiempo de residencia, el sistema calcula la relación de volumen de trabajo a recipiente utilizando las ecuaciones anteriores y comprueba para asegurarse de que el valor calculado se encuentra entre la relación de volumen mínimo y máximo de trabajo a volumen del recipiente. Cuando se especifica la relación de volumen de trabajo a recipiente, el sistema calcula el tiempo de residencia utilizando las ecuaciones anteriores.

Si esta unidad opera en una planta discontinua, el índice de flujo de alimentación F se calcula dividiendo el volumen de material que necesita procesarse por ciclo por el tiempo del proceso.