



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO PARA LA ASESORIA EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

IVÁN IGNACIO CORTÉS VENEGAS

PROFESORA GUÍA:

MARÍA ELENA LIENQUEO CONTRERAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JUAN ASENJO DE LEUZE

FELIPE DIAZ ALVARADO

SANTIAGO DE CHILE

ENERO 2015

RESUMEN

Debido a la creciente demanda energética mundial, junto al agotamiento próximo del petróleo y el aumento de su precio, se hace necesario impulsar alternativas energéticas como los biocombustibles, que pueden aportar en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los que favorecen la contaminación por polución del aire y el calentamiento global. El sector industrial de Transporte demanda casi un 30% de la energía mundial, y es responsable del 27% de las emisiones de GEI. Así, los biocombustibles, en particular el biodiesel, surgen como alternativa con ventajas económicas, ambientales, y de seguridad energética entre otras. El biodiesel puede producirse a partir de diversas materias primas como aceites vegetales y grasas animales. El aceite reciclado de cocina y el de ricino, no generan controversia debido a que no tienen un fin alimenticio, como otros aceites, por lo que se incluyeron de manera de promover una mejor disposición final del primero; y favorecer el desarrollo rural en sectores provechosos en el caso del segundo.

El desarrollo de sistemas expertos es una forma de promover conocimiento sobre un dominio específico; además sirve de apoyo al usuario, al no requerir de un experto - lo cual es difícil y costoso de conseguir -, y ahorra tiempo y recursos a éste, mejorando la accesibilidad al conocimiento.

El proceso producción de biodiesel mediante transesterificación, se formalizó e incorporó en una herramienta para implementar sistemas expertos (Shell). El sistema experto desarrollado en la Shell NExpert consta de 47 reglas de la forma SI-ENTONCES, y contiene información para llevar a cabo el proceso de transesterificación para cada aceite mencionado, mediante vía básica (NaOH o KOH) en un solo paso.

Se validó la transesterificación de aceite usado con NaOH como catalizador, obteniendo rendimientos muy cercanos (90%) a los reportados en la literatura. Por lo tanto, el sistema experto es válido para el proceso mencionado, pero queda pendiente la validación de los procesos restantes. Un usuario puede obtener suficiente información para llevar a cabo los procesos incluidos. Las proyecciones del sistema experto en su estado actual son como herramienta para fines académicos; sin embargo, puede ser ampliado a otros procesos, con otras materias primas y reactantes, y ser mejorado utilizando tecnologías de información.

DEDICATORIA

Gracias a esas personas importantes en mi vida, que me brindaron apoyo para concretar esta etapa, en especial a Uds., que a pesar de no estar conscientes de esto han sido fundamentales y sé que estarían orgullosos de mí. Para Uds. este trabajo y mi gratitud.

Abuelo Guido Enrique

Y Emilia Alelí.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría saludar y agradecer a mi mamá Ivonne, por tu entrega y amor, tu garra frente a las adversidades, por tu entusiasmo y todo tu esfuerzo para seguir creciendo profesionalmente, y por enseñarme e inculcarme el hambre por ser una persona de bien y por superarme día a día personal y profesionalmente.

A mis hermanos Cristián y Macarena, por ser los mejores hermanos que uno quisiera tener, por su compañía y complicidad, y por todas las alegrías que me han dado durante estos años, como mis sobrinos que son motor de superación para su tío.

A mis abuelos Teresa y Guido, y mis tíos Joanna y Carlos, por causar la motivación por estudiar en la Universidad de Chile, a mi tía por hacer de madre para mí en Santiago, cuidarme en muchos momentos difíciles, junto a su familia.

A mi padrastro Luis, por inculcarme el amor por la naturaleza, ayudarme a cultivar la paciencia y la humildad, y a cuidar y respetar el entorno del que todos somos parte.

Agradezco a los profesores del colegio, Omar Alarcón y Janette Badilla por confiar en mis capacidades, y en especial a Norma Ávila, por su profundo compromiso con la formación de calidad, es un gran privilegio haber pasado por su aula.

Agradezco a los profesores del departamento involucrados en mi aprendizaje y a los que me ayudaron en inquietudes personales durante la carrera. A la profesora María Elena Lienqueo, por su apoyo durante la realización de este trabajo.

Finalmente a todos mis amig@s y personas a las que tengo mucho cariño; les agradezco su alegría, sus palabras sinceras en los momentos de duda o difíciles; y a mi Alelí, que me ha hecho renacer como hombre, revalorarme, y aprender a ser mejor día a día.

Espero estar a la altura de cualquier desafío que se presente, y estoy seguro que gracias a lo aprendido desde Uds., y desde esta Facultad, todo es posible, la clave es perseverar, ir paso a paso, y confiar en uno mismo. Muchas Gracias a todos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	5
INDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ANEXOS.....	8
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN, MARCO TEÓRICO, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	9
1. Introducción y motivación.....	9
1.1 Situación medioambiental actual.....	9
1.2 Biocombustibles y biodiesel.....	12
1.2.1 Biodiesel.....	17
1.2.2 Materia prima para producción de biodiesel.....	21
1.3 Situación en Chile.....	22
1.3.1 Marco Regulatorio.....	29
1.4 Sistemas expertos.....	31
1.5 Motivación.....	37
1.5.1 Descripción del proyecto.....	37
1.5.2 Justificación.....	38
2. Marco Teórico.....	39
2.1 Biomasa para biodiesel.....	39
2.2 Biodiesel a partir de aceite vegetal usado.....	41
2.2.1 Reciclaje de Aceite Usado en Chile.....	43
2.3 Biodiesel a partir de aceite de ricino.....	44
2.4 Producción de biodiesel mediante transesterificación.....	47
2.5 Variables que afectan el proceso de transesterificación.....	49
2.5.1 Temperatura de reacción.....	49
2.5.2 Relación molar alcohol:aceite vegetal.....	49
2.5.3 Tipo de alcohol.....	50
2.5.4 Tipo de catalizador.....	51
2.5.5 Concentración de catalizador.....	52
2.5.6 Tiempo de reacción.....	52
2.5.7 Intensidad de mezclado.....	52

2.5.8	Contenido de ácidos grasos libres y humedad	52
2.6	Proceso de producción de biodiesel – Transesterificación Homogénea Básica.....	54
2.6.1	Reactivos.....	54
2.6.2	Caracterización del aceite.....	58
2.6.3	Etapas del proceso.....	62
3.	Antecedentes al trabajo a realizar.....	66
4.	Objetivos.....	69
4.1	Objetivo general	69
4.2	Objetivos específicos	69
CAPÍTULO II: MATERIALES, PROCEDIMIENTOS Y METODOLOGÍAS.....		70
5.	Materiales.....	70
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		72
6.	Resultados y discusiones	72
6.1	Validación:	77
7.	Conclusiones.....	82
8.	Glosario.....	84
9.	BIBLIOGRAFÍA	86
10.	ANEXOS.....	94
	Situación medioambiental actual	94
	Biocombustibles y biodiesel	95
	Materia prima para producción de biodiesel	97
	Normativa relacionada al biodiesel en Chile	99
	Sistemas Expertos.....	101
	Procedimientos de caracterización de especies.....	102
	Sistema Experto Biodiesel	110

INDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Emisiones globales de CO ₂ por sector en 2010	11
Figura N°2: Clasificación de los biocombustibles	13
Figura N°3: Distribución del consumo mundial de energías renovables, 2010	17
Figura N°4: Proceso de Transesterificación	18
Figura N°5: Diagrama de pertenencia entre los sistemas expertos y la IA	32
Figura N°6: Estructura e interacciones del sistema experto.	35
Figura N°7: Indicadores de Rendimiento de Especies	40
Figura N°8: Fruto, Planta y siembra de higuera.	45
Figura N°9: Reacción de transesterificación de triglicéridos (Metanolisis)	48
Figura N°10: Reacción de saponificación.....	53
Figura N°11: Reacción de hidrólisis	53
Figura N°12: Diagrama de flujo - Proceso de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal	54
Figura N°13: Esquema de funcionamiento del sistema experto Biodiesel	72
Figura N°14: Imágenes de la interfaz del sistema experto en uso	74
Figura N°15: Diagrama de Flujo – Proceso de Validación.....	79
Figura N°16: Imágenes del proceso de Validación.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Ventajas de los biocombustibles	14
Tabla N°2: Ventajas y desventajas del uso del biodiesel	21
Tabla N°3: Instituciones y proyectos de investigación en producción de biodiesel	25
Tabla N°4: Cantidad de catalizador base (NaOH y KOH) para aceites nuevos y usados.	56
Tabla N°5: Condiciones óptimas de operación en la transesterificación de aceites mediante catálisis homogénea básica.....	57
Tabla N°6: Métodos de caracterización del aceite contenidos en el sistema experto	58
Tabla N°7: Condiciones de operación en la producción de biodiesel por catálisis homogénea básica, un solo paso.	67
Tabla N°8: Condiciones de operación en la transesterificación de aceite vegetal usado mediante catálisis con NaOH	78
Tabla N°9: Flujos resultantes del proceso de producción de biodiesel para validación	79
Tabla N°10: Rendimiento de Biodiesel proceso de validación.....	80

ANEXOS

Anexo 1: Situación medioambiental actual	
Anexo 1-A: Evolución del consumo de energía primaria total	94
Anexo 1-B: PIB, energía y emisiones de CO2 entre 1950 y 2010	94
Anexo 1-C: Consumo de energía mundial por sector	95
Anexo 2: Biocombustibles y Biodiesel	
Anexo 2-A: Sustentabilidad	95
Anexo 2-B: Comparación entre crecimiento de bioetanol y biodiesel	96
Anexo 2-A: Principales países productores de biodiesel, 2011	96
Anexo 3: Materia prima para producción de biodiesel	
Anexo 3-A: Distribución de diferentes especies de oleaginosas en la producción mundial de aceite 2010-2011	97
Anexo 3-B: Rendimiento de distintas especies	98
Anexo 4: Normativa relacionada al biodiesel en Chile	
Anexo 4-A: Parámetros contenidos en la Norma Chilena de Biodiesel	99
Anexo 4-B: Trámites para la producción de biodiesel en Chile, desde cultivos oleaginosos o residuos orgánicos	100
Anexo 5: Sistemas expertos	
Anexo 5-A: Ejemplos de sistemas expertos	101
Anexo 6: Procedimientos de caracterización de especies	
Anexo 6-A: Titulación	103
Anexo 6-B: índice de Yodo	106
Anexo 7: Sistema Experto Biodiesel	
Anexo 7-A: Imágenes del sistema experto terminado	110
Anexo 7-B: Código del sistema experto (CD)	126

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN, MARCO TEÓRICO, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Este capítulo tiene como objetivo dar a conocer los distintos antecedentes del trabajo a realizar, dar una mirada global y local a la realidad medioambiental, y poner énfasis en la crisis actual como consecuencia de la creciente demanda energética, y el uso de combustibles fósiles en las últimas décadas. A partir de esto se genera la motivación para desarrollar este tema de memoria. Además se señalan los objetivos del tema.

1. Introducción y motivación

1.1 Situación medioambiental actual

Desde tiempos remotos, el ser humano ha usado la biomasa como fuente para obtener energía. La biomasa se entiende como materia orgánica renovable de origen vegetal o animal, procedente de la transformación natural o artificial de la misma. Hoy en día es posible encontrar biomasa proveniente de residuos agrícolas y forestales (tratados o no), cultivos energéticos, residuos animales, además de los residuos sólidos y aguas residuales de sectores urbanos; los que pueden ser utilizados como fuente de energía. El consumo total de energía suele expresarse como energía primaria, pues se refiere al total de fuentes básicas de energía que se utiliza para generar los servicios energéticos. En los últimos 200 años, el uso de energía primaria ha crecido veinte veces, mientras que la población mundial se ha multiplicado por seis. El consumo de energía se incrementó explosivamente a partir del término de la Segunda Guerra Mundial (Anexo 1-A). Este aumento en la demanda energética mundial, está relacionado estrechamente al crecimiento demográfico en el planeta y al crecimiento de la economía principalmente en países desarrollados después de la guerra. Como consecuencia, a partir de 1970 hasta el presente se ha duplicado el consumo de energía en el mundo en 40 años.¹

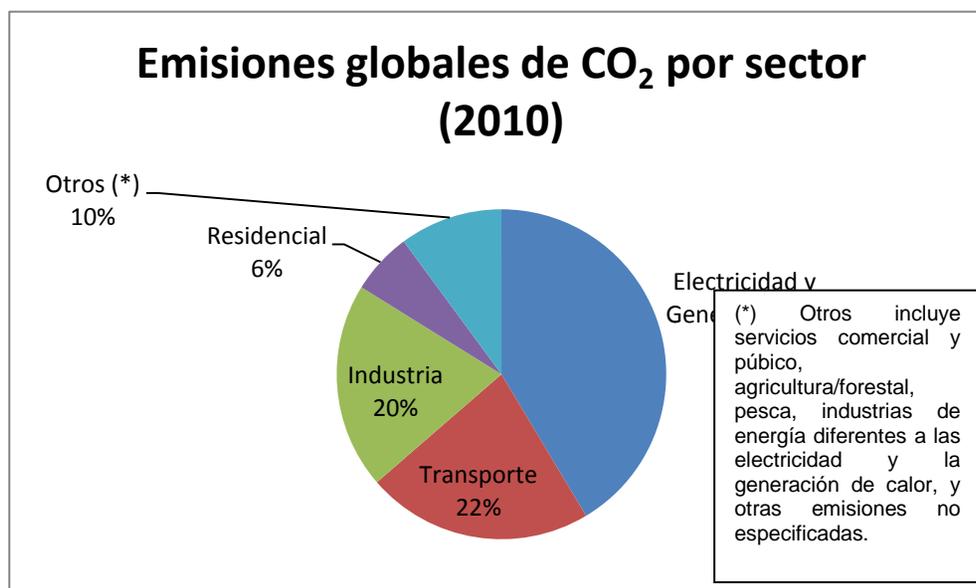
Entre 1971 y 2001 la demanda energética mundial se dobló y se espera que crezca un 53% antes del 2030.² De 1950 a 2006 el consumo creció casi 3% promedio al año y sus fuentes principales fueron el petróleo y el gas natural. Este crecimiento en el consumo de energía ha tenido lugar tanto en países en vías desarrollo, como en países desarrollados; aunque existen diferencias. En los países desarrollados el incremento en

el consumo energético se debe principalmente al incremento en el uso de energía per cápita, mientras que en los países en vías de desarrollo, se debe al incremento demográfico producto del mejoramiento de las condiciones de vida dentro de cada país. Además, el hombre actual tiene mayores y más variadas necesidades energéticas que antes; hoy en día se requiere mayor energía para el transporte de personas y carga, para sostener las comunicaciones a nivel global, para permitir el acceso a diversos alimentos y productos que no son propios de la localidad, para abastecer procesos de manufactura y uso de electrodomésticos, entre otras actividades.

El desarrollo económico a nivel global y el incremento en el ingreso per cápita ha sido una fuerza motora para originar un incremento en la demanda de energía. Si se miran los datos desde 1950, cuando el consumo en masa fue instaurado (Anexo 1-B)³, se observa que junto con un aumento del PIB promedio, ha aumentado el consumo de energía. En el gráfico mencionado se observa que junto al aumento de consumo energético, también ha aumentado la emisión de CO₂ -uno de los contaminantes atmosféricos más importantes- a la atmósfera, producto de la quema de combustibles fósiles. Este gas, es el principal gas de efecto invernadero (GEI) en función de la masa acumulada en la atmósfera, y su aumento exponencial en ella ha promovido el calentamiento global y el cambio climático actual.³

Si la demanda de energía mundial se analiza por sectores durante las últimas 3 décadas (1980-2006), el sector con mayor crecimiento de demanda promedio anual es el transporte con cerca del 3% anual, luego lo sigue el sector residencial (1,7%), y finalmente la industria (0,8%) (Anexo 1-C). El transporte es el único sector que crece sostenidamente durante todas las etapas de desarrollo económico y en todos los niveles de ingreso, a veces desplazando la demanda energética de otro sectores.³ Además, del Anexo recién mencionado se desprende que el transporte representa cerca del 30% de la demanda energética mundial. Por otro lado, el transporte es el segundo sector que más CO₂ libera a la atmósfera, como se observa en la Figura N°1; este sector representó el año 2010 un 22% de las emisiones totales de CO₂.

Figura N°1: Emisiones globales de CO₂ por sector en 2010



(Fuente: CO₂ Emissions from fuel combustion highlights. IEA, 2012)⁴

Además, las fuentes energéticas de este sector son principalmente fósiles o derivadas de éstos, que con su quema promueven la acumulación de GEI en la atmósfera. Sin embargo, los combustibles fósiles no son renovables, y se acabarán en un futuro cercano. Algunos estudios consideran que las reservas de petróleo y gas se acabarán en 41 y 63 años respectivamente, en caso de que el consumo continúe al ritmo actual.²

El petróleo ha sido el combustible más utilizado en las últimas décadas, pero como se ha reportado que las reservas se agotarán, el precio del crudo se irá incrementando sostenidamente, siguiendo la tendencia de las últimas décadas. Por esta razón los gobiernos de muchos países buscan desarrollar alternativas a los combustibles fósiles, para avanzar en la independencia energética, y no ser afectados por la volatilidad del precio del crudo. Junto con ello, los gobiernos además van tomando conciencia de los efectos que tiene el uso de los combustibles fósiles en la atmósfera, como el calentamiento del planeta y el cambio climático global.

Las alternativas que buscan disminuir el consumo de combustibles fósiles son las llamadas fuentes de energías renovables no convencionales (ERNC). Estas fuentes o tipos de energía son: geotermia, hidro, solar, mareomotriz y a partir de biomasa; su uso supone diversas ventajas con respecto a la utilización de combustibles convencionales.

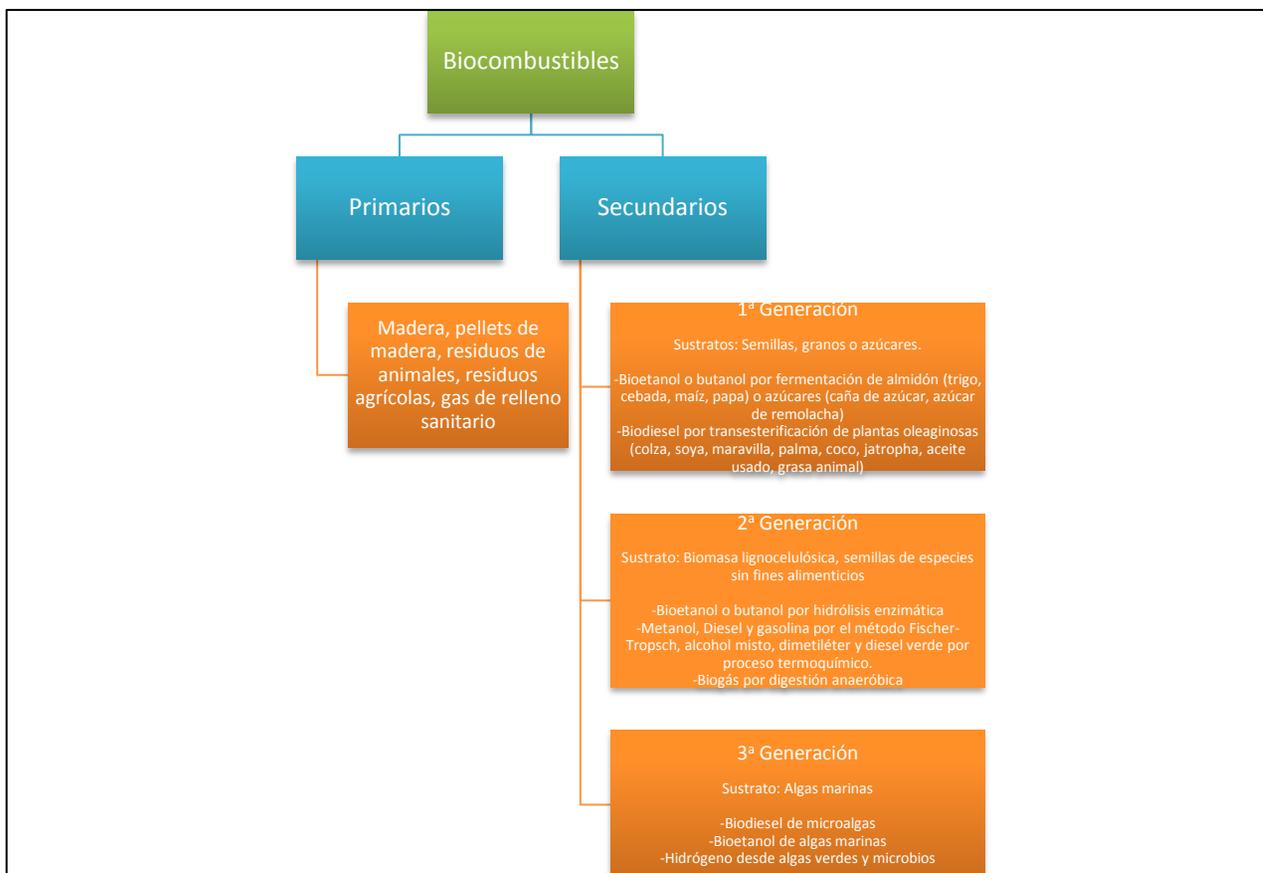
1.2 Biocombustibles y biodiesel

Las fuentes de energía a partir de biomasa pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas. El término “biomasa tradicional” se refiere a combustibles sólidos, como la leña, el carbón vegetal y pellets de madera; y el término “biocombustibles” se refiere a combustibles fluidos, ya sean líquidos, como el biodiesel y (bio)etanol; o gaseosos, como el biogás (metano). El desarrollo de los biocombustibles mencionados, se ha convertido en una de las propuestas para contribuir como solución a una parte del problema energético, y que avanza rápidamente, especialmente para buscar la reducción de GEI que se liberan a la atmósfera.

Entre las fuentes de energía a partir de biomasa, existe una clasificación que se usa ampliamente en estudios y artículos. Esta clasificación denota a la biomasa tradicional (sólidos) mencionada anteriormente, como “biocombustibles primarios”; y a los biocombustibles fluidos (líquidos y gases) como “biocombustibles secundarios”.

Los biocombustibles primarios se utilizan en su estado natural, principalmente para calefacción, cocina o producción de electricidad como leña, astillas y pellets de madera, etc. Los biocombustibles secundarios son producidos por el procesamiento de biomasa, por ejemplo, etanol y el biodiesel. Éstos se pueden utilizar en vehículos y diversos procesos industriales. La biocombustibles secundarios se pueden dividir además en biocombustibles de primera, segunda y tercera generación sobre la base de la materia prima y la tecnología utilizada para su producción (Figura N°2).

Figura N°2: Clasificación de los biocombustibles



(Fuente: Singh, 2011)⁵

Como se dijo anteriormente, los biocombustibles pueden ser sólidos, como la leña, el carbón vegetal y pellets de madera, o líquidos, tal como el etanol, el biodiesel y aceites de pirólisis; o gaseosos, tales como biogás (metano); sin embargo, en la literatura y en la práctica se ha acuñado el término “biocombustible”, sólo para “biocombustibles secundarios”, los que de aquí en adelante se tratarán como “biocombustibles”.

Con motivo de promover su desarrollo algunos países comenzaron a regular el uso de los biocombustibles en ciertos porcentajes de mezcla, otorgando subsidios para su producción debido a las ventajas que éstos poseen frente a los combustibles fósiles convencionales; las principales se muestran a continuación en la Tabla N°1.

Tabla N°1: Ventajas de los biocombustibles

Impactos económicos	Sustentabilidad
	Diversidad de combustibles
	Aumento de empleos rurales
	Aumento de ganancias
	Aumento de inversión en plantas y equipos
	Desarrollo en la agricultura
	Competitividad internacional
	Reducción de la dependencia de combustibles fósiles
Impactos Medioambientales	Reducción de emisión de GEI
	Reducción de la polución del aire
	Biodegradabilidad
	Mayor eficiencia de combustión
	Mejora en uso de suelo y agua
Seguridad energética	Captura de carbono
	Confiabilidad de suministro
	Reducción en uso de combustibles fósiles
	Fácil disponibilidad
	Distribución doméstica
	Materia prima renovable

(Fuente: Politics, economics and environmental impacts of biofuels: a review. A. Demirbas, 2009) ⁶

Las ventajas de los biocombustibles abarcan ámbitos económicos, medioambientales, y de seguridad energética. En materia económica lo principal es que son una nueva fuente de energía, alternativa a los de origen fósil; además provienen de diversas materias primas donde su desarrollo puede impulsar mayor trabajo en los sectores rurales. Esto en su totalidad ayuda a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, los cuales han tendido al alza (demanda), además el precio ha presentado alta volatilidad debido a las crisis económicas, y conflictos bélicos de los principales países productores.

En materia medioambiental, los biocombustibles pueden ayudar a reducir las emisiones de GEI y la polución en el aire producto de la contaminación resultante de los procesos industriales y el transporte; son biodegradables y algunos presentan mayor eficiencia de combustión. También pueden existir mejoras en el uso de suelo y agua, aunque se están estudiando los efectos de los cambios de usos de suelo que podría provocar el desarrollo de cultivos energéticos. Al tratarse de cultivos agrícolas, éstos tienen la capacidad de capturar el carbono durante su proceso de fotosíntesis, logrando que a algunos biocombustibles como el bioetanol se les considere como “emisión cero”.

A pesar de los beneficios de los biocombustibles, y la clara tendencia hacia la estandarización, certificación y globalización de los mismos, recientes estudios han mostrado que no todas las materias primas y tecnologías para producir biocombustibles poseen ventajas medioambientales y sociales cuando son comparadas con los combustibles fósiles. Dependiendo de la zona geográfica, tanto las condiciones naturales como la disponibilidad de tierra y agua, además del costo de mano de obra, juegan un papel importante a la hora de evaluar el potencial de una materia prima para producir biodiesel.

La *sustentabilidad ambiental* es un factor clave en este sentido, además de la necesidad de medir los beneficios de los biocombustibles con indicadores adecuados que permitan seleccionar la mejor alternativa desde distintos puntos de vista.

El adjetivo “sustentable” es frecuentemente usado para hablar de biocombustibles. En primer lugar se debe a que la producción de biodiesel es en gran parte “carbono neutral” (el CO₂ producido por la combustión del biocombustible es compensado por el carbono absorbido por la biomasa en crecimiento), lo cual no es necesariamente cierto, ya que dependiendo de los procesos/etapas incluidos en los análisis, el CO₂ emitido no alcanza a compensarse por la biomasa en crecimiento. En segundo lugar, la producción de biocombustibles en general no produce compuestos peligrosos. Y tercero, la producción de biomasa puede ser desarrollada y usada de una manera más distribuida, evitando la necesidad de transportar el combustible por largas distancias. No obstante, esto puede aumentar la instalación de plantas, lo que a su vez podría incrementar costos como: instrumentación, materia prima, al aumentar la competencia, entre otros.

Dicho lo anterior, es erróneo creer que un cultivo es sustentable sólo por el hecho de ser renovable. Muchos cultivos usados para consumo humano son renovables sólo en la medida que muchos recursos son utilizados. Algunos sistemas de producción de biocombustibles pueden incrementar las emisiones de GEI en relación a los combustibles fósiles que reemplaza, agravando así el problema del calentamiento global. Además, se ha llegado a dudar de la factibilidad de producción de algunos cultivos, debido a que al comparar diversos estudios, el balance energético resulta distinto, en gran medida por el hecho de si en el estudio en cuestión se considera a la

maquinaria como un requerimiento energético más para llevar a cabo el proceso de producción del biocombustible.⁷

En lo que a biocombustibles y sustentabilidad se refiere, los aspectos claves son los siguientes:⁸

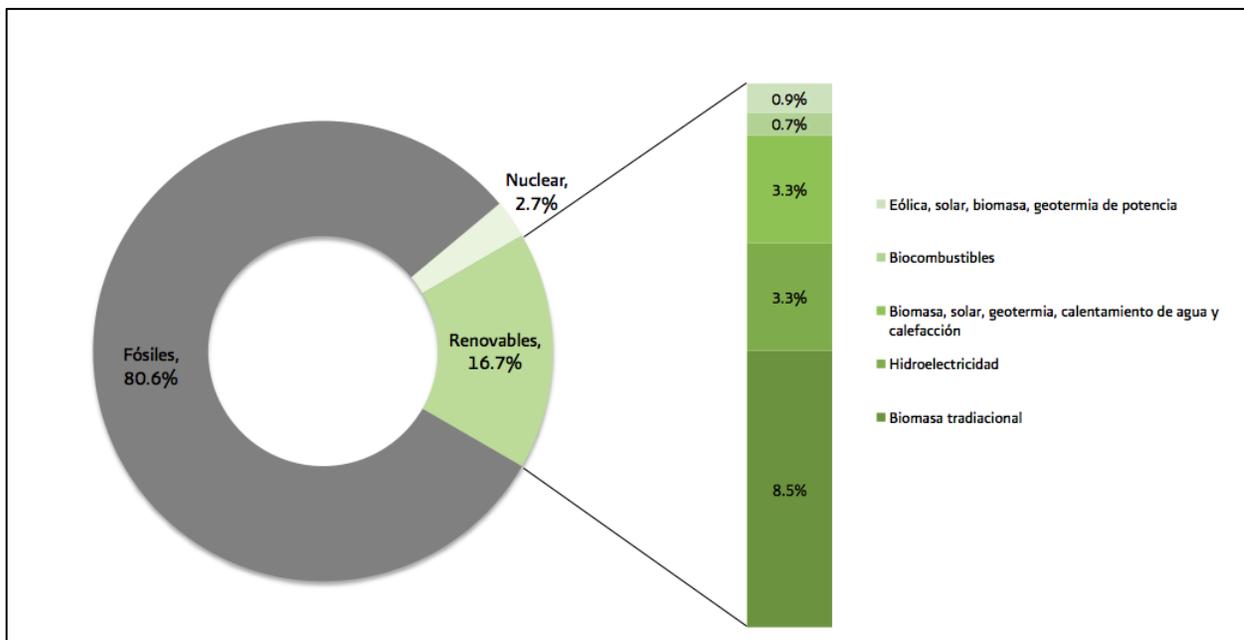
- Ser “carbono neutral”, considerando la necesidad de sustituir los combustibles fósiles y mitigar el calentamiento global. (Imposible con la matriz energética actual).
- No afectar la calidad, cantidad y el uso razonable de los recursos naturales disponibles como agua y suelo.
- No tener consecuencias sociales indeseadas como hambrunas por el alto precio de los alimentos, o generar escasez.
- Contribuir al desarrollo económico y social, y a la equidad.
- No afectar la biodiversidad.

En el Anexo 2-B se trata con mayor detalle los aspectos a considerar para una valoración de sustentabilidad efectiva.

Finalmente, en lo respectivo a la seguridad energética que aportan los biocombustibles se puede nombrar la confiabilidad del suministro, la reducción de uso de combustibles fósiles, incrementando la independencia del recurso. Al no tener que importar combustibles fósiles, no se está sujeto a las variaciones del precio del crudo por circunstancias externas. Finalmente la más importante ventaja de los biocombustibles es su renovabilidad dada por las materias primas usadas para su producción.⁶

Como se mencionó, el uso de energías renovables no convencionales sigue siendo bajo en el mundo, en particular los biocombustibles representan menos del 1% del total del consumo mundial de energía, como muestra la Figura N°3. El uso de energías renovables no convencionales (modernas) corresponde al 4,9% (se excluye la hidro y la biomasa tradicional), siendo los biocombustibles un 0,7% del total, lo cual es muy bajo, en comparación al 80,6% de participación de los combustibles fósiles.

Figura N°3: Distribución del consumo mundial de energías renovables, 2010



(Fuente: REN 21 Renewables 2012 Global Status Report. 2012) ⁹

La participación de los biocombustibles en la matriz energética mundial (0,7%) corresponde principalmente a bioetanol y biodiesel, dos de los biocombustibles más usados. El primero puede usarse para reemplazar la gasolina, y el segundo el diesel. El bioetanol ha tenido un crecimiento sostenido, y su producción es mucho mayor que la de biodiesel (Anexo 2-C). Este último se ha instalado como una alternativa fuerte para la sustitución del diésel convencional; aportando así a la disminución del uso de este combustible fósil. Este reemplazo se puede dar en motores diesel, los cuales se encuentran principalmente en la industria del transporte.

Los principales países productores de biodiesel al año 2011 son EEUU, Alemania Argentina, Brasil y Francia. (Anexo 2-D)

1.2.1 Biodiesel

- Definición:

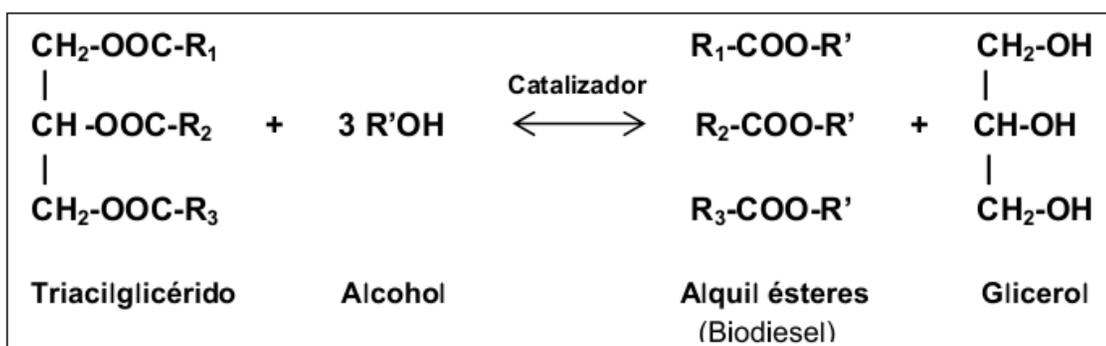
Como se mencionó, el biodiesel o FAME (Fatty Acid Methyl Ester) es un combustible renovable, derivado de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales.

Los aceites vegetales contienen hidrocarburos saturados (triglicéridos), los cuales consisten en glicerol y ésteres de ácidos grasos. Además, los ácidos grasos contienen distintos números de enlaces y de carbonos en sus cadenas.

Existen dos tipos de ácidos grasos: los saturados, que son compuestos polares y contienen un enlace carbono simple, y los insaturados, que incluyen uno o más enlaces carbono doble y son polares. Algunos ejemplos de ácidos grasos son: palmítico, esteárico, oléico, y linoleico. ²

Existen diversos métodos para modificar los ácidos grasos como: dilución, pirólisis, transesterificación, y microemulsión. La transesterificación es el método más comúnmente utilizado para obtener biodiesel de calidad de una forma sencilla. La reacción de transesterificación se muestra en la Figura N°4, y se tratará en detalle más adelante. ²

Figura N°4: Proceso de Transesterificación



(Fuente: REN 21 Renewables 2012 Global Status Report. 2012) ⁹

- Características:

Las características del biodiesel son diversas y repercuten en el medioambiente, el vehículo donde se utiliza, y en la economía local.

- Ventajas:

La materia prima puede provenir de cultivos energéticos, los cuales pueden ser usados en la recuperación de suelos degradados, salinos y susceptibles a la erosión; además, pueden ser cosechados como rebrotes cada tres o cuatro años, y las raíces pueden sobrevivir por décadas. ¹⁰

El uso de biodiesel aporta a la conservación del medioambiente, ya que es un biocombustible biodegradable, su uso reduce significativamente las emisiones y gases de los motores diésel tales como: hidrocarburos no combustionados (68%), monóxido de carbono (44%), óxidos de azufre (100%), e hidrocarburos poli cíclicos aromáticos (80-90%).

Es seguro de manipular y almacenar, y puede ser fácilmente producido en cantidades domésticas.²

El biodiesel puede ser producido económicamente en un amplio rango de lugares, tanto en localidades urbanas, como rurales, y a diferentes escalas, desde pequeñas cantidades para autoconsumo, hasta escalas comerciales. Además, posee una amplia gama de materias primas para su producción, y tiene gran potencial para ser producido por aceites no comestibles, eliminando la controversia que trae consigo el uso de alimentos para la producción de combustibles, además de dar solución al problema de contaminación generado por la inadecuada disposición final de los aceites.

El contenido energético del biodiesel es de 90% en relación al de diésel proveniente de petróleo, mientras que el de etanol es de 67% con respecto al de la gasolina.

El biodiesel puede sustituir al diésel convencional sin necesidad de reconversión mecánica de los motores de las máquinas. Generalmente se emplea en mezclas con diésel con hasta 20% de biodiesel; sin embargo, en algunas máquinas se usa puro o con mayores porcentajes de biodiesel, realizando pequeñas modificaciones en el motor.

El biodiesel contiene 11% de oxígeno en peso, y no contiene azufre, además posee mejores cualidades lubricantes que el combustible tradicional, lo que aumenta la vida útil de un motor.¹⁰

Finalmente, el biodiesel tiene mayor poder disolvente que el diésel, lo que hace que no se produzca carbonilla ni se obstruyan los conductos, manteniendo así el motor limpio.¹⁰

- Desventajas

El biodiesel posee malas propiedades a baja temperatura, presenta problemas de fluidez y congelamiento en estas circunstancias, solidificándose y formando cristales, lo que podría obstruir los conductos por donde transita el biodiesel durante su uso.

Algunos de los problemas más comunes son los depósitos de carbón, taponamiento de las líneas, gelificación de los aceites vegetales, suciedad en la cabeza de los pistones, y la adherencia de anillos.²

Por su alto poder solvente, puede degradar algunos materiales como el caucho y espuma de poliuretano, esto podría contaminar los motores afectando su rendimiento.

El biodiesel posee menor estabilidad a la oxidación debido a que posee dobles enlaces y oxígeno en su molécula. Esto afecta el tiempo de almacenamiento del biodiesel, el que no debe superar los 6 meses.

La presencia de K y Na en el biodiesel puede provocar la precipitación de jabones, obstruyendo filtros. Para que el biodiesel no contenga estos elementos se debe realizar un adecuado proceso de lavado durante su producción, otro elemento a considerar en el lavado es la glicerina.

La capacidad energética del biodiesel es menor que el diésel convencional (10% aproximadamente) por lo que su consumo es levemente mayor.

El uso de biodiesel eleva los niveles de emisión de óxidos de nitrógeno los cuales contaminan la capa de ozono. Estos son: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y el óxido nitroso (N₂O). El óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) se suelen considerar en conjunto por la denominación NO_x. En concentraciones altas producen daños a la salud y a las plantas, y corroen tejidos y materiales diversos. Además tienen una vida corta y se oxidan rápidamente a HNO₃ (ácido nítrico), el cual está presente en la formación de smog fotoquímico, del nitrato de peroxiacetilo (PAN), influye en las reacciones de formación y destrucción del ozono troposférico y estratosférico, así como en el fenómeno de la lluvia ácida.¹¹

La última desventaja a mencionar es el precio poco competitivo frente a los derivados fósiles, debido principalmente a los costos de materia prima, los pueden llegar a ser hasta el 75% del costo total del biodiesel cuando son usados aceites vegetales vírgenes. Las ventajas y desventajas mencionadas se resumen en la Tabla N°2.

Tabla N°2: Ventajas y desventajas del uso del biodiesel

	Ventajas	Desventajas
Económico	Amplia gama de materias primas. Seguro de manipular y almacenar, y puede ser fácilmente producido en cantidades domésticas.	Precio poco competitivo con respecto al diésel convencional, al usar aceites vegetales como materia prima.
Ambiental	Es biodegradable Reduce la cantidad de hidrocarburos no quemados, las emisiones de gases de efecto invernadero y óxidos de azufre. No contiene azufre. Evita la contaminación producida por inadecuada disposición final de los aceites.	La presencia de K y Na en el biodiesel puede provocar la precipitación de jabones, obstruyendo filtros. Eleva los niveles de emisión de óxidos de nitrógeno (NO _x)
Seguridad energética		El contenido energético del biodiesel es de 90% en relación al de diésel proveniente de petróleo.
Uso en motores	Buen sustituto del diésel sin cambios al motor. Mejores cualidades lubricantes lo que aumenta la vida útil del motor. Mayor poder disolvente que el diésel lo que hace que no se produzca carbonilla ni se obstruyan los conductos.	Problemas de fluidez y congelamiento a bajas temperaturas, solidificándose y formando cristales, lo que podría obstruir los conductos, tapar las líneas, ensuciar la cabeza de los pistones, y dejar pegajosos los anillos. Puede degradar algunos materiales como el caucho y espuma de poliuretano, esto podría contaminar los motores.

(Fuente: Elaboración propia)^{10, 11, 12}

1.2.2 Materia prima para producción de biodiesel

Los aceites de origen vegetal son la fuente de materia prima más importante para la producción de biodiesel a nivel mundial. Los principales aceites que se utilizan con fines energéticos son el de palma aceitera, soya, raps y maravilla, los que representan en conjunto alrededor del 85% de la producción mundial de oleaginosas (Anexo 3-A). De éstos, el aceite de palma es el único que no tiene fines alimenticios, por lo que se considera una fuente de segunda generación. Las fuentes de primera generación son las materias primas frecuentemente comestibles, de plantas tradicionales. Al ser cultivos que generalmente son destinados a fines alimenticios, surge hacia esta opción

una controversia sobre si su uso hacia otros fines -como el energético- es éticamente responsable en relación al uso de suelos, y el posible aumento de precio de las semillas.

En las materias primas de segunda generación la controversia anterior no existe ya que son fuentes que no son usadas para fines alimenticios. Sin embargo, se debe tener especial cuidado con los impactos negativos de algunos procesos de explotación y producción como la deforestación y la amenaza de la biodiversidad descritas anteriormente.⁷

Otros cultivos y materias primas para obtención de biodiesel ya sean de primera o segunda generación se enlistan en el Anexo 3-B.

En la estructura de costos de la producción de biodiesel, el costo de la materia prima es la parte crítica en el paso hacia la industrialización de este proceso. El costo del aceite vegetal puede ser hasta el 75% del costo total de manufactura, por esta razón el costo de biodiesel es del orden de 1,5 veces más alto que el diesel.¹²

El aceite vegetal usado (AVU) es de dos a tres veces más barato que los aceites vírgenes, lo que reduce significativamente el costo de producir biodiesel. Lo anterior, sumado a las razones enunciadas (controversia por fin y costo de materia prima) promovido la investigación de producción de biodiesel a partir de AVU, considerado materia prima de primera generación. En condiciones óptimas es posible alcanzar rendimientos de proceso y calidad de biodiesel similares entre el biodiesel obtenido a partir de AVU y de aceites vegetales (cerca de 90%).^{12, 13}

1.3 Situación en Chile

Según un estudio realizado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura (IICA) llamado "Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas" en su volumen para el biodiesel; en Chile no existen cifras significativas sobre producción de biodiesel, en comparación con los países vecinos.

En cuanto a materias primas comunes para producción de biodiesel, existen dos fuentes de aceite que son los principales cultivos oleaginosos del país: colza (raps o canola) y maravilla (girasol) - especies de primera generación -, con superficie de cultivo de 25.360 y 3.780 hectáreas respectivamente para el período 2008-2009 (Ministerio de Agricultura, 2009). Ambas fuentes de aceite crecieron sostenidamente en

la década 2000-2009; la superficie total de colza plantada aumentó 39% al año en promedio, y la de girasol 14%, siendo mucho mayor durante los últimos años.¹⁰

Si bien es cierto que las materias primas nombradas sirven para producir biodiesel, en la actualidad son usadas para otros fines. Además, según el informe titulado “Evaluación y Sensibilización de Estudios Técnico-Económicos Respecto al Potencial de Biocombustibles en Chile” del Centro Avanzado de Gestión, Innovación y Tecnología para la Agricultura de la Universidad Técnica Federico Santa María (2007)¹⁴, sólo es posible reemplazar el 2% de la demanda de biodiesel proyectada para el año 2010 utilizando Raps como materia prima, debido a que la cantidad de hectáreas de Maravilla y Raps disponibles no son suficientes el estudiar otros escenarios (5 y 8%). Además, la rentabilidad de cultivo para un productor individual es siempre positiva (17-24%) sólo en el escenario optimista para el precio de grano (Raps). Lo anterior da cuenta de un escenario favorable para la producción de biodiesel en base a Raps, no obstante, con diversas limitaciones. La generación de empleo es marginal; sin embargo, no se tomó en cuenta el empleo indirecto al proceso productivo, lo que elevaría este factor.

Existe un costo social en torno a la sustitución de un 5% de la demanda de biodiesel (MMUS\$22, 2010) consecuencia de la eliminación del impuesto específico a los combustibles.

Finalmente, el estudio señala que los biocombustibles de segunda generación, podrían tener mayores ventajas competitivas en el futuro. No obstante, señala que existe un valor importante al ingresar al mercado de biocombustibles independientemente de la baja rentabilidad que resultaría la producción actual, y es la capitalización del “*know how*” futuro, lo que puede llegar a ser muy valioso.^{14, 15}

Así, la Maravilla y el Raps son las principales especies con potencial para la producción de biodiesel en Chile y son de primera generación, siendo higuera (*Ricinus communis*) y jojoba (*Simmondsia chinensis*) las únicas especies de segunda generación potencial de desarrollo en el país, a pesar de que las consideran como de primera generación

En Chile existen algunas plantas productoras de biodiesel. La Planta FAME de Pullman Bus y Planta Industrias Grasas y Aceites Ltda. (INGRAS) son las más importantes, la primera emplea AVU, mientras que la segunda utiliza aceites y grasas recicladas. Otros proyectos de producción de biodiesel son: Biodiesel Chile S.A., Biodiesel Austral S.A. y

Biodiesel Sur S.A. (las tres plantas pertenecen al mismo grupo empresarial), Planta Matadero en Concepción, Bioengine en Puente Alto, Preseco S.A. en Las Condes, la planta artesanal de la Dirección de Gestión Ambiental (DIGA) de la Municipalidad de La Pintana, y la planta piloto de biodiesel en Hualpén, iniciativa de la Municipalidad de la misma comuna en conjunto con la agrupación ecológica Cerro Amarillo, en la Octava Región, donde en el año 2011 se inauguró una planta capaz de transformar 100 litros de aceite de fritura usado, en 90 litros de biodiesel y 8 litros de glicerina, aportando el combustible necesario para la flota de vehículos municipales. Además existen instituciones públicas y privadas que realizan investigaciones para estudiar las posibilidades reales de producción de biodiesel a gran escala en el país. Además, al año 2010, existían tres consorcios en el país dedicados a la producción de biodiesel con un financiamiento de US\$ 19 millones aproximadamente; éstos y otras iniciativas se muestran en la Tabla N°3.

Tabla N°3: Instituciones y proyectos de investigación en producción de biodiesel

Consorcio	Tipo	Instituciones	Nombre del Proyecto	Avances
Algaefuel S.A.	Microalgas	Manafuels S.A. (35%) E.CL (27%) COPEC (25%) PUC (13%) Inicio: 2010 Duración: 5 años Inversión: MM\$6.836	Implementación, ejecución y desarrollo de programas de investigación, desarrollo, e innovación relacionados a la producción de biocombustibles a partir de micro algas.	Este consorcio opera a través de dos laboratorios de campo, de una hectárea de producción cada uno. El Laboratorio de Campo 1 (Central Térmica de Mejillones), se encuentra en proceso de construcción de piscinas de mayor tamaño (150 m ³) para comenzar la producción de biomasa microalgal en mayor escala. Durante el 2013 se obtuvo mayor cantidad de biodiesel, el cual se probó en motores estacionarios. Además se construyó y habilitó un moderno laboratorio para nuevas investigaciones. Objetivo: cultivo de microalgas en agua de mar y con dióxido de carbono proveniente de fuentes fijas para la producción de biocombustible de segunda generación. ¹⁹
Desert Bioenergy S.A.	Microalgas	E.CL (41,2%) U.de Antofagasta (30,9%) Prodalmar Ltda. (12,4%) U. de la Frontera (10,4%) Molinera Gorbea Ltda. (5,2%) CICITEM Pigmentos Naturales S.A. Minera Michilla Duración: 5 años Inicio: 2011 Inversión Total: MMUS\$7	Investigación y desarrollo de tecnología para la elaboración de biodiesel a partir del cultivo de micro algas y, en forma complementaria, de otros bioproductos de interés económico.	Implementación y puesta en marcha de la primera planta piloto para el cultivo de microalgas inaugurada recientemente en Tocopilla. Además, la inyección de gases de combustión en los sistemas de cultivo, y la implementación de la planta piloto de biodiesel y biogás, lo que convierte a la central en una de las pocas a nivel internacional en integrar en un solo lugar desde la producción de micro algas hasta la producción de biodiesel. ¹⁹ “Estamos en una etapa de producción y monitoreo. Actualmente, por cada 100 kilos de biomasa se producen 10 litros de biodiesel -en unas 24 horas- y por cada 150 gramos se producen unos 200 ml de biogás” (Dr. Gustavo Ciudad, uno de los encargados de la puesta en marcha de esta segunda etapa, Diciembre, 2013.) ²⁰

	Colza	Instituto de Agroidustrias, U de la Frontera	Producción de biodiesel a partir de aceite de colza.	
	Raps	Universidad de la Frontera (UFRO) Universidad de Concepción Molino Gorbea COPEC Sociedad de Fomento Agrícola (SOFO) Aporte FONDEF: MM\$ 272 Proyecto N°: DO5I10391	Utilización de Brassica napus para la producción de biodiesel: desarrollo y optimización del proceso	La producción del biocombustible será generada en planta piloto y los ensayos específicos se realizarán en los laboratorios de las universidades participantes. Anteriormente se realizó una investigación llamada "ESTUDIO TEORICO EXPERIMENTAL DE LA UTILIZACIÓN DE ESTERES METILICOS DE BRASSICA NAPUS COMO COMBUSTIBLE" donde se concluyó que el biodiesel producido cumple con la normativa europea (EN 14214) y la americana (ASTM 6751). ^{21, 22}
	Algas	CRI Reyentué, INIA	Posibilidades de agrodiesel en la región del Maule	
	Microalgas	Universidad de Tarapacá Corporación Educacional La Araucana Inicio: 2006 Duración: 40 meses FONDEF: MM\$380 Proyecto N°: D06I1099	Desarrollo de un paquete tecnológico para producir bioenergía a partir de algas	El presente proyecto plantea la diversificación de la matriz energética utilizando algas como fuente de materias primas alternativas, mediante dos fuentes: por medio de la extracción de aceite desde microalgas, probando un método eficiente (tecnología de CO ₂ supercrítico) que permita su utilización por empresas emprendedoras que pretendan ingresar en el negocio de aceite y/o del biodiesel. La segunda manera de utilizar algas que plantea el proyecto se basa en la obtención de etanol a partir de microalgas, mediante el proceso de fermentación. ²³
		Dpto. Ciencias de la Ingeniería, U de Talca	Producción de biodiesel a pequeña escala, optimización del combustible	

		CATA, Dpto. de Industrias, U. Santa María	Evaluación socioeconómica y balance energético de la cadena productiva, desde la producción de materia prima hasta la elaboración del biodiesel y bioetanol en Chile, a partir de cultivos agrícolas tradicionales.	
	Microalgas	U. de Antofagasta Inicio: 2006 Duración: 36 meses FONDEF: 280 millones de pesos Proyecto N°:D0611021	Optimización y mejoramiento biotecnológico de las condiciones de cultivo de la microalga verde <i>Botryococcus Braunii</i> para la obtención de biohidrocarburos	Durante el transcurso del proyecto se espera optimizar la obtención de biomasa microalgal rica en hidrocarburos y por otro lado, usando herramientas biotecnológicas, identificar y sobreexpresar los genes responsables de la síntesis de hidrocarburos mejorando su eficiencia en <i>B. braunii</i> . Al término del proyecto se espera transferir la tecnología para tener un prototipo a escala con un volumen de 10000 litros para la producción de 20 kilos de biomasa, cuya transferencia tecnológica será a empresas dedicadas a la producción de sustancias bioactivas provenientes de microalgas. ²⁴

Fuentes:

- Seminario internacional de clausura de proyecto: "Procesos óptimos para el tratamiento de materiales lignocelulósicos para la producción de bioetanol". Biocombustibles en Chile, Viviana Ávalos, Ministerio de Energía.¹⁶
- Bioenergía en Chile.¹⁷
- Colegio de Ingenieros Agrónomos de Chile, 2009.¹⁸
- Memoria Anual ECL, 2013.¹⁹
- UFRO.CL. "Planta productora de biocombustibles a partir de microalgas puso en marcha segunda etapa".²⁰
- BODIESEL.COM.AR. "Producción de biodiesel en Chile, presentan la primera estación a escala industrial de este biocombustible".²¹
- CONICYT. "Se abre la llave del Biodiesel".²²
- CONICYT. Resumen Proyecto: "Desarrollo de un paquete tecnológico para producir bioenergía a partir de algas".²³
- CONICYT. Resumen Proyecto: "Optimización y mejoramiento biotecnológico de las condiciones de cultivo de la microalga verde *Botryococcus braunii* para la obtención de bio-hidrocarburos".²⁴

La Universidad de La Frontera, Molino Gorbea y Copec, desde el año 2009, tienen en operación experimental, una planta piloto que emplea semillas de raps como materia prima para la producción de biodiesel. Existen otras instituciones educacionales que han desarrollado proyectos de investigación usando especies oleaginosas como materia prima para la producción de biodiesel de segunda generación, estos son: Universidad de Chile y Universidad de Tarapacá con jatropha (*Jatropha curcas*), Universidad de Concepción con camelina (*Camelina sativa*) y mostaza (*Sinapis alba*) y Pontificia Universidad Católica de Chile con guindilla (*Guindilia trinervis*). Todos son proyectos a nivel de investigación, no siendo aún posible la producción intensiva de estas especies.

El consorcio Biocomsa S.A., se encuentra desarrollando proyectos destinados a producir biocombustibles de segunda generación. Este consorcio emplea cultivos lignocelulósicos, desechos forestales y desechos agrícolas como materia prima para la producción de biodiesel de segunda generación. La inversión para el desarrollo de este consorcio alcanzan US\$3,77 MM, siendo US\$1,97 MM aportados por InnovaChile de CORFO (CORFO, 2008).

InnovaChile de CORFO también está financiando otros dos proyectos que buscan la producción de biodiesel de tercera generación, proveniente desde el aceite de microalgas. Los consorcios favorecidos son Desert Bioenergy S.A. y Algafuels S.A., en conjunto estos dos consorcios invertirán US\$19,57 MM, y el aporte de InnovaChile equivale a US\$10,79 MM.¹⁶

Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado iniciativas de investigación y de puesta en marcha de laboratorios y escalas piloto de producción de biodiesel a partir de aceite de microalgas, que corresponde a un cultivo de tercera generación, que tiene distintas ventajas por sobre cultivos tradicionales. En primer lugar, el proceso productivo de la biomasa es del orden de pocos días frente a otros vegetales con etapas productivas que duran meses; se usan terrenos con áreas menores a cultivos agrarios, y el cultivo no es estacional. En segundo lugar, estos cultivos pueden ser desarrollados en el desierto (tierra infértil para otras especies) donde aprovechan altos niveles de radiación solar, por ello nuestro país posee gran potencial en esta materia.²⁵

Finalmente, dado que el CO₂ es uno de los componentes requeridos por estos cultivos para la generación de aceite; éste puede ser aportado por las chimeneas de fábricas y termoeléctricas, aportando en la reducción de gases de efecto invernadero (GEI).

1.3.1 Marco Regulatorio

En Chile, no existe un estatuto especial que reglamente los biocombustibles en el país. Sin embargo, éstos deben cumplir con una serie de disposiciones legales de carácter general que también son aplicadas a los combustibles fósiles, además de otras normas asociadas al tipo de biocombustible (bioetanol o biodiesel), a los insumos que se utilicen en su producción (vegetales o residuos), composición química o las actividades a las que son objeto a lo largo de la cadena de producción – consumo (procesamiento, almacenamiento, transporte o expendio).²⁶

Todo combustible líquido y gaseoso en Chile, cualquiera sea su origen, nacional o importado, debe cumplir con regulación específica y está sometido al control de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC).

- Regulación asociada la seguridad:

Se debe cumplir con las normas contenidas en el Decreto Supremo DS N° 90/1996 del Ministerio de Economía, fomento y Reconstrucción, “Aprueba Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento, Refinación, Transporte y expendio al Público de Combustibles Líquidos Derivados del Petróleo”, el que se aplica en forma supletoria a todo combustible líquido mientras no se dicte una regulación específica.

Para el transporte y expendio, las normas dependerán de las características físico-químicas.

- Regulación asociada a los procesos y tipo de biocombustible:

En el caso de biodiesel que provenga de residuos, el proceso productivo debe sujetarse a la regulación sanitaria que se encuentra contenida en el Código Sanitario y es controlada y fiscalizada por la Secretaría Regional Ministerial (SEREMI) de Salud.

- Regulación asociada a las etapas de la cadena producción - consumo:

Todas las etapas (importación, producción, procesamiento, almacenamiento, transporte, abastecimiento y expendio) se encuentran afectos al cumplimiento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), de esta forma, la Comisión Nacional del Medioambiente incide directamente en las condiciones de operación.

Respecto a las normas asociadas al almacenamiento y procesamiento, se deben considerar aquellas relacionadas con:

- Seguridad, sanitarias y medioambiente: En lugares destinados al trabajo, el Decreto Supremo N°594/1999, del Ministerio de Salud: “Reglamento que establece las Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo”.
- Uso de suelo permitidos: Se debe cumplir con las normas urbanísticas exigidas en el Decreto Supremo N°47/92, del Ministerio de Vivienda y Urbanismo: “Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones”.

Respecto a las normas asociadas al expendio, la regulación actual exige el cumplimiento de normas de calidad, por lo que basta que se respeten los parámetros establecidos a fin de cumplir la normativa vigente, la cual está definida en la norma chilena para biodiesel (publicada el 9 de Mayo de 2008): “Especificaciones de calidad para la producción, importación, Transporte, Almacenamiento, Distribución y Comercialización de biodiesel”. Sus parámetros se encuentran en el Anexo 4-A.

La normativa posee una distinción relacionada al insumo principal para la producción de biodiesel, ésta distingue en primer lugar la producción y procesamiento de biodiesel proveniente de cultivos oleaginosos, y en segundo lugar, cuando el biodiesel que se quiere producir proviene de residuos orgánicos. La producción de biodiesel a partir de residuos orgánicos, debe cumplir con todos los requisitos y autorizaciones indicadas para aquellos producidos a partir de cultivos oleaginosos, con excepción de que en este último caso es necesaria una Autorización Sanitaria para el Almacenamiento de Residuos, en vez de la emisión de un Informe Sanitario.

En el Anexo 4-B se muestran los trámites que deben llevarse a cabo en pos de cumplir con las exigencias nacionales.^{25, 26}

En los últimos años se han impulsado las siguientes normativas legales relacionadas con los biocombustibles y su desarrollo:²⁸

- **Circular N°30/2007**, SII. Indica que los biocombustibles no son afectos al impuesto específico según Ley 18.502/1986

- **Decreto N° 11/2008**, Ministerio de Economía. Define las especificaciones de calidad para biodiesel y bioetanol, autoriza la mezcla de 2% y 5% con petróleo diesel y gasolina, y anuncia el registro de personas e instituciones en la SEC.
- **Decreto N° 128/2008**, Ministerio de Minería. Crea comisión interministerial en materia de biocombustibles en Chile.
- **Ley N° 20.339/2009** modifica el DFL N°1/1979 del Ministerio de Minería, incorpora los biocombustibles como combustibles líquidos y otorga facultades a la SEC para su fiscalización.
- **Resolución Exenta N° 746, SEC**. Norma técnica para análisis y/o ensayos para bioetanol y biodiesel.
- **Resolución Exenta N° 142**, Ministerio de Economía. Establece procedimientos para la inscripción de las personas naturales y jurídicas que realicen actividades relacionadas con los biocombustibles y sus instalaciones.

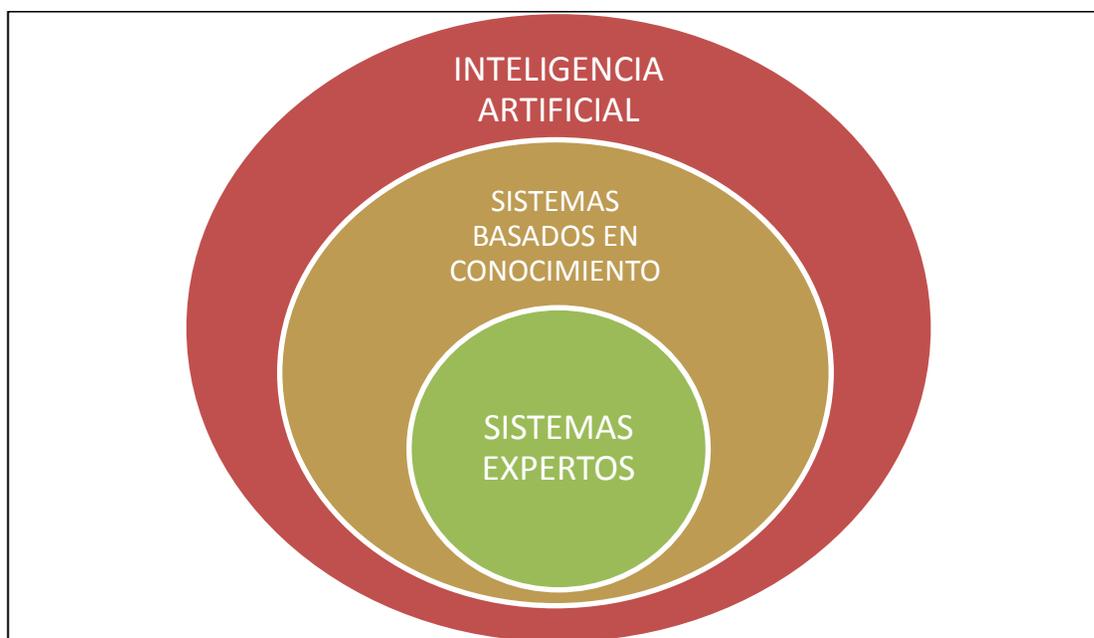
1.4 Sistemas expertos ^{29 - 36}

Un sistema experto es un tipo de sistema basado en conocimiento. Estos últimos se definen como sistemas avanzados de representación y resolución de problemas complejos. La forma en que se articula junto a sus formalismos, son la base de muchos sistemas actuales como el usado en un cajero automático, o en el mismo computador personal que posee un sistema operativo.

A través de la aplicación de técnicas de la inteligencia artificial (IA), los sistemas expertos captan el conocimiento básico y específico que permite a una persona desempeñarse como experto en un dominio de conocimiento determinado, esto mediante la simulación del proceso de razonamiento humano. Así, un sistema experto puede definirse simplemente como una aplicación informática que se emplea para resolver problemas complicados que de otra manera exigirían ampliamente la pericia humana.²⁹

En la Figura N°5 se observa el desglose desde la IA hacia los sistemas expertos. La IA abarca sistemas de procesamiento simbólico y heurísticas; luego los sistemas basados en conocimiento ponen mayor énfasis en el conocimiento y en la arquitectura de hardware; finalmente, cuando se aplica ese conocimiento a la resolución de un problema concreto mediante el conocimiento propio de la experiencia de un experto, es cuando se habla de un sistema experto.

Figura N°5: Diagrama de pertenencia entre los sistemas expertos y la IA



(Fuente: Elaboración propia)

Otros tipos de sistemas basados en conocimientos son:

- Lenguaje natural
- Realidad virtual
- Redes neuronales
- Robótica
- Sistemas de planeación
- Reconocimiento de imágenes
- Traductores.
- Sistemas evolutivos.
- Aprendizaje.
- Sistemas Tutoriales

Un sistema experto ideal debe poseer las siguientes características:

1. *Amplio conocimiento específico a partir del campo de interés*
2. *Aplicación de técnicas de búsqueda*
3. *Soporte para análisis heurístico*
4. *Habilidad para inferir nuevos conocimientos a partir de conocimientos ya existentes*
5. *Procesamiento de símbolos*
6. *Capacidad de explicar su propio razonamiento*

Los sistemas expertos se han desarrollado desde la década de 1950 hasta la actualidad; en diversas áreas de conocimiento como: medicina, finanzas, industria, electrónica, militar, aeronáutica, agricultura, arqueología, geología, química, etc.

Algunos de ejemplos de sistemas expertos actuales son:

1. GREENESYS (2012): Es un una herramienta-método asesor en materias de sustentabilidad en diseño de productos amigables con el medioambiente.³⁰
2. ECOWATCH (2012): Es una herramienta que apoya decisiones basándose en técnicas de lógica difusa, la cual puede indicar puntos de inflexión en la calidad de aguas mediante la medición de variables de forma continua, las que puede relacionar con descargas urbanas o polución desde actividades agrícolas. Esto complementa los análisis de laboratorio, proveyendo información que es difícilmente detectada mediante muestreo discreto.³¹
3. Identificador de plantas mediante la medición del verdor (2013): Para identificar el tipo de plantas, en agricultura se utilizan ciertos métodos, que combinados en un sistema experto, con un método de filtración de imágenes según diferentes condiciones climáticas y ambientales, hace posible la identificación de malas hierbas, para que algún tipo de acción se lleve a cabo, como tratamientos específicos con productos químicos o manipulaciones mecánicas.³²

Los primeros sistemas expertos en desarrollarse, y otros ejemplos, se nombran y se describe brevemente su función en el Anexo 5-A.

Estructura de los sistemas expertos:³³

Los sistemas expertos tienen una estructura general definida, la cual posee los siguientes componentes:

- PRINCIPALES
 1. Base de conocimientos: corazón del sistema experto, posee hechos, heurísticas y reglas de procedimiento disponibles para el sistema
 2. Memoria de trabajo: contiene los hechos, datos, componentes del problema a resolver de acuerdo a la información almacenada en la base de conocimientos
 3. Máquina o motor de inferencia: es el sistema de software que ubica los conocimientos e infiere nuevos usando la base de conocimiento.
 4. Interfaz de comunicación: Es la interacción entre el sistema experto y el usuario.

- SECUNDARIOS
 1. Componente explicativo: explica al usuario la entrega de la solución encontrada y justifica el porqué de las decisiones tomadas.
 2. Subsistema de adquisición de conocimiento: ofrece ayuda a la estructuración e implementación del conocimiento en la base de conocimientos.

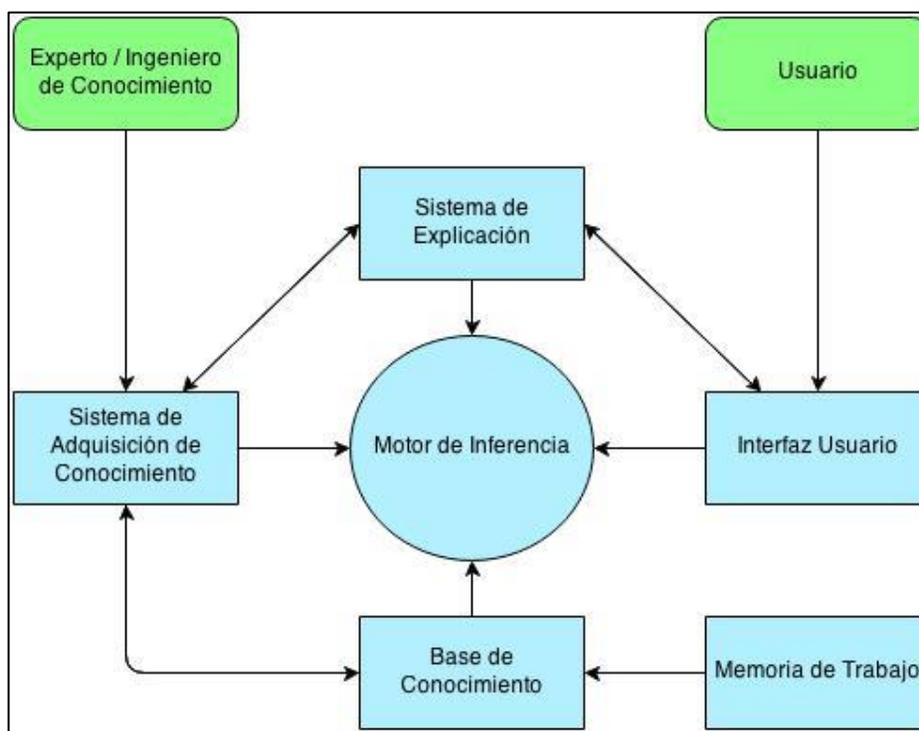
Equipo de desarrollo de los sistemas expertos: ²⁹

Las personas encargadas de llevar a cabo el desarrollo de un sistema experto deben cumplir ciertas características, y cada uno de ellos tiene un rol fundamental el éxito del proyecto. Las funciones de las personas se describen a continuación:

1. **Experto:** poner a disposición del sistema sus conocimientos específicos.
2. **Ingeniero de conocimiento:** Estructura los conocimientos del experto, dividiendo el problema en sub-problemas
3. **Usuario:** es el que opera el sistema experto. Puede estar operando en cualquiera de los modos siguientes:
 - a. *Verificador:* intenta comprobar la validez del desempeño del sistema.
 - b. *Tutor:* da información adicional o modifica el conocimiento del sistema.
 - c. *Alumno:* el usuario busca rápidamente desarrollar pericia personal relacionada con el área, recuperando los conocimientos específicos y condensados del sistema.
 - d. *Cliente:* aplica la pericia del sistema a problemas reales.

La relación e interacción entre los componentes descritos y el equipo a cargo del desarrollo se muestra en la Figura N°6.

Figura N°6: Estructura e interacciones del sistema experto.



(Fuente: elaboración propia)

Herramientas para el desarrollo de sistemas expertos:

Las herramientas para el desarrollo de sistemas expertos son soportes específicos que favorecen el desarrollo de estos sistemas ya que: ³³

1. Proporcionan ambientes enriquecidos que ayudan al desarrollo del software mediante editores de texto, paquetes de rastreo, opción multi-ventanas y facilidades de señalamiento.
2. Incluyen ayudas específicas para prototipos rápidos mediante registro histórico de cambios y control automático de versiones
3. Evitan que el ingeniero de conocimientos tenga que definir el modelo de consulta, la representación del conocimiento, y el paradigma de inferencia del motor porque estas facilidades están incorporadas en algunas herramientas. Esta es una gran ventaja en este caso, ya que el alumno no posee un grado de familiarización alto con concepto de IA y desarrollo de sistemas.
4. Existen herramientas para tareas específicas como adquisición de conocimiento, verificación del sistema, etc.

El principal desarrollo de las herramientas para sistemas expertos, fue la introducción de la estructura generalizada para un sistema experto, llamada *SHELL*. Esta última se define como un sistema experto con base de conocimiento vacía. Su desarrollo comenzó en la década de 1980, y a lo largo del tiempo se han sumado más y más *shells* en todo el mundo, debido a la variedad de aplicaciones en las que se pueden utilizar. La buena elección de una *Shell* puede ser crucial en tiempo del desarrollo del sistema experto; al no existir una *Shell* en específico para un problema determinado, el ingeniero de conocimientos debe experimentar con varias de ellas para dar con la más adecuada según el dominio de conocimiento.^{34, 35}

Toda *Shell* debe tener las siguientes funciones:

1. Esquema de representación de conocimiento
2. Interface o mecanismo de búsqueda
3. Forma de describir un problema
4. Detalle del estado durante la solución de un problema.

Una vez que ha seleccionado la *Shell*, se puede comenzar a desarrollar el prototipo de sistema experto para un dominio específico.

La usabilidad del sistema experto es mucho más importante que la automatización. Para ser una aplicación útil, los sistemas expertos deben estar integrados en otros sistemas de información mayores. Los expertos, tanto como desarrolladores y usuarios de los sistemas, tienen un rol crucial en el éxito de la aplicación.

El problema con la evaluación empírica es que un solo estudio proporciona solamente una pieza de evidencia para su validación. El análisis de los múltiples procesos del sistema, aumentan la confianza sobre el mismo.^{34, 35, 36}

Verificación, validación y evaluación de sistemas expertos:

Una vez que se ha finalizado el desarrollo del prototipo, se debe llevar a cabo la etapa de prueba del mismo. Esta prueba puede estar orientada a los resultados del sistema y/o al uso del mismo. En primer lugar se debe verificar el sistema, para ello se debe comprobar lo siguiente: que el sistema se ha llevado a cabo correctamente, que el sistema no contiene errores de implementación, y que el sistema cumple con las especificaciones inicialmente definidas.

En segundo lugar se debe validar el sistema, lo que se traduce en comprobar: que se está desarrollando el sistema (prototipo) correcto, que la salida del sistema es la correcta, y que el sistema cumple con las necesidades y los requisitos del usuario.

Por último, en la etapa de evaluación se pueden analizar posibilidades de expansión del dominio, base de conocimiento, funcionalidades, conexión con softwares externos entre otros.

La ejecución de las tres etapas descritas, conduce a mejorar el prototipo para finalmente obtener un producto final sin errores y confiable, ya sea en su base de conocimientos o su funcionamiento interno; y que cumpla con los requisitos del usuario.

1.5 Motivación

La motivación principal de este trabajo es poder aportar en el desarrollo de alternativas energéticas a los combustibles fósiles, en particular a los biocombustibles como el biodiesel, para así contribuir hacia un desarrollo sostenible y limpio, a través de la expansión del “*know-how*” del proceso de obtención de biodiesel mediante el uso de aceite usado o de ricino, para aportar al conocimiento de este proceso, y que en un futuro puedan concretarse proyectos a mayor escala en el país.

Si bien es cierto que el uso de biocombustibles no solucionará los problemas medioambientales actuales, su uso colabora en el camino hacia una solución definitiva de la mano de una tecnología más eficiente, y que no contamine como podrían ser las celdas de combustible con hidrógeno u otra.

1.5.1 Descripción del proyecto

El trabajo realizado consistió en la implementación de un sistema experto capaz de asesorar efectivamente durante el proceso de producción de biodiesel.

Primero se realizó la búsqueda bibliográfica pertinente a los sistemas expertos, y cuando se tuvo una idea global del problema se estudió paralelamente la producción de biodiesel a partir de aceite usado y de plantas de ricino.

Una vez recopilada la información, se forma la base de conocimiento del sistema experto, que idealmente debiese complementarse con información aportada por al menos un experto en la materia. El conocimiento es representado y almacenado mediante reglas SI-ENTONCES. Una vez lograda una cierta cantidad de reglas que abarquen el proceso a

grandes rasgos, se da forma a un prototipo, el que debe ser completado con información más detallada, corregido en su funcionamiento y validado en su eficacia.

Como se busca asesoría en producción de biodiesel, el sistema debe dar información adecuada como por ejemplo; secuencia de etapas, sugerencias de operaciones unitarias, materias primas y equipos, además de un pequeño análisis de costos de materias primas y productos resultantes.

La certidumbre de las conclusiones obtenidas es medida utilizando los factores de certidumbre de sus premisas; sin embargo en este caso se realizó una acabada búsqueda bibliográfica, por lo que se presume, la certidumbre de las premisas utilizadas es alta.

Finalmente, el sistema experto debe validarse mediante el análisis de las respuestas aportadas para distintos casos prueba, realizando una comparación con la respuesta que daría un experto o un grupo de ellos frente a los casos prueba. Este paso se lleva a cabo mediante el uso del sistema experto en la producción de biodiesel a escala de laboratorio. En este caso se realizó la validación para la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal usado.

Sin embargo, el biodiesel obtenido debe ser caracterizado y probado, y si sus características físicas – principalmente viscosidad – y de calidad resultan dentro de los límites definidos en las normas, entonces no debiesen existir dificultades para su uso en motores diesel.

El sistema experto puede ser refinado a partir de una caracterización de los productos obtenidos al seguir sus indicaciones y secuencia de etapas. Se pueden agregar alternativas a los procesos ya programados, y/o agregar otros procesos para dar mayor volumen de conocimiento al sistema.

1.5.2 Justificación

Junto con las ventajas que se obtienen del sistema experto, como reproducción y disponibilidad ilimitada, además de la portabilidad, es posible pensar que este tipo de programas puede contribuir de manera efectiva en distintos lugares, para distintas personas, logrando masificar este conocimiento, tan necesario para lograr que las energías renovables, en particular el uso de biocombustibles, se expanda y penetre aunque sea en pequeña escala en la matriz energética nacional.

Dado que aproximadamente un 27% de la energía consumida en el mundo es usada en el sector transporte, y que además este sector es el segundo sector que más aporta emisiones

de CO₂, que es el principal GEI; se hace relevante la promoción de herramientas que aporten en la reducción del uso de diesel convencional, de manera sencilla, rápida, y con alta disponibilidad.

2. Marco Teórico

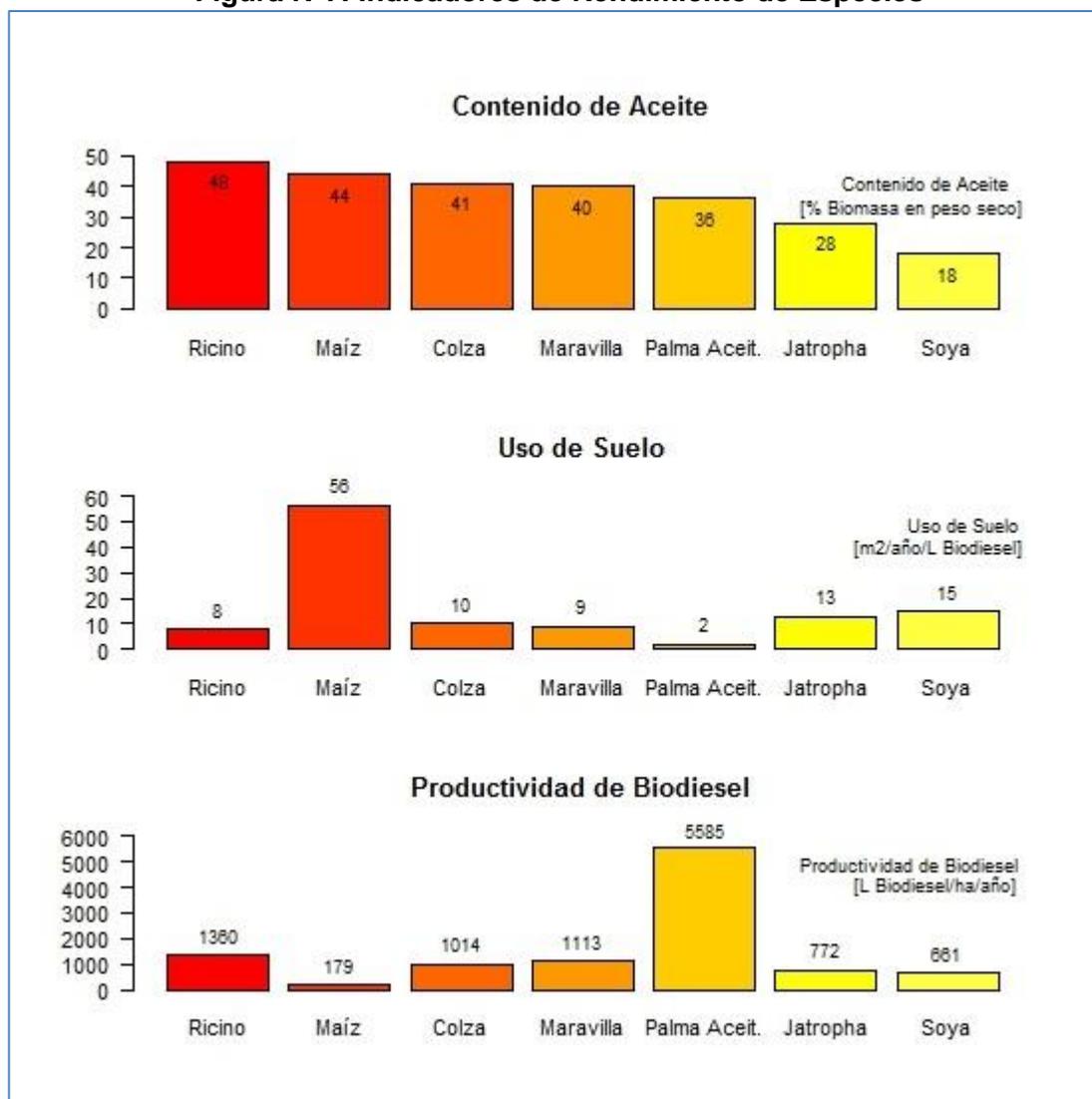
2.1 Biomasa para biodiesel

Todas las fuentes de ácidos grasos tales como grasas animales o lípidos de las plantas (más de 300 tipos) pueden ser usados en la producción de biodiesel.

Sin embargo, la utilización de este tipo de materia prima ha generado preocupación por una posible crisis alimentaria por el cambio de uso. Por lo tanto muchos investigadores se han enfocado en aceites no comestibles o aceite usado como materia prima para la producción de biodiesel tales como: aceite de alga, micro algas, aceite de jatropha, y grasa. A partir de la información contenida en el Anexo 3-B sobre rendimientos de especies para producción de biodiesel, se muestran a continuación los siguientes indicadores que parecen ser con seguridad lo más indicados para comparar el rendimiento y uso de recursos de algunas especies como la colza, maíz, maravilla, y soya, que para este ejercicio se catalogarán como “fin alimenticio”; además de palma aceitera y jatropha que se denominarán “fin energético”, y finalmente el ricino que se catalogará como “otro fin”.

Los indicadores incluidos son: contenido de aceite de la semilla [% Biomasa Seca], uso de suelo [m²/año/L biodiesel], y productividad de biodiesel [L Biodiesel/ha/año], y todos los datos se muestran en la Figura N°7.

Figura N°7: Indicadores de Rendimiento de Especies



(Fuente: Microalgae: A Potencial Source of Biodiesel. Rajvanshi, 2012)³⁷

Se pondrá especial atención en los datos obtenidos para el ricino, ya que esta especie es trabajada en el sistema experto debido a las diversas ventajas que podrían ser tomadas en cuenta para potenciar el cultivo de esta especie en el país, por tener en primer lugar, un fin distinto al alimenticio, y en segundo lugar, por desarrollarse en terrenos y condiciones donde otras especies no pueden y donde actualmente no tienen uso por la misma razón. Sus indicadores de rendimiento se analizan en relación a los valores de otras especies, y es posible obtener las siguientes ventajas de esta novedosa especie: su semilla contiene 48% de aceite, la más alta de las tres clasificaciones; su productividad de biodiesel es por lo menos 30% mayor a cualquier especie con fin alimenticio con superficie plantada en Chile, e incluso mayor a la jatropha, única especie con fin energético de esta clasificación con

potencial de cultivo en Chile (la palma africana no es potencialmente cultivable en Chile); si se analiza el uso de suelo, esta especie posee el mínimo uso de suelo de todas las especies con potencial de cultivo en Chile analizadas (8 [m²/año/L Biodiesel]).

En resumen el ricino posee importantes ventajas en comparación con otras especies, las que se sintetizan a continuación:

1. No posee fin alimenticio
2. Sus condiciones de vida permiten desarrollar su producción en terrenos marginales.
3. Su semilla posee alto contenido de aceite (48%)
4. Posee bajo uso de suelo (8 [m²/año/L Biodiesel])
5. Posee alta productividad de biodiesel (1300 [L Biodiesel/ha/año])

En un próximo apartado serán abordadas otras características particulares del ricino.

Otro indicador importante para la industrialización y comercialización del biodiesel es el costo de producción; que actualmente es la principal desventaja del proceso, dada por el costo de la materia prima. Por ello es que se hace atractivo usar aceites comestibles usados, ya que pueden reducir el costo de producción de biodiesel entre un 60 y 90%, minimizando los efectos contaminantes del aceite usado cuando es descartado en forma inadecuada.² Para producir biodiesel de alta calidad a costos bajos, los investigadores se han enfocado en varios procesos novedosos de manera de: disminuir el tiempo de reacción, disminuir la cantidad de alcohol usado y catalizador, y la temperatura de reacción.

2.2 Biodiesel a partir de aceite vegetal usado

El aceite vegetal usado es un producto lipídico de origen vegetal, que se utiliza en la cocción y fritura de alimentos. Este se desnaturaliza a altas temperaturas, modificando sus propiedades organolépticas y fisicoquímicas, cambiando la composición de los ácidos grasos que lo componen, convirtiéndose en un residuo orgánico no peligroso pero contaminante. Su vertido en aguas obstruye cañerías, alimenta roedores, y causa daño a la vida acuática y a la calidad de las fuentes hídricas, encareciendo la depuración de aguas residuales.³⁸

Más del 80% de los aceites de cocina usados son generados en los hogares y controlar su disposición implica enormes inversiones tales como la disposición del aceite y el alto costo del tratamiento de aguas. Según el Ministerio de Medioambiente, en Chile se desechan más de catorce millones de litro de aceite por año, de los cuales el 95% va a parar a los desagües. Si no se logra eliminar, puede afectar la productividad de suelos, contaminar ríos, formando capas en las superficies, lo que impide el paso de oxígeno, poniendo en riesgo la vida de organismos acuáticos.³⁹

El precio del aceite de cocina usado es dos a tres veces más barato que uno virgen, además al utilizarlo, se reducen los costos por disposición del aceite y tratamiento de aguas. El uso de esta materia prima, reduce el uso de suelo agrícola, el que podría ser usado para cultivos alimenticios.

Si el aceite se descompone por aumento de la temperatura, se generan radicales libres y peróxido, lo que pone rancio el aceite, aumenta su viscosidad y poder venenoso, lo que puede ocasionar problemas digestivos. Si el aceite es recalentado y se vuelve a usar, puede causar cáncer debido a la presencia de radicales libres y acrilamidas.

Es por lo anterior, que la reutilización de estos aceites es muy importante para la salud y la conservación del medioambiente, ya que así se evitan los efectos mencionados en los párrafos anteriores. Además, si se usa en producción de biodiesel, ayuda a crear puestos de trabajo, entre otras ventajas del biodiesel.⁴⁰

Y no sólo biodiesel puede ser obtenido del proceso de transesterificación de aceites y grasas, sino también grasas multiuso para calzado, rodales y palieres; jabones industriales, ceras, velas, abono orgánico, masa de vidrio, pintura, espumas de poliuretano, alcoholes polihídricos, resinas poliacrílicas, aceites para procesos sidadúrgicos y aceites epoxizados.

Algunas desventajas del uso de este aceite están relacionadas con la separación del glicerol y el biodiesel, además de la formación de ácidos diméricos y poliméricos, además de glicéridos. Por consiguiente, la viscosidad del aceite aumenta, mientras que el proceso de saponificación reduce la masa molecular y el índice de yodo. Mientras tanto, la formación de jabón consume parcialmente el catalizador y reduce el rendimiento final.³⁹

2.2.1 Reciclaje de Aceite Usado en Chile

Actualmente en el país se consumen más de 250.000 toneladas de aceite con fines alimenticios. De esta cifra, el 10% tiene potencial para ser reciclado, sin embargo, sólo se reciclan un poco más de 5 mil toneladas anuales, lo que equivale a 0,3 lt por persona al año, muy por debajo de países europeos, por ejemplo, donde se alcanza 1,5 lt de aceite por persona al año.

En este contexto nace en 2008 la empresa “Bioils”, un *spin-off* de la productora de aceites chilena “Trio”, que impulsada por los requerimientos de sus clientes, comienza a hacerse cargo también de la disposición de los aceites que comercializa, además de recolectar el aceite usado desde supermercados, restaurantes, entre otros; para revalorizar el residuo. La reciclaje se lleva a cabo mediante puntos de recolección habilitados en colegios, condominios, edificios y puntos limpios.

Actualmente la empresa Bioils se encuentra trabajando con más de 3.500 restaurantes, hoteles y casinos a lo largo de todo Chile. Con esto, Bioils recicla cerca de 5.000 m³ anuales de aceite, lo que equivale a una disminución de 717.840 kilos de CO₂ o a 500 autos menos circulando por Santiago. Esta cifra irá en crecimiento gracias a la apertura de nuevos mercados, como Perú y Colombia, donde ya tienen oficinas para empezar a recolectar.

El aceite se filtra de los restos de comida, se procesa y se exporta en un 80% a países europeos, como Inglaterra, para la elaboración de biodiesel. El otro 20% de queda en Chile. Cuando partió este negocio, en 2011, la empresa facturó cerca de US\$ 700 mil. Un año después, US\$ 2 millones, y el año 2013 cerca de US\$ 4,5 millones.⁴¹

Además de los puntos limpios dispuestos a lo largo de todo el país, la empresa ha acordado realizar campañas dirigidas a la comunidad en conjunto con las municipalidades y el Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Se han realizado charlas en distintos colegios de las 13 comunas con las que están trabajando. Además, ya tienen 30 acuerdos firmados con otros municipios. A lo anterior, se suma el programa Barrios Sustentables del MMA, donde Bioils es uno de los socios estratégicos, con el que se busca implementar un modelo de gestión ambiental basado en el desarrollo sustentable a nivel de barrio, donde los municipios trabajan en la comunidad a través de las Juntas de Vecinos y organizaciones comunitarias.⁴²

Un ejemplo de esta iniciativa se lleva a cabo en Anguelmo, lugar típico del sur de Chile, donde se quiere potenciar este lugar como un atractivo turístico de sello verde. El “*Programa de reciclaje de aceites vegetales usados de Angelmó*”, tiene como finalidad prevenir y/o evitar el desecho de aceites usados por los alcantarillados y desagües en las cocinerías de Angelmó, y cuenta con el apoyo del Sindicato de Locatarios de Angelmó.⁴³

Finalmente, otro ejemplo de este tipo surge también en el sur de Chile, específicamente en Valdivia, ciudad que busca avanzar en la consolidación como ciudad ecológica. Para ello la municipalidad de Valdivia y la empresa Bioils firmaron un convenio para la puesta en marcha del programa “Reciclaje de Aceites Usados de Cocina”, que permitirá la recolección de este producto, para luego ser trasladado hasta la Región Metropolitana para su posterior tratamiento y disposición.⁴⁴

2.3 Biodiesel a partir de aceite de ricino

El aceite de Higuera o Ricino, es un tipo de aceite que puede utilizarse en la producción de biodiesel mediante transesterificación. Esta materia prima presenta importantes características las cuales pueden ser aprovechadas en el país y dar alternativas de trabajo a sectores donde la agricultura es limitada, por bajas precipitaciones o disponibilidad de tierras cultivables.

Es importante poner énfasis en la planta de ricino, ya que tiene un costo de producción bajo, incluso en zonas semi-áridas, donde es posible incluir socialmente la agricultura familiar en la cadena de producción de biodiesel. En esta materia el gobierno de Brasil ya ha puesto atención por los motivos mencionados; además el contenido de aceite de las semillas es de entre 45 y 50%, lo que se considera alto en relación a otras especies con potencial en Chile.⁴⁵

Otro punto a destacar del Ricino es que no compite con la producción de alimentos, debido a que no es adecuado para el consumo humano, lo que va en dirección de promover la producción de biodiesel sin controversia por cambio de fin de la materia prima.

Higuerilla o Ricino: ⁴⁶

- Descripción:

Llamado científicamente como *Ricinus Communis* (Figura N°8), este árbol de tallo grueso y de hojas púrpura llega a medir entre 3 a 10 metros de altura, posee grandes hojas palmeadas, florece casi todo el año, sobretodo en el verano. Generalmente se encuentra en tierras cálidas y templadas.

Figura N°8: Fruto, Planta y siembra de higuerilla.



(Fuente: Cárcamo, 2012) ⁴⁶

En el antiguo Egipto ya se utilizaba esta planta para obtención de aceite a partir de las semillas de la higuerilla. El residuo sólido producto de la extracción del aceite por trituración, contiene un veneno muy tóxico llamado Ricina. No obstante, esta torta es abundante en proteína por lo que podría ser utilizada como materia prima en la producción de alimentos de ganado bovino, una vez desintoxicada la torta. Además, debido a su contenido de Nitrógeno-Fósforo-Potasio (NPK) puede ser utilizada como abono para el mismo cultivo, en proporciones de 2 a 3 ton/ha.

- Condiciones de producción:

Puede ser cultivada en distintos tipos de suelo, salvo aquellos que acumulan exceso de agua, además de los suelos salinos o sódicos.

Necesita una precipitación anual de 500 mm, equivalente a 5000 m³/ha. Puede producir con baja disponibilidad de agua, pero si esta última mejora, el período de fructificación aumenta. Es exigente a alta luminosidad, debiendo completar su ciclo 10 a 12 hrs de luz solar diarias.

A temperaturas entre 20-30°C y pH neutro se desarrolla bien, no obstante tolera suelos levemente alcalinos. Crece muy bien a alturas superiores a 400 hasta los 1200 msnm. La cosecha de esta planta se inicia a los 120 días en las variedades precoces, y a los 150 días en las más tardías. El fruto puede almacenarse hasta tres años en lugar seco y ventilado. En Chile esta planta se encuentra desde la XIV Región a la Metropolitana.⁴⁷

- Aceite de Ricino:

Es obtenido desde la semilla de higuera, la cual contiene entre 45 y 50% de aceite como se mencionó anteriormente. El aceite a su vez, contiene un 87% de ácido ricinoleico, principal ácido graso contenido en el aceite de ricino, este ácido graso posee 18 carbonos, con tres grupos funcionales altamente reactivos: el grupo carbonilo del primer carbono, el doble enlace o insaturación en el 9° carbono y el grupo hidroxilo en el 12° carbono.⁴⁸

Entre los aceites vegetales, el aceite de ricino se distingue de los demás por las siguientes características: contiene la proporción más alta de hidroxácidos grasos entre los aceites vegetales, posee un enlace no saturado, alto peso molecular (298 g/mol), bajo punto de fusión (5°C), y muy bajo punto de solidificación (-12 a 18°C); esto hace que sea muy conveniente para la industria, proporcionando la más alta viscosidad de todos los aceites vegetales. El alto contenido de ácido ricinoleico, con un grupo hidroxilo, es la razón de que el aceite de ricino tenga especialmente alta viscosidad y densidad. El aceite de ricino también se caracteriza por su alta estabilidad, alta higroscopicidad y su solubilidad en alcohol, que afecta a la reacción de transesterificación. Durante sus primeras etapas, la reacción de transesterificación está limitada por la baja solubilidad del aceite en alcohol, especialmente en metanol. El aceite de ricino es soluble en metanol, por lo que no se requiere la aplicación de calor para favorecer la solubilidad del aceite como en el caso de otros aceites vegetales (vírgenes y usados). Por lo tanto, este aceite favorece la reacción de transesterificación.⁴⁸

- Obtención:

El aceite de ricino se obtiene mediante prensado en frío o en caliente. Estos procesos recuperan un 35% del total de materia grasa (45-50% de la semilla), el otro 15% se pierde en la torta, el cual puede ser recuperado mediante extracción por solvente (líquido-líquido). Los rendimientos de aceite por hectárea se pueden ver en el Anexo 3-B; de este último se

desprende que a pesar de que solo el 35% es recuperado desde la semilla, este valor es relativamente bueno.

La extracción del aceite de la torta encarece el proceso, y el precio del aceite (1,1-1,3 USD/kg aprox.)⁴¹, lo que es una desventaja en comparación a otros aceites donde no es necesaria la realización de esta etapa. El solvente a utilizar es hexano. El disolvente se calienta, se volatiliza y se condensa goteando sobre la muestra, la cual queda sumergida en el disolvente, posteriormente éste es evacuado mediante un sifón al matraz de calentamiento para empezar de nuevo el proceso, el contenido de grasa se cuantifica por diferencia de peso.²⁷

Luego se procede a refinar el aceite, valorando el aceite para disminuir su contenido de ácidos grasos libres, y luego un desgomado con ácido fosfórico, para eliminar gomas y mucílagos, finalmente un proceso de lavado y de separación por densidades, y se obtiene el aceite.

- Usos:

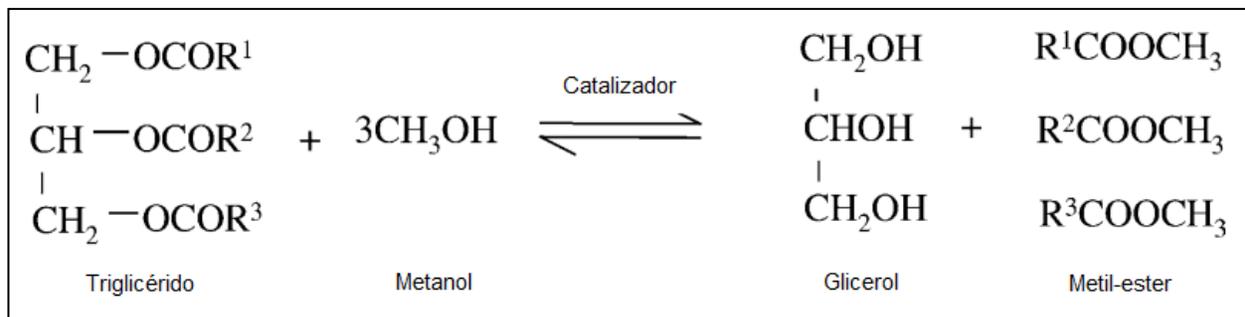
Antiguamente se usaba como purgante, actualmente las principales aplicaciones del aceite de ricino son: plastificante para lacas, dispersante de pigmentos para recubrimientos, tintas, lubricante de engranajes metalmecánicos, componente de líquido de frenos, entre otras.

En la actualidad su principal uso es la producción de biodiesel, sobretodo en Brasil.

2.4 Producción de biodiesel mediante transesterificación

El proceso de transesterificación o alcoholisis consiste en la reacción de un éster para cambiar algún radical asociado al grupo funcional, con el fin de modificar una propiedad sin dejar de ser un éster. El tipo de transesterificación depende del reactante a ocupar; en este caso se tiene aceites vegetales para producir biodiesel, lo que se logra mediante alcoholisis que consiste en intercambiar el grupo alcoxi (grupo alquilo unido a un átomo de oxígeno, es decir, RO) de un éster por otro alcohol, en presencia de un catalizador básico o ácido (Figura N°9).

Figura N°9: Reacción de transesterificación de triglicéridos (Metanolisis)



(Fuente: Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. Meher et al., 2006) ⁴⁹

Como se puede ver en la Figura N°9; R¹, R² y R³ son cadenas largas de hidrocarburos y átomos de carbono llamados ácidos grasos. La reacción se basa en un mol de triglicérido que reacciona con tres moles de metanol para producir tres moles de metilester (biodiesel) y un mol de glicerol.

La transesterificación puede ser catalítica o no. En caso de ser catalítica, puede ser homogénea o heterogénea. Muchos investigadores han utilizado la catálisis básica homogénea (NaOH, KOH, CH₃-ONa) para producir biodiesel, ya que este proceso es barato y el conocimiento sobre él está bastante desarrollado. Sin embargo, su uso trae consigo algunos alcances que se relacionan con el alto consumo de energía, lo que a su vez provoca un alza considerable en costo de equipos, y relacionados al ámbito de seguridad.²

Además, este proceso es altamente sensible al contenido de humedad y de ácidos grasos libres (AGL) del aceite a utilizar.

Finalmente, existen investigadores que han reportado que la transesterificación básica de dos pasos es mejor que la de un solo paso, ya que necesita menor temperatura de reacción, menor cantidad de alcohol y catalizador, alcanzando conversiones más altas. Los resultados indican que se puede mejorar en más de 30% la conversión de biodiesel en comparación a la de un solo paso.^{2, 50}

2.5 Variables que afectan el proceso de transesterificación

La síntesis de biodiesel involucra diversos parámetros críticos los cuales influyen significativamente en la conversión final y el rendimiento del proceso; éstos son:

- Temperatura de Reacción
- Relación molar alcohol : aceite vegetal
- Tipo de alcohol
- Tipo de catalizador
- Concentración de catalizador
- Tiempo de reacción
- Intensidad de mezclado
- Contenido de ácidos grasos libres y humedad

2.5.1 Temperatura de reacción

Dependiendo del aceite y el alcohol empleado, la temperatura a la cual se lleva a cabo la transesterificación puede variar. Se tiene que al incrementar la temperatura el rendimiento de la reacción aumenta, y el tiempo se reduce. Lo anterior se debe a que al incrementar la temperatura, el aceite se vuelve más soluble en el alcohol, lo que favorece la transferencia de masa durante la reacción; además, a temperatura ambiente el aceite no es soluble en alcohol. Sin embargo, es recomendable trabajar con temperaturas que no sobrepasen el punto de ebullición del alcohol, ya que éste se vaporiza y forma burbujas que limitan la reacción.⁵¹

Los estudios indican que para AVU, el rendimiento máximo es alcanzado a 65°C², y para el aceite de ricino se obtiene a 45°C.⁵²

Notar que esta diferencia de temperatura se debe a la mayor solubilidad del aceite de ricino en alcohol (metanol).

2.5.2 Relación molar alcohol:aceite vegetal

En la transesterificación de aceites vírgenes o usados se utilizan relaciones molares mayores a la estequiométrica (3:1), alimentando el alcohol a utilizar en exceso, esto debido a que la transesterificación es una reacción de equilibrio, por lo que al agregar alcohol en exceso, se busca desplazar la reacción hacia la producción de ésteres.

La desventaja de esto es que si se utiliza demasiado alcohol, se aumenta la solubilidad de los productos, lo que dificulta la separación de la glicerina. Además, la glicerina se mantiene en solución, lo que hace tender la reacción hacia el lado de los reactantes, afectando el rendimiento de la producción de ésteres (biodiesel). Finalmente, si se usa demasiado alcohol de manera de aumentar más de lo suficiente la relación alcohol:aceite; esto aumentan los costos de producción.

Los estudios indican que a medida que aumenta la relación alcohol:aceite, el rendimiento aumenta; sin embargo, el óptimo es alcanzado para la relación 6:1, ya que si se aumentase más esta razón, el rendimiento aumentaría, pero no significativamente como para incurrir en el aumento de costo correspondiente.

2.5.3 Tipo de alcohol

A pesar de ser muy tóxico, el alcohol más utilizado es el metanol; esto debido a su bajo costo y por permitir una separación fácil y rápida de los productos finales gracias a sus ventajas tanto físicas como químicas, tales como ser una sustancia polar y poseer la cadena de carbono más corta. Otro alcohol que se puede utilizar es el etanol (el segundo más usado), propanol, isopropanol o alcohol siopropílico, butanol, isobutanol, pentanol e isopentanol.⁵³

La selección del alcohol depende de los costos, del desempeño en la etapa de separación e idealmente que provenga de fuentes renovables.

Se dijo que a mayor temperatura, se mejora el rendimiento de la reacción, pero que no se debía sobrepasar el punto de ebullición del alcohol empleado. Por lo tanto dependiendo del alcohol a usar, se puede usar una temperatura mayor, en el caso de alcoholes de cadenas más largas, ya que éstos poseen mayor punto de ebullición.

Así al usar butanol o etanol en vez de metanol, se reduce el tiempo de reacción debido al incremento en la solubilidad del alcohol por el aceite en sí, y por el posible aumento de temperatura por mayor punto de ebullición de los alcoholes (metanol 60-65°C, etanol 75°C. y butanol 115°C).^{54, 55, 56}

El etanol posee otra ventaja por sobre el metanol, y es que proviene de recursos agrícolas renovables, además el biodiesel producido con etanol (fatty acid ethyl ester, FAEE) tiene menor punto de congelamiento y de nube que el biodiesel producido de metanol (fatty acid methyl ester, FAME), lo cual incrementa su capacidad de almacenamiento.⁵⁴

En relación a la influencia del tipo de alcohol (etanol o metanol) en el rendimiento del biodiesel producido (FAEE o FAME respectivamente) y sus emisiones, con respecto a

emisión de compuestos NO_x y CO , el tipo de alcohol no es factor de influencia. Mientras que en el contenido de hidrocarburos gaseosos totales (HCT) emitidos disminuye al usarse etanol en vez de metanol, debido a la menor volatilidad del etanol. En el caso de la opacidad y la emisión de materia particulado (PM), éstos índices disminuyen más en el caso de usar metanol en vez de etanol, debido a su mayor contenido de oxígeno.⁵⁷

2.5.4 Tipo de catalizador

Se recomienda usar catálisis básica para bajo contenido de AGL y humedad en el aceite (menos de 0,5% p/p de AGL, y menos de 1% de humedad); catálisis ácida para aceites con contenido mediano de AGL y humedad (mayor o igual a 10% p/p AGL), y catálisis homogénea ácido/base (dos pasos) y heterogénea para altos contenidos de estos parámetros.^{2, 58}

Algunos de los catalizadores ácidos más utilizados son el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido clorhídrico (HCl). Estos catalizadores son buenos en este contexto, ya que son insensibles al contenido de ácidos grasos libres o humedad del aceite. Sin embargo, tienen diversas desventajas frente a los catalizadores básicos, entre las cuales están: mayor tiempo de reacción, temperatura de reacción mucho mayor, además de necesitar mayor concentración de catalizador, y una relación molar alcohol:aceite muchísimo mayor que en el caso de catálisis básica.⁵⁸

Los catalizadores básicos alcanzan buenos rendimientos en períodos más cortos de tiempo; sin embargo, también traen consigo ciertas dificultades como: el catalizador se debe separar de la fase líquida de producto (biodiesel), la separación del glicerol puede resultar difícil, el agua alcalina del proceso debe ser tratada con algún ácido para ser neutralizada, además de la sensibilidad al contenido de ácidos grasos libres y humedad del aceite, mencionado anteriormente.

Como se mencionó, existen otras alternativas como la catálisis heterogénea, o la enzimática, que son insensibles al contenido de AGL y humedad en el aceite a transesterificar; sin embargo, estas alternativas presentan costos más elevados, principalmente por lo costoso de los catalizadores. Debido a esto, es que actualmente se están desarrollando catalizadores de bajo costo, fáciles de regenerar, y de bajo impacto al medio ambiente.

En lo referente a catálisis básica, algunos investigadores han comparado la actividad catalítica entre NaOH y KOH, concluyendo que es mejor el KOH para catálisis de aceite de cocina usado, ya que reacciona más rápido en comparación con el NaOH.

Se ha reportado el uso de metóxido de sodio (NaOCH_3) y de potasio (KOCH_3), donde la principal ventaja de estos catalizadores es que son reutilizables. ²

2.5.5 Concentración de catalizador

Este parámetro afecta el rendimiento hasta ciertos valores, ya que promueve la formación de sales en ciertas etapas, la emulsificación de la mezcla, y genera costos adicionales por su consumo. En el caso de la catálisis básica, la concentración de catalizador es menor que en la ácida, aunque levemente. En el caso de la primera, generalmente se usan concentraciones de catalizador entre 0,25 y 2% en peso de aceite, mientras que en la catálisis ácida se acostumbra a usar concentraciones de catalizador entre 0,5 y 4%. ⁵⁸

Para catálisis básica se recomienda usar una concentración de catalizador de entre 0,8 y 1% p/p. ^{2, 47}

2.5.6 Tiempo de reacción

La conversión de la reacción de transesterificación aumenta con el tiempo de reacción. La catálisis básica se caracteriza por emplear tiempos de reacción entre 25 minutos y 2 horas mientras que en la catálisis ácida el tiempo es mucho mayor, llegando a 10 y 80 horas.

Se ha reportado que se requiere menor tiempo de reacción al usar metanol en vez de etanol, con similares condiciones de operación, ya sea en catálisis ácida o básica, para alcanzar el mismo rendimiento, pero en menor tiempo. ⁵⁹

2.5.7 Intensidad de mezclado

La intensidad de mezclado es un parámetro importante al comienzo de la reacción, donde se ha formado una mezcla de líquidos inmiscibles entre el aceite y la solución alcohol/catalizador. Se han logrado buenos rendimientos en la producción de biodiesel con velocidad de mezclado entre 300 y 600 RPM. ⁵⁸

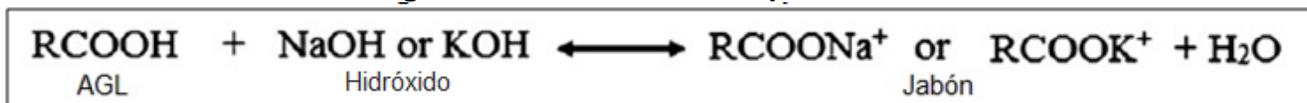
Una vez mezcladas ambas fases, ya no es necesario una agitación fuerte y sostenida, salvo en la catálisis heterogénea (catalizador sólido). ⁵⁰

2.5.8 Contenido de ácidos grasos libres y humedad

Ambos parámetros son fundamentales a la hora de decidir si un aceite cumple con las condiciones necesarias para ser procesado mediante transesterificación, dado que altas concentraciones de alguno de ellos o de ambos favorece el proceso de saponificación (Figura N°10). Esto último causa reducción del rendimiento del ester, dificultad de separación

biodiesel-glicerol, incremento en la viscosidad, y formación de emulsión; todas estas situaciones causan problemas en la purificación de la corriente producida y en la recuperación del biodiesel. ²

Figura N°10: Reacción de saponificación



(Fuente: Current biodiesel production technologies: A comparative review – Abbaszaadeh et al., 2013)⁵⁸

Hay diversos reportes sobre el efecto del contenido de ácidos grasos libres del aceite en la reacción con catálisis básica; sin embargo entre ellos no es posible determinar un valor uniforme de contenido de ácidos grasos libres para transesterificar sin neutralizar el aceite. Sí se puede establecer un valor límite de contenido de AGL, el cual debe ser menor a 0,5% p/p, para realizar la transesterificación sin problemas. ⁵⁸

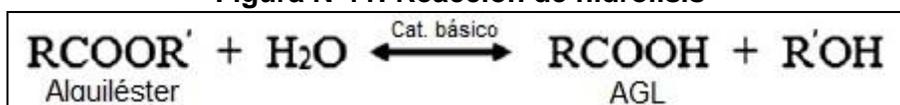
En el caso de que el aceite contenga un valor igual o mayor a 10% p/p de AGL, es recomendable transesterificar mediante catálisis ácida, debido a su mayor simplicidad, al no tener que pretratar el aceite, además de ser un proceso insensible al contenido de AGL y humedad del aceite. ⁶⁰

Se ha encontrado que es posible procesar el aceite de manera de reducir su contenido de AGL realizando una valoración del aceite. Esto se busca dado que al emplear aceites crudos se obtiene una conversión entre el 67 y el 84%, mientras que al utilizar aceites refinados, se obtienen rendimientos entre 93 y 98%, bajo las mismas condiciones. ⁵⁶

Por lo tanto, para rendimientos altos de alcohol y catalizador, éstos deben ser anhidros (alcohol al 99%; NaOH o KOH al 99% de pureza), y el aceite se debe refinar para reducir el contenido de agua y AGL por debajo del 1 y 3% respectivamente. ⁶¹

El agua en los reactivos debe evitarse debido a que causa formación de jabón, el cual consume el catalizador y reduce su eficiencia (Figura N°11).

Figura N°11: Reacción de hidrólisis



(Fuente: Current biodiesel production technologies: A comparative review – Abbaszaadeh et al., 2013)⁵⁸

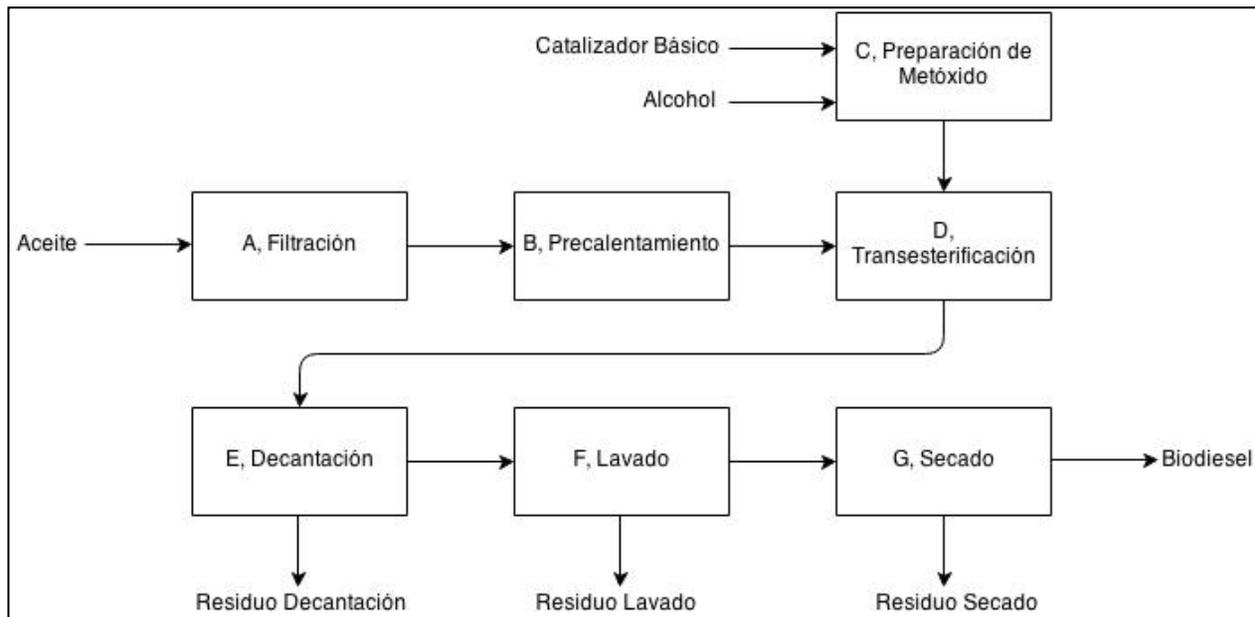
El jabón resultante causa un incremento de la viscosidad, formación de gel, y dificultad para la separación del glicerol.

El hidróxido de sodio o potasio reacciona con la humedad y el dióxido de carbono del aire, lo cual disminuye su efectividad como catalizador.

2.6 Proceso de producción de biodiesel – Transesterificación Homogénea Básica

Las etapas del proceso de producción de biodiesel se muestran en la Figura N°12, y se detallan más adelante.

Figura N°12: Diagrama de flujo - Proceso de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal



(Fuente: Elaboración propia)

2.6.1 Reactivos

Los reactivos principales para llevar a cabo la reacción de transesterificación homogénea básica de triglicéridos son: alcohol, catalizador básico, aceite. En este caso se detalla el proceso contenido en el sistema experto, el cual utiliza: hidróxido de sodio (NaOH) o de potasio (KOH), metanol (CH₃OH), y aceite vegetal usado (AVU) o de ricino.

En el caso de la validación del sistema experto, se busca validar el proceso para aceite vegetal usado, usando metanol como alcohol e hidróxido de sodio como catalizador.

Alcohol

Por estequiometria, son necesarias tres moléculas de alcohol por una de triglicérido (3:1), pero en la práctica se emplea mayor cantidad de alcohol para mejorar el rendimiento de la reacción. Este exceso puede ser 6:1 o 9:1, sin embargo, se ha observado que el rendimiento no mejora sustancialmente al pasar de 6:1 a 9:1, ya que en la primera razón ya se alcanzan rendimientos aceptables (90%) en un tiempo razonable (1 hr.), mientras que alcanzar un rendimiento mayor implicaría mayor costo de catalizador, y aumentar demasiado el tiempo de proceso; por lo tanto el alcohol se incorpora en relación 6:1 con respecto al aceite.⁵⁰

A partir de aceite vegetal usado y de ricino:

En el caso de usar metanol (CH_3OH) la cantidad necesaria es de 250 ml/Lt aceite (según la densidad del aceite debe ser un mol), que corresponden a seis moles de alcohol, sin embargo en la práctica existen productores que usan menos alcohol (200-220 ml/Lt) logrando buenos resultados. En el sistema experto se sugiere usar 250 ml/Lt para ambos aceites, debido a que este valor corresponde a una relación molar alcohol:aceite igual a 6:1, con lo que se favorece aún más el rendimiento de la reacción.

Catalizador

Los catalizadores más usados en la transesterificación básica de aceites son: hidróxido de sodio o sosa cáustica (NaOH), e hidróxido de potasio o potasa cáustica (KOH); razón por la cual ambos catalizadores son incluidos en el sistema experto. Sin embargo, la elección debe ser tomada por el usuario con ayuda de la información proporcionada por el programa.

La cantidad de catalizador a utilizar depende del tipo de aceite (nuevo o usado), del catalizador (NaOH o KOH), y del resultado de la valoración que debe realizarse al aceite antes de ser tratado.

Si el aceite es nuevo es necesaria menor cantidad de catalizador que si fuese usado, esto debido a que el aceite usado ha pasado por procesos de calentamiento que han dejado en suspensión AGL que aumentan la acidez del aceite; así, en la práctica se asume que los

aceites usados tienen mala calidad para producir biodiesel en comparación a los nuevos, y se busca favorecer su neutralización mediante la adición extra de catalizador.

El tipo de catalizador utilizado también da lugar a ciertas diferencias a lo largo del proceso. El catalizador más usado es el NaOH ya que es fácil de conseguir y más barato que el KOH. Sin embargo, el KOH es más fácil de usar ya que tiene mejor solubilidad en metanol, posee mejor desempeño ante aceites de mala calidad, y los subproductos – en particular la glicerina – son líquidos, lo que favorece la separación. No obstante, el NaOH es más fuerte que el KOH, por lo que si se usa KOH se debe usar mayor cantidad de hidróxido que si se usa NaOH (1,4025 veces). Así, para cada catalizador se define una cantidad base por cada litro de aceite a tratar.⁶²

Los valores base de catalizador según el tipo de aceite e hidróxido se muestran en la Tabla N°4. a continuación.

Tabla N°4: Cantidad de catalizador base (NaOH y KOH) para aceites nuevos y usados.

		Catalizador Básico	
		NaOH	KOH
		$\left[\frac{g NaOH}{Lt Aceite} \right]$	$\left[\frac{g KOH}{Lt Aceite} \right]$
Aceite	Nuevo	3,5	4,9
	Usado	5	7

(Fuente: biodieseltutorial.com⁶³, makebiodiesel.org⁶⁴)

Los valores base mostrados suponen una pureza de 100%, por ello es que si se usa un catalizador con una pureza menor, se debe ajustar la cantidad de catalizador a utilizar. A diferencia del NaOH, el KOH probablemente no sea puro; su pureza suele ser de 85%, 90% o 92%. El KOH con 99% de pureza es caro y difícil de encontrar, y de todas maneras con KOH al 85% se obtienen buenos resultados.

Ejemplo: Para ajustar la cantidad “Base” de catalizador según la pureza del KOH se debe proceder como sigue:

- Para el aceite usado, los 7 gr “Base” de KOH al 100% serían:

- KOH al 85%: 8,2 (8,235) gramos
- KOH al 90%: 7,7 (7,77) gramos
- KOH al 92%: 7,6 (7,608) gramos

El tercer y último aspecto tomar en cuenta es el resultado de la valoración del aceite. Ésta se realiza para determinar el contenido de AGL en el aceite de tal manera de cuantificar el hidróxido adicional necesario para la neutralización el aceite. La valoración puede realizarse con NAOH o KOH, lo importante es ser consistente con el hidróxido a usar. El proceso de transesterificación debe realizarse con el mismo hidróxido usado en la valoración; incluso, si se quisiese producir jabón con la glicerina, también debe usarse el mismo hidróxido en el proceso.

En la valoración se usa una solución de concentración conocida para titular otra de concentración desconocida. Los resultados de la valoración se muestran en [g Hidróxido /Lt Aceite], y según su valor el sistema experto instruye las acciones a seguir. El procedimiento, e interpretación de resultados se muestra en el Anexo 6-A.

Aceite

En el sistema experto se elige el tipo de aceite (usado o de ricino) según disponga el usuario, y el sistema entrega la información sobre las etapas adecuadas a llevar a cabo y los resguardos de seguridad a tomar en cuenta durante el proceso, y – junto a la información ingresada por el usuario – se calcula la cantidad necesaria de cada reactivo involucrado en el proceso de producción de biodiesel.

El resumen de las condiciones de operación para cada línea de aceite y de catalizador se muestra en la Tabla N°5:

Tabla N°5: Condiciones óptimas de operación en la transesterificación de aceites mediante catálisis homogénea básica

Aceite	Tipo de catalizador	Catalizador	[Catalizador] [g/L Aceite]	Alcohol	Relación alcohol:aceite	Tiempo [hrs]	Temperatura [°C]	Rendimiento, Conversión, [%]
Usado	Básico	NaOH	5	Metanol	6:1	1,0	65	90
		KOH	7					
Ricino	Básico	NaOH	3,5	Metanol	6:1	1,0	45	90
		KOH	4,9					

(Fuente: Aceite usado ², de Ricino ⁵¹)

2.6.2 Caracterización del aceite

Existen distintos métodos para caracterizar los aceites. Los propuestos en el sistema experto son: índice de acidez, humedad, e índice de yodo. Sus objetivos, principio y rangos de interés se muestran en la Tabla N°6.

Tabla N°6: Métodos de caracterización del aceite contenidos en el sistema experto

Índice	Objetivo	Principio	Interpretación de Resultados	
			% AGL (FFA)	Acción
Acidez ⁶⁵	Determinar el contenido de ácidos grasos libres.	Titular con una solución valorante de concentración y volumen conocidas, una solución de concentración desconocida.	$\leq 1,5$	No es necesario neutralizar
			1,5 - 3	Se debe neutralizar
			3 - 5	Debe mezclarse con otro aceite de mejor calidad
			> 5	El aceite no debe ser usado en el proceso
Yodo ^{66, 67, 68}	Determinar el grado de instauración.	Disolución de la muestra y adición de reactivo de Wijs. Luego de un tiempo, adición de solución acuosa de yoduro potásico y valoración del yodo liberado con solución de tiosulfato sódico.	$II = \frac{12,69(V_1 - V_2)}{P}$	$II < 120 \left[\frac{g I_2}{100 g} \right]$ Buen desempeño y adecuado almacenaje

Humedad	Determinar si quedan restos de humedad.	Se calienta la muestra a 100°C y se observan “chirridos” Si el aceite empieza a bullir, con un burbujeo, crepitar o crujir, esto es un indicador de presencia de agua.	Presenta Chirridos	Contiene agua, se debe secar. Seguir método sugerido
			No presenta Chirridos	No contiene agua, puede usarse sin pretratamiento

Fuentes:

- “Analíticos en alimentaria, métodos oficiales de análisis”. Aceites y grasas.⁶⁵
- “Guía para la elaboración de aceites comestibles, caracterización y procesamiento de nueces.” Vega, Alberto, 2004.⁶⁶
- “An overview of biodiesel oxidation stability”. Pullen, 2012.⁶⁷
- “Dependence of oil stability index of fatty compounds on their structure and concentration and presence of metals”. Knothe, 2003.⁶⁸
- “Lavado de Biodiesel”.⁶⁹

El indicador más importante en este paso es el índice de acidez del aceite, el cual se obtiene al llevar a cabo la disolución de una muestra de aceite en una mezcla de disolventes, y valorar los ácidos grasos libres mediante una solución que puede ser de:^{46, 65}

- Hidróxido de sodio (NaOH) o potasio (KOH), más un alcohol,
- que puede ser etanol (C₂H₅OH) o alcohol isopropílico (C₃H₈O).

Generalmente predominan los ensayos donde se usa etanol como disolvente único (Bishop).

Se puede utilizar un potenciómetro, o usar indicadores visuales para determinar el punto final. El indicador visual más recomendado es la fenolftaleína, aunque otros autores sugieren que se tienen puntos finales más exactos con timolftaleína o azul de timol. El método incluido en el sistema experto se muestra en el Anexo 6-A. El valor obtenido en la titulación de la muestra de aceite sirve para saber qué cantidad de catalizador debe ser usado posteriormente, ya sea para el proceso de transesterificación y/o neutralización de AGL según corresponda el caso.

Los procesos hidrolíticos afectan de manera significativa al aceite o grasa sometida a calentamiento, por ello se debe reducir al máximo el contenido de ácidos grasos libres, lo que se expresa en un índice de acidez bajo (menos de 2 ml. usados en la titulación); sin

embargo, los resultados de la titulación para aceites usados es de entre 3 y 4 ml. el que se espera obtener como resultado de la titulación.

Como se dijo anteriormente, el agua en el aceite reduce la eficiencia de la reacción, por lo que conocer este aspecto es necesario para una caracterización efectiva. El método para determinar la humedad es más bien artesanal, y consiste en calentar en un sartén 2 a 3 cucharadas de aceite, hasta la temperatura de ebullición del agua (100°C). Si el aceite no presenta “chirridos”, significa que está libre de humedad. En caso contrario, contiene humedad.⁶⁶ Para lograr un aceite sin humedad se puede mantener la temperatura del aceite a 70°C durante 15 min., luego verterlo en un recipiente de sedimentación (embudo de decantación o similar). Dejar en reposo durante 1 día como mínimo dependiendo del tamaño del lote. Pasado el tiempo en cuestión, se debe separar el 90% de arriba (aceite), y el 10% (abajo) se debe descartar.⁶⁹

La oxidación del biodiesel resulta desde un cambio de color a amarillo a café del biodiesel, junto a un olor rancio, a la reducción del poder calorífico, y aumento el número de cetano y viscosidad del biodiesel; además de la formación de polímeros que pueden bloquear los inyectores y filtros del vehículo.⁶⁷

En lo que a estabilidad térmica se refiere, los sitios insaturados de una cadena de ácidos grasos pueden reaccionar con los de otra cadena si se alcanza la temperatura suficiente, formando polímeros (dímeros y trímeros). Estudios dicen que la oxidación térmica sólo es relevante cuando una temperatura de entre 250 y 300°C es alcanzada.

Se han desarrollado múltiples ensayos que buscan proveer información de ciertos aspectos de estabilidad del biodiesel, algunos indican qué tan propenso es el material a la oxidación, mientras otros aportan información sobre los productos de oxidación. Los test más elaborados implican acelerar la oxidación del biocombustible usualmente con exposición controlada a oxígeno y elevada temperatura. Durante cierto tiempo los productos de oxidación son monitorizados, así la resistencia relativa a las oxidación puede ser evaluada.

Las técnicas de caracterización de la estabilidad oxidativa pueden ser categorizados de acuerdo al parámetro que buscan medir, ya sea composición inicial de ácidos grasos, productos de oxidación primarios o secundarios, propiedades físicas, entre otros. El análisis escogido e incluido en el sistema experto es el análisis del índice de yodo; no obstante, se

incluye el procedimiento para llevar a cabo una titulación, y con ello obtener el índice de acidez, complementando el resultado de la caracterización.⁶⁷

Es importante recalcar que ningún parámetro medible o test de estabilidad parece ser adecuado para definir todas las características de estabilidad de biodiesel, y que es poco probable que aparezca un nuevo test capaz de definir completamente la estabilidad del biodiesel, por lo tanto, varias mediciones son requeridas para lograr una caracterización adecuada del combustible.

El índice de yodo permite dar una idea sobre el desempeño del biodiesel resultante mediante la determinación del grado de insaturación del aceite. El índice de yodo se define como el peso de yodo absorbido por 100 g. de muestra en las condiciones descritas en el Anexo 6-B. A mayor índice de yodo, en general, mejor será su desempeño en climas fríos.⁷⁰

El índice de yodo es uno de los más antiguos y comunes métodos para determinar el nivel de insaturación de un aceite, y la idea de usarlo es que aporta una medida de qué tan propenso es el aceite a la oxidación, y por tanto a polimerizar y formar depósitos en el motor. Por ello es que en las normas técnicas se establece un valor límite (máximo) que en el caso de la norma EN 14214 (Norma estándar de biodiesel europea) es de 120 [g I₂/100 g]. Al no estar incluido este valor en la norma técnica chilena, éste es el valor escogido como límite en las secciones pertinentes del sistema experto.

El índice de yodo no depende de la naturaleza del doble enlace, por lo tanto no proporciona ninguna información en la distribución de dobles enlaces, tratando todos los dobles enlaces como si fuesen igualmente reactivos. Se ha demostrado que las estructuras de ácidos grasos diferentes, pueden dar valores de índice de yodo iguales o similares; también, muestras con el mismo índice de yodo pueden exhibir diferente comportamiento de oxidación.

Existen estudios donde se ha demostrado que no existe correlación entre el índice de yodo y otras mediciones de estabilidad a la oxidación y que el índice de yodo tiende a disminuir con el envejecimiento. Además, se discute que el índice de yodo es una medida insuficientemente precisa como para ser incluida en una norma como la nombrada anteriormente.⁶⁸

Finalmente, el índice de yodo se entiende como un indicador aproximado de la estabilidad, existiendo otras mediciones más precisas que incluyen la naturaleza de la insaturación del

compuesto. El establecimiento de vínculos claros entre las mediciones de estabilidad y desempeño del biodiesel en el mundo real sigue siendo un reto para la investigación.

2.6.3 Etapas del proceso

Filtración

En esta etapa son separadas las partículas finas y gruesas que contiene el aceite. Generalmente son restos de frituras que quedan suspendidos en el aceite usado, o partículas sólidas que no fueron desechadas en la torta en el caso del aceite de ricino. Según la cantidad se puede usar un colador con algodón para escalas pequeñas, o un colador más grande pero con orificios pequeños para escalas mayores.

De esta etapa se obtiene el aceite filtrado el cual puede conservarse en recipientes de plástico o vidrio del tamaño acorde a la escala utilizada.

Pre calentamiento

Se vierte el aceite filtrado en un reactor batch de dos litros, o más según la escala. Este aceite se precalienta a baño maría con un termoagitador eléctrico hasta alcanzar la temperatura deseada (65°C para AVU, 45°C para Ricino), con agitación leve y constante. Mientras el aceite es precalentado se debe preparar el metóxido.

Preparación metóxido

Mientras el aceite es precalentado, se prepara la mezcla de catalizador con metanol (metóxido). La cantidad de hidróxido calculada según la valoración de cada aceite se mezcla con metanol en un recipiente. Se debe ir mezclando el metanol ocupando sólo el 40% del volumen del recipiente de mezcla, de manera de prevenir inconvenientes en el transcurso de la reacción y como medida de seguridad; por ello se va mezclando e incorporando de a poco el metanol; se debe tapar bien el recipiente y agitar hasta que el hidróxido se disuelva (mín. 15 min.).

Debido a que esta reacción es exotérmica, se debe tener cuidado al manipular los equipos, por lo que se debe usar mascarilla y guantes, ya que el alcohol y el hidróxido son dañinos. Se debe procurar que se evapore lo mínimo de alcohol hacia el exterior, por lo tanto se debe

evitar que los vapores salgan por orificios del reactor, tapándolos de alguna forma. Se debe evitar la exposición del hidróxido al aire, ya que se humedece y carbonata, perdiendo su actividad catalítica.

Al disolverse el hidróxido se tapa el recipiente. Una vez mezclado el metóxido y cuando el aceite ha alcanzado la temperatura deseada se transfiere el metóxido al reactor batch donde se tiene el aceite a temperatura.

Transesterificación

Luego de tener los reactivos en el reactor, se va incorporando el metanol restante, con el cual se va lavando el vaso precipitado antes de ser incorporado al reactor batch este paso se repite hasta que se termine el volumen de metanol.

Al tener ya todo el metanol incorporado al reactor, éste se tapa y se deja la mezcla en agitación y temperatura constante.

Mantener la agitación constante durante 1 hr. de forma intensa para que el alcohol en exceso se incorpore al aceite. Si la agitación se prolonga por más tiempo, el glicerol que se forma comienza a dispersarse, lo que hace más difícil la separación de las fases resultantes.

La temperatura deseada también debe mantenerse constante, para ello se va cambiando el agua del baño maría por agua fría.

Luego de 1 hr. la agitación se detiene, y no es necesario mantener la temperatura mencionada. Se debe traspasar a un embudo de decantación (o recipiente similar). Se deja reposar hasta el otro día (8 hrs. como mínimo).

El pH dentro del reactor debe ser lo más neutro posible, ya que así la reacción es más rápida, para ello se debe tratar de minimizar la cantidad de catalizador a utilizar.

Decantación

La decantación es usada para separar dos mezclas heterogéneas de distintas densidades. Luego de la transesterificación se obtienen dos fases, la superior corresponde a la mezcla de esteres, y la inferior corresponde al glicerol.

Una vez que se ha cumplido el reposo de la mezcla, se abre la válvula u orificio inferior del recipiente para que salga el glicerol. Este paso se repite una vez para eliminar la mayor cantidad de glicerol. Una vez que el glicerol restante ha decantado, se abre nuevamente el orificio inferior, o se abre la válvula en caso de estar usando un embudo de decantación.

La glicerina es de color marrón oscuro, y es bastante viscosa. Al drenar no forma espuma. Cuando el contenido que sale empieza a aclarar quiere decir que está comenzando a salir biodiesel, por lo que se debe cerrar la válvula que se esté utilizando, luego esperar a que el contenido se asiente nuevamente, para abrir nuevamente la válvula y drenar el último resto de glicerina decantada.

Durante este proceso se debe usar mascarilla protectora y guantes para evitar cualquier contacto con el hidróxido, o la respiración de metanol, que está contenido en la glicerina.

- *Control de la transesterificación:*

Para controlar si la transesterificación se ha llevado a cabo con éxito, se debe observar:

1. Separación (interfase) entre el biodiesel (fase superior) y la glicerina (fase inferior), si esto no ocurre se debe evaluar el motivo de este problema.
2. Que la prueba de lavado sea exitosa. Al agregar el agua y dejar reposar:
 - a. Si se logra una separación rápida (30 min) de las sustancias, se tiene que la producción fue exitosa y el biodiesel es de buena calidad.
 - b. Si se separan, pero entre ambas fases hay una capa de espuma o jabón, se debe realizar un nuevo lavado de todo el lote, añadiendo ácido fosfórico o acético para facilitar la separación, y se debe mejorar el proceso de transesterificación.
 - c. Si no se separan adecuadamente, sino que permanecen mezclados en una emulsión lechosa, no se ha completado el proceso de transesterificación.

Lavado

Luego el biodiesel decantado se debe lavar, agregando al biodiesel porciones de 30 ml. de agua destilada. Idealmente el agua debe estar templada a 50-60°C y se debe realizar por aspersión, cuidando de no promover la agitación, ya que si se agita se formaría una

emulsión. El agua arrastra impurezas (alcohol, catalizador, glicerol) que hayan quedado en el biodiesel. Se agrega el agua agitando con cuidado el recipiente en el que se encuentra el biodiesel, luego se deja reposar unas horas para que decanten las impurezas y su separación se logre más fácilmente. Una vez separados los líquidos, el biodiesel queda encima y el agua con los jabones disueltos se puede sacar con válvula desde el fondo del recipiente.⁶⁹

Se puede incorporar una solución ácida como ácido acético o fosfórico para neutralizar el catalizador, este forma una sal que es desechada junto al agua de lavado, además esto hace neutra (pH) el agua desechada. Al usar agua levemente ácida también se desechan contaminantes de calcio y magnesio, además de trazas de fierro y cobre, que hacen que disminuya la estabilidad del biodiesel.

Se puede repetir el lavado, dos o tres veces sólo con agua. El agua del tercer lavado puede usarse para el lavado del siguiente lote.

El biodiesel tiene un aspecto más limpio y cristalino después del lavado.

Secado

El producto lavado se traslada a un recipiente y se procede a secar el biodiesel, ya que queda con agua luego del lavado realizado.

El método para secado puede ser calentar a baño maría, o directo a fuego lento para que el agua destilada se evapore, además del catalizador y el alcohol que no reaccionaron.

La muestra de biodiesel se pone a calentar a 70°C durante los primeros 10 min., luego a 100°C, hasta que no se observan gotas de agua en la muestra.

Así finalmente, se obtiene el biodiesel con rendimientos cercanos al 90% para cada proceso.

*Almacenamiento.*¹⁰

La estabilidad del biodiesel y sus mezclas, está relacionada con su estabilidad de almacenamiento a largo plazo comúnmente llamada “estabilidad oxidativa”, y con su

estabilidad térmica a temperaturas elevadas en el sistema de combustible (“estabilidad térmica”).

Los siguientes consejos pueden asegurar un adecuado almacenamiento de biodiesel:

1. Evitar la exposición al calor, la luz, e incluso al oxígeno: Las insaturaciones pueden reaccionar con el oxígeno y formar peróxidos, y éstos a su vez pueden derivar en ácidos, sedimentos y gomas; y el calor y la luz pueden acelerar este proceso.
2. Almacenar mezclas en lugar de biodiesel puro (B100): las mezclas son más estables que el B100, y así se eliminan las preocupaciones por el punto de niebla del biodiesel en presencia de climas fríos. En mezclas de 20% de biodiesel (B20) las propiedades de fluidez en frío son las mismas que el diesel convencional, y por debajo del 5% (B5) prácticamente es igual al diesel.
3. El monitoreo del índice de acidez puede indicar si el biodiesel se está oxidando, ya que el envejecimiento puede elevar el índice de acidez.
4. No usar sistemas de almacenamiento que contengan metales como: cobre, plomo, estaño, zinc, y sus aleaciones; ya que aceleran el proceso de degradación oxidativa. Algunos materiales compatibles son el acero al carbono, aluminio, teflón, acero, vitón, plásticos fluorados, nylon y la mayoría de las fibras de vidrio.
5. No almacenar el biodiesel por períodos mayores a 6 meses a menos que se utilice un aditivo para estabilizarlo.
6. Evitar la contaminación con agua: Para lograrlo se suele maximizar la relación altura / diámetro de los tanques y éstos deben ser mayormente de volúmenes pequeños.

3. Antecedentes al trabajo a realizar

A continuación se muestran distintos estudios los cuales se obtuvieron condiciones óptimas para llevar a cabo la transesterificación en función del aceite utilizado, de manera de maximizar el rendimiento del proceso y la conversión a biodiesel; dichas condiciones se muestran en la Tabla N°7.

**Tabla N°7: Condiciones de operación en la producción de biodiesel por catálisis homogénea básica, un solo paso.
(a) Aceite vegetal usado**

Aceite	Tipo de catalizador	Catalizador	[Catalizador] % p/p	Alcohol	Relación alcohol:aceite	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Rendimiento, Conversión, [%]	Referencia
Usado	Básico	KOH	1,00	Metanol	6:1	30	25	93,00	Tomasevic, 2003
	Básico	NaOH KOH NaOCH ₃ KOCH ₃ KOH	1,00	Metanol	6:1	120	65	77,00	Encinar, 2005
			0,50					94,00	
			1,25					75,00	
			1,50					88,00	
								74,00	
	Básico	NaOH	1,00	Metanol	6:1	60	65	97,02	Wang et al, 2006 [2]
	Básico	NaOH	1,10	Metanol	7:1	20	60	88,80	Lueng and Gau, 2006 [2]
	Básico	NaOH KOH	0,80 %m/v	Metanol	8,9:1	60	60	94,00	Chirinos, 2007
0,80 %m/v			8,9:1		90	83,00			
1,00 %m/v			6,7:1		60	92,00			
1,40 %m/v			8,9:1		90	90,00			
Básico	NaOH	0,80	Etanol	280 ml/L Aceite (4,8:1)	20	60	94,5	Chhetri, 2008	
Básico	KOH	1,00	Metanol	6:1		65	98,16	Refaat et al, 2008 [2]	
Básico	KOH	2,00		8:1	180	55	96,00	Yusup and Khan, 2010 [2]	

Fuente: (Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales una revisión catálisis química” – Rojas, 2011) ⁴⁶.

(b) Aceite de Ricino

Aceite	Tipo de catalizador	Catalizador	[Catalizador] % p/p	Alcohol	Relación alcohol:aceite	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Rendimiento, Conversión, [%]	Referencia	
Ricino	Ácido	H ₂ SO ₄	Al:ac:cat 60:10:2 mol	Metanol	6:1	480	60	84,00	Meneghetti, 2006	
	Básico	NaOH		HCl			Etanol	80		63,00
				KOH			Metanol	60		61,00
							Etanol	80		77,00
				Metanol			60	59,00		
				Etanol			80	55,00		
				Metanol			60	68,00		
				Etanol			80	46,00		
	Básico	NaOH	0,80	Metanol	9:1	120	25	89,00	Benavides, 2007	
			1,40		9:1		25	78,00		
			0,80		12:1		50	83,00		
			0,80		15:1		50	81,00		
	Básico	NaOH	1,00	Metanol	12:1	90	40	91,69	Chalita, 2007	
			1,00				63	97,81		
			0,50				40	93,71		
0,50			63				97,31			
Básico	NaOH	0,50	Metanol	6:1	60	50	94,26	Guerrero, 2010 [39]		
Básico	KOH	0,50	Metanol	6:1	15	28	92,00	Sousa, 2010		
Básico	KOH	0,50	Metanol	9:1	180 (700 rpm)	65	90,04	Encinar, 2010		
		1,00					91,01			
Básico	NaOH KOH	0,80	Metanol	6:1	90	55	67,23	Cárcamo, 2012 [34]		
		0,80					96,56			
Básico	NaOH	1,00	Metanol	6:1	60	35	98,00	Okullo, 2013		
					(600 rpm)	45	97,00			

Fuente: (Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales una revisión catálisis química” – Rojas, 2011) ⁴⁶.

Los valores de las variables que afectan el proceso de producción de biodiesel incluidas en el sistema experto se encuentran dentro de los rangos expuestos en la tabla anterior, estas condiciones son sugeridas de manera que se reduzcan los costos del proceso. Se sugieren valores de temperatura, concentración de catalizador, relación molar alcohol:aceite, de manera que se utilicen cantidades bajas de alcohol y catalizador, el tiempo de reacción sea bajo, las materias primas sean económicas, y el proceso resulte relativamente sencillo con respecto a otras maneras de producción de biodiesel; de esta manera se garantiza un rendimiento aceptable del proceso de obtención de biodiesel, cercano a los óptimos reportados.

Todo el proceso y sus etapas, además de indicaciones de seguridad y procedimientos, insumos necesarios, y toda la información necesaria para llevar a cabo un proceso de producción de biodiesel satisfactorio, seguro, y eficaz se implementa en el sistema experto.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

El objetivo de la memoria es la implementación de un sistema experto capaz de asesorar en el diseño conceptual de un proceso de producción de biodiesel utilizando como materia prima aceite usado o de ricino.

4.2 Objetivos específicos

1. Selección de la *Shell* y otras herramientas adecuadas a las características del problema.
2. Elicitar el conocimiento para definir las reglas adecuadas para el correcto desarrollo de la producción de biodiesel.
3. Implementar un prototipo de sistema experto.
4. Validar la utilidad y desempeño del sistema mediante análisis con distintos expertos.

CAPÍTULO II: MATERIALES, PROCEDIMIENTOS Y METODOLOGÍAS

5. Materiales

- *Material bibliografico y/o un Experto:* Un experto o material bibliográfico disponible para consultas y visitas (idealmente), de preferencia que estén trabajando actualmente en alguna planta de producción de biodiesel.
- *Hardware Adecuado:* Computador u otro tipo de soporte adecuado para las características de las herramientas a escoger.
- *Herramientas para sistemas expertos:* Lo principal es la *Shell* a usar. En este caso será NEXPERT OBJECT.

Nexpert Object TM (Neuron Data) es la principal herramienta escogida para desarrollar el trabajo de título presente. Es una herramienta de construcción de sistemas expertos que ofrece un ambiente para el desarrollo de diversas aplicaciones.

Se cataloga de híbrida, ya que soporta un mecanismo de razonamiento basado en reglas y un sistema de representación orientado a objetos. En ella se programa en base a objetos, donde están contenidas propiedades, métodos y procedimientos. En el programa los objetos son llamados por otros objetos para que realicen acciones. Lo anterior da lugar al conocimiento base del programa, el cual se organiza mediante reglas.

La estructura abierta de la *Shell* permite comunicación con aplicaciones y comunicación con agentes externos como hojas de cálculo, Visual Basic, entre otras.

Nexpert Object TM incorpora una interfaz gráfica que permite a los desarrolladores y expertos de dominio editar reglas, objetos y estructuras de control.

Una sesión típica con Nexpert Object TM puede incluir la creación o modificación de un conjunto de reglas, la construcción de los objetos de una base de conocimiento, o interactuar con un sistema experto existente. La característica más atractiva de Nexpert Object TM es la posibilidad de mostrar las redes de más de una regla, sus objetos y antecedentes correspondientes.

La principal desventaja se da en el marco de la interfaz gráfica con el usuario, ya que es demasiado básica, y no permite un uso amigable por parte del mismo; además debido a su

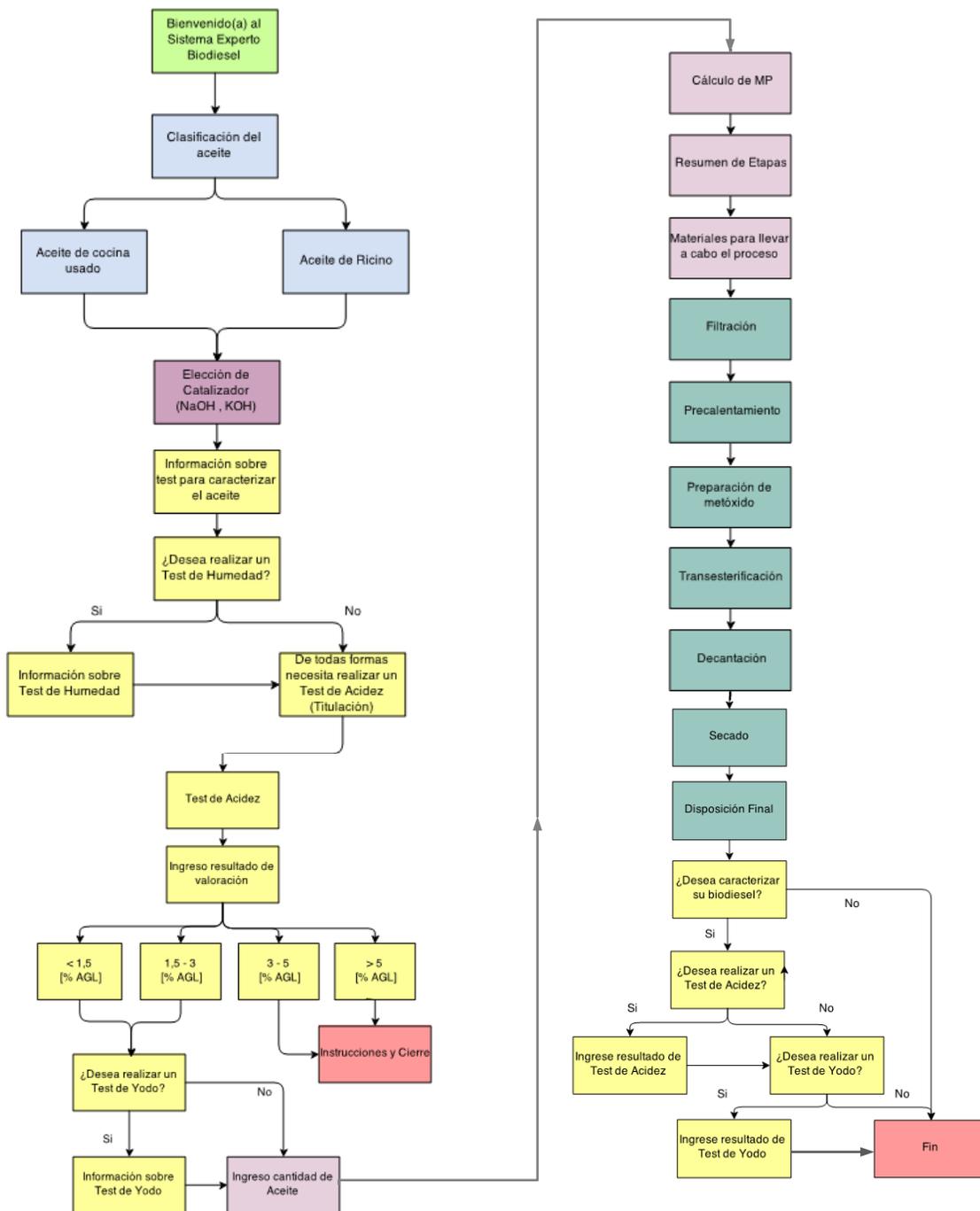
carácter comercial, para ser usado en un computador cualquiera, debe poseerse una llave (protección de software), lo que dificulta su portabilidad. No obstante, como proyección es posible afirmar que pueden existir mejores herramientas acordes a los niveles de utilidad y facilidad de manejo como las tecnologías actuales.

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIONES

6. Resultados y discusiones

Un esquema general del funcionamiento del sistema experto se muestra en la Figura N°13.

Figura N°13: Esquema de funcionamiento del sistema experto Biodiesel



(Fuente: Elaboración propia)

De acuerdo a lo mostrado en el esquema anterior, al comenzar el programa, se da la bienvenida al usuario; éste en primer lugar debe clasificar su materia prima ya sea aceite de ricino o aceite vegetal usado.

En segundo lugar, el usuario debe escoger el catalizador básico usando la información sobre cada catalizador (NaOH y KOH), proporcionada en el sistema experto.

En el paso siguiente, el usuario debe optar por realizar algún test (acidez al menos) para caracterizar el aceite, y medir la calidad de este. El programa despliega información general de todos los test (humedad, acidez, y yodo), para luego dar paso a cada test en particular; comenzando por el test de humedad. Si el usuario opta por realizar un test de humedad, entonces se despliega la información pertinente para poder llevar a cabo el test; y luego se da paso al segundo test (acidez). En caso contrario, se despliega la información para llevar a cabo el test de acidez (titulación), que en el programa es de carácter obligatorio, dada la relevancia de este parámetro en el correcto desarrollo del proceso, y sus resultados.

Una vez que se ha llevado a cabo el test, el usuario debe ingresar el volumen de solución utilizada en la valoración. Dependiendo del volumen ingresado, el programa clasifica el aceite de acuerdo al %AGL (%FFA), como se mostró anteriormente en el capítulo sobre caracterización del aceite (Apartado 2.6.2). Si el aceite no posee la calidad suficiente para ser tratado, el programa termina; en caso contrario el programa sigue, ofreciendo la opción de realizar el último test (yodo). Si el usuario decide realizar un test de yodo, entonces el programa despliega la información para llevarlo a cabo. Luego el usuario debe ingresar el valor resultante del test, y el programa informa si es que el aceite cumple o no la normativa vigente.

Nota: El valor del test de yodo es una medida aproximada del desempeño del biodiesel en climas fríos, y de su capacidad de resistir la oxidación al ser almacenado. Independiente del valor, el programa sigue en curso.

Una vez que se ha caracterizado el aceite, el usuario debe ingresar la cantidad que desea tratar. Con esta información el programa calcula y despliega la información de materias primas requeridas (alcohol, catalizador escogido), resumen de etapas, y materiales e insumos para llevar a cabo el proceso. En este punto del programa se comienza a desplegar

la información y sugerencias de cada etapa en particular, comenzando por la filtración del aceite, hasta la disposición final.

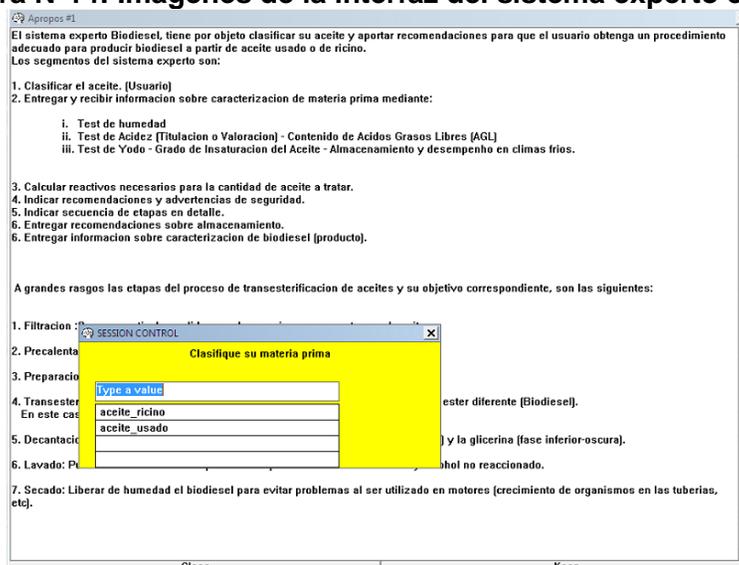
Por último, el programa ofrece la opción de caracterizar el biodiesel resultante mediante un test de acidez y/o de yodo. Si el usuario no desea caracterizar el biodiesel, el programa termina. En caso contrario, el programa despliega la información para llevar a cabo un test de acidez, y el usuario debe ingresar el valor del volumen utilizado en dicho test. El programa ofrece información sobre cumplimiento de normas, y luego da paso al test de yodo. Si el usuario desea realizar un test de yodo, se despliega la información para llevar a cabo dicho test, y se entrega información sobre cumplimiento de normas una vez que el usuario ha ingresado el valor del test. Luego el programa termina. Si el usuario no desea realizar el test de yodo, el programa termina.

El sistema implementado consta de 47 reglas que enlazadas albergan el conocimiento específico necesario que permite asesorar efectivamente a un usuario en la producción de biodiesel. Este usuario inexperto, sin la utilización del sistema experto de biodiesel, hubiese requerido amplia experiencia y conocimiento del proceso.

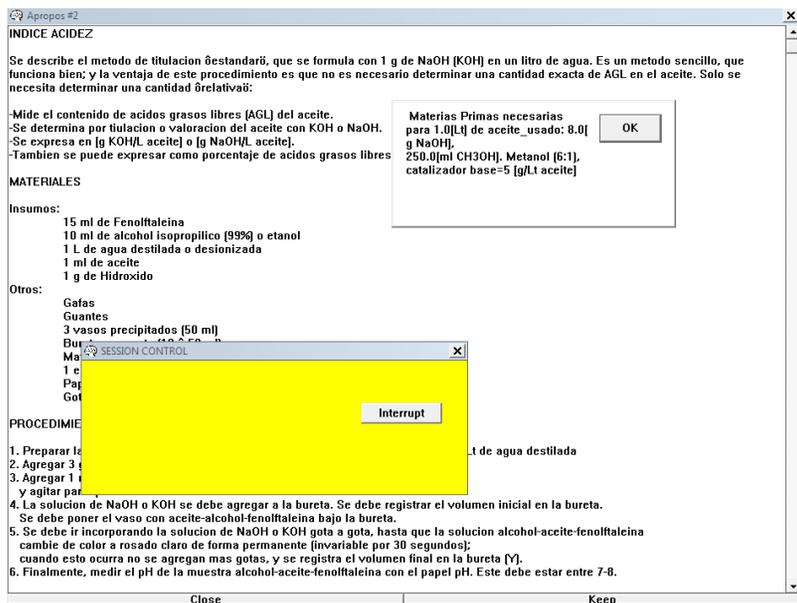
Sistema Experto en Uso

Algunas imágenes de la interfaz del sistema experto en uso se muestran a continuación en la Figura N°14.

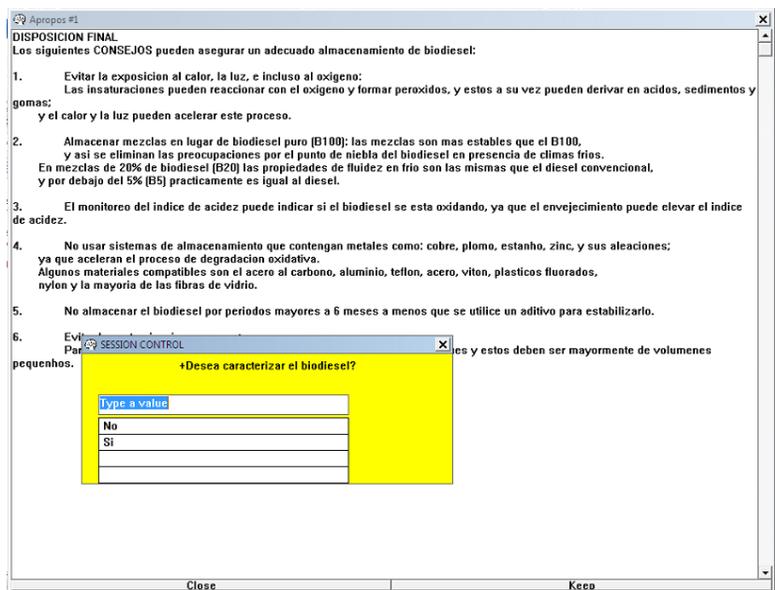
Figura N°14: Imágenes de la interfaz del sistema experto en uso



(a) Clasificación del aceite.



(b) Entrega informaci3n de materias primas necesarias.



(c) Caracterizaci3n del biodiesel resultante.

En el Anexo 7-A se encuentran imágenes del sistema experto en uso para una prueba de principio a fin; además en el Anexo 7-B se encuentra el código del sistema experto desarrollado (CD).

Discusiones

Las condiciones de operaci3n para los procesos implementados en el sistema experto se enmarcan dentro de los antecedentes previos, con la salvedad de que el sistema experto

resulta ser más estricto al momento de aceptar una materia prima como idónea para el proceso a llevar a cabo.

De los estudios consultados se toma la reacción molar alcohol:aceite vegetal, la temperatura y tiempo de reacción, y otros parámetros menos importantes como intensidad de mezclado.

El parámetro más importante a tomar en cuenta es el contenido de ácidos grasos libres, y relacionado con este parámetro, el contenido de humedad de un aceite. La clasificación propuesta en el sistema experto busca lograr un mayor control sobre las condiciones del aceite a utilizar, debido a que si presenta niveles altos de ácidos grasos libres y/o humedad el resultado del proceso no será satisfactorio. Pero además busca que esos aceites que no tienen buena calidad para ser tratados, puedan ser tratados de alguna forma por el usuario - ya sea siendo mezclados con un aceite de mejor calidad o neutralizando el aceite con la adición de catalizador extra - , y con ello ser evaluados nuevamente al momento de la caracterización del aceite. Con esto se pretende lograr mayor cantidad de aceite disponible, y la reducción de los descartes de los mismos.

Con respecto a la cantidad de catalizador a utilizar, las medidas por litro de aceite se han minimizado, resultando ser menores que las reportadas en antecedentes previos, esto con el objetivo de hacer el proceso menos costoso para el usuario, pero además porque en la práctica se busca reducir las posibilidades de que la reacción de saponificación se lleve a cabo, la cual forma jabón, dificultando la separación posterior del biodiesel. Si bien las cantidades de catalizador según el tipo (NaOH o KOH), son menores a las reportadas en estudios de investigación, estos valores (catalizador base) han sido ampliamente usados en diversas partes del mundo, logrando resultados satisfactorios.

Con respecto al desarrollo del sistema experto, la *Shell* utilizada resultó ser demasiado primitiva, privando al sistema experto de una característica primordial que es su portabilidad, lo que afecta además su disponibilidad. Además, la interfaz de desarrollo de la misma resultó poco amigable para el desarrollador, lo que sin duda afecta en el tiempo de desarrollo del sistema. Para el usuario la interfaz del sistema experto también resulta primitiva y poco amigable. La elección de las herramientas adecuadas, en particular la *Shell* es un paso primordial para el éxito en el diseño e implementación del sistema experto; por ello, si es que se hubiesen usado otras *Shells* más actualizadas y por la misma razón, mayormente usadas como *Vidwan* y *JESS* (Java Expert System Shell) – las cuales se caracterizan principalmente

por su simpleza y facilidad de aprendizaje para el desarrollador y los usuarios –, probablemente podrían haberse evitado dificultades en el manejo de la Shell, mejorado sus capacidades de portabilidad y usabilidad; además de su capacidad de integración con otras herramientas recientes, ampliamente usadas; que también sirven para el desarrollo de sistemas basados en conocimiento como *Matlab* y *Scilab*, con lo que la calidad de la información entregada al usuario hubiese sido más idónea.

No obstante, el sistema experto posee los elementos principales que definen su estructura; la base de conocimientos implementada resulta suficiente para poder llevar a cabo los procesos implementados de manera eficaz. El motor de inferencia y la interfaz, están integradas en la *Shell* escogida. Sin embargo, algunos componentes secundarios, como un componente explicativo, sistemas de adquisición de conocimiento, o memoria de trabajo, no son fácilmente utilizables por el usuario ni por un ingeniero de conocimiento. Este último de todas formas, al manipular la Shell, puede lograr obtener información sobre el enlazamiento de las reglas, además de incorporar nuevo conocimiento al sistema.

Para probar que el sistema experto asesora de manera eficaz se realizó un proceso de validación, que consistió en producir biodiesel siguiendo sólo la información entregada por el sistema; una vez finalizada la verificación de sus reglas y funcionamiento interno, y la compleción de la base de conocimientos.

6.1 Validación:

En primer lugar se lleva a cabo una validación sobre el uso del sistema experto, es decir, si cumple las necesidades del usuario. Este proceso contó con la colaboración de un alumno del Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología de la Universidad de Chile, no involucrado en el desarrollo de este trabajo. Una vez planteadas sus inquietudes, se mejoró la claridad en la información entregada por el sistema, así como la forma; de manera de cumplir con los requerimientos del usuario, con lo que se da fin a la validación sobre el uso.

En segundo lugar se llevó a cabo la validación parcial orientada a resultados, es decir, si el sistema efectivamente asesora con la información suficiente para que un usuario con un acercamiento a protocolos de laboratorio pueda finalmente producir biodiesel.

Se mencionó que esta validación es parcial ya que no abarca todos los procesos de producción de biodiesel implementados; no obstante, al validar el proceso para la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal usado, usando metanol como alcohol, e hidróxido de sodio como catalizador, se puede considerar un logro importante, debido a que validar las condiciones y variables involucradas permite lograr un resultado eficaz, en el proceso que se espera sea consultado en mayor cantidad, por ser la materia prima menos costosa y de mayor disponibilidad.

El haber llevado a cabo el proceso anterior y haber producido biodiesel, valida el funcionamiento del sistema experto. Sin embargo, para que el biodiesel producido pueda ser usado, se recomienda realizar una caracterización del producto para obtener información sobre su calidad, y poder decidir con mayor información, si es seguro, y si cumple con los requerimientos del usuario en cuanto a pureza. Por lo anterior el proceso de caracterización como alternativa fue incluido en una etapa posterior a la experiencia realizada en el laboratorio.

Las condiciones de operación se muestran en la Tabla N°8:

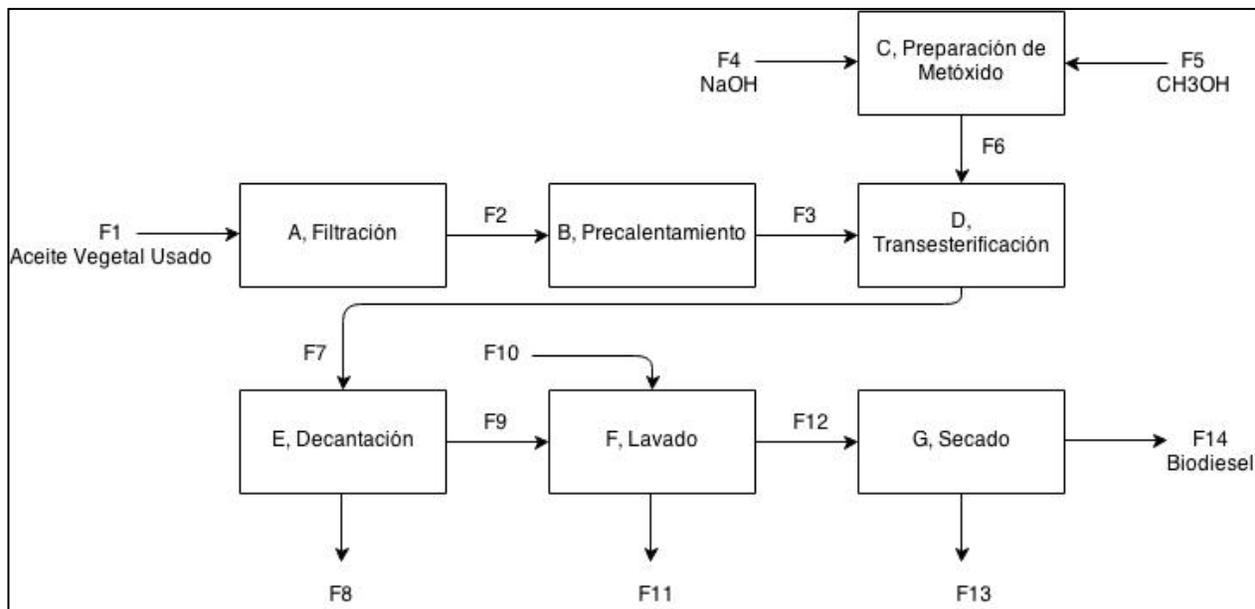
Tabla N°8: Condiciones de operación en la transesterificación de aceite vegetal usado mediante catálisis con NaOH

Aceite	Tipo de catalizador	Catalizador	[Catalizador] [g/L Aceite]	Alcohol	Relación alcohol:aceite	Tiempo [hrs]	Temperatura [°C]	Rendimiento, Conversión, [%]
Usado	Básico	NaOH	5	Metanol	6:1	1,0	65	91

(Fuente: Elaboración propia)

Se realizaron 2 experimentos en los cuales se usó el mismo tipo de aceite - recolectado en un restaurant de comida china -, y el mismo volumen (500 ml.) Se muestra a continuación el diagrama de flujo correspondiente al proceso llevado a cabo, éste muestra la secuencia de etapas realizadas y los insumos más importantes (Figura N°15).

Figura N°15: Diagrama de Flujo – Proceso de Validación



(Fuente: Elaboración propia)

Las cantidades correspondientes a cada flujo y su descripción se muestran en la Tabla N°9 a continuación.

Tabla N°9: Flujos resultantes del proceso de producción de biodiesel para validación

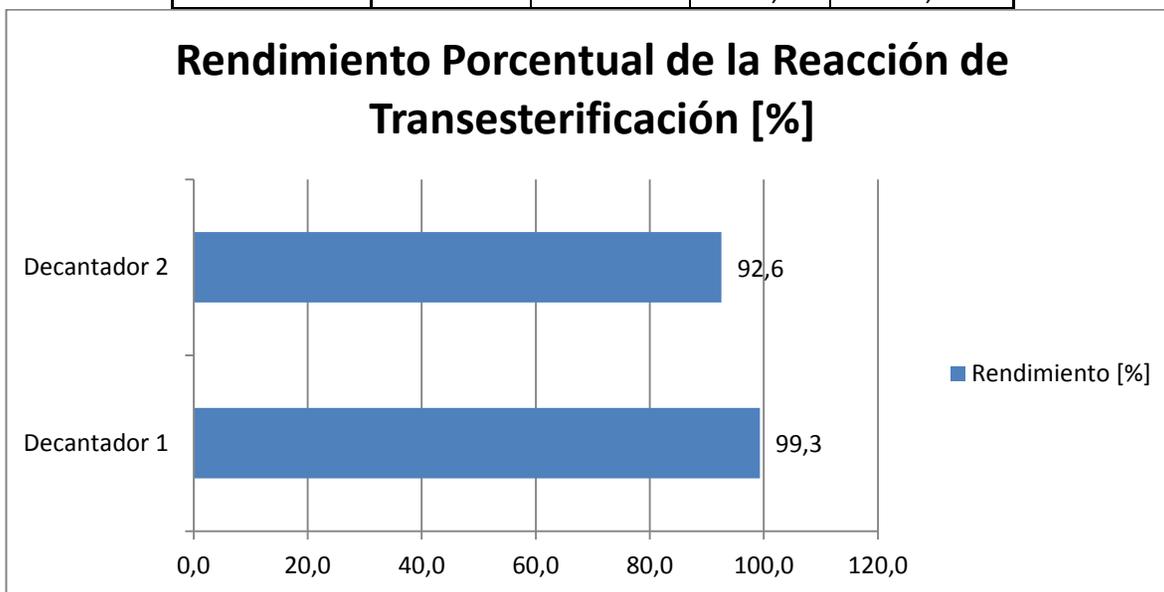
Especie	Aceite Vegetal Usado	Aceite Filtrado	Aceite pre calentado	NaOH	Metanol	Metóxido de Sodio	MeOH + Aceite	Residuo Decantación	Biodiesel 1	Agua Destilada	Residuo Lavado	Biodiesel Lavado	Agua + Residuos	Biodiesel Final
Flujo	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
Unidad	[ml]	[ml]	[ml]	[g]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]
D1	500	500	500	1,75	125	126,8	626,8	31,8	595	100	210	485	13	472
D2	500	500	500	1,75	125	126,8	626,8	54,8	572	100	207	465	25	440

(Nota: D1 Decantador 1; D2 Decantador 2)

Los resultados de rendimiento porcentual para el proceso llevado a cabo en la validación se muestran en la Tabla N°10. Dichos resultados fueron obtenidos en base a valores de propiedades físicoquímicas provenientes de la bibliografía consultada.

Tabla N°10: Rendimiento de Biodiesel proceso de validación

	Aceite	Biodiesel Real	Biodiesel Teórico	Rendimiento Porcentual
	[g]	[g]	[g]	[%]
Decantador 1	460	472	475,4	99,3
Decantador 2	460	440	475,4	92,6

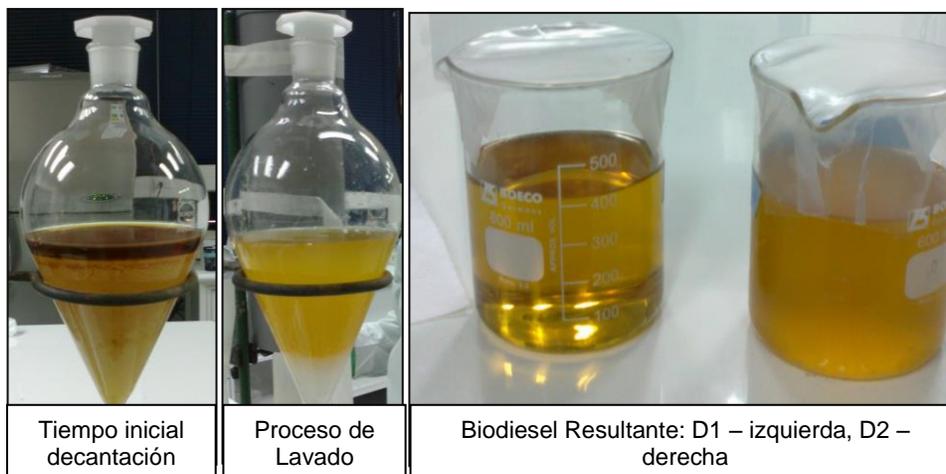


(Fuente: Elaboración propia) ⁴²

Como los resultados lo muestran, el rendimiento del proceso (96% promedio) es mayor cercano al reportado en la literatura (que es de ~ 90%) para ambos experimentos. Este rendimiento se calculó en base a estimaciones de las propiedades fisicoquímicas del biodiesel y el aceite, por lo que el valor obtenido para cada experimento podría ser levemente distinto en la práctica. El mayor valor de rendimiento obtenido con respecto al reportado, puede deberse a que el producto final no sólo es biodiesel, sino más bien el producto deseado junto a compuestos no reaccionados como alcohol, catalizador y otros. La diferencia en los resultados, siendo el rendimiento del decantador 1 (D1) mayor al del decantador 2 (D2), se debe a que se usaron decantadores de distinta calidad y geometría, en particular al manipular la válvula del decantador 2 se tenía menor control de ésta, por lo que al abrirla, se perdió algo de biodiesel como residuo. Además el decantador D2, no contaba con una geometría idónea para la decantación, ya que no poseía una forma cónica hacia la base acorde a un decantador como el primero (D1), lo que hubiese permitido que la fase pesada decantara de mejor forma hacia el fondo del decantador.

Algunas imágenes del proceso se muestran a continuación:

Figura N°16: Imágenes del proceso de Validación



En las imágenes anteriores, se puede apreciar cómo el biodiesel se va purificando a medida que transcurren las etapas. Una vez transcurrida la reacción, al trasvasijar la mezcla al decantador (D1 en la imagen) se puede ver que no es posible distinguir entre biodiesel y glicerol. La segunda imagen corresponde al proceso de lavado, y en ella se puede ver cómo el agua de lavado decanta para ser posteriormente separada del biodiesel. Este proceso se repite, de manera que el agua arrastre sales e impurezas, hasta que el agua de lavado salga lo más clara posible. En la última imagen se puede ver el biodiesel resultante para ambos experimentos; el primero (D1) resultó cristalino con respecto al otro (D2), principalmente debido a la mejor configuración geométrica del decantador 1 (D1). De lo anterior se desprende que es muy importante contar con equipos de la calidad suficiente para llevar a cabo este proceso; de lo contrario se mermará la calidad del biodiesel resultante, además de la cantidad obtenida del mismo.

Para que la validación sea completa, ésta debe realizarse para todas las líneas de proceso implementadas, lo que implica contar con todas las materias primas involucradas, además del tiempo necesario para llevar a cabo estas pruebas.

7. Conclusiones

Se ha logrado elicitar conocimiento sobre procesos de producción de biodiesel e implementar un sistema experto, el cual alcanza un buen desempeño en el dominio involucrado.

La *Shell* escogida permitió desarrollar el sistema experto, el cual logra el asesoramiento del usuario en el proceso de producción de biodiesel a partir de los aceites incluidos. No obstante, de acuerdo a las características del problema que condujeron a la realización de este estudio, hizo falta una *Shell* y herramientas más actualizadas que las usadas. Debido a lo anterior, no fue posible integrar el sistema con aplicaciones o herramientas que permitiesen entregar la información de forma más fácil y clara para el usuario, y en un entorno y con interfaz más amigable.

En cuanto a la explicación de sus cadenas de inferencia el sistema experto posee una opción donde es posible desplegarlas; sin embargo no es posible obtener una explicación clara del camino a una determinada respuesta. Sin embargo, un ingeniero de conocimiento puede acceder a ellas, y con un análisis de las reglas puede corroborar las estrategias y caminos utilizados.

Las reglas escogidas dan lugar a un sistema experto sin errores internos, lo que resulta en un correcto desarrollo del sistema, y su posterior uso. Además, su base de conocimiento fue verificada para su propósito inicial, el cual es asesorar al usuario para poder llevar a cabo la producción de biodiesel de manera eficaz. Se debe agregar que no fue necesaria una jerarquización de las reglas, ni la introducción de factores de incertidumbre, logrando de igual forma el objetivo práctico del trabajo; sin embargo éstos pueden ser incorporados al manipular la *Shell*

En lo referente a la validación del sistema experto, la evaluación orientada a resultados del sistema fue parcial, sin embargo se espera que el proceso validado sea el de mayor consulta, pudiendo los otros procesos ser validados en el futuro, por lo que de todas maneras el sistema experto puede ser usado logrando resultados satisfactorios.

La evaluación y validación orientada al uso se realizó, obteniendo un sistema experto utilizable sin mayores problemas por un usuario promedio, sin perjuicio de que en el futuro el sistema experto pueda ser modificado y actualizado en alguna *Shell* o herramienta más

actual y tecnológica. Si se espera la masificación de estas herramientas, su desarrollo e implementación deben ir de la mano de la tecnología actual, ya que cada vez más rápido surgen nuevas plataformas explotables. No obstante, la tecnología usada permite de todas formas contar con una herramienta útil para el aprendizaje de ingenieros químicos, no familiarizados con los procesos insertos en la base de conocimiento, o con el lenguaje de programación y sistemas basados en conocimiento.

Recomendaciones

Para finalizar, es posible formular las siguientes recomendaciones en relación al trabajo realizado:

- Ya que el sistema experto no es portable como se esperaba - lo que dificulta su acceso a mayor cantidad de personas -, las reglas implementadas pueden ser escritas en otro lenguaje de programación y ser insertas en algún sistema de desarrollo más amigable para el desarrollador y el usuario final, donde además pueda ser mejorado ya sea con su funcionamiento actual, aumentar la base de conocimientos, o agregar funcionalidades.
- El sistema experto puede ser utilizado con motivos académicos, con el objeto de aproximar a nuevos alumnos al desarrollo de sistemas basados en conocimiento, y/o a los procesos específicos insertos en la base de conocimiento, lo que también contribuye a expandir el “*know-how*” de este tipo de procesos.
- La base de conocimiento del sistema puede ser ampliada con mayor número de materias primas, ya sean aceites o grasas; sin embargo, se proponen las especies donde existe gran potencial de desarrollo como el caso de las microalgas. Además, podría expandirse el número y tipo de catalizadores, agregando catalizadores ácidos, por ejemplo, adherir otros procesos para obtención de biodiesel, o incluir aspectos como economías potenciales y costos
- También es posible expandir la base de conocimiento agregando etapas específicas para obtención de distintos aceites, ya sean los incluidos en el sistema experto u otros. Estas actualizaciones deben ser realizadas por un ingeniero de conocimiento, es decir, una persona involucrada en el desarrollo de sistemas basados en conocimiento.

8. Glosario

Aceite: Producto de origen mineral, animal o vegetal, líquido a 25 °C. Constituido en el primer caso por hidrocarburos pesados, y en los otros por mezclas de glicéridos.

Ácidos grasos: Nombre dado a un grupo de ácidos capaz de neutralizar un solo equivalente básico, por tener solo un hidrogeno sustituible. En la mayoría de los casos, se puede decir que la fórmula de un ácido graso es $R - COOH$. Entran en la composición de grasas y aceites, los más frecuentes son el oleico, palmítico, y esteárico.

Ácidos grasos libres: También conocidos por sus siglas al inglés FFA (*free fatty acids*) son aquellos ácidos grasos que no se encuentran unidos a ningún glicérido. El contenido de estos en aceites y grasas se puede determinar mediante el índice de acidez y el pH.

Alcoholólisis: Es la reacción química mediante la cual una molécula es desplazada por un alcohol.

Anhidro: Compuesto que no contiene agua.

Ester: Compuesto orgánico que se origina cuando se unen un ácido y un alcohol. Corresponde a la fórmula general $R - COO - R'$.

Etanol: También conocido como alcohol etílico, es un alcohol liviano (peso molecular, PM: 46,1). Líquido incoloro, soluble en agua, inflamable. La presentación más común es al 96% libre de agua. Corresponde a la fórmula CH_3CH_2-OH .

Glicérido: Ester de glicerol y un ácido graso.

Glicerol: También conocido como propanotriol, es un alcohol con tres grupos hidroxilo (-OH). Alcohol pesado (peso molecular, PM: 92,1). Líquido viscoso, soluble en agua.

Grasa: ester de glicerol. Se caracteriza por ser sólido a 25 ° Celsius.

Hidróxido de sodio: Conocido como soda o sosa cáustica, es un sólido cristalino, que se disuelve en agua y alcoholes. Corresponde a la fórmula NaOH. Tiene tendencia a absorber agua y dióxido de carbono con facilidad.

Metanol: Conocido también como alcohol metílico o alcohol de madera, es un alcohol liviano (peso molecular, PM: 32,0). Líquido incoloro, soluble en agua, inflamable. Puede

conseguirse fácilmente en el mercado al 99,9 % libre de agua. Corresponde a la fórmula $\text{CH}_3\text{-OH}$.

Metóxido de sodio: Compuesto formado de la disolución de hidróxido de sodio en metanol, corresponde a la fórmula $\text{CH}_3\text{O}^-\text{Na}^+$.

Peróxido: Los peróxidos son sustancias que presentan un enlace oxígeno-oxígeno y que contienen el oxígeno en estado de oxidación -1 . La fórmula general de los peróxidos es $\text{Metal} + (\text{O}^{-1})_2^{-2}$. Generalmente se comportan como sustancias oxidantes. En contacto con material combustible pueden provocar incendios o incluso explosiones

Solubilidad: Se utiliza este término para denotar la propiedad que tienen ciertas sustancias de disolverse en otras. En términos químicos se entiende por solubilidad la máxima cantidad de un soluto que se puede disolver en una cantidad dada de un solvente. La solubilidad se expresa normalmente en gramos de soluto por cada 100g de solvente

Transesterificación: Es el proceso de desplazamiento de un alcohol pesado por un alcohol liviano en un éster.

Triglicérido: Molécula de glicerol en la cual los tres grupos alcohólicos ($-\text{OH}$) han sido esterificados, es decir, los tres grupos alcohólicos han sido sustituidos con moléculas de ácidos grasos.

Índice de Cetano: Es una medida de la calidad de la combustión de combustible diesel durante el encendido de compresión. Se trata de una expresión significativa de la calidad de un combustible diesel. Índice de cetano o CN es una medida de retardo del encendido de un combustible, el período de tiempo entre el inicio de la inyección y el primer aumento de presión que puede ser identificada durante la combustión del combustible. En particular, un motor diesel, combustibles de cetano superiores tendrán más cortos periodos de retardo de ignición que los combustibles de cetano inferiores.

Punto de congelamiento: es la temperatura en la cual una sustancia en estado líquido pasa a encontrarse en estado sólido.

Punto de nube: Es la temperatura en la cual empiezan a formarse cristales en el biodiesel. Es también la temperatura en la cual una solución de un surfactante o glycol empieza a formar micelas (aglomerados moleculares), convirtiéndose así en una especie de nube.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CASTRO, Miguel. “Hacia una Matriz Energética Diversificada en Ecuador”, Quito, CEDA, Noviembre 2011.
- [2] TALEBIAN-KIAKALAIEH, Amin, “A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil” CREG, UTM, Skudai, Johor, Malaysia. (Applied Energy, 2013)
- [3] RUHL, Christof. “BP Statistical Review of World Energy 2011” [en línea] <http://www.google.cl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CFIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.bp.com%2Fliveassets%2Fbp_internet%2Fspain%2FSTAGING%2Fhome_assets%2Fdownloads_pdfs%2Fs%2FStatisticalReview_2011_ES.pdf&ei=pu_yT_uxAo2G8QSNhtHOCQ&usg=AFQjCNFVIK0pzyrna4bBr2xrLbs47zeBEA&sig2=c3-jB4KaSS-aZyLQZQOI5A> [consulta: 30 de Junio 2012]
- [4] IEA. “CO₂ Emissions from fuel combustion highlights”. IEA, 2012. p138.
- [5] SINGH, A. SINGH P. “Production of liquid biofuels from renewable resources” University of Ulster Northern Ireland, UK. Biofuels Research Group, Environmental Research Institute, University College Cork, Ireland. (Progress in energy and combustion science, 2011)
- [6] DEMIRBAS, Ayhan. “Politics, economics and environmental impacts of biofuels: a review”. Sila Science, Trabzon, Turkey. (Applied Energy, 2009)
- [7] NOETMENGISELMON Agrocombustibles. Rendimiento Energetico. [en línea] http://www.noetmengiselmon.org/IMG/pdf/Agrocomb_Rendimiento_Energetico.pdf [consulta: 17 de Noviembre de 2012]
- [8] SILVA LORA, Electo, ESCOBAR, José, ROCHA, Mateus H. “Issues to consider, existing tools and constraints in biofuels sustainability assessments”. Fedral University of Itajubá, Brazil. Instituto Cubano de investigaciones y derivados de la caña de azúcar, La Habana, Cuba. (Energy, 2011)
- [9] REN 21. “Renewables 2012 Global Status Report. 2012”. 172p.
- [10] IICA. “Atlas de los agroenergía y los biocombustibles en las Américas”. San José, Costa Rica, 2010.
- [11] AGUDELO, John, DEBOYA, Iván, AGUDELO, Andrés. “Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de biodiesel de palma [en línea] Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte. [consulta: 30 de Junio 2012]

- [12] PHAN, Anh, PHAN, Tan. "Biodiesel production from waste cooking oils", Newcastle University, UK, 2008. (Fuel, 2008)
- [13] TOMASEVIC, A. V., SILER-MARINKOVIC, S. S. "Methanolysis of used frying oil", Institute for plant protection and environment, MEIgrade, Serbia and Montenegro. (Fuel Processing Technology 81, 2003)
- [14] ORTEGA, R., R. MUÑOZ, L. ACOSTA, C. FERNÁNDEZ, J. PUIGGROS y P. FERNÁNDEZ. 2007b. Evaluación y sensibilización de estudios técnico-económicos respecto al potencial de biocombustibles en Chile: informe final. Universidad Técnica Federico Santa María. Santiago, Chile.
- [15] ORTEGA, R., R. MUÑOZ, L. ACOSTA, C. FERNÁNDEZ, J. PUIGGROS y P. FERNÁNDEZ. 2007a. Evaluación del potencial productivo de biocombustibles en Chile con cultivos agrícolas tradicionales: informe final. Universidad Técnica Federico Santa María. Santiago, Chile.
- [16] AVALOS, Viviana. "Seminario internacional de clausura de proyecto: "Procesos óptimos para el tratamiento de materiales lignocelulósicos para la producción de bioetanol". Biocombustibles en Chile, Ministerio de Energía, 2010. [En línea] <<http://www.cec.uchile.cl/~biocombustibles/Viviana%20Avalos%20Biocombustibles%20liquidos%20UChile%2015nov2010.pdf>> [consulta: 17 de Noviembre de 2012]
- [17] PANEQUE, Manuel. "Bioenergía en Chile" Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2011. 124p.
- [18] AGRONOMOS. "El biodiesel en Chile". [En línea] <http://www.agronomos.cl/2009/may/biodisel.html> [consulta: 16 de Diciembre de 2012]
- [19] E-CL. "Memoria Anual – 2013". [En línea] http://www.e-cl.cl/prontus_ecl/site/artic/20111026/asocfile/20111026132820/memoria_anual.pdf [consulta: 17 de Noviembre de 2012]
- [20] UFRO.CL. "Planta productora de biocombustibles a partir de microalgas puso en marcha segunda etapa" [En línea]. <<http://www.ufro.cl/index.php/mas-noticias/1515-planta-productora-de-biocombustibles-a-partir-de-microalgas-puso-en-marcha-segunda-etapa>> [consulta: 17 de Noviembre de 2012]
- [21] BODIESEL.COM.AR. "Producción de biodiesel en Chile, presentan la primera estación a escala industrial de este biocombustible" [En línea] <<http://biodiesel.com.ar/3305/produccion-de-biodiesel-en-chile-presentan-la-primera-estacion-a-escala-industrial-de-este-biocombustible>> [consulta: 19 de Noviembre de 2012]

[22] CONICYT. “Se abre la llave del biodiesel” [En línea] <<http://www.conicyt.cl/fondef/2010/04/12/se-abre-la-llave-del-biodiesel/>> [consulta: 19 de Noviembre de 2012]

[23] CONICYT. Resumen Proyecto: “Desarrollo de un paquete tecnológico para producir bioenergía a partir de algas”. [En línea] <http://www.conicyt.cl/wpcontent/themes/fondef/encuentra_proyectos/PROYECTO/06/I/D06I1099.html> [consulta: 19 de Noviembre de 2012]

[24] CONICYT. Resumen Proyecto: “Optimización y mejoramiento biotecnológico de las condiciones de cultivo de la microalga verde *Botry oococcus braunii* para la obtención de biohidrocarburos”. [En línea] <http://www.conicyt.cl/wp-content/themes/fondef/encuentra_proyectos/PROYECTO/06/I/D06I1021.html> [consulta: 19 de Noviembre de 2012]

[25] BODIESEL.COM.AR. “Biodiesel de algas en Chile”. [En línea] <<http://biodiesel.com.ar/1530/biodiesel-de-algas-en-chile>> [consulta: 19 de Noviembre de 2012]

[26] CNE. “Estudio Marco Normativo y Procedimientos: consumo de Biocombustibles en Chile”. 2009

[27] CNE. “Estudio Marco Normativo y Procedimientos que se debe cumplir en la Cadena de Producción-Consumo de los Biocombustibles, para el inicio y desarrollo de sus actividades dentro de la República de Chile”. Informe Final, Volumen 3. Barros y Errázuriz Abogados, Gamma Ingenieros S.A. Santiago, Chile. 2008. 171p.

[28] BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. “Buscador de Leyes por “Biocombustibles”. [En línea] <<http://www.leychile.cl/Consulta/listaresultadosimple?cadena=biocombustibles&npagina=1&itemspagina=20&exacta=0&orden=0&tipoviene=0&totalitems=15&seleccionado=0>> [consulta: 16 de Diciembre de 2012]

[29] ROLSTON, David W. “Principios de inteligencia artificial y sistemas expertos”. 1ª Edición. Bogotá, Colombia, McGraw-Hill, 1990. 255p.

[30] VARGAS H., N, OKUDAN K., G., SCHMIDT, L. C., ACOSTA H., P.R. “Development of an expert system to aid engineers in the selection of design for environment methods and tools” U. Of Texas, Pennsylvania State University, U. Of Maryland, USA. (Expert Systems with Applications, 2012)

- [31] ANGULO, C., CABESTANY, J., RODRÍGUEZ, P., BATLLE, M., GONZÁLEZ, A., “Fuzzy expert system for the detection of episodes of poor water quality through continuous measurement”. Universidad Politécnica de Cataluña, España. Adasa Sistemas S.A.U., Barcelona, España. (Expert System with Applications, 2012)
- [32] ROMEO, J., PAJARES, G., MONTALVO, M., GUERRERO, J. M., GUIJARRO, M., DE LA CRUZ, J. M. “A new expert system for greenness identification in agricultural images” Universidad Complutense de Madrid, España. (Expert System with Applications, 2012)
- [33] MUÑOZ, Diego. “Metodología de adquisición de conocimientos para la construcción de sistemas computacionales basados en conocimiento (Sistemas expertos) y aplicación a la ingeniería de procesos” Tesis de magíster en ingeniería química, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Universidad de Chile. 1989. 414h.
- [34] MC MALLEEN, M. R., KUESTEN, C. L. “Expert system shells – Selecting the most appropriate development environment” Department of Food Science and Technology, Cornell University – NYSAES, Geneva, NY 14456, USA. (Food Research International). 1994
- [35] HATONEN, K. KARONEN, O. NURMINEN, J. “What makes expert systems survive over 10 years - empirical evaluation of several engineering applications”. Nokia Research Center, Finland. (Expert System with Applications 24, 2003).
- [36] LIAO, Shu-Hsien. “Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004. Tamkang University, Taiwan. (Expert system with applications, 2005)
- [37] RAJVANSHI, S., PAL SHARLA, M. “Microalgae: A Potential Source of Biodiesel”. Biofuel Research Laboratory, Alternate Hydro Energy Centre, Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee, India. (Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 2012)
- [38] FELIZARDO et al. “Production of biodiesel from waste frying oils”. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2005.
- [39] BERRÍOS, Leonardo. “Producción de biodiesel a nivel de laboratorio mediante la transesterificación de aceite comestible usado” Universidad de Santiago, Chile, 2012. 106p.
- [40] COSTA NETO, Pedro R., ROSSI, Luciano F. S., ZAGONEL, Giuliano F., & RAMOS, Luiz P.. “Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras”. Departamentos de Química e de Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR) – Curitiba, Brasil. (Química Nova, 2000)

- [41] EVERDE. "Bioils". [en línea] <<http://www.everde.cl/2012/05/bioils-una-empresa-dedicada-al.html>> [consulta: 04 de Enero de 2013]
- [42] QUEPASAMINERIA.CL "Reciclaje de aceite para biodiesel: Cadena de oportunidades". [En línea] <<http://www.quepasamineria.cl/index.php/vida-e-innovacion/item/2179-reciclaje-de-aceite-para-biodi%C3%A9sel-cadena-de-oportunidades>> [consulta: 04 de Enero de 2013]
- [43] SURTISTICO.CL "Lanzamiento programa de reciclaje de aceites en Angelmo" ". [En línea] <<http://www.surturistico.cl/index.php/home/medio-ambiente/1272-lanzamiento-programa-de-reciclaje-de-aceites-vegetales-usados-de-angelmo-puerto-montt>> [consulta: 04 de Enero de 2013]
- [44] MUNICIPALIDAD DE VALDIVIA. "Municipio firma convenio para reciclar aceites domésticos". [En línea] http://www.munivaldivia.cl/www/municipal_valdivia/index.php?option=com_content&view=article&id=1883%3Amunicipio-firma-convenio-para-reciclar-aceites-domesticos&catid=64%3Ageneral&Itemid=601&lang=es [consulta: 04 de Enero de 2013]
- [45] SANTAN, G. C. S., MARTINS, P. F., DE LIMA DA SILVA, N., BATISTELLA, C. B., MACIEL FILHO, R., WOLF MACIEL, M. R. "Simulation and cost estimate for biodiesel production using castor oil" Laboratory of Technology, Department of Technology, Sytate University of Feira de Santana, BA, Brazil. (2010, Chemical Engineering Research and Design)
- [46] CÁRCAMO, Nicolás. "Obtención de aceite de ricino y posterior transesterificación para síntesis de biodiesel". Universidad de Santiago, Santiago, Chile, 2012.
- [47] CHILEFLORA. "Ricinus Communis" [En línea] <<http://www.chileflora.com/Florachilena/FloraSpanish/HighResPages/SH0558.htm>> [consulta 30 de Junio 2013]
- [48] ENCINAR, J.M. et al. "Synthesis and characterization of biodiesel obtained from castor oil transesterification" Dpto. Ingeniería Química y Química Física, Universidad de Extremadura, España. (European Association for the Development of Renewable Energies, 2010)
- [49] MEHER, L. C., VIDYA SAGAR, D., NAIK, S. N. "Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review" Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India. (Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006)
- [50] ÇAYLI, G., KÜSEFOĞLU, S. "Increased yields in biodiesel production from used cooking oils by a two step process: Comparison with one step process by using TGA". Bogazici University, Department of Chemistry, Bebek, Istanbul. (Fuel Processing Technology, 2008)

- [51] ROJAS, Andrés, GIRÓN, Erika. "Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales una revisión catálisis química". Universidad de Bogotá, Colombia, 2011.
- [52] GUERRERO F., Carlos, OSORIO L., Iván D., SIERRA V., Fabio E. "Evaluación del efecto de la temperatura en la producción de biodiesel con aceite de higuera". (Ingeniería e Investigación, 2010)
- [53] LANG, X., DALAI, A. K., BAKHSI, N., REANEY, M., HERTZ, P. "Preparation and characterization of bio-diesels from various bio-oils" Department of Chemical Engineering, University of Saskatchewan", Canada. (Biosource Technology, 2001)
- [54] YAAKOB, Z., MOHAMMAD, M., ALHERBAWI, M., ALAM, Z., SOPIAN, K. "Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil". Universiti KEbangsaan Malaysia UKM, Selangor 43600, Malaysia. (Renewable an Sustainable Energy Reviews, 2013)
- [55] CERVERÓ, J. M. COCA, J., LUQUE, S. "Production of biodiesel from vegetable oils". Department of Chemical and Environment Engineering, University of Oviedo, España. (Grasas y Aceites, 2008)
- [56] FREEDMAN, B., PRYDE, E. H., MOUNTS, T. L., "Variables affecting the yields of fatty esters from transesterification vegetable oils". Agricultural Research Service, USA. (Journal of American Oil Chem. Soc., 1984)
- [57] LAPUERTA, M., HERREROS, J., LYONS, L., GARCÍA-CONTRERAS, R., BRICEÑO, Y. "Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions". Universidad de Castilla La-Mancha, Ciudad Real, España (Fuel, 2008)
- [58] ABBASZADEH, A., GHOBADIAN, B., OMIDKHAH, M. R., NAJAFI, G. "Current biodiesel production technologies: A comparative review" Tarbiat Modares University, Jalale-E-Aleahmad Highway, Tehran, Iran. (Energy Conversion and ManagemAent, 2012)
- [59] MENEGHETTI, S. M. P., WOLF, M. R., SILVA, E. C., LIMA, G. E. S., SILVA, L., SERRA, T. M., CAUDURO, F., OLIVEIRA, L. G., "Biodiesel from Castor Oil: A Comparison of Ethanolysis versus Methanolysis". Universidade Federal de Alagoas and Universidade Luterana do Brasil, Rio Grande do Sul, Brazil. (Energy & Fuel, 2006)
- [60] WANG, Y., OU, S, LIU, P., XUE, P., TANG, S. "Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil". Department of Food Science and Engineering, Jinan University, China. (Journal of Molecular Catalysis, 2006)

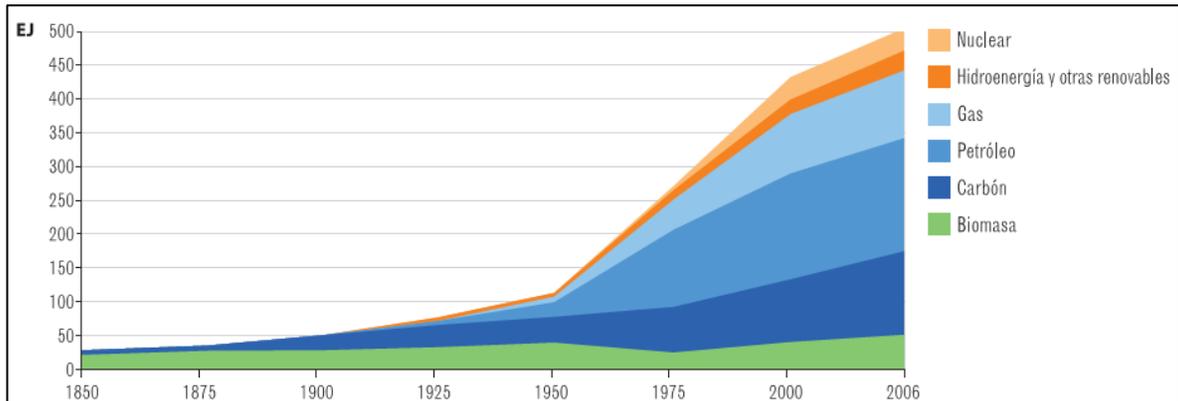
- [61] RECINOS, G., RODRIGUEZ, A., HERNANDEZ. C., YEOMANS, J. "Metodología para la fabricación de biodiesel a partir de aceite de palma africana (*Elais Guineensis*) y aceite de soya usado". Universidad EARTH, Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica. (Tierra Tropical, 2005)
- [62] JOURNEYTOFOREVER. "Cómo hacer biodiesel" [En línea] <<http://es.journeytoforever.org/biocombustibles/como-hacer-biodiesel-2.cgi#hidroxido-potasio>> [consulta 30 de Junio 2013]
- [63] BODIESELTUTORIAL. "Tritating Oil" [En línea] <<http://biodieseltutorial.utahbiodieselsupply.com/titratingoil/>> [consulta 30 de Junio 2013]
- [64] MAKEBIODIESEL.ORG. "Single Stages Base Recipes". [En línea] <http://www.make-biodiesel.org/Biodiesel-Recipes/single-stage-base-recipes.html> [consulta 30 de Junio 2013]
- [65] PANREAC QUIMICA S.A. "Analíticos en alimentaria, métodos oficiales de análisis. Aceites y grasas" [en línea] <<http://www.usc.es/caa/MetAnalisisStgo1/aceites.pdf>> [consulta: 02 de Febrero de 2013]
- [66] VEGA T., Alberto. "Guía para la elaboración de aceites comestibles, caracterización y procesamiento de nueces". Bogotá, D.C., Colombia. Convenio Andrés Bello, 2004. 86p.
- [67] PULLEN, J. Khizer SAEED, K. An overview of biodiesel oxidation stability. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 8, 5924-5950 (2012)
- [68] KNOTHE, G., DUNN, R. O. Dependence of oil stability index of fatty compounds on their structure and concentration and presence of metals. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 80, 1021-1026 (2003).
- [69] JOURNEY TO FOREVER. "Lavado de biodiesel". [En línea] <<http://es.journeytoforever.org/biocombustibles/lavado-biodiesel.cgi>> [consulta: 10 de Noviembre de 2012]
- [70] TRANSPORT INFORMATION SERVICE. "Drying capacity of oils". [En línea] <http://www.tis-gdv.de/tis_e/misc/trocknun.htm> [consulta: 02 de Febrero de 2013]
- [71] BRITISH PETROLEUM, "Statistical Review of World Energy, June 2012". [en línea] <http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2012.pdf> [consulta: 25 de Noviembre de 2012]

- [72] EIA. "Biofuels production". [en línea] <<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=79&pid=81&aid=1&cid=ww,&syid=2007&eyid=2011&unit=TBPD>> [consulta: 10 de Marzo de 2013]
- [73] BERGMANN, J. C. et al. "Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks". Department of Genomic Sciences and Biotechnology, Universidade Católica de Brasília, Brazil. (Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013)
- [74] ROMÁN, C. "Validación del software biodieselfao como herramienta de apoyo a la toma de decisión en proyectos de producción de biodiesel" [En línea] Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile. 2011. 74p.
- [75] ECODESARROLLO. "Norma Chilena Biodiesel". [En línea] <<http://ecodesarrollo.cl/portal1/content/view/35/40/>> [consulta: 16 de Diciembre de 2012]

10. ANEXOS

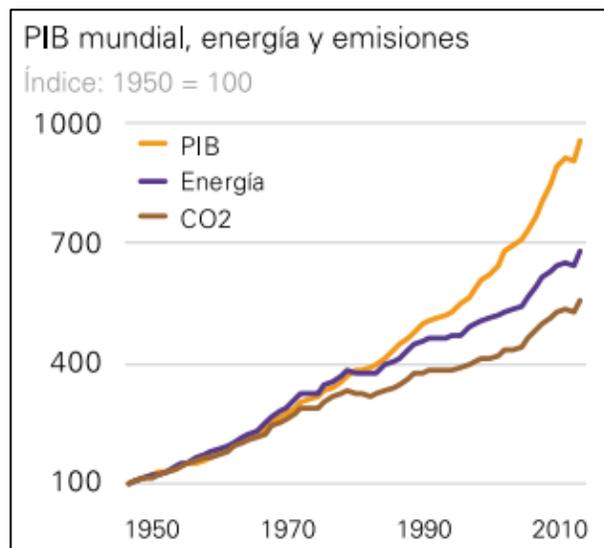
Situación medioambiental actual

Anexo 1-A: Evolución del consumo de energía primaria total



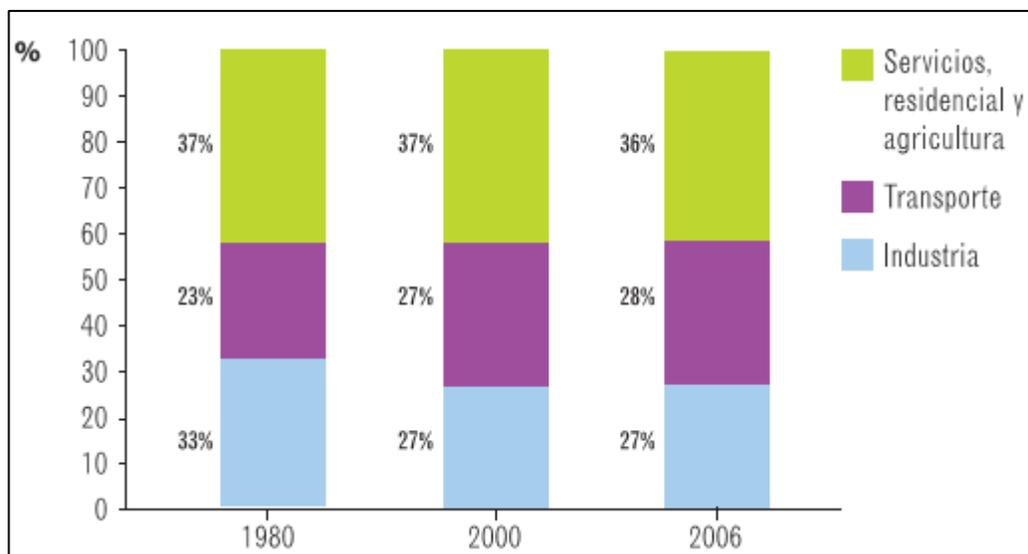
(Fuente: Hacia una Matriz Energética Diversificada en Ecuador)¹

Anexo 1-B: PIB, energía y emisiones de CO₂ entre 1950 y 2010



(Fuente: BP Statistical Review of World Energy, Junio de 2011)⁷¹

Anexo 1-C: Consumo de energía mundial por sector



(Fuente: Hacia una matriz energética diversificada en Ecuador, 2011)

Biocombustibles y biodiesel

Anexo 2-B: Sustentabilidad

Para lograr una valoración de sustentabilidad efectiva deben ser considerados los siguientes aspectos: Productividad (kg/ha), emisiones de GEI, uso de tierras y cambios en reservas de carbono, eficiencia de fertilizantes, ya que una fracción de ellos pueden ser volatilizados a la atmósfera, o ser lixiviados a las aguas, además del uso de combustibles fósiles en la producción de estos fertilizantes; uso de co-productos y utilización de residuos, potencial de expansión de cultivos, impacto en recursos de agua, uso de suelo, ya que puede degradarse por erosión e incremento de sales; impactos en la biodiversidad, uso de tierras para actividades complementarias al cultivo; y finalmente aspectos sociales, no menos importantes como: condiciones de trabajo, desarrollo rural, precios de alimentos, e impactos en comunidades.⁸

En lo que a uso de suelo se refiere, el principal aspecto a considerar es la deforestación, donde el principal ejemplo ocurre en Malasia, India, y Tailandia con la producción de aceite de palma.

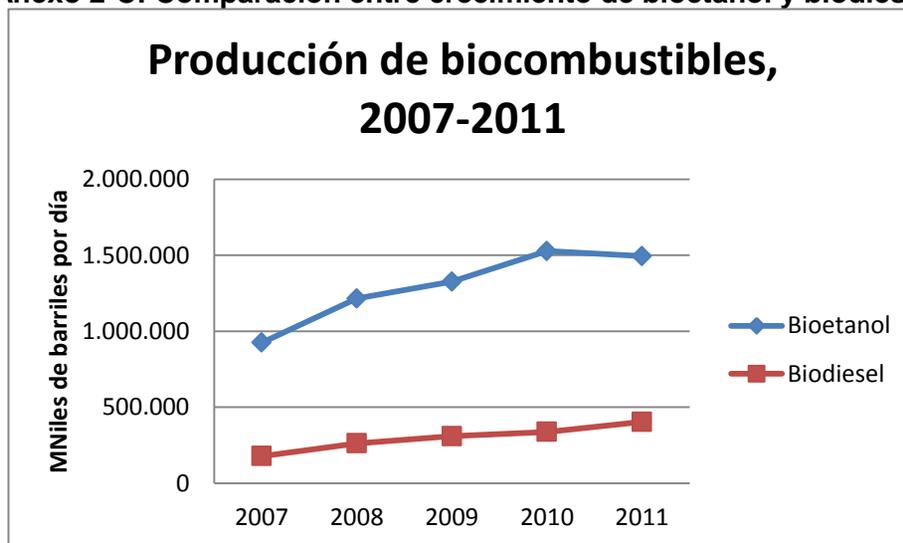
Las emisiones de GEI asociadas al cambio de uso de suelo a veces pueden ser suficientes para negar las ventajas de los biocombustibles.

Se ha llegado a concluir que los biocombustibles podrían proveer grandes beneficios si la materia prima es producida con bajos insumos agrícolas, en zonas con bajo valor agrícola, y bajos insumos de energía para su conversión en biocombustibles; lo cual es una tarea compleja, que requiere de la optimización de la relación entre insumos y rendimiento.

Más que “carbono neutro” o “emisión cero”, el objetivo principal de sustentabilidad que debe buscarse en la producción de biocombustibles es un “balance de carbono favorable”; ya que la “emisión cero” no considera los aspectos mencionados como: emisiones de N₂O por la fertilización de terrenos, transporte de materias primas, y emisiones indirectas por cambio de uso de suelo. Además, no debe olvidarse el carbono liberado en el abastecimiento energético del proceso.⁸

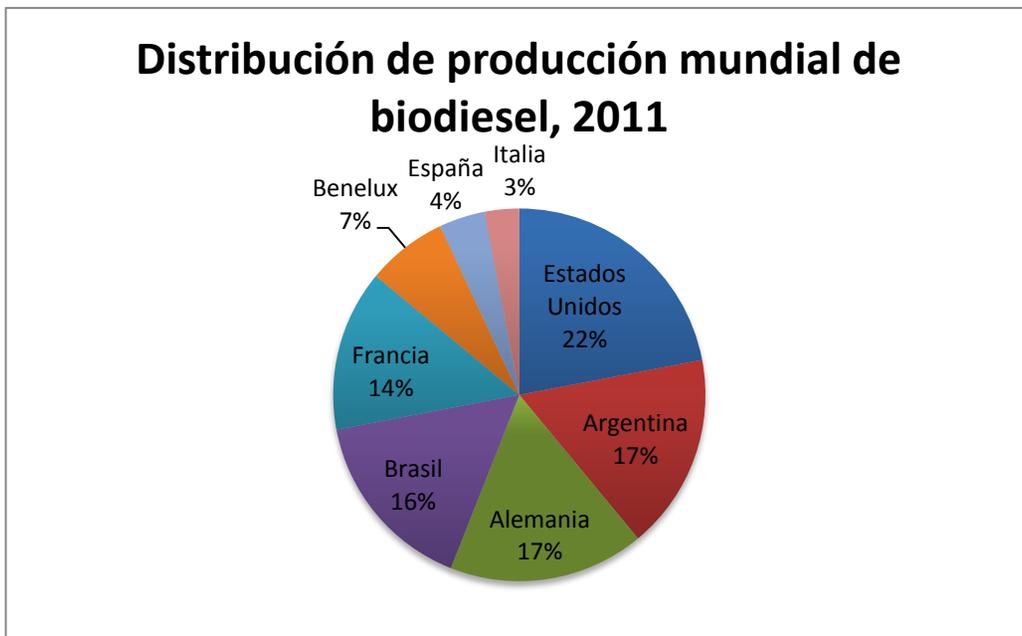
Debido al alto porcentaje de biocombustibles de primera generación, el ahorro en emisiones de GEI dada por el uso de los mismos se notará sólo después de 2030, siendo la deforestación (biodiesel de aceite de palma en Indonesia/Malasia, y etanol de caña de azúcar en Brasil), y la amenaza a la biodiversidad, los principales impactos negativos de estos procesos. Basado en estos datos, se hace vital un movimiento rápido hacia la producción de biocombustibles de segunda generación.⁸

Anexo 2-C: Comparación entre crecimiento de bioetanol y biodiesel



(Fuente: Elaboración propia con datos de EIA)⁷²

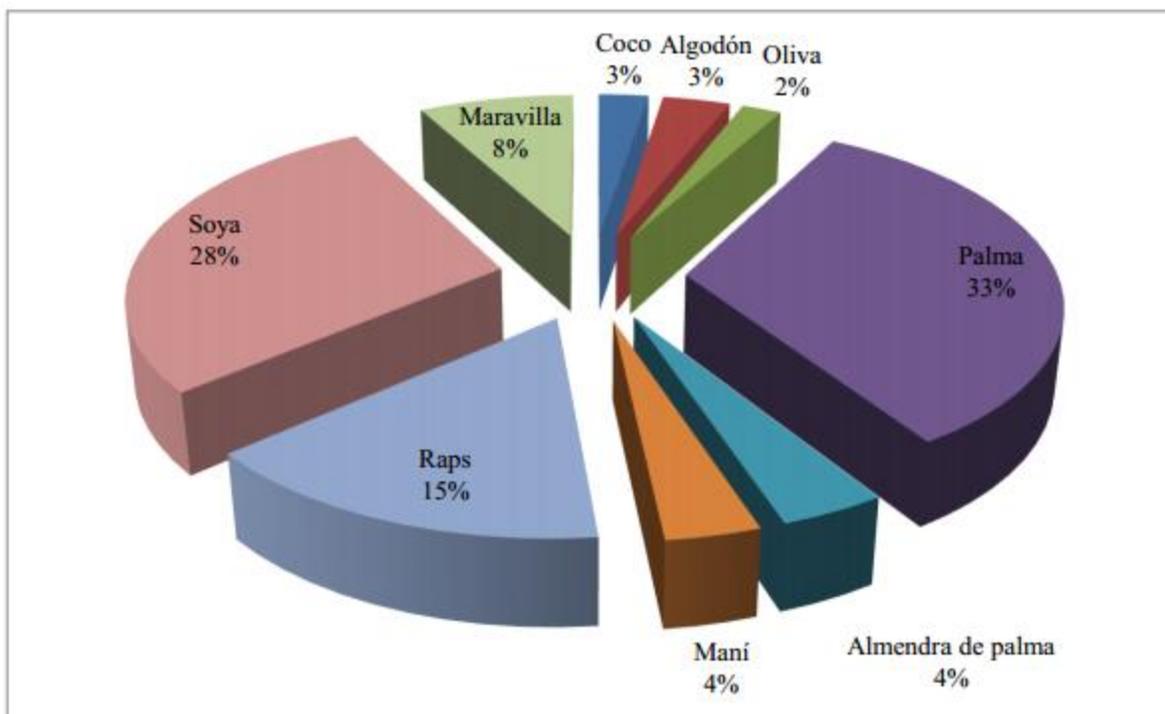
Anexo 2-D: Principales países productores de biodiesel, 2011



(Fuente: Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks, 2013) ⁷³

Materia prima para producción de biodiesel

Anexo 3-A: Distribución de diferentes especies de oleaginosas en la producción mundial de aceite 2010-2011



(Fuente: Román, 2011) ⁷⁴

Anexo 3-B: Rendimiento de distintas especies

	Contenido de Aceite [% Biomasa seca]	Rendimiento Aceite [L aceite/ha/año]	Uso de suelo [m ² /año/L Biodiesel]	Rendimiento Biodiesel [L Biodiesel/ha/año]
Microalga (Alto contenido)	70	136.900	0,1	142.475
Microalga (Medio contenido)	50	97.800	0,1	101.782
Ricino	48	1.307	8	1.360
Maíz	44	172	56	179
Colza	41	974	10	1.014
Girasol	40	1.070	9	1.113
Palma Aceitera	36	5.366	2	5.585
Cáñamo	33	363	26	378
Microalga (Bajo contenido)	30	58.700	0,2	61.091
Jatropha	28	741	13	772
Soya	18	636	15	661

(Fuente: Microalgae: A Potencial Source of Biodiesel. 2012) ³⁷

Normativa relacionada al biodiesel en Chile

Anexo 4-A: Parámetros contenidos en la Norma Chilena de Biodiesel

Propiedad	Unidad de Medida	Valor
Densidad a 15°C	g/cc	Min 0,86 – Max. 0,9
Viscosidad a 40°C	mm ² /s	Min. 3,5 – Max 5,0
Punto de Inflamación	°C	Min. 120
Punto de Ecurrimiento	°C	Max. -1
Azufre Total	% masa	Max. 0,005
Residuos de Carbono Conradson (CCR) al 100%	% masa	Max. 0,05
Contenido de ceniza sulfatada	% masa	Max. 0,02
Agua y sedimentos	% volumen sedimentario	Max. 0,05
Corrosión de la lámina de cobre (3 hrs., 50°C)	Grado de corrosión	Max. N°2
Valor de neutralización (valor de ácido mg KOH/g)	mg KOH/g muestra	Max. 0,5
Contenido de éster	% masa	Min. 96,5
Contenido de Metanol	% masa	Max. 0,20
Glicerina Libre	% masa	Max. 0,02
Glicerina Total	% masa	Max. 0,25
Fósforo	mg/kg	Max. 10
Contenido de alcalinos (Na+K)	mg/kg	Max. 5
Contenido de metales (Ca+Mg)	mg/kg	Max. 5
Estabilidad a la oxidación a 110°C	Horas	Max. 6

(Fuente: Decreto N° 11, 2008, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción "Aprueba Definiciones y Especificaciones de Calidad para la Producción, Importación, Transporte, Almacenamiento, Distribución y Comercialización, de Bioetanol y Biodiesel". 09/05/08), ECODesarrollo.cl)⁷⁵

Anexo 4-B: Trámites para la producción de biodiesel en Chile, desde cultivos oleaginosos o residuos orgánicos.

Trámite N°	Instituciones relacionadas	Biodiesel a partir de:	
		Cultivos Oleaginosos	Residuos orgánicos
1	CONAMA o COREMA	Ingreso al SEIA: 120 días hábiles si es EIA o 60 si es DIA.	Ingreso al SEIA: 120 días hábiles si es EIA o 60 si es DIA.
2	SEREMI de Salud	Informe Sanitario: planos reguladores, riesgos al entorno.	Autorización Sanitaria para el Tratamiento y Almacenamiento de Residuos: planos reguladores, riesgos al entorno.
3	SEREMI de Salud, COREMA o CONAMA	Calificación Industrial: en consideración a los riesgos de su funcionamiento hacia el entorno	Calificación Industrial: en consideración a los riesgos de su funcionamiento hacia el entorno
4	Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)	Notificación de Inicio de Actividades: Se debe notificar por escrito a la SEC (Oficio circular N°2083 de 1998)	Notificación de Inicio de Actividades: Se debe notificar por escrito a la SEC (Oficio circular N°2083 de 1998)
5	Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)	Inscripción de las Instalaciones asociadas a Combustibles Líquidos: Inscribir instalaciones conforme lo dispone la SEC (Oficio circular N° 1422 de 1998)	Inscripción de las Instalaciones asociadas a Combustibles Líquidos: Inscribir instalaciones conforme lo dispone la SEC (Oficio circular N° 1422 de 1998)
6	Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)	Cumplimiento de requisitos técnicos conforme lo dispone el Decreto Supremo N° 90/1996 , del Ministerio de Economía, “Aprueba Reglamento de Seguridad para el almacenamiento, refinación, transporte y expendio al público de combustibles líquidos derivados del petróleo”	Cumplimiento de requisitos técnicos conforme lo dispone el Decreto Supremo N° 90/1996 , del Ministerio de Economía, “Aprueba Reglamento de Seguridad para el almacenamiento, refinación, transporte y expendio al público de combustibles líquidos derivados del petróleo”
7	Dirección de Obras o SEREMI del MINVU	Cumplimiento normas de Localización: Ver instrumento de planificación territorial	Cumplimiento normas de Localización: Ver instrumento de planificación territorial
8	Municipalidad	Patente Municipal: Realizar pago	Patente Municipal: Realizar pago

(Fuentes: Elaboración propia a partir de fuentes)²⁶

Sistemas Expertos

Ejemplos de sistemas expertos

Algunos ejemplos de sistemas expertos y su dominio de aplicación se enlistan en la tabla a continuación.

Anexo 5-A: Ejemplos de sistemas expertos

Sistema	Fecha	Autor	Tema
Dendral	1965	Stanford	Deduce información sobre estructuras químicas
Macsyma	1965	MIT	Realiza análisis matemático complejo
Age	1973	Stanford	Herramientas para generar sistemas expertos
Mycin	1972	Stanford	Diagnóstico de enfermedades de la sangre
Prospector	1972	Stanford Research Institute	Exploración mineral y herramientas de identificación
OPS5	1974	Carnegie-Mellon	Herramienta de desarrollo de sistemas expertos
Caduceus	1975	University of Pittsburgh	Herramienta de diagnóstico para la medicina interna
LIQSTR	2003	Hong Kong Polytechnic University	Diseño de estructuras para retención de líquidos
CAKES-NEGO	2008	Sungkyunkwan University	Negociación "B2B"

(Fuente: Liao, 2005) ³⁶

Procedimientos de caracterización de especies

Anexo 6-A: Titulación

Se describe el método de titulación “estándar”, que se formula con 1 g de NaOH (KOH) en un litro de agua. Es un método sencillo, que funciona bien; y la ventaja de este procedimiento es que no es necesario determinar una cantidad exacta de AGL en el aceite. Sólo se necesita determinar una cantidad “relativa”:

Insumos:

- 15 ml de Fenolftaleína
- 10 ml de alcohol isopropílico (99%) o etanol
- 1 L de agua destilada o desionizada
- 1 ml de aceite
- 1 g de NaOH o KOH

○ *Otros*

- Gafas
- Guantes
- 3 vasos precipitados (50 ml)
- Bureta y soporte (10 – 50 ml)
- Matraz de 250 ml (erlenmeyer)
- 1 embudo
- Papel pH
- Gotero

Procedimiento:

- 1) Preparar solución de NaOH o KOH 0,1 % p/v (1 g de NaOH o KOH por cada Litro de agua destilada).
- 2) Agregar 3 gotas de fenolftaleína al alcohol en un vaso precipitado, y agitar.
- 3) Agregar 1 ml. de aceite al matraz Erlenmeyer con alcohol y fenolftaleína, y agitar para que el aceite se disuelva en el alcohol.

- 4) La solución de NaOH o KOH se debe agregar a la bureta. Se debe registrar el volumen inicial en la bureta. Se debe poner el vaso con aceite-alcohol-fenolftaleína bajo la bureta.
- 5) Se debe ir incorporando la solución de NaOH o KOH gota a gota, hasta que la solución alcohol-aceite-fenolftaleína cambie de color a rosado claro de forma permanente (invariable por 30 segundos); cuando esto ocurra no se agregan más gotas, y se registra el volumen final en la bureta.
- 6) Finalmente, medir el pH de la muestra alcohol-aceite-fenolftaleína con el papel pH. Este debe estar entre 7-8.

Interpretación de Resultados:

- %FFA (*Free Fatty Acid*):

Si se quiere caracterizar el aceite a utilizar, se recomienda usar el %FFA (*Free Fatty Acid*), que corresponde a la razón peso/peso de AGL contenida en una muestra de aceite. Para calcular este indicador usando el valor obtenido en la titulación se utiliza la siguiente fórmula general:

$$\% FFA = \frac{(Y - b) \cdot N_{XOH} \cdot 28.2}{P}$$

Donde,

- Y : Volumen de solución [ml] utilizada en la valoración.
- b : Volumen de solución utilizada en el blanco ($b = 0$)
- N_{XOH} : Normalidad de la solución de valoración ($X = Na$ o K)
($N_{NaOH} = 0,025$; $N_{KOH} = 0,178$)
- P : Peso de la muestra (1 ml de aceite = 0,92 g)
- El valor 28,2 es el peso molecular del ácido oleico dividido en 10.

Dependiendo del hidróxido a usar la fórmula anterior queda como sigue:

$$\% FFA_{NaOH} [\%] = 0,776 \cdot Y$$

$$\% FFA_{KOH} [\%] = 0,546 \cdot Y$$

Se debe tener en cuenta que dado que la densidad del aceite y el peso molecular del ácido graso medio son estimaciones, el resultado también es una estimación; sin embargo, es lo suficientemente buena para este uso.

La interpretación de resultados se describe a continuación en la Tabla 6-A.

Tabla N°6-A: Interpretación de resultados de la valoración del aceite

NaOH	KOH	AGL (FFA)	Acción
[ml sol NaOH]	[ml sol KOH]	[%]	
≤ 2	≤ 2,8	≤ 1,5	No es necesario neutralizar. Sólo agregar la cantidad base de hidróxido (Ver Tabla N°4)
2 - 4	2,8 - 5,5	1,5 - 3	Se debe agregar el valor obtenido
4 – 6,5	5,5 - 9	3 - 5	Debe mezclarse con otro aceite de mejor calidad
> 6,5	> 9	> 5	El aceite no debe ser usado en el proceso

(Fuente: Elaboración propia)

- *Acid Number* (AN):

El “Valor de neutralización”, “*Acid Number*” (AN) o “*Acid Value*”, es normalmente usado para caracterizar el biodiesel resultante, y corresponde a la cantidad de KOH [mg] necesaria para reaccionar con el ácido contenido en una muestra de aceite [g].

$$AN = \frac{(Y - b) \cdot N_{XOH} \cdot F}{P}$$

Donde,

- *Y* : Volumen de solución [ml] utilizada en la valoración.
- *b* : Volumen de solución utilizada en el blanco (*b* = 0)

- N_{XOH} : Normalidad de la solución de valoración ($X = Na$ o K)
($N_{NaOH} = 0,025$; $N_{KOH} = 0,0178$)
- F : Es el peso molecular del hidróxido a utilizar
($PM_{NaOH} = 40 \left[\frac{g}{mol} \right]$; $PM_{KOH} = 56,1 \left[\frac{g}{mol} \right]$)
- P : Peso de la muestra (1 ml de aceite = 0,92 g)

Independiente del hidróxido a utilizar, si se es consistente en los datos, el valor N_{XOH} se cancela con F , con lo que la fórmula anterior queda como sigue:

$$AN = 1,08 \cdot Y$$

Se debe notar que en las normas internacionales EN 14214 (Europa) y ASTM D6751 (EEUU), y la norma chilena de biodiesel DS N°11 (2008), se especifica un valor de neutralización máximo de 0,5 [mg de KOH/g muestra] en el biodiesel, para que este pueda ser usado sin problemas. Si bien las normas nombradas sólo especifican este ítem para el KOH como reactivo, es posible realizar un cálculo simple para obtener el valor límite de neutralización al usar el NaOH. Se parte el análisis desde la siguiente ecuación:

$$AN_{KOH} = 1,08 \cdot [Y_{KOH}]$$

Pero se sabe que la cantidad de solución valorante a utilizar es mayor para el KOH que para el NaOH (1,4025 veces). Por lo tanto se obtiene una expresión para el valor de neutralización al usar NaOH, además de su valor límite (máximo) equivalente:

$$AN_{KOH} = 1,08 \cdot [Y_{KOH}]$$

$$AN_{KOH} = 1,08 \cdot [1,4025 \cdot Y_{NaOH}]$$

$$AN_{KOH} = 1,51 \cdot [Y_{NaOH}]$$

Así se obtiene una expresión del valor de neutralización para cada hidróxido utilizado en la valoración, y su volumen correspondiente. De la última expresión se obtiene el valor máximo de ácido permitido si se utiliza solución de NaOH en la valoración. El valor se

obtiene dividiendo el valor 0,5 [mg KOH/g muestra] de la norma por el factor 1,4, resultando un valor máximo de 0,36 [mg NaOH/g muestra].

Anexo 6-B: Índice de Yodo

El procedimiento para determinar el índice de Yodo de un aceite se basa en una valoración volumétrica por retroceso, donde en la etapa inicial se fija un reactivo halogenado adicionado en exceso, usualmente monocloruro de yodo o monobromuro de yodo a los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados.

Posteriormente el exceso de halógeno se hace reaccionar con yoduro para formar triyoduro; este se debe valorar con una solución conocida de tiosulfato, usando engrudo de almidón como indicador.

Existen muchos métodos para la determinación de este índice, entre los que cabe destacar el método de Wijs y Hanus, que se diferencian en el reactivo halogenado a usar; el primero usa un reactivo clorado, y el segundo un reactivo bromado.

El monobromuro de yodo es muy tóxico por inhalación, y genera problemas medioambientales. Además el método de Hanus no define el peso de la muestra, como sí lo indica el método de Wijs, por ello se recomienda usar este método.

Todos los reactivos deben ser de calidad analítica reconocida.

Reactivos:

Reactivo	Denominación
Ácido acético	Ácido acético glacial PA-ACS-ISO
Almidón soluble	Almidón de Patata soluble PA
Ciclohexano	Ciclohexano PA-ACS-ISO
Engrudo de almidón	Almidón solución 1% RV
Sol. volumétrica patrón de tiosulfato sódico	Sodio Tiosulfato 0,1 mol/l (0,1 N) SV
Yoduro Potásico, solución de 100 g/l	Potasio Yoduro solución 10% p/v RE
Reactivo de Wijs	Reactivo de Wijs 0,1 mol/l (0,2 N) RV

Notas:

- Yoduro Potásico (KI) debe estar exento de yodatos o de yodo libre.
 - Engrudo de Almidón: se mezclan 5 g de almidón soluble con 30 ml de agua, luego añadir esta mezcla a 1 Lt de agua en ebullición, hervir durante 3 min. y dejar enfriar.
 - La solución patrón de tiosulfato sódico ($c(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})=0,1 \text{ mol/l}$), debe ser valorada como máximo, 7 días antes de su uso.
 - Se debe preparar un disolvente mezclando volúmenes iguales de ciclohexano y ácido acético.
 - Reactivo de Wijs, que contenga monocloruro de yodo en ácido acético. Nota: El reactivo contiene 9 g de ICl_3 + 9 g de I en ácido acético.
- *Otros*
- Gafas
 - Guantes
 - Matraces de 500 ml (erlenmeyer) con boca esmerilada, provistos de tapones de vidrio y perfectamente secos.
 - Gotero

Procedimiento:

1) Secar la muestra homogeneizada con sulfato sódico y filtrarla.

- *Tamaño de la muestra*

El peso de la muestra varía en función del índice de yodo previsto, como se indica en la Tabla 6-B.

Tabla N°6-B: Índice de Yodo previsto

Índice de Yodo Previsto	Peso de muestra
	[g]
<5	3,00
5 - 20	1,00
21 – 50	0,40
51 – 100	0,20
101 – 150	0,13
151 - 200	0,10

Nota:

- El índice de yodo previsto para el aceite usado varía entre 80-140 y el del aceite de ricino entre 80 y 120; por ello en el sistema experto se define el tamaño de muestra para ambas especies en 0,2 g. de aceite.
- 2) Pesar la muestra
 - 3) Introducir la muestra en un matraz de 500 ml y añadir 20 ml de disolvente para disolver el aceite.
 - 4) Agregar exactamente 25 ml de reactivo de Wijs, tapar el matraz, agitar el contenido, y colocar el matraz al abrigo de la luz.

Preparar del mismo modo un ensayo en blanco con el disolvente y el reactivo, pero sin la muestra de aceite. Como el índice de Yodo previsto es inferior a 150, los matraces se deben mantener en la oscuridad durante 1 hora.

- 5) Valorar con la disolución de tiosulfato sódico hasta que haya desaparecido casi totalmente el color amarillo producido por el yodo.
- 6) Añadir unas gotas de engrudo de almidón y continuar la valoración hasta el momento preciso en que desaparezca el color azul después de agitar intensamente.

7) Efectuar 2 determinaciones de la muestra.

Nota:

- Si en el proceso de determinación del Índice de yodo, pasado el tiempo de oscuridad la muestra está decolorada, debe repetirse el análisis disminuyendo la cantidad de muestra (0,1 g.)
- El KI tiene la finalidad de liberar el yodo que quedó como ICL (sin reaccionar), al agregarlo se debe lavar el tapón, el cuello y las paredes del frasco. Lo mismo se debe hacer con el agua a fin de arrastrar el I₂ que pueda quedar en las paredes.
- El almidón que se emplea como indicador no se adiciona desde el principio, porque si hay mucho yodo se produce coagulación de la suspensión del almidón y descomposición de ésta.
- Al titular con Na₂S₂O₃ sin almidón, la solución pasa de café a amarillo y en este momento se adiciona el almidón, la solución se torna azul y se sigue la titulación hasta decoloración total.

Expresión de Resultados:

$$\text{Índice Yodo} = \frac{12,69 \cdot c \cdot (V_1 - V_2)}{P}$$

Donde,

c: Valor numérico de la concentración exacta, expresada en moles por litro, de la solución volumétrica patrón de tiosulfato sódico utilizada

*V*₁: ml de tiosulfato sódico utilizados para el blanco (solución de Wijs sin aceite)

*V*₂: ml de tiosulfato de sodio consumidos por la muestra

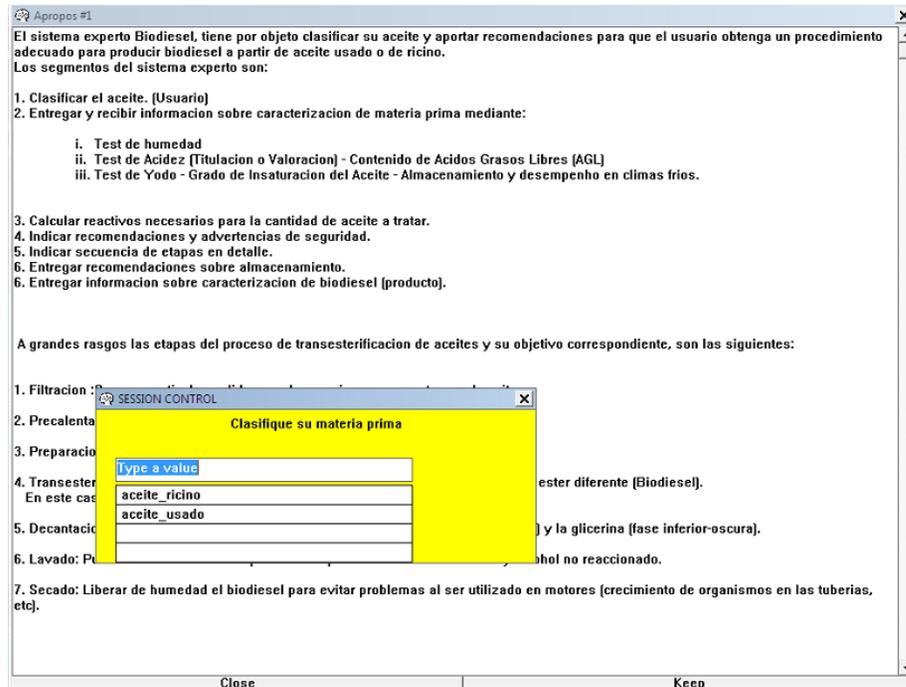
P: Peso de la muestra [g]

Se toma como resultado la media aritmética de las dos determinaciones, y la unidad que corresponde son los gramos de yodo absorbido por 100 gramos de sustancia. Dependiendo si se analiza el aceite (materia prima), o el biodiesel resultante, el valor máximo para este índice es de 160 [g I₂ / 100 g] en el caso de la materia prima, y 120

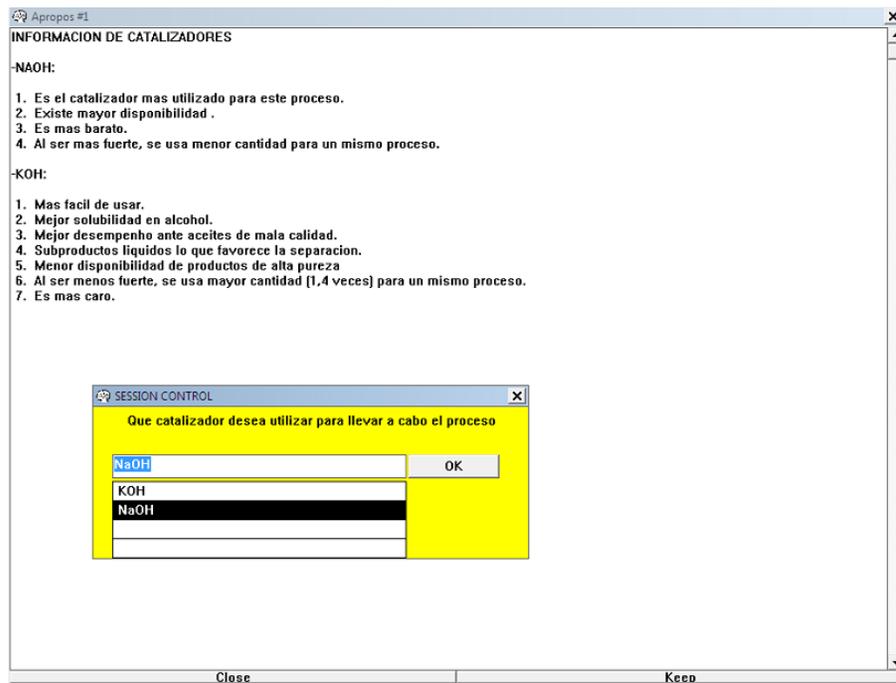
para el biodiesel resultante, considerando que este último valor está normado en la norma europea EN 14214.

Sistema Experto Biodiesel

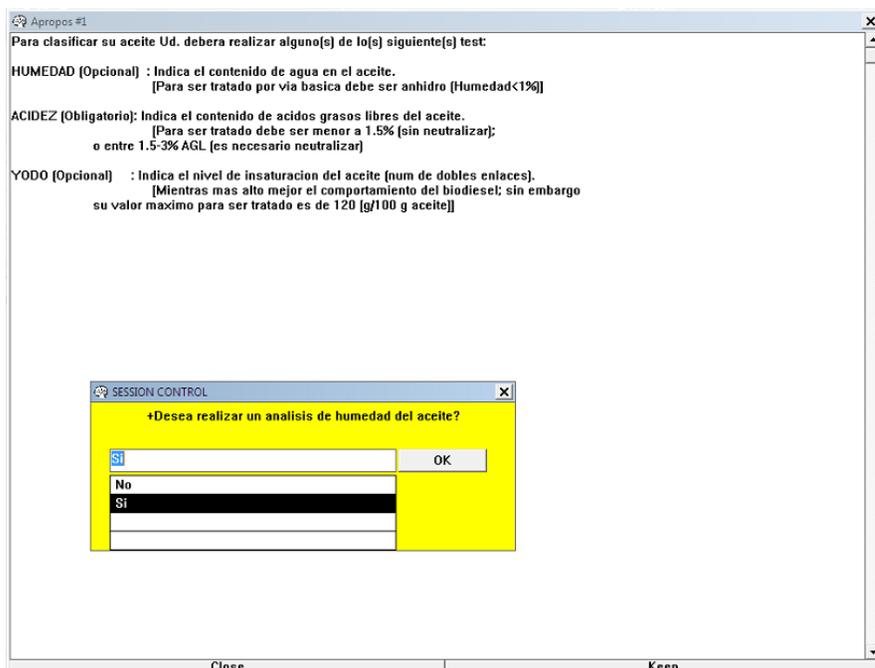
Anexo 7-A: Imágenes del sistema experto terminado



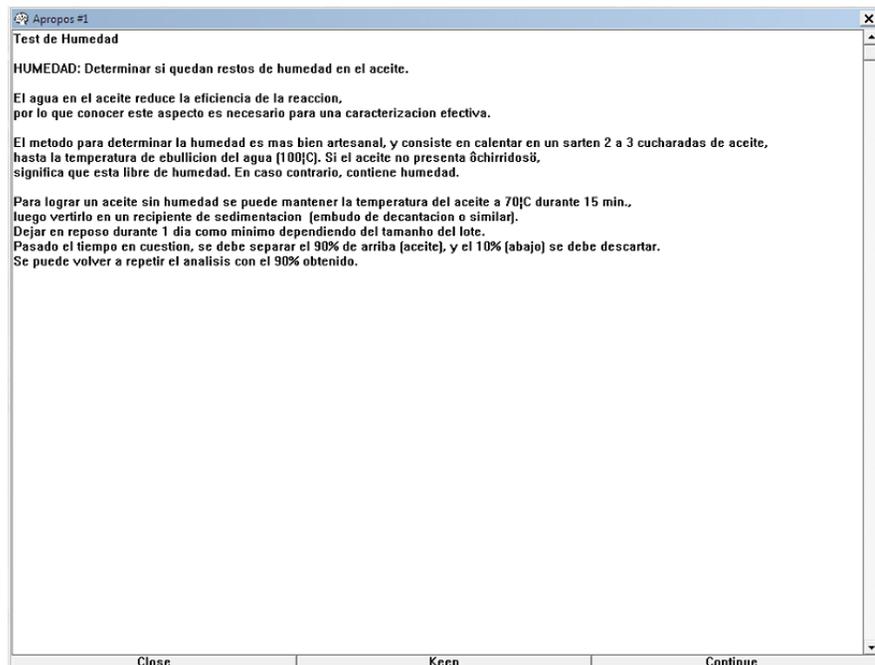
(a) Clasificación del aceite.



(b) Clasificación del catalizador.



(c) Test de Humedad.



(d) Información sobre Test de Humedad.

Apropos #1

INDICE ACIDEZ

Se describe el metodo de titulacion estandarizado, que se formula con 1 g de NaOH [KOH] en un litro de agua. Es un metodo sencillo, que funciona bien; y la ventaja de este procedimiento es que no es necesario determinar una cantidad exacta de AGL en el aceite. Solo se necesita determinar una cantidad relativa:

- Mide el contenido de acidos grasos libres (AGL) del aceite.
- Se determina por titulacion o valoracion del aceite con KOH o NaOH.
- Se expresa en [g KOH/L aceite] o [g NaOH/L aceite].
- Tambien se puede expresar como porcentaje de acidos grasos libres

MATERIALES

Insumos:

- 15 ml de Fenolftaleina
- 10 ml de alcohol isopropilico [99%] o etanol
- 1 L de agua destilada o desionizada
- 1 ml de aceite
- 1 g de Hidroxido

Otros:

- Gafas
- Guantes
- 3 vasos precipitados [50 ml]
- Bureta y soporte [10 ÷ 50 ml]
- Matraz de 250 ml [erlenmeyer]
- 1 embudo
- Papel pH
- Getero

PROCEDIMIENTO

1. Preparar la solucion de 1% NaOH [KOH] vertiendo un gramo de NaOH [KOH] en 1 Lt de agua destilada
2. Agregar 3 gotas de fenolftaleina al alcohol en un vaso precipitado, y agitar
3. Agregar 1 ml. de aceite al matraz Erlenmeyer con alcohol y fenolftaleina, y agitar para que el aceite se disuelva en el alcohol.
4. La solucion de NaOH o KOH se debe agregar a la bureta. Se debe registrar el volumen inicial en la bureta. Se debe poner el vaso con aceite-alcohol-fenolftaleina bajo la bureta.
5. Se debe ir incorporando la solucion de NaOH o KOH gota a gota, hasta que la solucion alcohol-aceite-fenolftaleina cambie de color a rosado claro de forma permanente [invariable por 30 segundos]; cuando esto ocurra no se agregan mas gotas, y se registra el volumen final en la bureta [Y].
6. Finalmente, medir el pH de la muestra alcohol-aceite-fenolftaleina con el papel pH. Este debe estar entre 7-8.

Close Keep Continue

(e) Información sobre Test de Acidez (Aceites) I.

Apropos #1

INTERPRETACION DE RESULTADOS

Se usa el indicador [%FFA] para la caracterizacion del aceite, y AN [Acid Number] [g Hidroxido/g aceite] para biodiesel:

%FFA [Free Fatty Acid]:

$$\begin{aligned} \% \text{ FFA}_{\text{NaOH}} [\%] &= 0,776 \times Y_{\text{NaOH}} \\ \% \text{ FFA}_{\text{KOH}} [\%] &= 0,546 \times Y_{\text{KOH}} \end{aligned}$$

*Se debe tener en cuenta que dado que la densidad del aceite y el peso molecular del acido graso medio son estimaciones, el resultado tambien es una estimacion; sin embargo, es lo suficientemente buena para este uso.

La interpretacion de resultados se describe a continuacion en la

Interpretacion de resultados de la valoracion del aceite

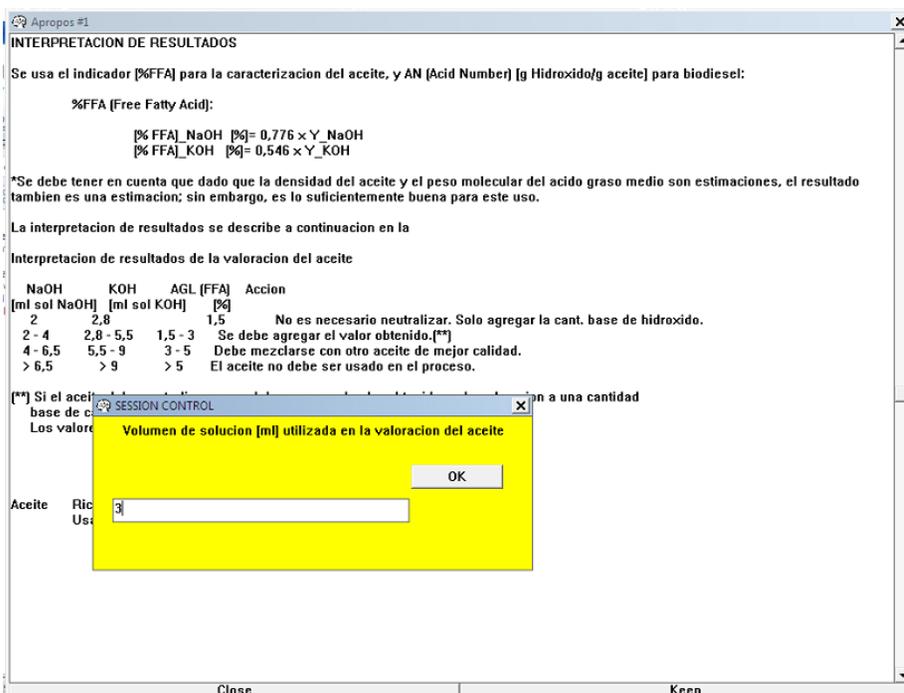
NaOH [ml sol NaOH]	KOH [ml sol KOH]	AGL [FFA] [%]	Accion
2	2,8	1,5	No es necesario neutralizar. Solo agregar la cant. base de hidroxido.
2 - 4	2,8 - 5,5	1,5 - 3	Se debe agregar el valor obtenido.[**]
4 - 6,5	5,5 - 9	3 - 5	Debe mezclarse con otro aceite de mejor calidad.
> 6,5	> 9	> 5	El aceite no debe ser usado en el proceso.

[**] Si el aceite debe neutralizarse, se debe agregar el valor obtenido en la valoracion a una cantidad base de catalizador dada segun el tipo de catalizador y de aceite.
Los valores de la cantidad base de cada caso se muestra a continuacion:

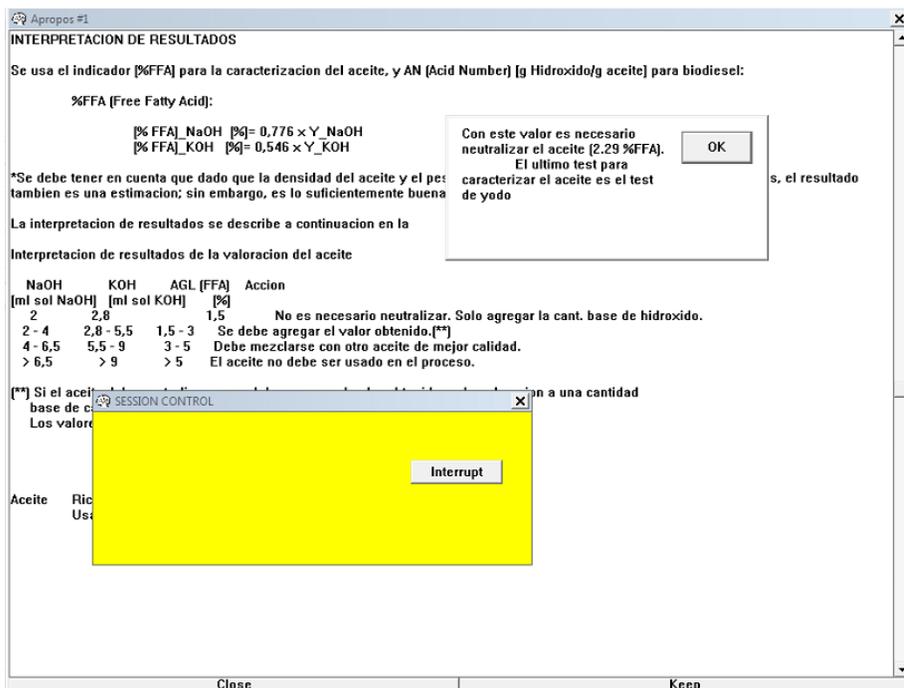
Aceite	Ricino Usado	Catalizador Basico	
		NaOH [[g NaOH]/[Lt Aceite]]	KOH [[g KOH]/[Lt Aceite]]
		3,5	4,9
		5	7

Close Keep Continue

(f) Información sobre Test de Acidez (Aceites) II.



(g) Ingreso volumen de valoración.



(h) Entrega %AGL y acción a realizar.

Apropos #1

TEST YODO
 Se usa para medir el grado de insaturación del aceite, es decir, el contenido de dobles enlaces en la cadena de carbono.
 A mayor índice de yodo el aceite (y el biodiésel) se solidifica a menores temperaturas.

MATERIALES

Reactivo	Denominación
Acido acetico	Acido acetico glacial PA-ACS-ISO
Almidon soluble	Almidon de Patata soluble PA
Ciclohexano	Ciclohexano PA-ACS-ISO
Engrudo de almidon	Almidon solucion 1% RV
Sol. volumetrica patron de tiosulfato sodico	Sodio Tiosulfato 0,1 mol/l (0,1 N) SV
Yoduro Potasico, solucion de 100 g/l	Potasio Yoduro solucion 10% p/v RE
Reactivo de Wijs	Reactivo de Wijs 0,1 mol/l (0,2 N) RV

Otros

- Gafas
- Guantes
- Matraces de 500 ml (erlenmeyer) con boca esmerilada, provistos de tapones de vidrio y perfectamente secos.
- Gotero

Notas:

- Yoduro Potasico [K] debe estar exento de yodatos o de yodo libre.
- Engrudo de Almidon: se mezclan 5 g de almidon soluble con 30 ml de agua, luego anhadir esta mezcla a 1 Lt de agua en ebullicion, hervir durante 3 min. y dejar enfriar.
- La solucion patron de tiosulfato sodico [c(Na2S2O3·5H2O)=0,1 mol/l], debe ser valorada como maximo, 7 dias antes de su uso.
- Se debe preparar un disolvente mezclando volúmenes iguales de ciclohexano y acido acetico.
- Reactivo de Wijs, que contenga monocloruro de yodo en acido acetico. (El reactivo contiene 9 g de ICl3 + 9 g de I en acido acetico).

PROCEDIMIENTO

1. Secar la muestra homogeneizada con sulfato sodico y filtrarla.

Nota:
 El índice de yodo previsto para el aceite usado varia entre 80-140 y el del aceite de ricino entre 80 y 120; por ello en el sistema experto se define el tamaño de muestra para ambas especies en 0,2 g. de aceite.

Close Keep Continue Altavoces: 98%

(i) Información sobre Test de Yodo (Aceites) I

Apropos #1

Preparar del mismo modo un ensayo en blanco con el disolvente y el reactivo, pero sin la muestra de aceite.
 Como el índice de Yodo previsto es inferior a 150, los matraces se deben mantener en la oscuridad durante 1 hora.

5. Valorar con la disolucion de tiosulfato sodico hasta que haya desaparecido casi totalmente el color amarillo producido por el yodo.
6. Anhadir unas gotas de engrudo de almidon y continuar la valoracion hasta el momento preciso en que desaparezca el color azul despues de agitar intensamente.
7. Efectuar 2 determinaciones de la muestra.

Nota:

Si en el proceso de determinacion del índice de yodo, pasado el tiempo de oscuridad la muestra esta decolorada, debe repetirse el analisis disminuyendo la cantidad de muestra (0,1 g.)
 El KI tiene la finalidad de liberar el yodo que quedo como ICL (sin reaccionar), al agregarlo se debe lavar el tapon, el cuello y las paredes del frasco.
 Lo mismo se debe hacer con el agua a fin de arrastrar el I2 que pueda quedar en las paredes.
 El almidon que se emplea como indicador no se adiciona desde el principio, porque si hay mucho yodo se produce coagulacion de la suspension del almidon y descomposicion de esta.
 Al titular con Na2S2O3 sin almidon, la solucion pasa de cafe a amarillo y en este momento se adiciona el almidon, la solucion se torna azul y se sigue la titulacion hasta decolora racion total.

Expresion de Resultados:

Índice Yodo= $(12,69 \times c \times (V1 - V2)) / P$

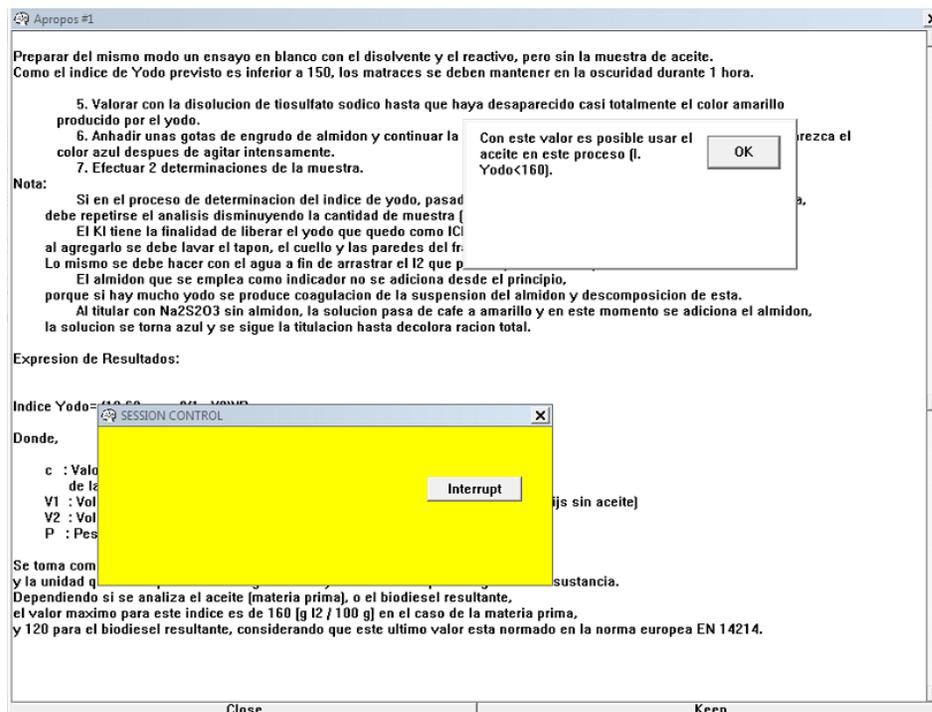
Donde,

- c : Valor numerico de la concentracion exacta, expresada en moles por litro, de la solucion volumetrica patron de tiosulfato sodico utilizada.
- V1 : Volumen [ml] de tiosulfato sodico utilizados para el blanco (solucion de Wijs sin aceite)
- V2 : Volumen [ml] de tiosulfato de sodio consumidos por la muestra
- P : Peso de la muestra [g]

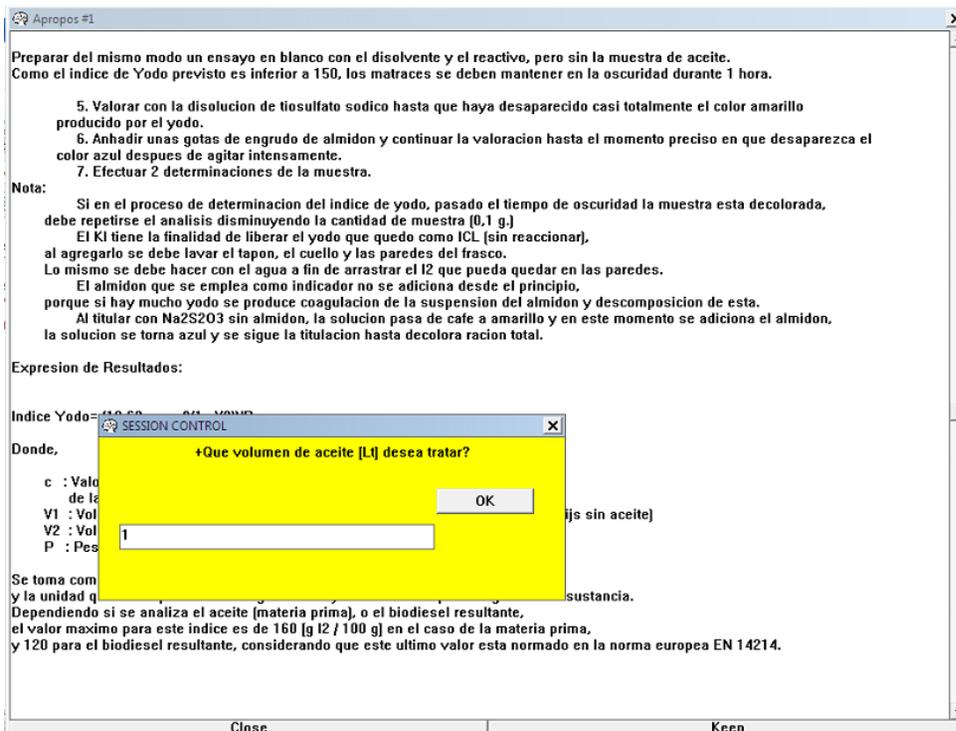
Se toma como resultado la media aritmetica de las dos determinaciones, y la unidad que corresponde son los gramos de yodo absorbido por 100 gramos de sustancia.
 Dependiendo si se analiza el aceite (materia prima), o el biodiésel resultante, el valor maximo para este índice es de 160 [g I2 / 100 g] en el caso de la materia prima, y 120 para el biodiésel resultante, considerando que este ultimo valor esta normado en la norma europea EN 14214.

Close Keep Continue

(j) Información sobre Test de Yodo (Aceites) II



(k) Entrega información de cumplimiento de normativa.



(l) Ingreso volumen de aceite a tratar.

Apropos #2

INDICE ACIDEZ

Se describe el metodo de titulacion estandar, que se formula con 1 g de NaOH (KOH) en un litro de agua. Es un metodo sencillo, que funciona bien; y la ventaja de este procedimiento es que no es necesario determinar una cantidad exacta de AGL en el aceite. Solo se necesita determinar una cantidad relativa:

- Mide el contenido de acidos grasos libres (AGL) del aceite.
- Se determina por titulacion o valoracion del aceite con KOH o NaOH.
- Se expresa en [g KOH/L aceite] o [g NaOH/L aceite].
- Tambien se puede expresar como porcentaje de acidos grasos libres

Materias Primas necesarias para 1.0[L] de aceite_usado: 8.0[g NaOH], 250.0[ml CH3OH], Metanol (6:1), catalizador base=5 [g/Lt aceite]

OK

MATERIALES

Insumos:

- 15 ml de Fenolftaleina
- 10 ml de alcohol isopropilico (99%) o etanol
- 1 L de agua destilada o desionizada
- 1 ml de aceite
- 1 g de Hidroxido

Otros:

- Gafas
- Guantes
- 3 vasos precipitados (50 ml)
- Bureta
- Matraz
- 1 e
- Pap
- Got

SESSION CONTROL

Interrupt

PROCEDIMIENTO

1. Preparar la muestra de aceite en un matraz de 100 ml con 1 ml de agua destilada
2. Agregar 3 ml de alcohol isopropilico o etanol
3. Agregar 1 ml de fenolftaleina y agitar para homogeneizar
4. La solucion de NaOH o KOH se debe agregar a la bureta. Se debe registrar el volumen inicial en la bureta. Se debe poner el vaso con aceite-alcohol-fenolftaleina bajo la bureta.
5. Se debe ir incorporando la solucion de NaOH o KOH gota a gota, hasta que la solucion alcohol-aceite-fenolftaleina cambie de color a rosado claro de forma permanente (invariable por 30 segundos); cuando esto ocurra no se agregan mas gotas, y se registra el volumen final en la bureta [Y].
6. Finalmente, medir el pH de la muestra alcohol-aceite-fenolftaleina con el papel pH. Este debe estar entre 7-8.

Close Keep

(m) Cálculo y entrega de requerimientos de materia prima.

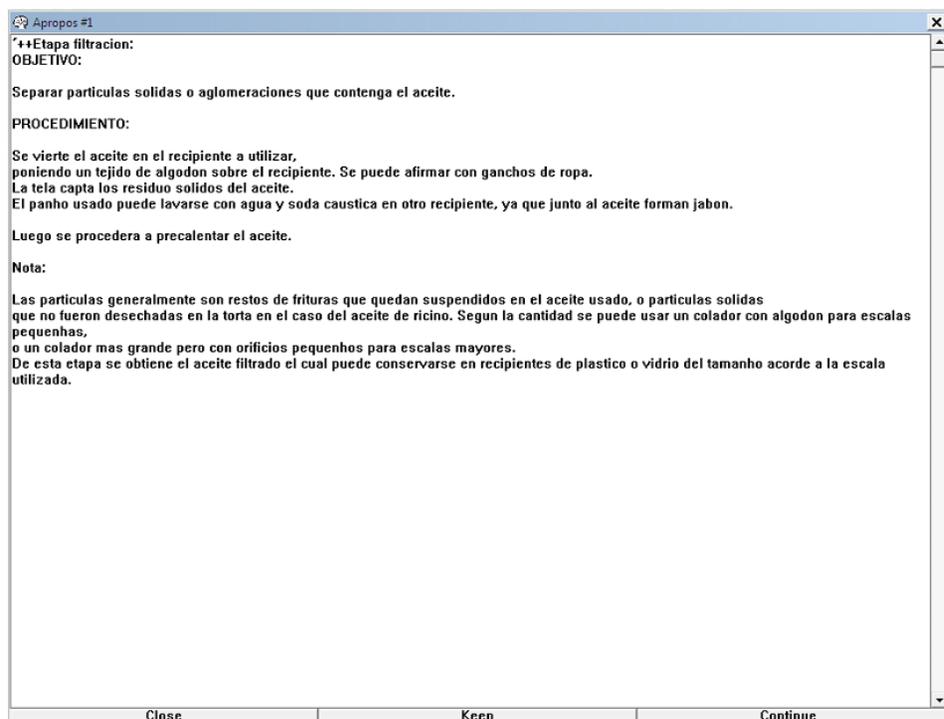
Apropos #2

Las etapas del proceso a llevar a cabo son las siguientes:

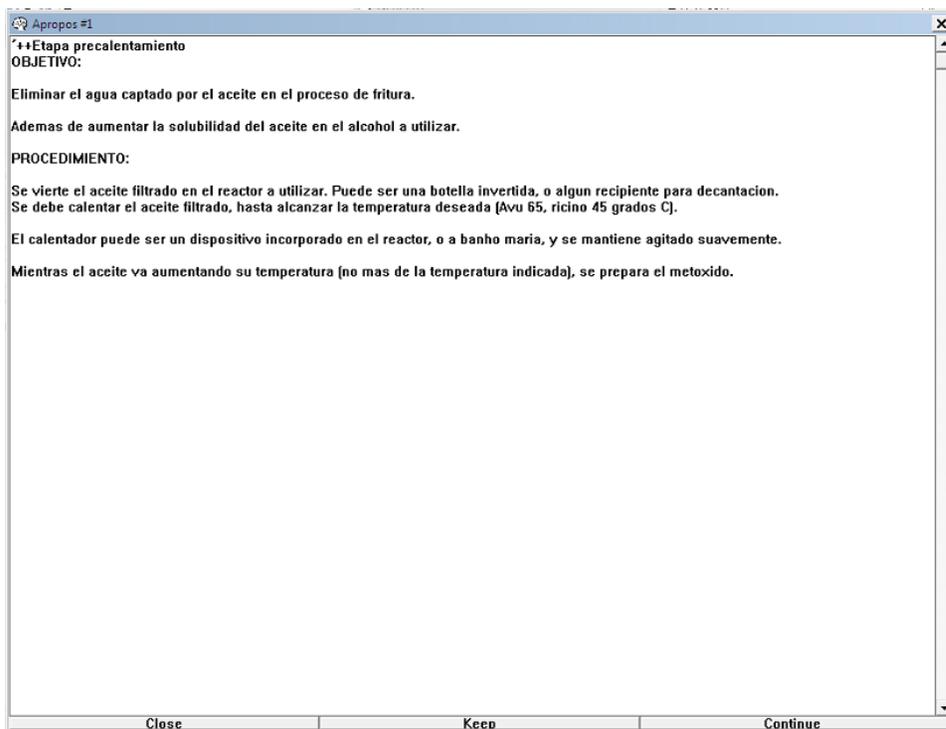
1. Filtración :Separar particulas solidas o aglomeraciones que contenga el aceite.
2. Pre calentamiento: Favorecer la solubilidad del alcohol en el aceite.
3. Preparacion de metoxido: Disolver los pellets de catalizador en el alcohol.
4. Transesterificacion: Dividir un triglicerido y cambiar sus radicales para formar un ester diferente (Biodiesel). En este caso se busca disminuir la viscosidad del ester.
5. Decantacion: Lograr la separacion de fases entre el biodiesel (fase superior-clara) y la glicerina (fase inferior-oscura).
6. Lavado: Purificar el biodiesel de impurezas del proceso como catalizador y alcohol no reaccionado.
7. Secado: Liberar de humedad el biodiesel para evitar problemas al ser utilizado en motores (crecimiento de organismos en las tuberias, etc).

Close Keep Continue

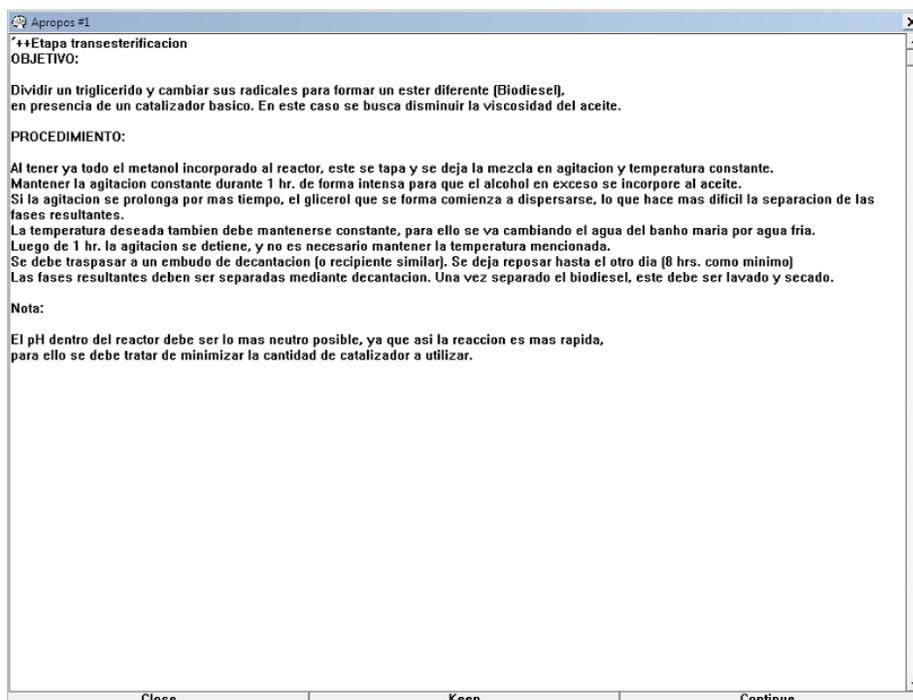
(n) Resumen de etapas a llevar a cabo.



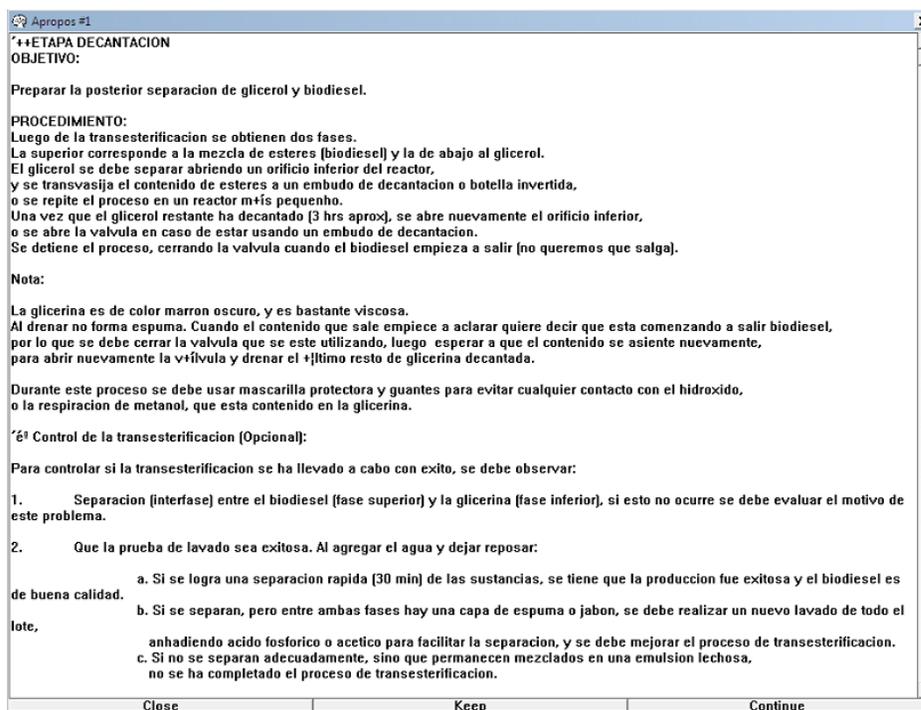
(ñ) Etapa Filtración.



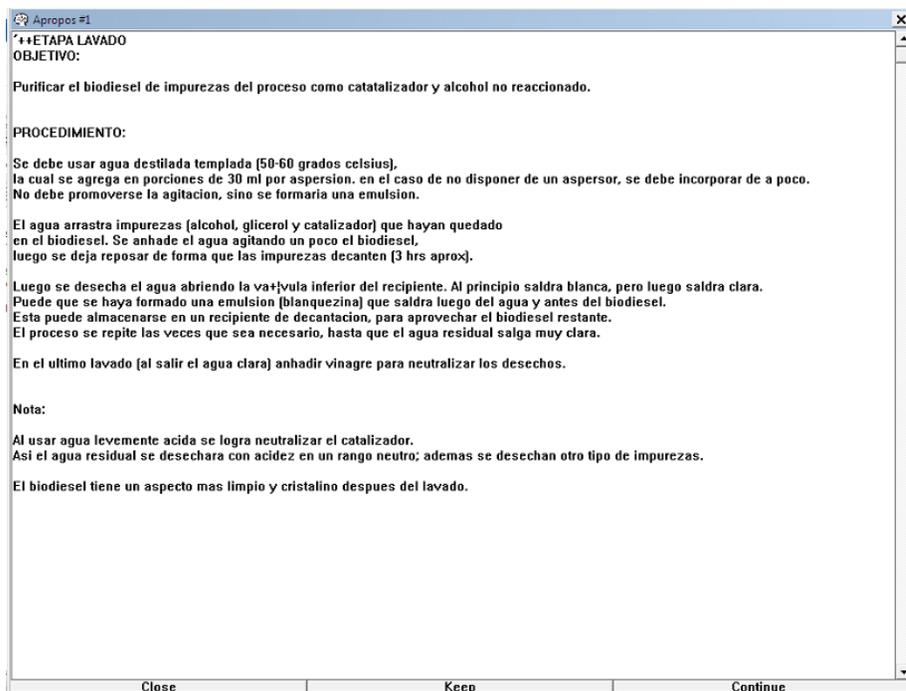
(o) Etapa Precalentamiento.



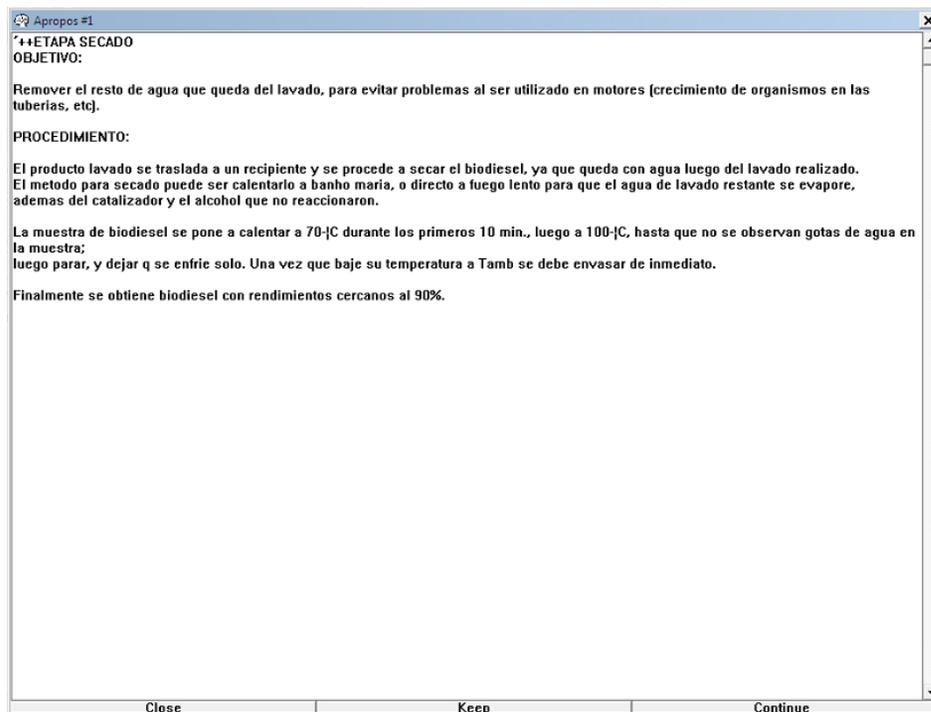
(r) Etapa Transesterificación.



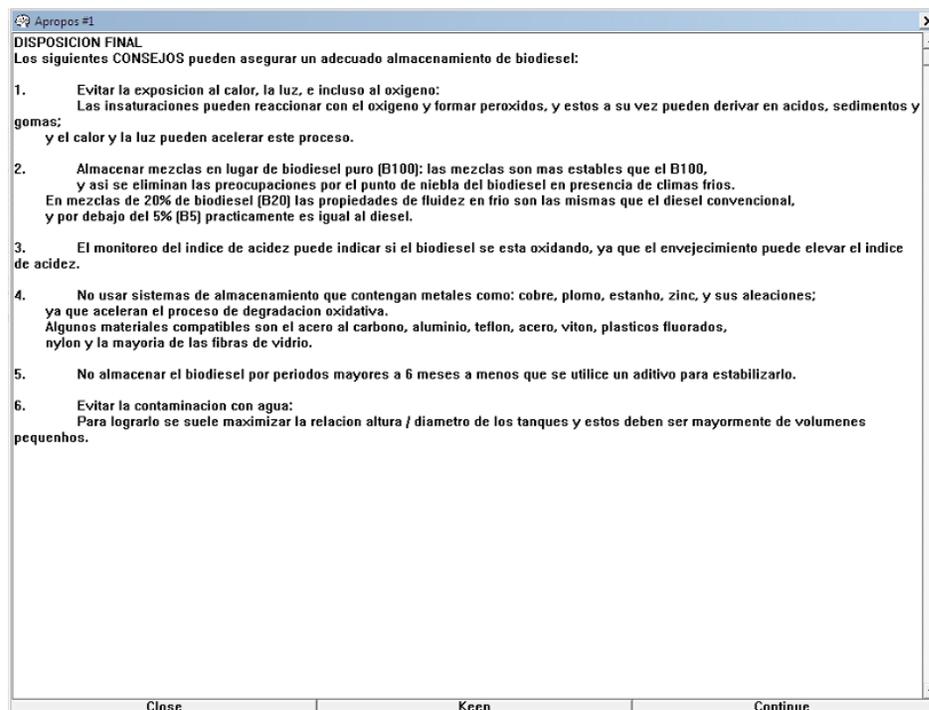
(s) Etapa Decantación.



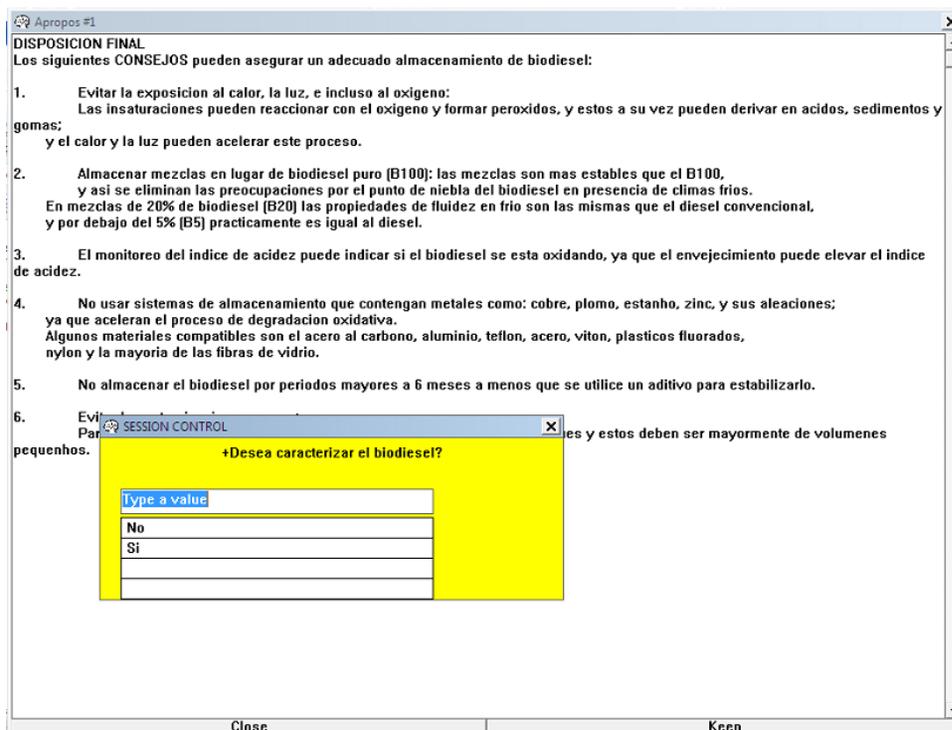
(t) Etapa Lavado.



(u) Etapa Secado.



(v) Disposición Final.



(w) Caracterización de Biodiesel.

Apropos #1

INDICE ACIDEZ

Se describe el metodo de titulacion estandar, que se formula con 1 g de NaOH [KOH] en un litro de agua. Es un metodo sencillo, que funciona bien; y la ventaja de este procedimiento es que no es necesario determinar una cantidad exacta de AGL en el aceite. Solo se necesita determinar una cantidad relativa:

- Mide el contenido de acidos grasos libres [AGL] del aceite.
- Se determina por titulacion o valoracion del aceite con KOH o NaOH.
- Se expresa en [g KOH/L aceite] o [g NaOH/L aceite].
- Tambien se puede expresar como porcentaje de acidos grasos libres

MATERIALES

Insumos:

- 15 ml de Fenolftaleina
- 10 ml de alcohol isopropilico (99%) o etanol
- 1 L de agua destilada o desionizada
- 1 ml de aceite
- 1 g de Hidroxido

Otros:

- Gafas
- Guantes
- 3 vasos precipitados (50 ml)
- Bureta y soporte (10 ÷ 50 ml)
- Matraz de 250 ml (erlenmeyer)
- 1 embudo
- Papel pH
- Gotero

PROCEDIMIENTO

1. Preparar la solucion de 1% NaOH [KOH] vertiendo un gramo de NaOH [KOH] en 1 Lt de agua destilada
2. Agregar 3 gotas de fenolftaleina al alcohol en un vaso precipitado, y agitar
3. Agregar 1 ml. de aceite al matraz Erlenmeyer con alcohol y fenolftaleina, y agitar para que el aceite se disuelva en el alcohol.
4. La solucion de NaOH o KOH se debe agregar a la bureta. Se debe registrar el volumen inicial en la bureta. Se debe poner el vaso con aceite-alcohol-fenolftaleina bajo la bureta.
5. Se debe ir incorporando la solucion de NaOH o KOH gota a gota, hasta que la solucion alcohol-aceite-fenolftaleina cambie de color a rosado claro de forma permanente (invariable por 30 segundos); cuando esto ocurra no se agregan mas gotas, y se registra el volumen final en la bureta [Y].
6. Finalmente, medir el pH de la muestra alcohol-aceite-fenolftaleina con el papel pH. Este debe estar entre 7-8.

Close Keep Continue

(x) Información sobre Test de Acidez (Biodiesel) I.

Apropos #1

3. Agregar 1 ml. de aceite al matraz Erlenmeyer con alcohol y fenolftaleina, y agitar para que el aceite se disuelva en el alcohol.
4. La solucion de NaOH o KOH se debe agregar a la bureta. Se debe registrar el volumen inicial en la bureta. Se debe poner el vaso con aceite-alcohol-fenolftaleina bajo la bureta.
5. Se debe ir incorporando la solucion de NaOH o KOH gota a gota, hasta que la solucion alcohol-aceite-fenolftaleina cambie de color a rosado claro de forma permanente (invariable por 30 segundos); cuando esto ocurra no se agregan mas gotas, y se registra el volumen final en la bureta [Y].
6. Finalmente, medir el pH de la muestra alcohol-aceite-fenolftaleina con el papel pH. Este debe estar entre 7-8.

INTERPRETACION DE RESULTADOS

Se usa el indicador [%FFA] para la caracterizacion del aceite, y AN [Acid Number] [g Hidroxido/g aceite] para biodiesel: 7

Acid Number (AN):

$$AN_{KOH} = 1,08 \cdot [Y_{NaOH}]$$

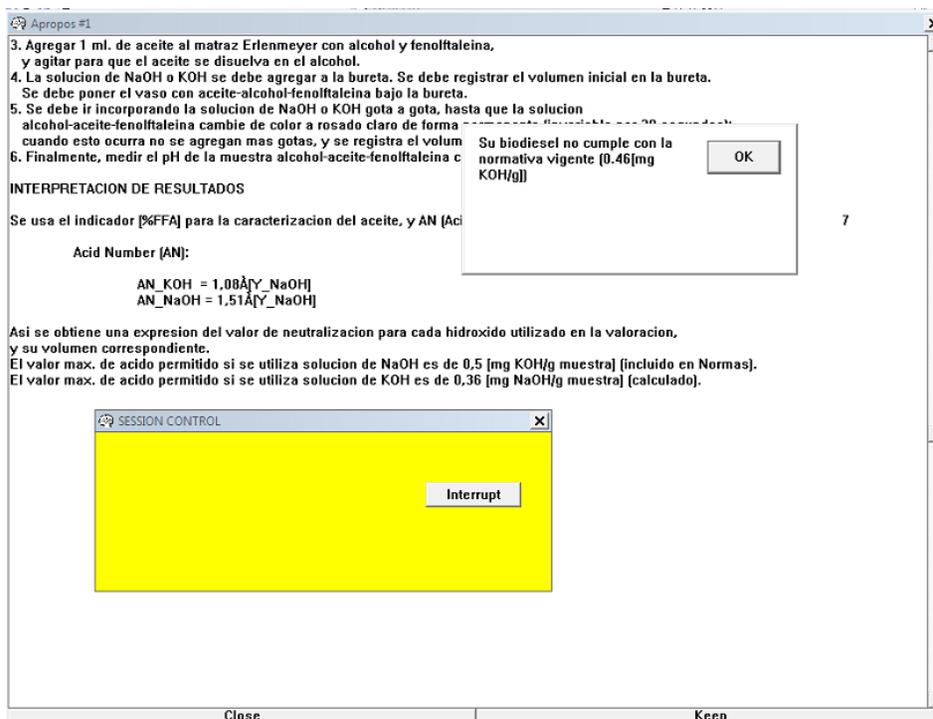
$$AN_{NaOH} = 1,51 \cdot [Y_{NaOH}]$$

Asi se obtiene una expresion del valor de neutralizacion para cada hidroxido utilizado en la valoracion, y su volumen correspondiente.

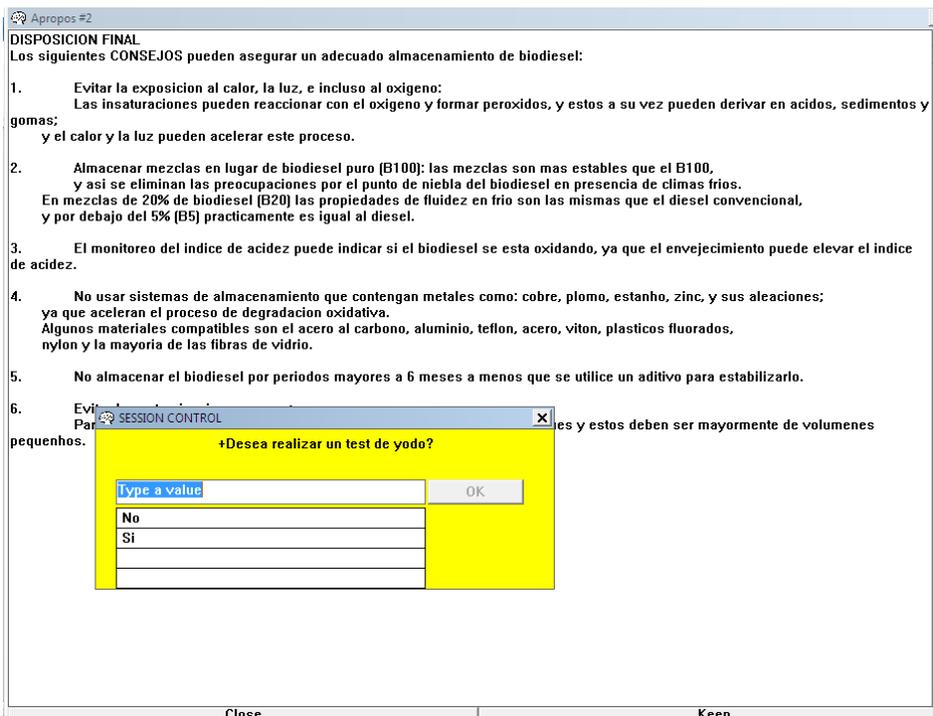
El valor max. de acido permitido si se utiliza solucion de NaOH es de 0,5 [mg KOH/g muestra] [incluido en Normas].
El valor max. de acido permitido si se utiliza solucion de KOH es de 0,36 [mg NaOH/g muestra] [calculado].

Close Keep Continue

(y) Información sobre Test de Acidez (Biodiesel) II.



(z) Información sobre Test de Acidez (Biodiesel) II.



(aa) Test de Yodo (Biodiesel).

Apropos #2

TEST YODO
 -Se usa para medir el grado de insaturación del aceite, es decir, el contenido de dobles enlaces en la cadena de carbono.
 -A mayor índice de yodo el aceite (y el biodiesel) se solidifica a menores temperaturas.

MATERIALES

Reactivo	Denominación
Acido acetico	Acido acetico glacial PA-ACS-ISO
Almidon soluble	Almidon de Patata soluble PA
Ciclohexano	Ciclohexano PA-ACS-ISO
Engrudo de almidon	Almidon solucion 1% RV
Sol. volumetrica patron de tiosulfato sodico	Sodio Tiosulfato 0,1 mol/l (0,1 N) SV
Yoduro Potasico, solucion de 100 g/l	Potasio Yoduro solucion 10% p/v RE
Reactivo de Wijs	Reactivo de Wijs 0,1 mol/l (0,2 N) RV

Otros
 Cafas
 Guantes
 Matraces de 500 ml (erlenmeyer) con boca esmerilada, provistos de tapones de vidrio y perfectamente secos.
 Gotero

Notas:
 - Yoduro Potasico (KI) debe estar exento de yodatos o de yodo libre.
 - Engrudo de Almidon: se mezclan 5 g de almidon soluble con 30 ml de agua, luego anhadir esta mezcla a 1 Lt de agua en ebullicion, hervir durante 3 min. y dejar enfriar.
 - La solucion patron de tiosulfato sodico [c(Na2S2O3·5H2O)=0,1 mol/l], debe ser valorada como maximo, 7 dias antes de su uso.
 - Se debe preparar un disolvente mezclando volúmenes iguales de ciclohexano y acido acetico.
 - Reactivo de Wijs, que contenga monocloruro de yodo en acido acetico.
 [El reactivo contiene 9 g de ICl3 + 9 g de I en acido acetico].

PROCEDIMIENTO

1. Secar la muestra homogeneizada con sulfato sodico y filtrarla.

Nota:
 El índice de yodo previsto para el aceite usado varia entre 80-140 y el del aceite de ricino entre 80 y 120; por ello en el sistema experto se define el tamaño de muestra para ambas especies en 0,2 g. de aceite.

Close Keep Continue

(bb) Información Test de Yodo (Biodiesel) I.

Apropos #2

2. Pesar la muestra (0,2 g)
3. Introducir la muestra en un matraz de 500 ml y anhadir 20 ml de disolvente para disolver el aceite.
4. Agregar exactamente 25 ml de reactivo de Wijs, tapar el matraz, agitar el contenido, y colocar el matraz al abrigo de la luz.

Nota:
 Preparar del mismo modo un ensayo en blanco con el disolvente y el reactivo, pero sin la muestra de aceite. Como el índice de Yodo previsto es inferior a 150, los matraces se deben mantener en la oscuridad durante 1 hora.

5. Valorar con la disolucion de tiosulfato sodico hasta que haya desaparecido casi totalmente el color amarillo producido por el yodo.
6. Anhadir unas gotas de engrudo de almidon y continuar la valoracion hasta el momento preciso en que desaparezca el color azul despues de agitar intensamente.
7. Efectuar 2 determinaciones de la muestra.

Nota:
 Si en el proceso de determinacion del índice de yodo, pasado el tiempo de oscuridad la muestra esta decolorada, debe repetirse el analisis disminuyendo la cantidad de muestra (0,1 g.)
 El KI tiene la finalidad de liberar el yodo que quedo como ICl (sin reaccionar), al agregarlo se debe lavar el tapon, el cuello y las paredes del frasco.
 Lo mismo se debe hacer con el agua a fin de arrastrar el I2 que pueda quedar en las paredes.
 El almidon que se emplea como indicador no se adiciona desde el principio, porque si hay mucho yodo se produce coagulacion de la suspension del almidon y descomposicion de esta.
 Al titular con Na2S2O3 sin almidon, la solucion pasa de cafe a amarillo y en este momento se adiciona el almidon, la solucion se torna azul y se sigue la titulacion hasta decoloracion total.

Expresion de Resultados:

Indice Yodo= $(12,69 \times c \times (V1 - V2)) / P$

Donde,

c : Valor numerico de la concentracion exacta, expresada en moles por litro, de la solucion volumetrica patron de tiosulfato sodico utilizada.
 V1 : Volumen [ml] de tiosulfato sodico utilizados para el blanco (solucion de Wijs sin aceite)
 V2 : Volumen [ml] de tiosulfato de sodio consumidos por la muestra
 P : Peso de la muestra [g]

Se toma como resultado la media aritmetica de las dos determinaciones, y la unidad que corresponde son los gramos de yodo absorbido por 100 gramos de sustancia.

Close Keep Continue

(cc) Información Test de Yodo (Biodiesel) II.

Apropos #2

Nota:

Si en el proceso de determinación del índice de yodo, pasado el tiempo de oscuridad la muestra esta decolorada, debe repetirse el analisis disminuyendo la cantidad de muestra (0,1 g.)
 El KI tiene la finalidad de liberar el yodo que quedo como ICL (sin reaccionar), al agregarlo se debe lavar el tapon, el cuello y las paredes del frasco.
 Lo mismo se debe hacer con el agua a fin de arrastrar el I2 que pueda quedar en las paredes.
 El almidon que se emplea como indicador no se adiciona desde el principio, porque si hay mucho yodo se produce coagulation de la suspension del almidon y descomposicion de esta.
 Al titular con Na2S2O3 sin almidon, la solucion pasa de cafe a amarillo y en este momento se adiciona el almidon, la solucion se torna azul y se sigue la titulacion hasta decolora racion total.

Expresion de Resultados:

Indice Yodo= $(12,69 \times c \times (V1 - V2))/P$

Donde,

c : Valor numerico de la concentracion exacta, expresada en moles por litro, de la solucion volumetrica patron de tiosulfato sodico utilizada.
 V1 : Volumen [ml] de tiosulfato sodico utilizados para el blanco (solucion de Wijs sin aceite)
 V2 : Volumen [ml] de tiosulfato de sodio consumidos por la muestra
 P : Peso de la muestra [g]

Se toma como resultado la media aritmetica de las dos determinaciones, y la unidad que corresponde son los gramos de yodo absorbido por 100 gramos de sustancia.
 Dependiendo si se analiza el aceite (materia prima), o el biodiesel resultante, el valor maximo para este indice es de 160 [g I2 / 100 g] en el caso de la materia prima, y 120 para el biodiesel resultante, considerando que este ultimo valor esta normado en la norma europea EN 14214.

Close Keep Continue

(dd) Información Test de Yodo (Biodiesel) III.

Apropos #2

Nota:

Si en el proceso de determinación del índice de yodo, pasado el tiempo de oscuridad la muestra esta decolorada, debe repetirse el analisis disminuyendo la cantidad de muestra (0,1 g.)
 El KI tiene la finalidad de liberar el yodo que quedo como ICL (sin reaccionar), al agregarlo se debe lavar el tapon, el cuello y las paredes del frasco.
 Lo mismo se debe hacer con el agua a fin de arrastrar el I2 que pueda quedar en las paredes.
 El almidon que se emplea como indicador no se adiciona desde el principio, porque si hay mucho yodo se produce coagulation de la suspension del almidon y descomposicion de esta.
 Al titular con Na2S2O3 sin almidon, la solucion pasa de cafe a amarillo y en este momento se adiciona el almidon, la solucion se torna azul y se sigue la titulacion hasta decolora racion total.

Expresion de Resultados:

Indice Yodo= $(12,69 \times c \times (V1 - V2))/P$

Donde,

c : Valor numerico de la concentracion exacta, expresada en moles por litro, de la solucion volumetrica patron de tiosulfato sodico utilizada.
 V1 : Volumen [ml] de tiosulfato sodico utilizados para el blanco (solucion de Wijs sin aceite)
 V2 : Volumen [ml] de tiosulfato de sodio consumidos por la muestra
 P : Peso de la muestra [g]

Se toma como resultado la media aritmetica de las dos determinaciones, y la unidad que corresponde son los gramos de yodo absorbido por 100 gramos de sustancia.
 Dependiendo si se analiza el aceite (materia prima), o el biodiesel resultante, el valor maximo para este indice es de 160 [g I2 / 100 g] en el caso de la materia prima, y 120 para el biodiesel resultante, considerando que este ultimo valor esta normado en la norma europea EN 14214.

SESSION CONTROL

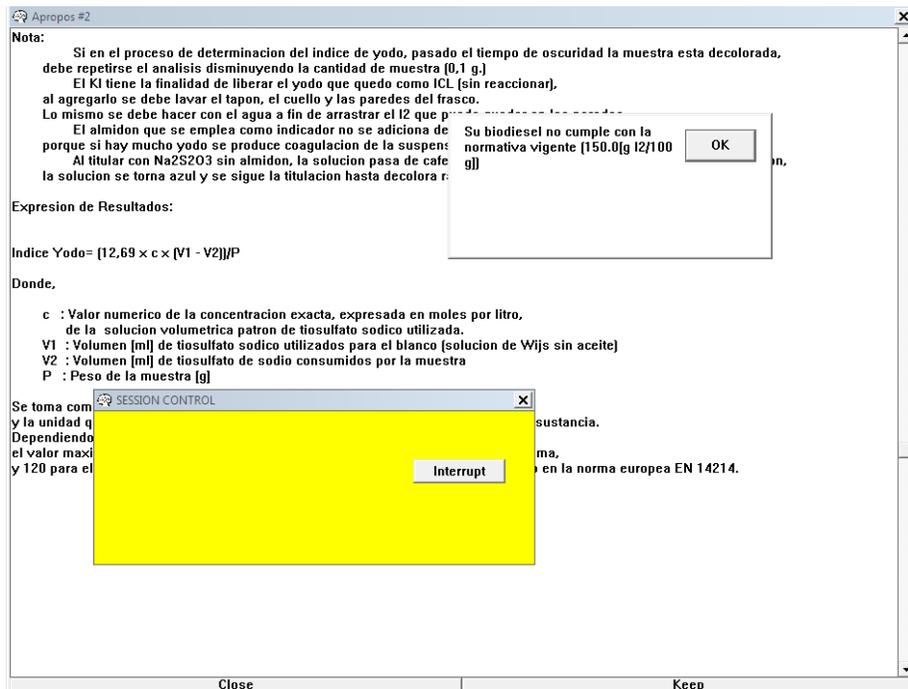
Resultado del Test de Yodo

150

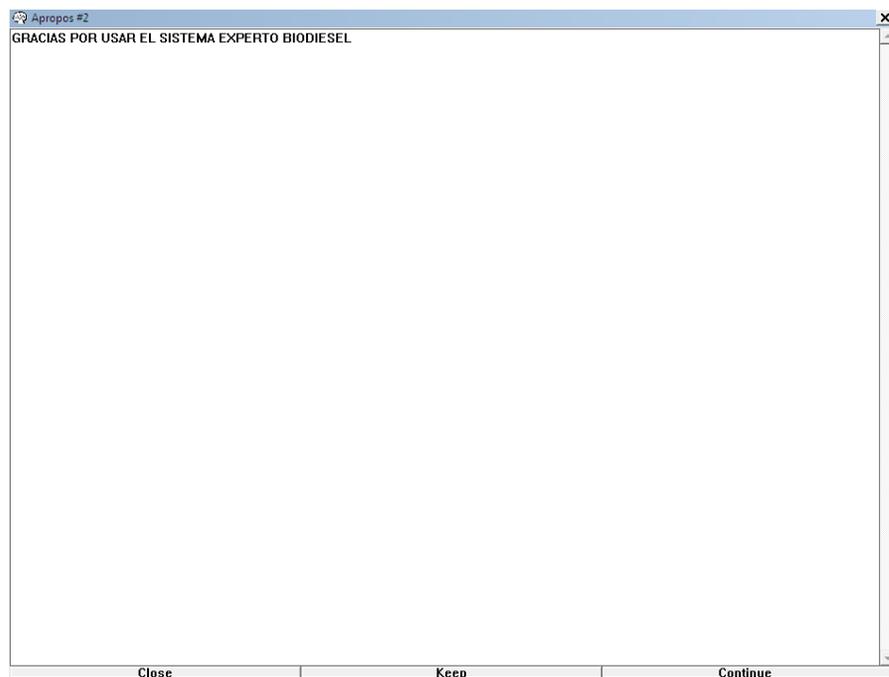
OK

Close Keep

(ee) Información Test de Yodo (Biodiesel) III.



(ff) Entrega información de cumplimiento de normativa.



(gg) Mensaje Finalización.

Anexo 7-B: Código del sistema experto (CD)

El código del sistema experto y los archivos para poder ejecutarlo se presentan en un CD.