

00553



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

**EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA
LA SELECCIÓN DE UN PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE METILÉSTERES
(BIODIESEL) USANDO LÓGICA DIFUSA**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS
(INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
DE PROYECTOS)**

PRESENTA

VÍCTOR JAVIER MARTÍNEZ ORTIZ



MÉXICO D.F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE QUÍMICA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

BIOL. FRANCISCO J. INCERA UGALDE
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN DE POSGRADO

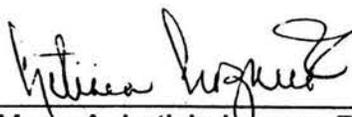
PRESENTE.

Me permito informarle, que después de haber revisado la tesis titulada: Evaluación de Tecnologías para la Selección de un Proceso de Producción de Metilésteres (Biodiesel) usando Lógica Difusa que presentó el ing. Víctor Javier Martínez Ortiz, considero que cumple con los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Sistemas (Ingeniería y Administración de Proyectos), por lo que otorgo mi voto aprobatorio.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente

Ciudad Universitaria, 7 de diciembre de 2004



M. en A. Leticia Lozano Ríos

FACULTAD DE QUÍMICA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

BIOL. FRANCISCO J. INCERA UGALDE
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN DE POSGRADO

PRESENTE.

Me permito informarle, que después de haber revisado la tesis titulada: Evaluación de Tecnologías para la Selección de un Proceso de Producción de Metilésteres (Biodiesel) usando Lógica Difusa que presentó el ing. Víctor Javier Martínez Ortiz, considero que cumple con los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Sistemas (Ingeniería y Administración de Proyectos), por lo que otorgo mi voto aprobatorio.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente

Ciudad Universitaria, 7 de diciembre de 2004



M. en A. Fernando Báez Ramos

FACULTAD DE QUÍMICA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

BIOL. FRANCISCO J. INCERA UGALDE
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN DE POSGRADO

PRESENTE.

Me permito informarle, que después de haber revisado la tesis titulada: Evaluación de Tecnologías para la Selección de un Proceso de Producción de Metilésteres (Biodiesel) usando Lógica Difusa que presentó el ing. Víctor Javier Martínez Ortiz, considero que cumple con los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Sistemas (Ingeniería y Administración de Proyectos), por lo que otorgo mi voto aprobatorio.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente

Ciudad Universitaria, 7 de diciembre de 2004



M. en I. Jorge Luis Aguilar González

FACULTAD DE QUÍMICA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

BIOL. FRANCISCO J. INCERA UGALDE
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN DE POSGRADO

PRESENTE.

Me permito informarle, que después de haber revisado la tesis titulada: Evaluación de Tecnologías para la Selección de un Proceso de Producción de Metilésteres (Biodiesel) usando Lógica Difusa que presentó el ing. Víctor Javier Martínez Ortiz, considero que cumple con los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Sistemas (Ingeniería y Administración de Proyectos), por lo que otorgo mi voto aprobatorio.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente

Ciudad Universitaria, 7 de diciembre de 2004



I.Q. Manuel Miguel López Ramos

FACULTAD DE QUÍMICA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

BICL. FRANCISCO J. INCERA UGALDE
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN DE POSGRADO

PRESENTE.

Me permito informarle, que después de haber revisado la tesis titulada: Evaluación de Tecnologías para la Selección de un Proceso de Producción de Metilésteres (Biodiesel) usando Lógica Difusa que presentó el ing. Víctor Javier Martínez Ortiz, considero que cumple con los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Sistemas (Ingeniería y Administración de Proyectos), por lo que otorgo mi voto aprobatorio.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente

Ciudad Universitaria, 7 de diciembre de 2004



I.Q. José Antonio Ortiz Ramírez

*A Dios, quien me ha concedido
la oportunidad de progresar en
todos los aspectos de mi vida.*

*Con admiración y
reconocimiento a mis
padres, quienes me han
apoyado en todo momento
para salir adelante.*

*A mis hermanos Sergio,
Alfonso, Luis y Fernando,
por todas las vivencias
compartidas.*

*A mis amigos, a Claudia, Iván,
Eduardo, Joel, Verónica, Luisa,
Amparo, Ricardo, Pedro,
Arturo, Marco Antonio y a
todos mis compañeros de aula
de licenciatura y maestría, a
quienes les deseo éxito en todo.*

*A los ingenieros Manuel
Miguel López Ramos y Jorge
Alejandro Avella Martínez por
todas sus enseñanzas y apoyo
incondicional.*

Con afecto, admiración y aprecio
a mi tutor, el M. en I. Ezequiel
Millán Velasco, a quien debo el
haber convertido un rotundo
fracaso en un gran éxito.

Con profundo respeto al
Dr. Julio Ricardo Landgrave
Romero, a quien debo la
oportunidad de haber cursado
la maestría y su invaluable
apoyo para concretarla.
Descanse en paz.

Con mi más profundo
agradecimiento al Dr. Jesús
Guzmán Rivera y al Dr. Carlos
Escobar Toledo por su valiosa
intervención y apoyo para poder
continuar adelante en la
obtención del grado.

A mis sinodales:

M. en A. Leticia Lozano Ríos

M. en A. Fernando Báez Ramos

M. en I. Jorge Luis Aguilar González

I.. Q. Manuel Miguel López Ramos

I.. Q. José Antonio Ortiz Ramírez

Por su valioso apoyo y comprensión.

A la Universidad Nacional
Autónoma de México y en
especial a la Facultad de
Química a las que debo toda mi
formación profesional y la
aspiración a un excelente
futuro.

EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA SELECCIÓN DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE METILÉSTERES (BIODIESEL) USANDO LÓGICA DIFUSA.

HIPÓTESIS:

Es factible realizar de manera simultánea la evaluación técnica y financiera de las tecnologías de producción de biodiesel usando Lógica Difusa, para demostrar la capacidad que tiene ésta como método de evaluación integral de tecnologías de plantas químicas de proceso a través de la técnica de la Selección Difusa Multiobjetivo.

OBJETIVOS:

Evaluar técnica y financieramente 5 tecnologías comerciales de producción de biodiesel y seleccionar la que sea más factible por el método propuesto de Selección Difusa Multiobjetivo para una capacidad nominal de 11.9 millones de galones por año (40,000 toneladas por año).

Proponer la técnica conocida como Selección Difusa Multiobjetivo correspondiente a la Lógica Difusa como procedimiento apropiado y útil para evaluar tecnologías de plantas químicas de proceso.

Utilizar como ilustración del método la evaluación de tecnologías comerciales para la introducción del biodiesel como combustible en México para el inicio de su producción a gran escala.

INTRODUCCIÓN

El biodiesel es un combustible alternativo al diesel, tiene grandes posibilidades de que en un futuro cercano, por cuestiones ambientales o por una cada vez más probable privatización de la industria de los combustibles en México, pueda ser introducido en nuestro país. De esta manera, existe un numeroso grupo de tecnólogos que esperan oportunidades para vender su tecnología. Dada esta oferta, es interesante realizar una evaluación de tales tecnologías para conocer las características técnicas, económicas, financieras y comerciales que ofrecen y las posibilidades que tienen para tener éxito en nuestro país. Para comparar tales características de cada tecnología usamos la herramienta de la Lógica Difusa conocida como toma de decisiones multi-objetiva, aprovechando la ocasión para probar su capacidad para evaluar tecnologías de la industria química de proceso.

Explico en forma detallada de las bases teóricas fundamentales del proceso de producción del biodiesel, así como las tres rutas de reacción aplicables en los procesos comerciales y el esquema general de producción, mencionando con cierta profundidad las operaciones unitarias involucradas en el proceso y aportando información general que servirá en los capítulos posteriores para aclarar el panorama del sustento tecnológico de los procesos evaluados y de los criterios considerados para realizar la evaluación.

Dado que es un producto relativamente reciente, cada país que ha desarrollado su propia tecnología y que a través de ésta lo produce, ha desarrollado su propia norma de calidad, mismas que mencionamos a detalle incluyendo la norma europea EN 14214 (ISO 14214), la estadounidense ASTM PS121-99 y la alemana DIN 51606, que a corto plazo serán las que predominen y sean las únicas reconocidas a nivel mundial. Los estándares de estas normas entre las que se encuentra la pureza del producto, que constituye uno de los principales objetivos de evaluación como se verá más adelante, tienen un significado determinante en el diseño de los procesos de producción de biodiesel.

Para realizar la evaluación y verificar la hipótesis de una forma realista, tuve la oportunidad de conseguir información suficiente de cinco tecnologías (de aproximadamente 20 reconocidas a nivel comercial) proveniente de patentes y de sus sitios en internet, incluso por contacto directo de sus representantes de ventas que solamente tres de los cinco correspondieron con datos complementarios. Sometí Tal información a un proceso de

clasificación para dejarla lista y aplicar en ésta el método de evaluación, tomando en cuenta que la información analizada fue la disponible.

Para la evaluación de las cinco tecnologías proponemos el empleo del método ya mencionado; el procedimiento de su aplicación en la evaluación queda detallado paso a paso e ilustrado con sus resultados, demostrando ser además de un método novedoso, ágil y sin complicaciones, certero y coherente para tomar decisiones.

Su efectividad queda a discusión a través de los resultados que proporciona y comparamos sus atributos con otra manera semejante de evaluar las tecnologías, sólo que ésta última sin tales atributos, para poder resaltar así, las bondades de la Lógica Difusa método de evaluación de procesos químicos.

En las conclusiones abordo primordialmente la dependencia de la efectividad del método con la información otorgada por lo objetos de estudio, en este caso la información técnica y financiera y del discernimiento del usuario del método respecto a las fuentes y características de dicha información; además puntualizo las recomendaciones pertinentes acerca de la implementación del biodiesel como combustible en México.

ÍNDICE

Capítulo	Título	Pág.
	Título, objetivo, hipótesis	<i>i</i>
	Introducción	<i>ii</i>
	Índice	<i>iv</i>
I.	Antecedentes	1
II.	Generalidades	2
II.1	Tecnologías de reacción de transesterificación de triglicéridos	5
II.2	Descripción general del proceso de producción de Biodiesel	14
II.3	Normas y especificaciones para el Biodiesel	20
III.	Tecnologías comerciales de producción de Biodiesel	23
III.1	Proceso BIOX	24
III.2	Proceso CTER	29
III.3	Proceso CD	34
III.4	Proceso LURGI	38
III.5	Proceso IWP	43
IV.	Método empleado para la evaluación de las tecnologías de producción de Biodiesel	47
IV.1	Lógica Difusa	48
V.	Definición de las características de evaluación técnico-financiera de los procesos de Biodiesel	67
V.1.....	Criterios de Evaluación.....	68
V.2.....	Establecimiento de las prioridades entre los criterios de evaluación.....	100
VI.	Evaluación de tecnologías mediante selección difusa multiobjetivo.....	103
VII.	Análisis de resultados	117
VII.1.....	Validación de resultados.....	123
VIII.	Conclusiones y recomendaciones.....	127
Apéndice 1.	Memoria de cálculo de la aplicación de la Lógica Difusa para evaluar la tecnología BIOX	134
A1.1	Cálculo de los grados de membresía para la tecnología BIOX	134
A1.2	Cálculo de los valores de decisión para la tecnología BIOX	139
	Bibliografía	141

CAPÍTULO I.

ANTECEDENTES ^[1]

El uso masivo de las fuentes fósiles desde el inicio de la industrialización ha conducido a una alteración significativa del clima global cuyas consecuencias todavía no cuantificables en su totalidad. Por otro lado, estudios cuidadosos de la producción de petróleo y gas natural en las diferentes regiones del mundo así como de los nuevos hallazgos de reservas indican que dentro de pocos años la producción de estos combustibles claves de la economía mundial pasará pronto por su máximo, con consecuencias graves para la economía mundial. Nuevos análisis muestran que 23 de 44 naciones productoras de petróleo (que representan el 99 por ciento de la producción global) ya pasaron por su punto de máxima producción; está calculado que la producción en los países no pertenecientes a la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo) tuvo su máximo en 2003, mientras que el pico en los estados de la OPEP se espera para el año 2017.

A partir del panorama anterior, queda claro que la búsqueda de fuentes y tecnologías alternativas de energía debe ser una de las prioridades mundiales en los próximos años y décadas. Dos características de estas nuevas fuentes y tecnologías son esenciales: la minimización del impacto ambiental y la renovabilidad.

De los diferentes sectores, el del transporte ha sido uno con mayor dinamismo en el pasado; a la vez representa una de las fuentes más importantes de la contaminación del aire, particularmente en los grandes centros urbanos, por ejemplo, en la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM). A pesar de muchos intentos de controlar las emisiones provenientes de los vehículos particulares y camiones, la situación generada por la concentración de los contaminantes en la atmósfera sigue siendo crítica, por lo cual soluciones alternativas son cada vez más urgentes.

CAPÍTULO II.

GENERALIDADES

Según la ASTM, el biodiesel es una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivadas de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas animales, que puede reemplazar o formar una mezcla con el diesel para su empleo en motores de compresión o en calderas. Estamos de un combustible líquido y biodegradable.

Su uso es ecológicamente justificable, posee características químicas que hacen que su combustión sea altamente eficiente comparada con la del diesel, no contiene azufre ni hidrocarburos aromáticos, posee un alto potencial oxigenante ya que su molécula tiene un 11% en peso de oxígeno.

El biodiesel es producido en forma pura, mezclado con diesel forma una mezcla designada como BXX, donde XX representa el porcentaje en volumen de biodiesel puro contenido en la mezcla. Sus propiedades como combustible superan en algunos aspectos a las del diesel,

por ejemplo en el índice de cetano, que cuando menos tiene un valor de 50, pudiendo llegar hasta 70 y su lubricidad es aproximadamente 20% mayor que la del diesel con aditivo dada su naturaleza grasa, por lo que incluso, funciona como aditivo para diesel en motores.

En cuanto al motor que va a usar biodiesel, en general no requiere modificaciones salvo en los que tienen conductos de goma, los cuales es necesario cambiar por un material resistente a causa del alto poder solvente del metiléster que con su uso continuo disuelve estas gomas, así como también puede remover la basura acumulada en cierta cantidad en el tanque de diesel y de manera muy limitada a la pintura del tanque en aquellos motores que usaron siempre diesel y de pronto cambian al biodiesel en cualquier proporción de mezcla. Aún no está establecida una comparación absoluta entre el biodiesel y el diesel correspondiente a su comportamiento en los motores, pero en términos generales aparentemente son similares.

Técnicamente la producción del biodiesel es diferente de la del diesel en que el primero es producido mediante un proceso ecológicamente sustentable a partir de materias primas renovables, mientras que el diesel depende de reservas fósiles no renovables. La sustentabilidad ecológica del biodiesel consiste en determinar la medida en la que su combustión cumple con el ciclo del carbono, calculando cuánto CO_2 fija una determinada plantación de oleaginosa y comparándolo con la cantidad de CO_2 que genera la combustión del biodiesel.

La producción del biodiesel está concentrada en Europa, principalmente en Alemania, en donde existe la mayor cantidad de licenciadores de tecnologías de biodiesel, de mayor prestigio y con mayor reconocimiento comercial, Alemania por sí sola produce 1.2 millones de toneladas anuales hasta el año de 2003.

Las materias primas para la elaboración del biodiesel consisten en un alcohol y una fuente de triglicéridos, ya sea aceite vegetal o grasa animal, nuevo o usado. La calidad de las materias primas juega un papel muy importante en el proceso del biodiesel, ya que está visto que las tecnologías de producción de biodiesel son, operativamente hablando, muy sensibles a la calidad de dichos insumos, principalmente en la sección de reacción de transesterificación del proceso, la cual requiere características muy controladas de los componentes, así como de su composición y de sus concentraciones; por ejemplo, uno de los componentes más indeseables en esta etapa del proceso es el agua que puede provenir

de alcohol, ya que conlleva a una variedad de efectos, su presencia durante la reacción disminuye la concentración de catalizador en el reactor disminuyendo así la eficiencia de la reacción; disuelto el catalizador en el agua, reacciona químicamente con las moléculas de metiléster ya formadas que son el producto principal del proceso y las transforma en jabones, mismos que a su vez imposibilitan y en el mejor de los casos ineficientan notablemente la separación de las fases del producto de reacción, por lo que es necesario que el alcohol tenga alto grado de pureza y esté libre de agua en la mayor forma posible.

En el caso del aceite animal o grasa vegetal, existe el problema de que los ácidos grasos libres provocan la necesidad de incluir etapas adicionales al proceso, ya que alimentados directamente al reactor o reactores de transesterificación, causan la saponificación por efecto de la presencia del catalizador, haciendo disminuir la presencia de éste y provocando problemas semejantes a los descritos para el caso de la presencia de agua.

Los agentes químicos que utiliza el proceso del biodiesel son principalmente ácidos minerales para tratar los ácidos grasos libres provenientes de la fuente de triglicéridos o bien para neutralizar el pH de los productos antes de su purificación y de los efluentes del proceso. Los ácidos minerales empleados para tratar los ácidos grasos libres requieren alta concentración y pureza; si son para neutralización, requieren pureza y concentración no altas.

Los catalizadores requieren pureza de grado técnico con muy bajo contenido de humedad e intervienen solamente en la reacción de transesterificación.

II.1 TECNOLOGÍAS DE REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DE TRIGLICÉRIDOS ^[2] ^{[3] [4] [35] [38]}

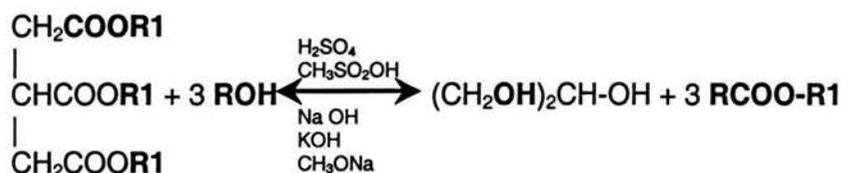
Las materias primas principales para producir metilésteres son en general grasas y aceites, los cuales están compuestos por moléculas llamadas triglicéridos. Cada triglicérido está compuesto por tres cadenas largas de ácidos grasos de 4 a 24 átomos de carbono unidos a la estructura de la glicerina. Las moléculas de glicerina son casi removidas por completo del biodiesel producto. El biodiesel está compuesto por cadenas de ácido graso que están químicamente unidos a una molécula de alcohol. Cuando las cadenas de ácido graso abandonan la molécula y rompen al triglicérido, existen en la forma denominada como ácidos grasos libres (AGL). Las alimentaciones al proceso que contienen ácidos grasos libres sirven también para producir biodiesel, pero requiere un proceso diferente de conversión.

Las materias primas para producir biodiesel están clasificadas por su contenido de ácidos grasos libres de la siguiente manera:

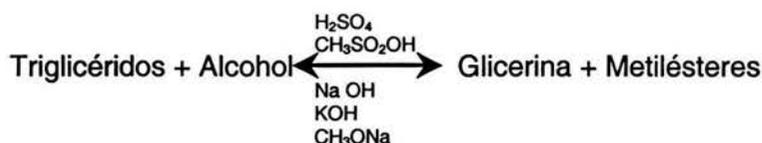
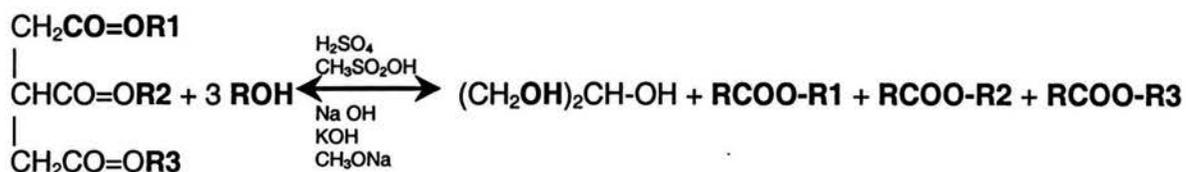
- **Aceites refinados**, tales como el aceite de soya, contiene menos de 1.5% de ácidos grasos libres.
- **Aceites con bajo grado de ácidos grasos libres**, como grasas amarillas (grasas usadas ya tratadas) y grasas animales que tienen menos del 5% de ácidos grasos libres.
- **Aceites con alto grado de ácidos grasos libres**, grasas animales que contienen al menos 20 % de ácidos grasos libres.

La producción del biodiesel procede en un reacción llamada transesterificación, en el cual varios aceites (triglicéridos) sufren una conversión para producir metilésteres a través de la reacción química con un alcohol (preferiblemente metanol) en presencia de un catalizador alcalino tal como hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH) o metóxido de sodio (CH₃ONa) o un ácido, como el H₂SO₄ o el ácido metilsulfónico (CH₃SO₂OH). El subproducto de esta reacción es la glicerina, la cual es indeseable en el reactor y debe ser removida del combustible junto con las trazas del alcohol sin reaccionar, triglicéridos y catalizador.

La reacción aparece a continuación



En la realidad, casi siempre los grupos alquilo de los triglicéridos son diferentes, por lo tanto, una forma más detallada para escribir la reacción es la siguiente:



R1, R2, R3, R : Grupos alquilo.

Los procesos de producción de biodiesel son bien conocidos. Existen tres rutas básicas para la producción de biodiesel a partir de aceites y grasas:

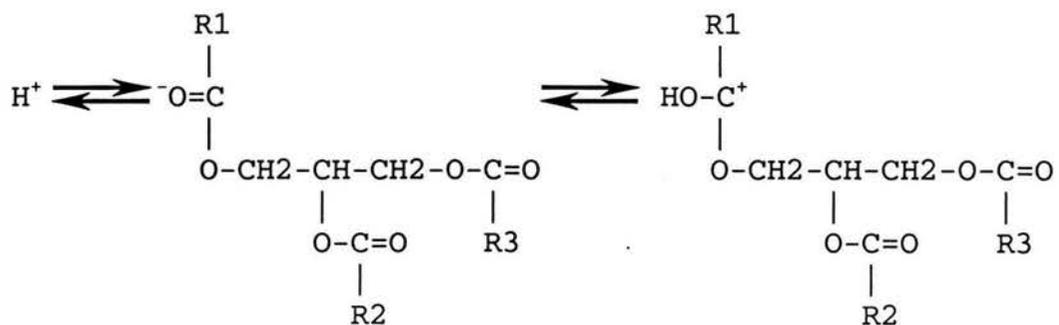
1. Transesterificación de aceite catalizada por ácido ^[5]

En los inicios de la producción comercial de biodiesel, a partir de 1982, ésta era la ruta de reacción con que los procesos comerciales producían el biodiesel.

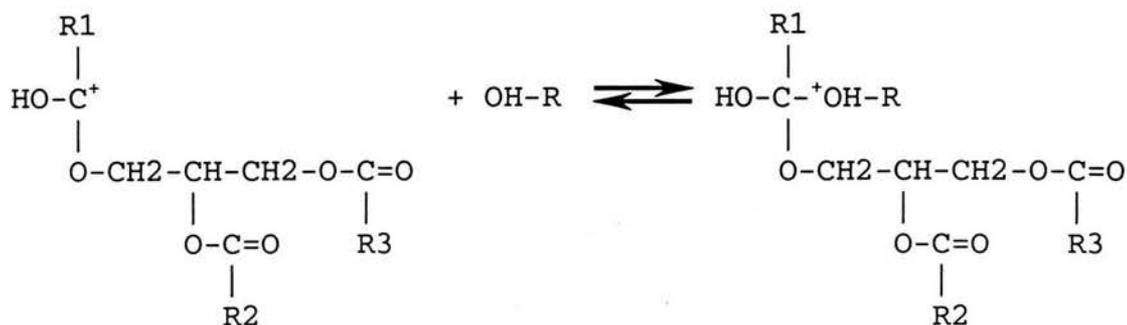
El proceso de transesterificación es catalizado por ácidos de Bronsted; preferiblemente el ácido metilsulfónico o el sulfúrico. Estos catalizadores brindan rendimientos muy altos en la formación de alquil ésteres, pero las reacciones son lentas, requiriendo temperaturas arriba de los 100°C y más de 3 horas para completar la conversión. Por ejemplo, la metanolisis o transesterificación del aceite de soya en presencia de 1 mol de ácido sulfúrico, con una relación molar alcohol/aceite de 30:1 a 65°C toma 50 horas para alcanzar la conversión casi completa del aceite vegetal (> 99%).

La relación molar alcohol/triglicérido es uno de los principales factores que influyen la transesterificación. Un exceso de alcohol favorece la formación de los productos, mientras que una cantidad excesiva de alcohol hace que la recuperación de la glicerina sea muy difícil, de tal manera que la relación ideal alcohol/triglicérido debe ser establecida mediante experimentación.

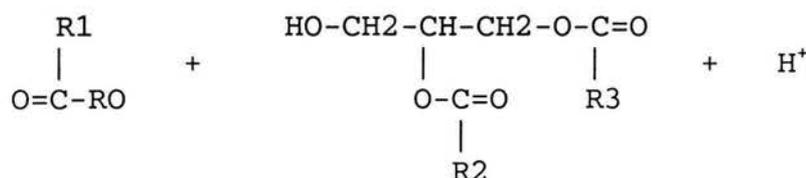
El mecanismo de la transesterificación del triglicérido catalizada por ácido aparece en el diagrama, la protonación del grupo carbonílico del éster produce un carbocatión



El carbocatión es sometido a un ataque nucleofílico por el alcohol para producir un intermediario tetraédrico



A partir del cual ocurre la separación del glicol para formar el éster y el protón libre regenera al catalizador ácido



De acuerdo a este mecanismo, es factible la formación de ácidos carboxílicos a partir de la reacción del carbocatión con agua presente en la reacción de la mezcla, por lo tanto la transesterificación catalizada con ácido sugiere la necesidad de evitar la presencia de agua para no permitir la formación competitiva de los ácidos carboxílicos, lo cual reduce el rendimiento en la formación de metilésteres.

2. Transesterificación del aceite catalizada por base.

Aceite refinado y desacidificado ^[6]

En la actualidad, la ruta catalizada por base para la transesterificación de triglicéridos es la mejor desde el punto de vista comercial, ya que la reacción ocurre a presión atmosférica y a una temperatura ligeramente menor a la de ebullición del alcohol (60°C), que en los procesos comerciales es el metanol (t.b. = 65°C).

Esta categoría de proceso tiene alta eficiencia y produce un combustible de alta calidad, después de remover el exceso de metanol, el catalizador y la glicerina subproducto. La base química de esta reacción requiere tres moléculas de metanol por cada molécula de triglicérido, lo que corresponde aproximadamente al 10% en peso de alcohol por masa de

aceite procesado. La relación del catalizador es de aproximadamente el 10% en peso de la masa del alcohol.

Pequeñas cantidades de ácidos grasos libres quedan convertidos en jabones (menos del 1.5%). Esos jabones quedan disueltos en la glicerina. Los catalizadores usualmente empleados son bases fuertes como NaOH, KOH o CH₃ONa. El uso de la sosa como catalizador no permite la formación de productos fertilizantes como al usar potasa. Los ácidos minerales sirven para romper emulsiones en la glicerina subproducto y neutralizar al catalizador alcalino. Para disminuir o evitar la formación de emulsiones durante la reacción es preferible el empleo del metóxido de sodio.

Ésta tecnología está probada en diversas condiciones de reacción, como la utilización de catalizadores no alcalinos y el empleo de diferentes tipos de alcoholes como etanol, isopropanol, alcohol butílico y metanol. De esas pruebas resultan diferentes tiempos de reacción y diferentes rendimientos. El típico proceso de transesterificación opera a condiciones atmosféricas estándar y 60°C de temperatura.

Aceites con bajo grado de ácidos grasos libres^[7]

En la búsqueda de un proceso más flexible hacia la calidad de las materias primas, existen procedimientos desarrollados para aceptar cierto contenido de ácidos grasos libres en la materia prima fuente de triglicéridos.

Ésta es sólo una variación del proceso para aceite refinado y desacidificado. Típicamente, la técnica consiste en agregar una pequeña cantidad de catalizador a la alimentación del proceso para reaccionar con los ácidos grasos libres y formar jabones, estos últimos son removidos y entonces la reacción descrita de transesterificación procede.

El proceso catalizado por base está también probado con aceites usados de cocina, los cuales contienen un alto grado de ácidos grasos libres. El mayor contenido de ácidos grasos libres conlleva a una mayor cantidad de jabones producidos por la reacción de saponificación al principio del proceso. Una cantidad de metiléster equivalente de aceite limpio tiende a ser perdido con los jabones, provocando pérdidas en el rendimiento de la reacción. Esta ruta presenta las siguientes desventajas:

-
- La reacción es lenta a temperatura ambiente.
 - La reacción no es completa, y por lo tanto requiere una segunda o aún una tercera etapa para alcanzar la pureza necesaria.
 - La reacción difícilmente puede tolerar sustratos que tengan un contenido superior al 1% de ácidos grasos, a causa de que los ácidos neutralizan al catalizador para formar jabones.

Existen técnicas para atenuar los problemas mencionados:

- Emplear un co-solvente inerte, barato y reciclable para llevar a cabo la reacción en una sola fase, incrementando así la transferencia de masa y por lo tanto, la velocidad de reacción.
- Usar un exceso de metanol para incrementar la polaridad de la mezcla, lo que permite mantener ionizado al catalizador.

Para sustratos que contienen ácidos grasos, es necesaria una etapa previa de reacción catalizada por ácido para convertir los ácidos grasos en metilésteres, antes de usar el catalizador alcalino para convertir los triglicéridos.

3. Conversión del aceite o grasa en sus ácidos grasos y posteriormente en biodiesel ^{[4] [7] [8] [9] [10] [11]}

Una propuesta mas eficiente para los ácidos grasos libres de grado alto es la tecnología de esterificación ácida seguida de la transesterificación alcalina. Los ácidos grasos libres reaccionan con alcohol (relación 1:1) en presencia de un catalizador ácido como ácido sulfúrico para formar metilésteres. El rendimiento de esta reacción de esterificación es típicamente de menos del 96%, lo cual significa que el 4% de los ácidos grasos disponibles quedan sin reaccionar, mismos que reaccionan con el catalizador alcalino en la siguiente etapa de transesterificación para formar jabones. El resto del proceso es igual que en la tecnología anterior.

Actualmente la producción de biodiesel es llevada a cabo con la reacción catalizada por base por las siguientes razones:

1. Su temperatura y presión son bajas.

2. La reacción alcanza una alta conversión (> 98%) con un mínimo de reacciones secundarias y un muy corto tiempo de reacción.
3. La conversión a biodiesel es directa y no existen compuestos intermediarios.
4. No existe la necesidad de equipos de proceso construidos con materiales especiales.

En la reacción, la base (KOH, NaOH o CH₃ONa) reacciona con el alcohol para producir un anión reactivo.

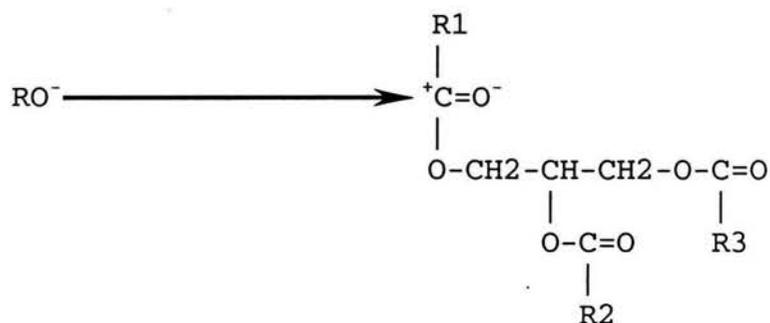


El hidróxido de potasio (potasa KOH), el hidróxido de sodio (sosa NaOH) o el metóxido de sodio (CH₃ONa) son bases fuertes, de tal manera que el desplazamiento de la reacción es predominantemente hacia su derecha.

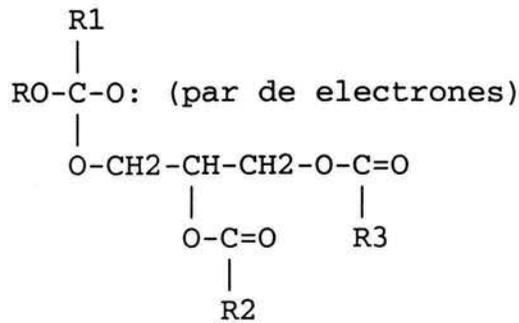
El alcohol (ROH) debe estar completamente seco. Cualquier cantidad de agua en el alcohol inhibe la formación del radical alcoxi (RO⁻).

El grupo RO⁻ es una especie reactiva, una vez formado, procede a reaccionar con el triglicérido. La reacción S_n2 que procede reemplaza al grupo alquilo del triglicérido en una serie de reacciones.

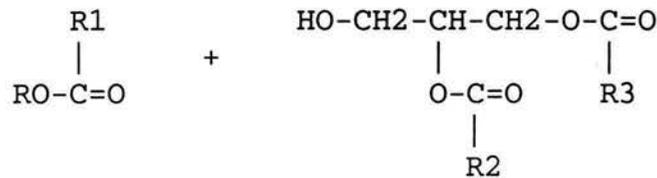
El carbón del éster del triglicérido tiene una ligera carga positiva, y los oxígenos tienen una ligera carga negativa, la mayoría de los cuales está localizada sobre el oxígeno de la doble ligadura. Esta carga es la que atrae al RO⁻ al sitio de reacción.



Éste alcanza un estado de transición que tiene un par de electrones a partir del enlace C=O ahora localizado sobre el oxígeno que estuvo en el enlace C=O.



Entonces esos electrones recaen en el carbón y expulsan al glicol formando el éster.



Entonces dos RO^- reaccionan vía este mecanismo con los otros dos grupos $\text{C}=\text{O}$ y degradan paulatinamente al triglicérido en forma de glicérido parcial (diglicérido y monoglicérido) hasta convertirlo en glicerina. Este tipo de reacción tiene varios factores limitantes. El RO^- ataca en el lugar donde existe una ligera carga positiva sobre el $\text{C}=\text{O}$. Así, por ejemplo, el MeO^- (radical metóxido) trabaja bien a causa de que es una molécula pequeña. En la medida que el alquilo R del RO^- tiende a ser más grande, la velocidad de reacción decrece. Este efecto es conocido como impedimento estérico. Es por ello que el metanol y el etanol son los más usados.

Existen varias reacciones que compiten, es imprescindible asegurar que la ruta de la reacción deseada es la que ocurre, por lo general usando un exceso de RO^- .

El metiléster de ácido graso y la glicerina surgen a partir del triglicérido en una reacción de equilibrio típicamente catalizada por base vía glicéridos parciales como productos intermediarios. La reacción es una típica reacción de estado estacionario, es decir, en una reacción en particular, las velocidades de formación del producto y la de su descomposición en los reactivos originales son la misma. La reacción puede progresar solamente por la remoción de los productos de reacción o añadiendo reactivos en exceso. La cinética de esta reacción es de segundo orden.

Por ejemplo, para el aceite de palma, la constante de reacción de degradación del triglicérido de aceite de palma a diglicérido a 60°C es de 0.036 con una energía de activación de 12.69 Kcal/mol, mientras que la constante de reacción de degradación del diglicérido de aceite de palma a monoglicérido a 60°C es de 0.07 con una energía de activación de 13.74 Kcal/mol.

El método catalizado por ácido tiene una leve variante, pero también es afectado por el impedimento estérico.

Por otro lado, la principal reacción secundaria que presenta la fabricación de biodiesel es la inevitable formación de jabones. Los jabones, al menos en cantidades correspondientes a trazas, aparecen en una reacción durante o después del proceso de transesterificación:

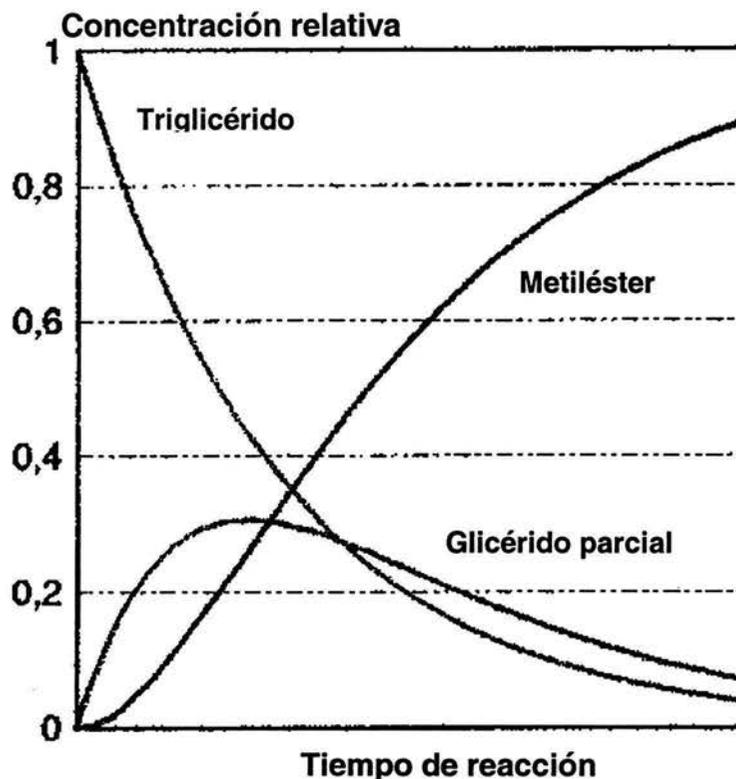
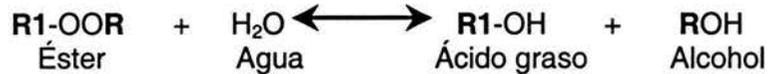
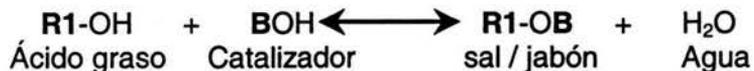


Figura 1. Representación de la cinética de reacción para la transesterificación de triglicéridos

Ésta es una reacción de equilibrio, cualquier base neutralizará al ácido formado, removiéndolo y forzando la reacción a la derecha. De tal manera, el producto de reacción entre la base y el ácido es una sustancia no deseada (un jabón, que es un agente emulsificante):



R1, R : Grupos alquilo.

B : Ion alcalino.

Estas reacciones tienen una ligera tendencia a ocurrir durante la transesterificación a causa de la pequeña e inevitable presencia de agua en el sistema. La fuente de agua que interfiere en la reacción puede estar contenida en el alcohol o en otros reactantes debido a su exposición a la atmósfera.

En cualquier caso, durante la etapa de transesterificación, sólo son necesarias trazas de jabón para provocar la emulsificación de la mezcla de reacción.

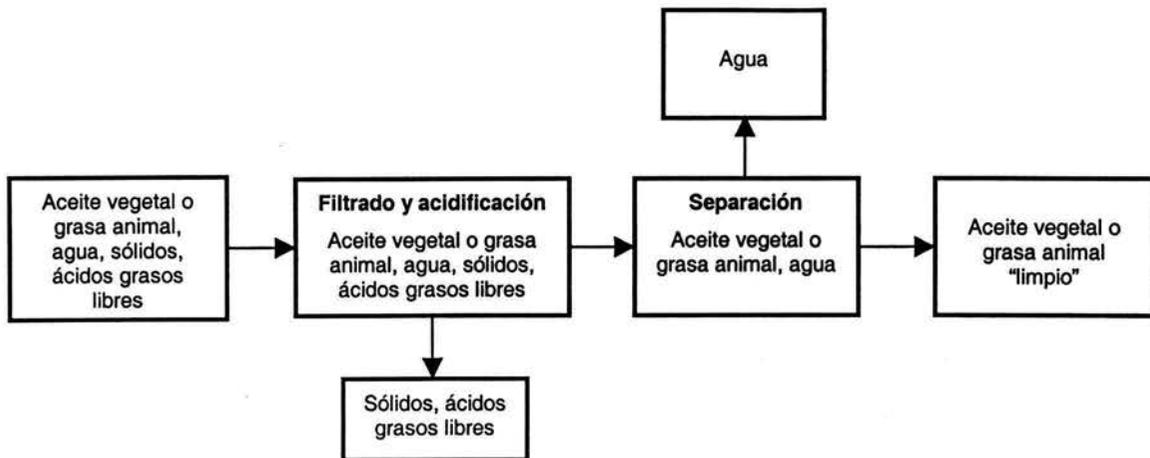
II.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL BIODIESEL ^{[7] [8]} _{[12] [13]}

Para producir biodiesel aplican dos tipos de proceso, el proceso batch o el continuo. Por ejemplo, la mayoría de las firmas en Estados Unidos emplean la tecnología batch para producir metiléster grado combustible (biodiesel), mientras que el proceso continuo es preferido en Europa y en Estados Unidos en procesos industriales para producir metilésteres de grado comercial, aunque actualmente el desarrollo tecnológico permite la producción continua de metiléster grado combustible.

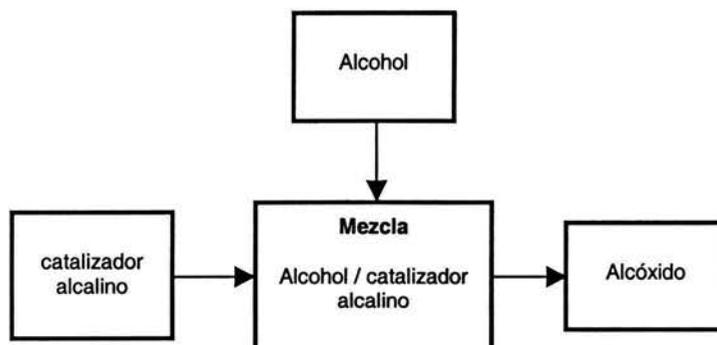
Los equipos de proceso que aplican en el proceso batch son de material inoxidable y el tamaño de un recipiente depende de la cantidad disponible de materias primas. Los recipientes usados tienen una capacidad para manejar de 5 a 10 mil litros de metiléster en proceso batch.

La producción de biodiesel catalizada por base generalmente ocurre usando los siguientes pasos:

-
1. **Pretratamiento.** La grasa o aceite a emplear como materia prima es primeramente filtrada y tratada para eliminar los sólidos y el agua que existen y que pueden interferir más adelante en la reacción. La acidificación procede con ácido mineral para convertir en ésteres a los ácidos grasos libres.



2. **Mezcla del alcohol y el catalizador.** El catalizador es típicamente hidróxido de sodio (sosa) o hidróxido de potasio (potasa). Éste es disuelto en alcohol (usualmente metanol) mediante un agitador estándar o mezclador para producir un alcóxido. Esta etapa es evitable usando directamente el catalizador en forma de alcóxido



3. **Reacción.** La mezcla alcohol/catalizador es entonces alimentada a un recipiente de reacción perfectamente cerrado y sellado para prevenir la pérdida de alcohol para alimentar simultáneamente el aceite o la grasa. La mezcla de reacción debe mantenerse justo abajo del punto de ebullición del alcohol para acelerar la reacción.
-

Un diagrama de bloques detallado del proceso del biodiesel aparece en la siguiente figura:

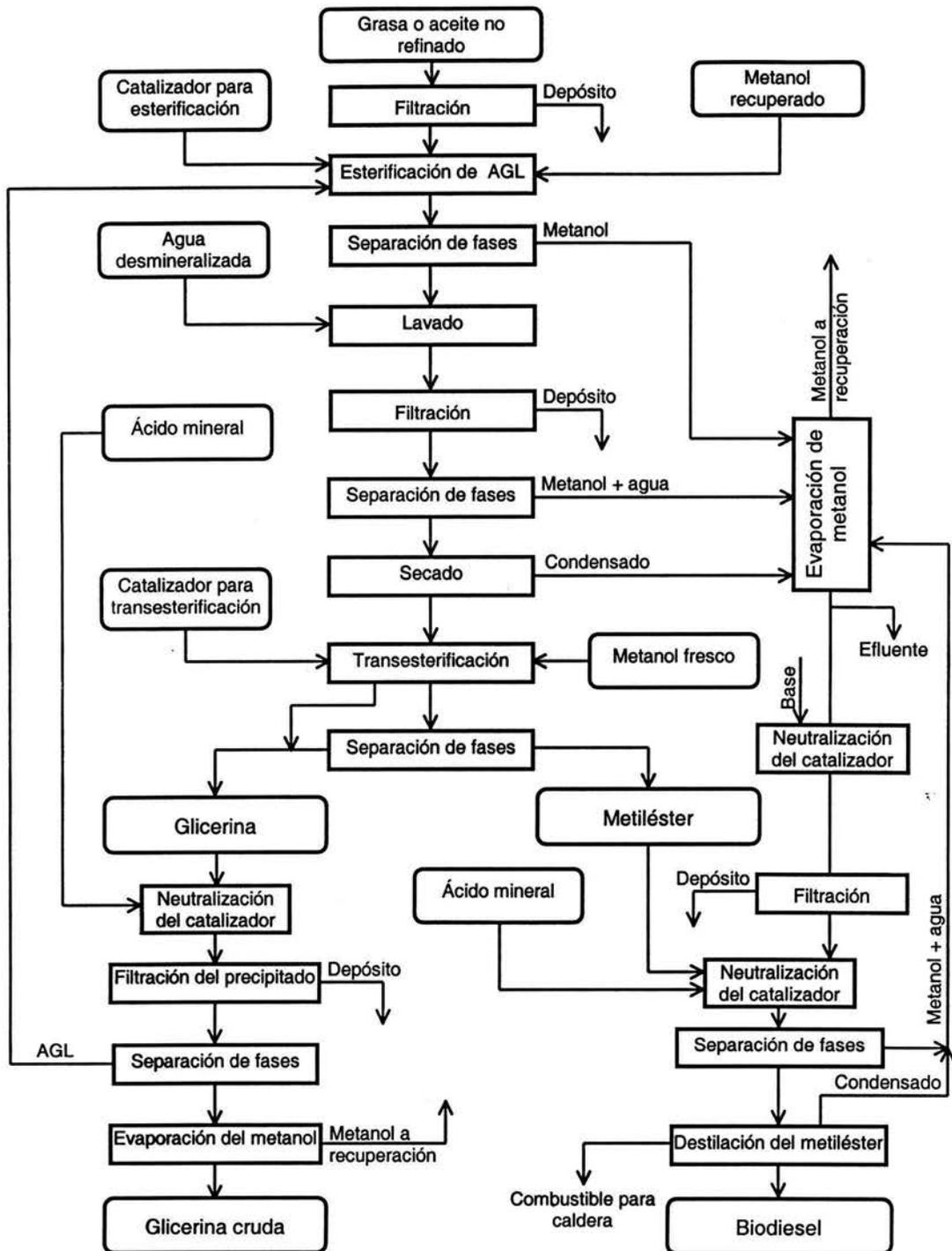
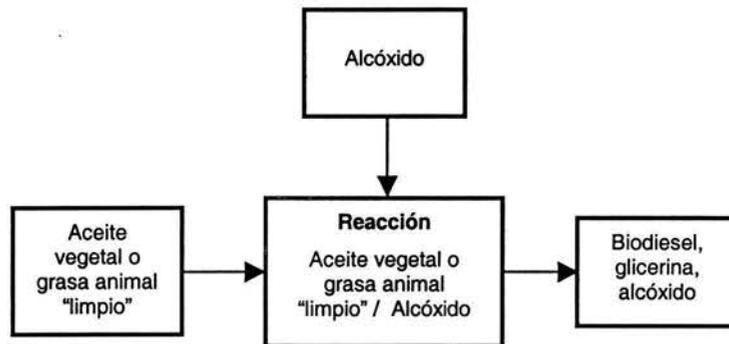


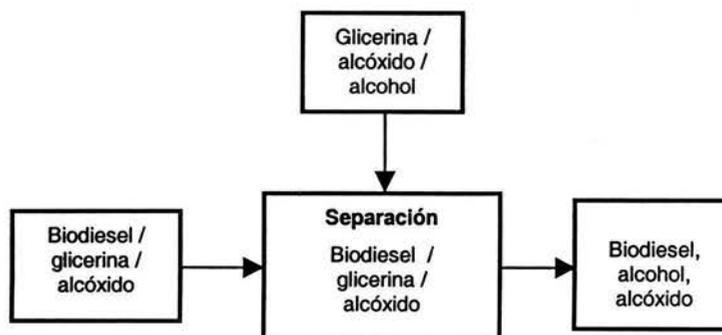
Figura 2. Esquema genérico de producción de biodiesel.

Un exceso de alcohol aplica para asegurar la conversión total de la grasa o aceite en sus ésteres.

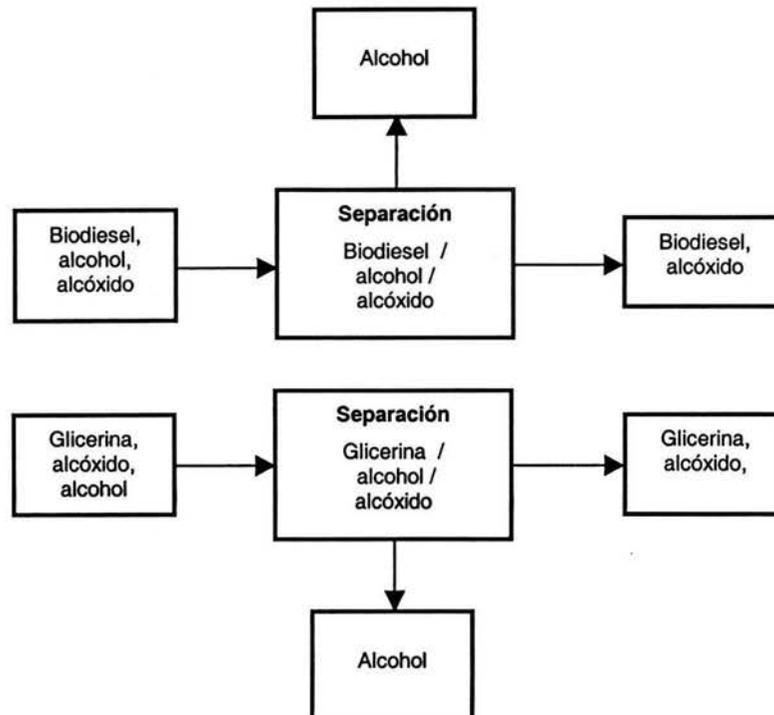
Hay que tener mucho cuidado en monitorear la cantidad de agua y de ácidos grasos en el aceite o grasa que entra al proceso. Si el nivel de agua y ácidos grasos es muy alto, puede ocasionar problemas por formación de jabón y dificultar la separación de la glicerina subproducto.



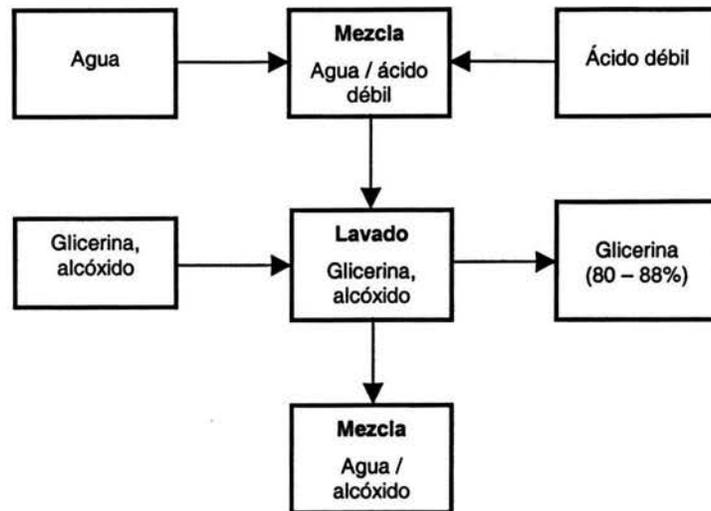
4. **Separación.** Una vez que la reacción es completada, existen dos productos principales: glicerina y biodiesel. Cada uno tiene una cantidad substancial de exceso del alcohol usado en la reacción. En ocasiones la mezcla de reacción es neutralizada cuando es necesario. La fase de la glicerina es mucho más densa que la del biodiesel y ambas pueden ser separadas por gravedad con el drene de la glicerina en el fondo de un recipiente separador. En algunos casos, es conveniente el empleo de una centrífuga para separar más rápido ambas fases.



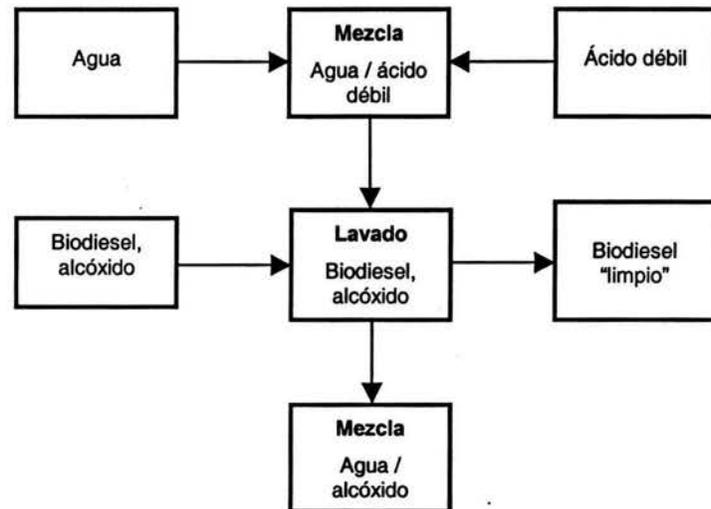
-
5. **Remoción del alcohol.** Una vez que ambas fases están separadas, el proceso implica la recuperación del alcohol excedente en cada fase con evaporación tipo flash o por destilación. Otros sistemas indican la remoción del alcohol excedente y la neutralización de la mezcla antes de la separación de la mezcla en glicerina y los metilésteres. En ambos casos, procede la recuperación del alcohol por destilación y su posterior reuso. Debe evitarse a toda costa que exista agua en la corriente del alcohol recuperado.



6. **Neutralización de la glicerina.** El proceso de neutralización del catalizador contenido en la glicerina subproducto consiste en la adición de ácido mineral para posteriormente enviar la glicerina a un tanque de almacenamiento de glicerina cruda. En algunos casos es recomendable realizar la recuperación de la sal formada durante esta fase para su uso como fertilizante, aunque en la mayoría de los casos la sal permanece en la glicerina. Posteriormente, procede la remoción del alcohol y del agua para producir glicerina con 80 – 88% de pureza, lista para su venta como glicerina cruda. En operaciones más sofisticadas, aplica la destilación de la glicerina mediante la destilación al vacío hasta alcanzar el 99% de pureza para su venta en tiendas farmacéuticas y de cosméticos, aunque es un método impráctico y no económico a pequeña escala.



7. **Lavado del metiléster.** Una vez separado de la glicerina, algunas veces es preferible la purificación del biodiesel con un ligero lavado con agua caliente para remover jabones y catalizador, para su posterior secado y envío a almacenamiento. En algunos procesos este paso es innecesario. Normalmente el fin del proceso de producción resulta en un líquido ámbar-amarillo claro con una viscosidad semejante a la del diesel. En algunos sistemas, destilar el biodiesel en un paso adicional sirve para remover pequeñas cantidades de pigmentos y así producir biodiesel incoloro.



8. **Calidad del producto y registro.** Antes de usarlo como un combustible comercial, el biodiesel producido es analizado usando un sofisticado equipo analítico para garantizar que cumple con las especificaciones que apliquen (ASTM, DIN y EN).

Los más importantes aspectos de la producción del biodiesel para asegurar una operación libre de problemas en los motores diesel son:

- Reacción completa.
- Remoción completa de la glicerina.
- Remoción completa del catalizador.
- Remoción completa del alcohol.
- Ausencia de ácidos grasos libres.

II.3 NORMAS Y ESPECIFICACIONES PARA EL BIODIESEL ^[3]

Varias organizaciones dedicadas a establecer especificaciones en el mundo han adoptado recientemente especificaciones para el biodiesel. Específicamente, ASTM aprobó recientemente una especificación para el biodiesel referenciada como D 6751. En adición, autoridades alemanas emitieron una especificación provisional bajo la DIN 51606. El Comité Europeo para la Estandarización (CEN) aprobó el establecimiento de un estándar técnico para biocombustibles y está referido como EN 14214 (ISO 14214). Las especificaciones europeas son más rigurosas para los límites de agua y sulfuros, así como para la prueba de estabilidad por oxidación, la cual es ausente en la especificación de ASTM.

Dependiendo del tipo de biomasa alimentada y del proceso de elaboración del biodiesel puro, éste debe estar basado en los requerimientos de ASTM D 6751 (antes ASTM PS121-99), o de una especificación europea aprobada, como DIN 51606 o EN 14214.

En México no existen estándares de prueba para el biodiesel, por lo que resulta conveniente adoptar las especificaciones DIN o EN porque son las más exigentes, ya que la calidad del biocombustible debe estar acorde a la del diesel producido en México. Las claves de control de calidad involucran la completa o casi completa remoción del alcohol, catalizador, agua, jabones, glicerina, ácidos grasos libres y triglicéridos no reaccionados o parcialmente reaccionados. La falla en la remoción de esos contaminantes causan que el metiléster producto no cumpla con uno o más estándares del combustible.

Los metil ésteres deben cumplir con las especificaciones mostradas en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones para biodiesel en diferentes países según sus propias normas.

	Unidades	Austria	República Checa	Francia	Alemania	Italia	Suecia	Australia	Europa	Estados Unidos
Estándar / Especificación		ON C1191	CSN 65 6507	Journal Oficial	DIN V 51606	UNI 10635	SS155436	Standard C1191	EN14214	ASTM PS121-99
Fecha de Implementación		Julio 1997	Sept 1998	Sept 1997	Sept 1997	Abril 1997	Nov 1996	Nov 1996	Julio 2001	Julio 1999
Aplicación*		FAME	RME	VOME	FAME	VOME	VOME	FAME	FAME	FAMAE
Densidad @15°C	g/cm ³	0.88 – 0.89	0.87 – 0.89	0.87 – 0.89	0.875 – 0.90	0.86 – 0.90	0.87 – 0.90	0.85 – 0.89	0.86-0.9	
Viscosidad @14°C	mm ³ /s	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5-5.0	1.9 – 6.0
Destilado 95%	°C			≤ 360		≤ 360				
Punto flash	°C	≥100	≥110	≥100	≥110	≥100	≥100		>101	≥100
Punto de taponamiento de filtro frío	°C	0/-15	-5		0/-10/-20		-5			
Punto de fluidez	°C			≤-10		≤0/≤-15		-15		
Sulfuros	%masa	≤0.02	≤0.02		≤0.01	≤0.01	≤0.001	≤0.02	<0.01	≤0.05
CCR 100%	%masa	≤0.05	≤0.05		≤0.05					≤0.05
10% destilado residuo	%masa			≤0.3		≤0.5				
Residuo sulfatado de carbón	%masa	≤0.02	≤0.02		≤0.03				0.02	≤0.02
Carbón (óxido)	%masa					≤0.01	≤0.01			
Agua	mg/kg		≤500	≤200	≤300	≤700	≤300		<500	≤0.05%
Total de contaminantes	mg/kg		≤24		≤20		≤20		<24	
Corrosión 3 horas / 50 °C			1		1					≤No.3
Índice de cetano		≥49	≥48	≥49	≥49		≥48	≥49	>51	≥40

Tabla 1. Especificaciones para biodiesel en diferentes países según sus propias normas.

	Unidades	Austria	República Checa	Francia	Alemania	Italia	Suecia	Australia	Europa	Estados Unidos
Estándar / Especificación		ON C1191	CSN 65 6507	Journal Oficial	DIN V 51606	UNI 10635	SS155436	Standard C1191	EN14214	ASTM PS121-99
Fecha de Implementación		Julio 1997	Sept 1998	Sept 1997	Sept 1997	Abril 1997	Nov 1996	Nov 1996	Julio 2001	Julio 1999
Aplicación*		FAME	RME	VOME	FAME	VOME	VOME	FAME	FAME	FAMAE
Densidad @15°C	g/cm ³	0.88 – 0.89	0.87 – 0.89	0.87 – 0.89	0.875 – 0.90	0.86 – 0.90	0.87 – 0.90	0.85 – 0.89	0.86-0.9	
Viscosidad @14°C	mm ³ /s	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5 – 5.0	3.5-5.0	1.9 – 6.0
Destilado 95%	°C			≤ 360		≤ 360				
Punto flash	°C	≥100	≥110	≥100	≥110	≥100	≥100		>101	≥100
Punto de taponamiento de filtro frío	°C	0/-15	-5		0/-10/-20		-5			
Punto de fluidez	°C			≤-10		≤0/≤-15		-15		
Sulfuros	%masa	≤0.02	≤0.02		≤0.01	≤0.01	≤0.001	≤0.02	<0.01	≤0.05
CCR 100%	%masa	≤0.05	≤0.05		≤0.05					≤0.05
10% destilado residuo	%masa			≤0.3		≤0.5				
Residuo sulfatado de carbón	%masa	≤0.02	≤0.02		≤0.03				0.02	≤0.02
Carbón (óxido)	%masa					≤0.01	≤0.01			
Agua	mg/kg		≤500	≤200	≤300	≤700	≤300		<500	≤0.05%
Total de contaminantes	mg/kg		≤24		≤20		≤20		<24	
Corrosión 3 horas / 50 °C			1		1					≤No.3
Índice de cetano		≥49	≥48	≥49	≥49		≥48	≥49	>51	≥40

Tabla 1. Especificaciones para biodiesel en diferentes países según sus propias normas (continuación).

	Unidades	Austria	República Checa	Francia	Alemania	Italia	Suecia	Australia	Europa	Estados Unidos
No. de neutralización	mgKOH/g	≤0.8	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.6			≤0.8
Metanol	%masa	≤0.2		≤0.1	≤0.3	≤0.2	≤0.2	≤0.2	<0.2	
Contenido de éster	%masa			≥96.5		≥98	≥98		>96.5	
Monoglicéridos	%masa			≤0.8	≤0.8	≤0.8	≤0.8		<0.8	
Diglicéridos	%masa			≤0.2	≤0.4	≤0.2	≤0.1		<0.2	
Triglicéridos	%masa			≤0.2	≤0.4	≤0.1	≤0.1		<0.4	
Glicerina libre	%masa	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.05	≤0.02	≤0.02	<0.02	≤0.02
Glicerina total	%masa	≤0.24	≤0.24	≤0.25	≤0.25			≤0.24	<0.25	≤0.24
No. de Iodo		≤120		≤115	≤115		≤125	≤120	120	
C18:3 y ácidos insaturados mayores	%masa	≤15								
Fósforo	mg/kg	≤20	≤20	≤10	≤10	≤10	≤10	≤20	<10	
Alcalinidad	mg/kg		≤10	≤5	≤5		≤10		<5	

RME: Rapeseed oil Metil Ester (metil éster de aceite de colza).

FAME: Fatty Acid Metil Ester (metil éster de ácido graso).

VOME: Vegetable oil Metil Ester (metil éster de aceite vegetal).

FAMAE: Fatty Acid Mono Alkil Ester (monoalquil éster de ácido graso).

CAPÍTULO III.

TECNOLOGÍAS COMERCIALES ^[39]

Desde principios de los 80, cuando fue producido el biodiesel por primera vez a escala piloto, han ido apareciendo diferentes rutas tecnológicas se reacción de transesterificación, siendo estas empleadas en los procesos comerciales desarrollados por las diferentes compañías que dedicadas a la elaboración comercial del biodiesel. La primera ruta fue la conocida como catalizada por ácido, que fue empleada por compañías como Henkel GmbH y Ballestra S.p.a. Esa tecnología fue desplazada por la ruta de reacción catalizada por base, utilizada con éxito en la actualidad dadas las condiciones de proceso tan benignas que requiere. Existen una cantidad relativamente grande de tecnólogos que usan esta ruta, entre las cuales figuran las 5 contempladas en este trabajo, descritas a continuación.

III.1 PROCESO BIOX^{[14] [15] [16] [17] [18] [36] [37]}

El proceso BIOX es una tecnología patentada propiedad de Biox Co. La tecnología del sistema de reacción de este proceso es innovadora en el campo de la producción de biodiesel, emplea una sola etapa de reacción que tiene por característica conseguir la transesterificación en una sola fase gracias al empleo de un cosolvente inerte que permite alcanzar el estado de equilibrio en relativamente poco tiempo con la dirección de desplazamiento de la reacción predominantemente hacia la formación de los productos; el cosolvente consigue la mezcla de los reactivos en una sola fase además de aumentar el volumen de la mezcla, que tiene por consecuencia que la concentración de los productos disminuya, logrando así que la constante de equilibrio de la reacción sea muy grande y confirmando que esta tecnología es muy eficiente en la realización de la reacción.

El proceso de producción continua del biodiesel empieza con la formación de la solución alcalina disolviendo hidróxido de sodio en metanol y formando rápidamente el metóxido de sodio, que queda en solución metanólica; la mezcla de dicha solución con el aceite vegetal y el tetrahidrofurano (cosolvente) pasa por precalentamiento y entra al reactor que es de tanque agitado, la reacción termina en poco tiempo (1 minuto) a 60°C. Después del término de la reacción, el metanol y el tetrahidrofurano pasan por destilación en una columna, por el domo salen estos ya destilados y en los fondos quedan el metiléster, la glicerina y las impurezas producidas durante la reacción, que son principalmente agua, jabones, catalizador, trazas de metanol y muy pequeñas cantidades de compuestos orgánicos consistentes de monoglicéridos y diglicéridos productos de una reacción incompleta, así como de los triglicéridos del aceite que hayan quedado sin reaccionar.

Los fondos de la columna retoman su naturaleza inmiscible, puesto que el cosolvente fue extraído junto con el metanol para su recirculación, para proseguir con la separación de la fase acuosa de la fase grasa del metiléster por centrifugación y su posterior neutralización con la adición de ácido sulfúrico, los jabones formados retoman nuevamente la forma de ácidos grasos libres; una vez más el proceso de centrifugación aplica para separar las fases acuosa y grasa formadas en la neutralización; la fase grasa entra a un sistema de columnas de lavado que usan agua desmineralizada a contracorriente saliendo el metiléster libre de trazas de metanol, tetrahidrofurano, glicerina, ácidos grasos y sales de sodio por el domo y el agua de lavado con los componentes mencionados por el fondo de la última torre, el

metiléster entra entonces a un secador para eliminar el contenido de humedad para finalmente enviar biodiesel producido a almacenamiento.

La mezcla formada con la fase acuosa que sale de la centrifugación y el agua saliente del sistema de lavado entran a una etapa de purificación de glicerina, la cual consiste primeramente de un secador para eliminar el agua, que junto con el agua proveniente del secador de metiléster, retorna mediante recirculación a la sección de lavado, la glicerina ya seca pasa a una columna de destilación de glicerina, logrando en ésta un producto con alto grado de pureza. La glicerina obtenida alcanza un grado de pureza de por lo menos 99% grado USP con alto valor comercial para la industria farmacéutica.

Finalmente, el producto de la reacción de esterificación de los ácidos grasos libres (AGL) producidos con metanol y ácido sulfúrico concentrado entran a un mezclador situado a la salida del segundo separador de transesterificación.

Rendimiento del proceso

Representa el porcentaje del aceite vegetal alimentado al proceso transformado específicamente en el metiléster producido. El rendimiento de este proceso alcanza el 99%.

Productos

El biodiesel producido cumple con las normas ASTM, DIN y EN, la glicerina alcanza una pureza grado USP.

Economía

La inversión estimada es de 1.25 USDIs/galón/año de biodiesel producido para una planta que produce de 2 a 6 millones de galones por año, 1.00 USDIs/galón/año de biodiesel para una planta que produce de 6 a 10 millones de galones por año y 0.75 USDIs/galón/año de biodiesel para plantas que producen más de 10 millones de galones por año.

Plantas comerciales

Actualmente está en etapa de diseño una planta de 54 mil toneladas por año y es factible que su construcción inicie a finales de 2004 en el sur de Ontario, Canadá.

Materias primas, agentes químicos y servicios auxiliares por tonelada métrica de biodiesel producido

Vapor de media	1.49 Ton
Agua desmineralizada	0.02 Ton
Electricidad	19.7 kWh
Nitrógeno gas	1 m ³
Agua de enfriamiento	3.52 Ton
Tetrahidrofurano	0.005 Ton
Hidróxido de sodio	0.033 Ton
Aceite vegetal < 30 % AGL	1 Ton
Metanol	0.11 Ton
Ácido sulfúrico	0.045 Ton

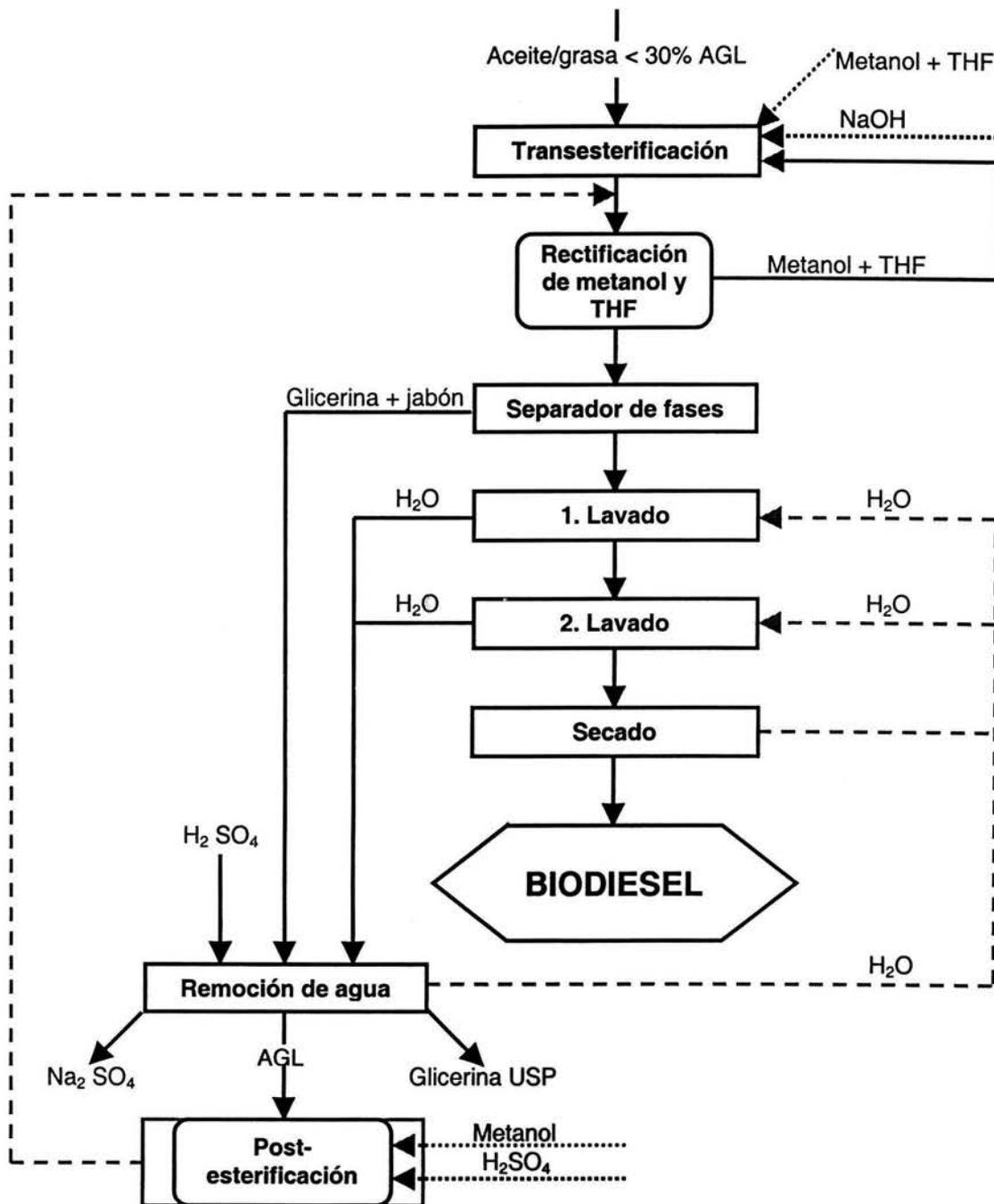


Figura 3. Diagrama de bloques del proceso BIOX

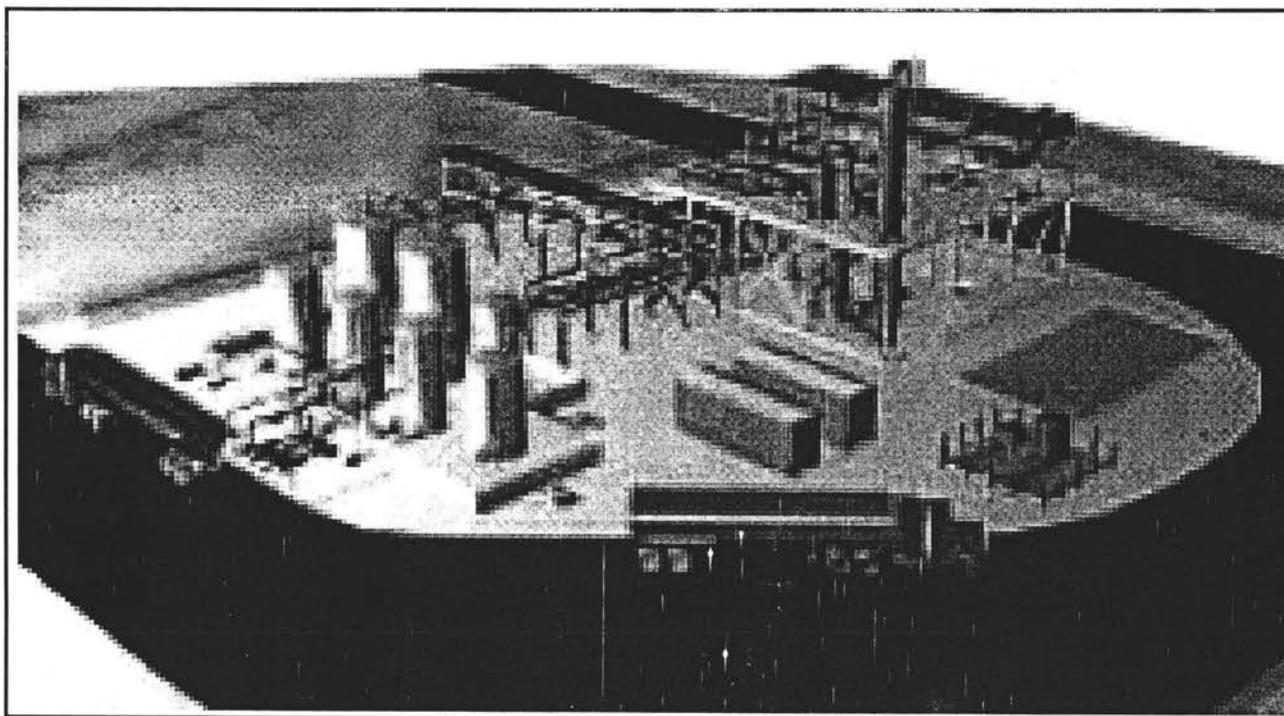


Figura 4. Vista de una planta de Biox Co. para producir de biodiesel en maqueta electrónica

III.2 PROCESO CTER^[19] [20] [21]

El proceso CTER (Continuous Trans Esterification Reaction) es una tecnología patentada propiedad de Energea Umwelttechnologie GmbH. El sistema de reacción de transesterificación consiste de dos reactores dispuestos en serie, cada uno con un dispositivo de separación de fases por medio de micro y nanofiltración. Los reactores son de agitación estática patentados por Energea, en los cuales la alimentación de la mezcla heterogénea de los reactivos requiere una muy alta presión, esta técnica permite la formación de una emulsión de gotas sumamente finas, consiguiendo con ésto un área interfacial muy grande entre las fases de los reactivos que son inmiscibles entre sí, y en consecuencia, la velocidad de reacción alcanzada es muy alta. En este proceso la velocidad de reacción impone la velocidad de separación de las fases de los productos, que también son inmiscibles entre sí, para lo cual es necesario el uso de filtros de malla molecular, dando por resultado el poder alcanzar la separación a la misma velocidad que la de reacción.

El proceso continuo inicia con un pretratamiento del aceite materia prima consistente en una reacción entre los ácidos grasos libres provenientes del aceite con el ácido sulfúrico concentrado mezclado con metanol llamada esterificación, cuyo propósito es generar metilésteres a partir de los ácidos grasos libres evitando la posterior saponificación de éstos en la etapa de transesterificación y la formación de jabones, que son un componente muy dañino para el proceso de producción de biodiesel.

La producción específica del biodiesel en proceso continuo inicia con el mezclado del catalizador (hidróxido de potasio) en metanol para formar la solución metanólica alcalina con radicales de metóxido de potasio, la mezcla de dicha solución con la fuente de triglicéridos (grasa o aceite) entra al primer reactor inyectada con una bomba de alta presión a una presión de 200 bar y 60°C. En su trayecto dentro del reactor, las materias primas reaccionan para alcanzar rápidamente el equilibrio (20 segundos). Los productos entran a la presión mencionada en un sistema de filtración cuyo medio de filtración es malla molecular; la fase correspondiente a la glicerina pasa a una etapa de destilación y la fase del metiléster entra nuevamente mezclada con la solución alcalina al segundo reactor mediante una bomba de alta presión a 200 bar y 60°C, ésta brinda un servicio de características idénticas al primero, y de la misma manera, su correspondiente sistema de separación de fases.

El metiléster separado contiene aún metanol, restos de catalizador, trazas de jabón y glicerina, la extracción de los componentes mencionados aplica en dos etapas de lavado con agua desmineralizada, llevada a cabo en un arreglo en serie de torres de lavado.

Finalmente el metiléster ya libre de impurezas, entra a un sistema de evaporación del metanol restante y después pasa por un secador para eliminar el agua y recircularla a la etapa de lavado. El producto final es biodiesel que va a almacenamiento.

La mezcla de las corrientes de glicerina que por impurezas contienen agua, metanol, jabón y catalizador que salen de los sistemas de separación asociados a los reactores de transesterificación, con las corrientes acuosas provenientes del sistema de lavado llevada a cabo en un recipiente con agitación, así como con ácido sulfúrico concentrado, da origen a una reacción entre el ácido y los jabones contenidos en las corrientes mencionadas para producir sulfato de potasio (con valor comercial en la agricultura) y ácidos grasos libres, para la recirculación de estos últimos hacia la etapa de esterificación. Simultáneamente, en el mismo recipiente ocurre la neutralización del catalizador restante; la extracción de la fase formada de ácidos grasos procede por sedimentación y la del sulfato de potasio mediante cristalización. El subproducto consistente en glicerina cruda entra a un sistema de evaporación de metanol y secado para la eliminación de agua.

La mezcla del metanol proveniente de esta última etapa con el proveniente de la etapa de purificación del biodiesel pasa a una corriente de recirculación hacia la sección de transesterificación; de la misma manera, la mezcla del agua proveniente de la etapa de secado de la glicerina con la proveniente de la etapa de purificación de biodiesel entra nuevamente a la etapa de lavado de metiléster mediante recirculación.

La glicerina cruda obtenida tiene un valor de pureza de 80%, con cierto valor comercial en la industria química.

Rendimiento del proceso

El rendimiento reportado para este proceso de producción de biodiesel respecto al aceite o grasa alimentado es de 99.9%.

Economía.

La inversión estimada para la planta modular es de 0.69 USDIs/galón/año para producir 12 millones de galones por año de biodiesel.

Materias primas, agentes químicos y servicios auxiliares por tonelada métrica de biodiesel producido

Vapor de media	0.091 Ton
Agua desmineralizada	0.02 Ton
Electricidad	50 kWh
Agua de enfriamiento	1.38 Ton
Hidróxido de potasio	0.03 Ton
Aceite vegetal desgomado	1 Ton
Metanol	0.11 Ton
Ácido sulfúrico	0.028 Ton

Plantas comerciales

Existen referencias de 4 plantas comerciales de biodiesel en operación; en Australia con 12 millones de galones por año, en Inglaterra con 75 millones de galones al año, en España con 12 millones de galones al año y en Austria con 45 millones de galones al año.

Productos

El biodiesel producido cumple las normas ASTM, DIN y EN, la glicerina no pura alcanza una pureza del 80%. Entre los productos también está el sulfato de potasio, con valor en la agricultura como fertilizante.

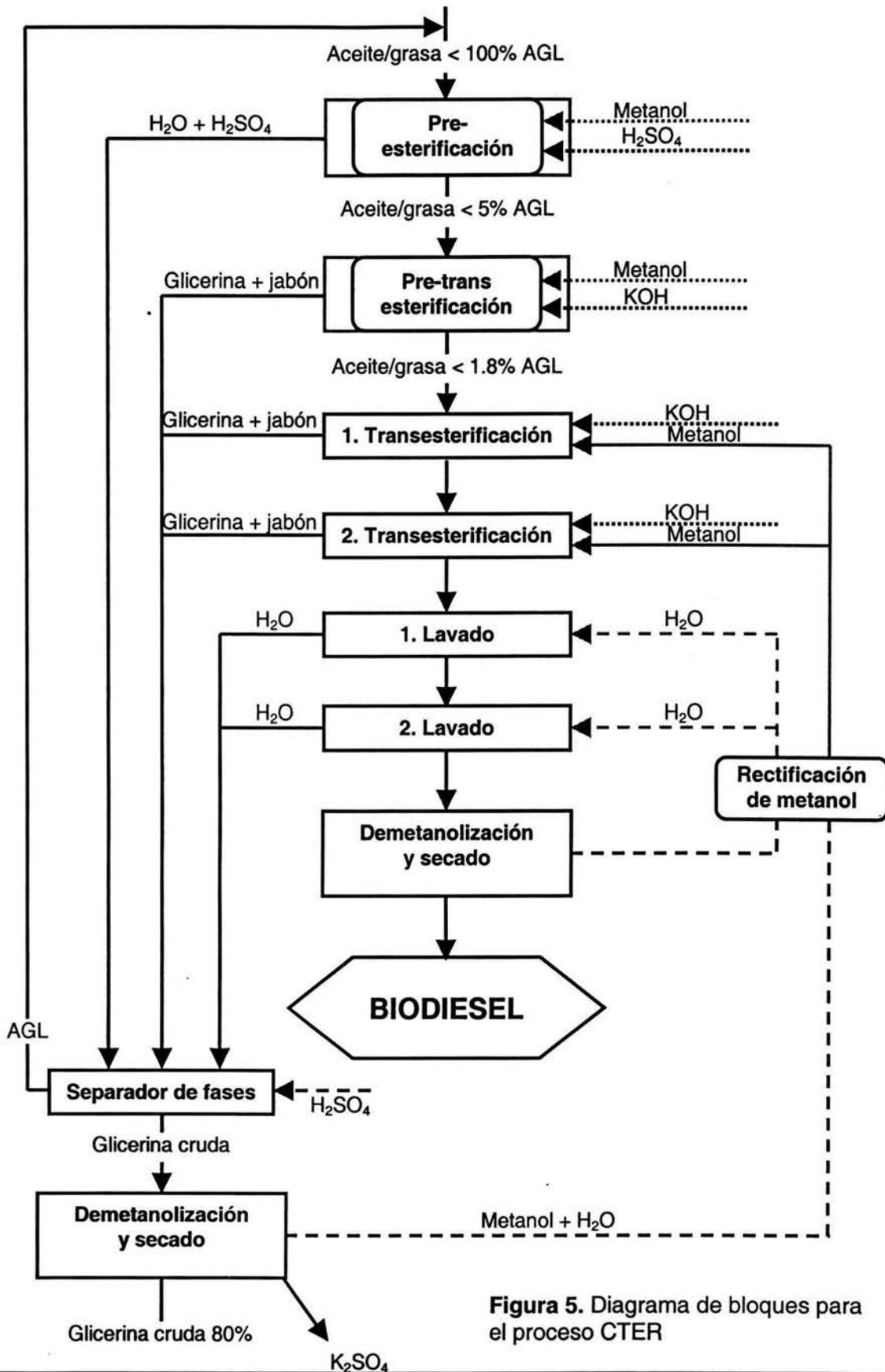


Figura 5. Diagrama de bloques para el proceso CTER

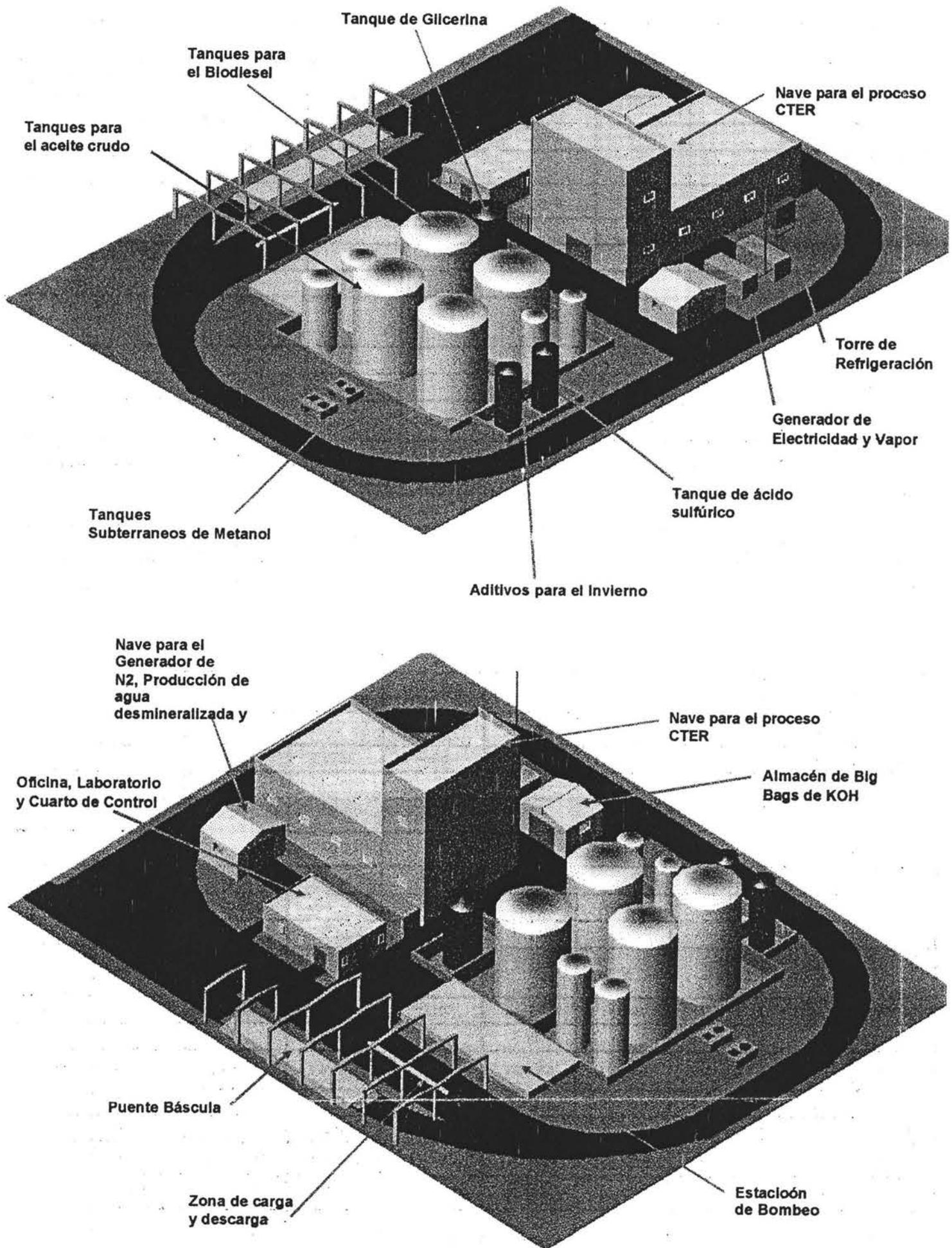


Figura11. Vista de una planta de Energea GmbH para producir biodiesel en maqueta electrónica

III.3 PROCESO CD ^[22] ^[23]

El proceso CD (Continuos Deglycerolisation) es una tecnología patentada propiedad de Ölmühle Connemann Leer GmbH. El sistema de reacción de transesterificación consiste de dos etapas de reacción en serie, cada etapa incluye dos reactores, seguida cada una de ellas por un sistema de separación de fases por medio de centrifugación. Cada etapa de reacción consta de una columna reactiva seguida de un reactor de tanque agitado, para posteriormente centrifugar el producto. Las columnas reactivas son el elemento tecnológico fundamental del proceso, en ellas la reacción alcanza un alto porcentaje de conversión para encontrar su complemento en los reactores de tanque agitado, este principio permite que el proceso esté en posibilidad de manejar capacidades muy grandes que son muy difíciles de lograr con otras tecnologías. En consecuencia, la velocidad de producción es muy alta. En esta tecnología, la rapidez de reacción impone la velocidad necesaria de separación de las fases del producto de reacción.

La producción del biodiesel en proceso continuo inicia con la elaboración del metóxido de sodio por medio de la mezcla del metanol y el hidróxido de sodio para formar la solución metanólica alcalina, una vez formada entra en contacto con el aceite vegetal en un mezclador ya sea estático o de agitación para alimentar esta mezcla a la primera torre reactiva (por el domo) de la primera etapa de reacción, por el fondo de la torre sale la corriente de la glicerina ya formada y de la zona inferior de la torre en forma lateral sale la corriente de metiléster formado, al igual que la corriente de glicerina, con impurezas como mono, di y triglicéridos no reaccionados, metanol, agua, jabones y catalizador; esta corriente pasa al segundo reactor de la primera etapa de transesterificación que es de tanque agitado, en el cual la reacción alcanza el estado estacionario y su producto a la salida aumenta su temperatura a 80°C para su posterior neutralización con un buffer en solución acuosa de pH entre 8 y 10, entra a una sección de centrifugación de la primera etapa para lograr la separación de la fase del metiléster de la de la glicerina.

El metiléster centrifugado es entonces alimentado al primer reactor de la segunda etapa de reacción (la segunda torre reactiva) y el procedimiento es idéntico al de la primera etapa de reacción.

Posteriormente el metiléster elaborado y separado entra a una columna de agotamiento para separar el metanol que acompaña al metiléster. Éste ya libre de metanol entra a un proceso

de lavado para extraer otras impurezas acuosas con agua desmineralizada a 80°C, entonces el metiléster queda libre del catalizador, sales, metanol residual, glicerina y jabones, este proceso de lavado procede en dos etapas en serie que concluyen cada una por separado con centrifugación para separar la fase acuosa que contiene las impurezas de la fase grasa correspondiente al metiléster.

El metiléster ya lavado pasa a un secador que opera a 120°C y 0.88 atm en donde pierde la humedad para finalmente pasar por un enfriador y un filtro; el biodiesel producido va a almacenamiento.

Las corrientes de glicerina provenientes de la sección de reacción pasan a una sección de purificación de glicerina que consiste en la destilación del metanol contenido para posteriormente eliminar el agua en un secador y finalmente destilar la glicerina para liberarla de compuestos orgánicos como ácidos grasos y glicéridos parciales junto con los triglicéridos no reaccionados.

El metanol destilado de la glicerina y del metiléster entra nuevamente a la sección de reacción mediante recirculación, de la misma manera ocurre con el agua, que pasa nuevamente a la sección de lavado de metiléster. El metanol destilado de la glicerina y del metiléster pasa mediante recirculación a la sección de reacción, de la misma manera ocurre con el agua hacia a la sección de lavado de metiléster.

La glicerina obtenida tiene una pureza del 99.5% con alto valor comercial en la industria farmacéutica.

Rendimiento del proceso

El proceso de metiléster presentado muestra un rendimiento de 99.6% respecto del aceite alimentado al proceso.

Productos

El biodiesel elaborado cumple con las normas ASTM, DIN y EN y la glicerina alcanza una pureza de 99.5% grado USP.

Plantas comerciales

Existen referencias de 5 plantas comerciales en operación. La primera construida en 1991 con una capacidad de 292 millones de galones por año de biodiesel, en 1993 entra en operación otra con una capacidad de 1,462 millones de galones por año y en 1995 entra en operación una tercera con una capacidad de 17.8 millones de galones por año, las tres en Alemania, en 1996 entra en operación una planta de 29.7 millones de galones por año en Francia y en 2001 entra en operación una planta de 23.8 millones de galones por año en Ucrania. Actualmente existe otra que está en etapa de construcción.

Materias primas, agentes químicos y servicios auxiliares por tonelada métrica de biodiesel producido

Vapor de media	0.30 Ton
Agua desmineralizada	0.02 Ton
Electricidad	25 kWh
Nitrógeno gas	1 m ³
Agua de enfriamiento	3.20 Ton
Hidróxido de sodio	0.0085 Ton
Aceite vegetal < 5% AGL	1 Ton
Metanol	0.11 Ton
Ácido clorhídrico	0.011 Ton

Economía

La inversión estimada es de 0.84 USDls/galón/año para una planta de 17.8 millones de galones al año de biodiesel.

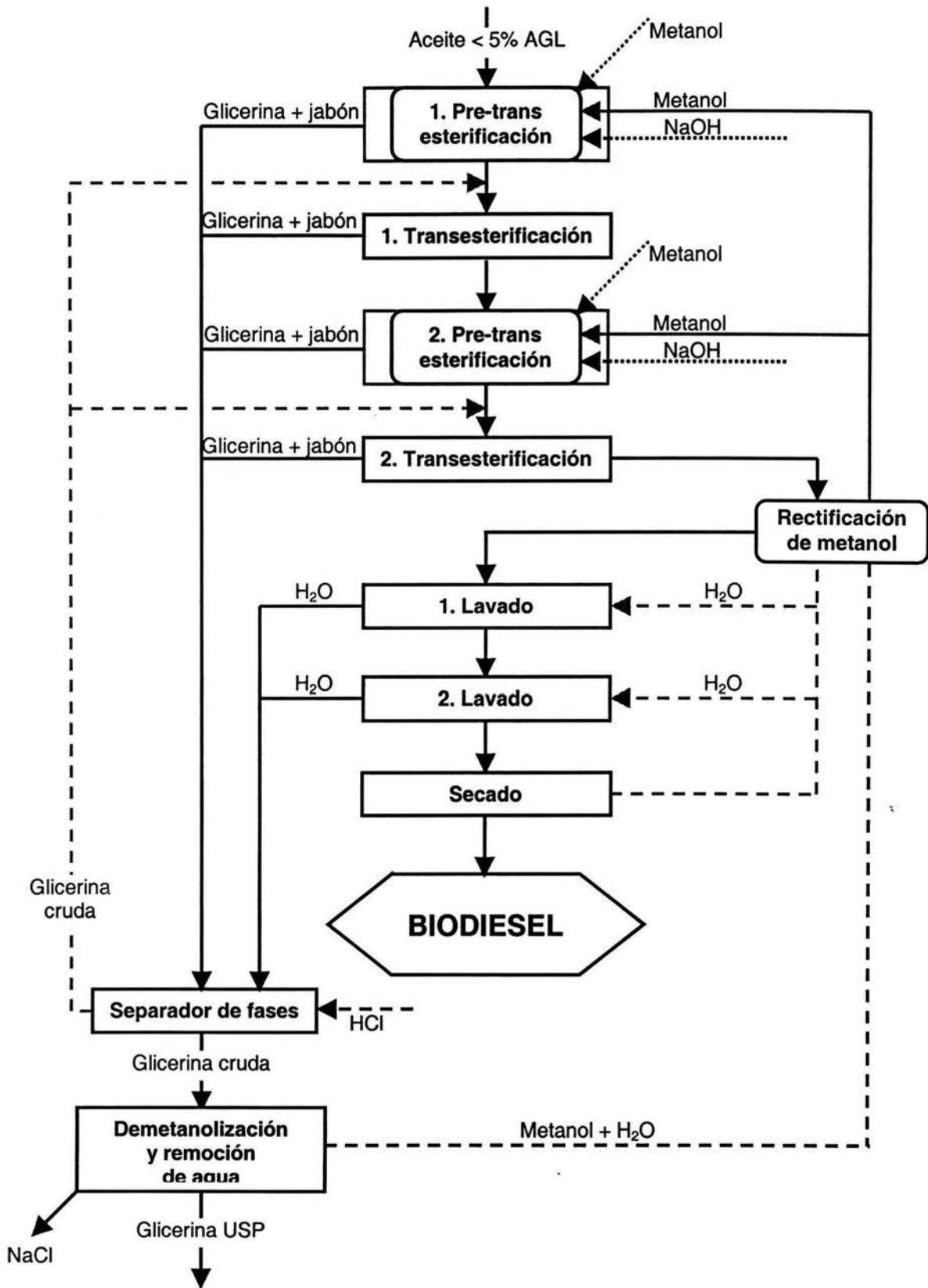


Figura 7. Diagrama de bloques para el proceso CD

III.4 PROCESO LURGI [18] [24] [25] [26]

El proceso Lurgi es una tecnología patentada propiedad de Lurgi PSI Metallgesellschaft GmbH. El sistema de reacción de transesterificación comprende dos etapas de reacción en serie cada una con su correspondiente tanque sedimentador de separación de fases. Ambos reactores son de tipo tanque agitado y están patentados por Lurgi. En esta tecnología el esquema de reacción presenta la particularidad de que la fase acuosa separada del producto de la segunda etapa de reacción y que corresponde a la glicerina, es íntegramente recirculada hacia el reactor de la primera etapa, llevando consigo el metanol y el catalizador, además de otras impurezas como agua y jabones, aunque en muy poca proporción, con este recurso la tecnología ofrece la optimización de la reacción en el primer reactor, dado que aumenta la cantidad de metanol y del catalizador y el equilibrio químico de la reacción tiende aún más hacia la formación de los productos.

El proceso inicia con la disolución del metóxido de sodio en metanol para formar la mezcla metanólica alcalina, la mezcla de tal solución con el aceite previamente refinado entra al primer reactor en el cual, después de alcanzar el estado estacionario de la reacción de transesterificación, la mezcla de reacción pasa a un sistema de separación de fases, y la fase correspondiente al metiléster entra nuevamente mezclado con otra cantidad de solución alcalina al segundo reactor y el proceso de reacción, así como el de separación ocurre nuevamente de manera idéntica al de la primera etapa de reacción, con la diferencia de que la glicerina obtenida en el segundo separador entra al primer reactor mediante recirculación al primer reactor. El metiléster obtenido pasa a un proceso de lavado para eliminar las impurezas (jabón, catalizador, glicerina y metanol) con agua desmineralizada y ácido clorhídrico en un sistema de columnas de lavado en serie. El metiléster lavado que sale por el domo de la última columna pasa a un secador en donde pierde el agua contenida y el biodiesel producido va a almacenamiento.

La mezcla formada por el agua saliente de los fondos de las torres de lavado con la glicerina obtenida del primer tanque separador de fases entra a una columna de destilación previamente acidificada con ácido clorhídrico para obtener metanol que pasa mediante recirculación hacia la etapa de reacción; en los fondos de la torre sale glicerina, agua y ácidos grasos; la separación de éstos últimos tiene lugar en un tanque separador de fases y la neutralización de la glicerina acidificada sucede con hidróxido de sodio en un tanque

agitado; la glicerina entra a un sistema de evaporación de agua, el agua obtenida pasa al tren de torres de lavado por medio de recirculación y la glicerina cruda entra a un sistema de destilación de glicerina para obtenerla con alto grado de pureza.

Finalmente, ocurre la esterificación de los ácidos grasos libres (AGL) producidos con metanol y ácido sulfúrico concentrado y la recirculación del producto de reacción hacia la salida del segundo separador de transesterificación.

La glicerina obtenida tiene una pureza de 99.8% con alto valor comercial en la industria farmacéutica.

Rendimiento del proceso

El rendimiento del aceite para convertirlo en metiléster en el proceso es de 99.2%.

Plantas comerciales

Existen referencias de 10 plantas en operación a escala comercial. En 1988 entra en operación una planta de 20 millones de galones por año en Estados Unidos, en 1991 entra en operación una planta de 25 millones de galones por año en Indonesia, en 1992 entra en operación una planta de 6 millones de galones por año en Hungría, en 1998 entra en operación otra planta de 20 millones de galones por año en Estados Unidos, en 2002 entra en operación una planta de 30 millones de galones por año en Alemania, en 2003 entra en operación una planta de 750 mil galones por año en España, en 2004 entra en operación otra planta de 12 millones de galones por año en España, una de 10 millones de galones por año en Alemania, una de 18 millones de galones por año también en Alemania y finalmente está en etapa de construcción otra de 2.8 millones de galones por año en Estados Unidos.

Productos

Se produce biodiesel que cumple con las normas ASTM, DIN y EN, así como glicerina grado USP al 99.8% de pureza.

Economía.

La inversión varía según el rango de producción, para una producción de 15.8 millones de galones al año es de 0.89 USDIs/galón/año y para 31.7 millones de galones al año es de 0.65 USDIs/galón/año.

Materias primas, agentes químicos y servicios auxiliares por tonelada métrica de biodiesel producido

Vapor de media	0.415 Ton
Agua desmineralizada	0.02 Ton
Electricidad	12 kWh
Nitrógeno gas	1 m ³
Agua de enfriamiento	3.20 Ton
Hidróxido de sodio	0.0015 Ton
Metóxido de sodio	0.005 Ton
Aceite vegetal < 20% AGL	1 Ton
Metanol	0.096 Ton
Ácido sulfúrico	0.028 Ton
Ácido clorhídrico	0.01 Ton

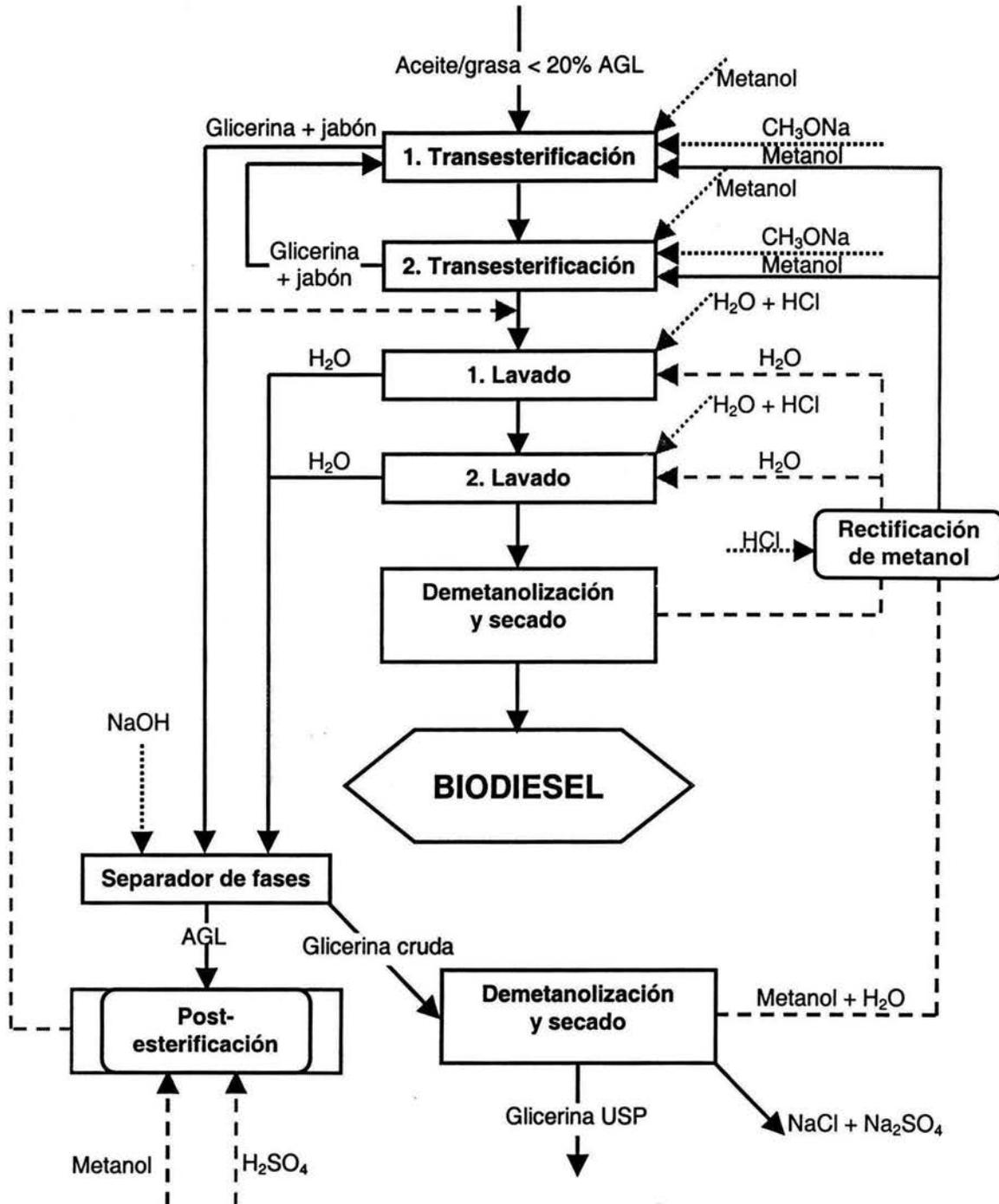


Figura 8. Diagrama de bloques del proceso LURGI

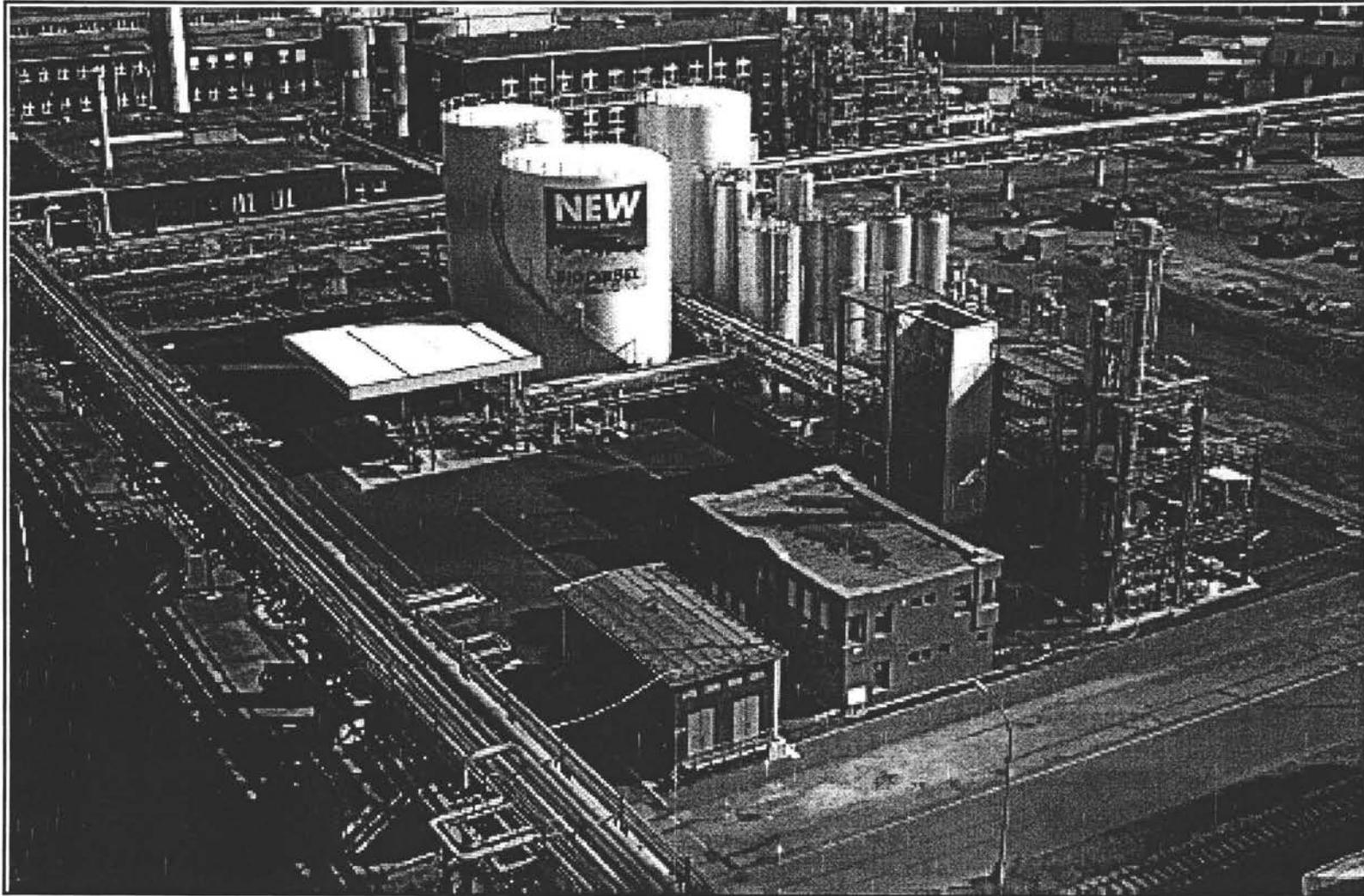


Figura 9. Vista panorámica de una planta de Lurgi GmbH para producir biodiesel

III.5 PROCESO IWP * [27] [32]

El proceso es una tecnología desarrollada por Imperial Western Products Inc. El esquema de reacción asociado a esta tecnología permite que simultáneamente a la reacción de transesterificación y en la misma sección de reacción tenga lugar la reacción de esterificación de los ácidos grasos libres provenientes del aceite empleado como materia prima. La reacción ocurre en dos etapas, en cada una de las cuales primero sucede la reacción de transesterificación de los triglicéridos junto con la inevitable saponificación de los ácidos grasos libres, cuando la reacción alcanza el equilibrio, la masa producida pasa al segundo reactor, en el cual, mediante la adición de ácido sulfúrico y más metanol, los jabones formados regresan a su estado de ácidos grasos libres y seguidamente reaccionan formando metilésteres, el producto queda neutralizado, para finalmente, después de un periodo de sedimentación en el mismo reactor de esterificación para la separación de las fases grasa y acuosa, enviar la fase grasa correspondiente al metiléster a las etapas sucesiva de separación y purificación del biodiesel, y de la misma forma para la fase acuosa consistente de glicerina.

La producción continua de biodiesel inicia con la preparación del metóxido de sodio en solución alcalina de metanol mediante la disolución del hidróxido de sodio en el metanol, la mezcla de esta solución con el aceite vegetal entra al reactor de transesterificación de la primera etapa de reacción, luego de esperar el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio en un reactor agitado a 60°C, para después hacer pasar el producto de reacción al segundo reactor de la primera etapa para reaccionar con una solución ácida de ácido sulfúrico en metanol con el propósito de convertir los jabones en ácidos grasos libres y provocar su esterificación en medio ácido para producir metilésteres. Después de alcanzar la formación de los productos deseados, este mismo reactor actúa como tanque separador de fases, proceso que dura lo mismo que lo que la reacción de transesterificación, es decir, aproximadamente una hora.

Una vez separada la fase del metiléster de la de la glicerina, ambas con las mismas impurezas producidas en las reacciones aunque naturalmente en diferente concentración, ésta entra al primer reactor de la segunda etapa de reacción, el procedimiento en esta segunda etapa es idéntico al de la primera.

* Información otorgada por licenciador

El metiléster separado pasa a un evaporador para eliminar el metanol, para posteriormente entrar a un sistema de columnas de lavado, el cual emplea agua desmineralizada para extraer las impurezas como sales y trazas de glicerina, la corriente de salida de metiléster pasa por centrifugación para separar la fase acuosa y finalmente por un secador para eliminar la humedad y enviar el biodiesel producido a almacenamiento.

La fase de la glicerina separada en la sección de reacción, entra a una columna de destilación para extraer el metanol, la mezcla de éste con el del evaporador de la purificación del metiléster pasa por recirculación hacia la sección de reacción. Posteriormente entra un secador para eliminar el agua contenida y finalmente la glicerina va a almacenamiento con un alto valor de pureza.

La glicerina así obtenida está libre de metanol y agua, pero aún contiene sales y subproductos orgánicos de reacción consistentes en mono, di y triglicéridos no reaccionados, el grado de pureza alcanzado es de 90%, un valor de pureza adecuado para su uso como solvente en la industria química.

Rendimiento del proceso

El rendimiento representa la relación del metiléster producido respecto a la cantidad de aceite alimentado al proceso y tiene un valor de 98%.

Materias primas, agentes químicos y servicios auxiliares por tonelada métrica de biodiesel producido

Vapor de media	0.35 Ton
Agua desmineralizada	0.033 Ton
Electricidad	100 kWh
Agua de enfriamiento	2.04Ton
Hidróxido de sodio	0.033 Ton
Aceite vegetal < 40% AGL	1.02 Ton
Metanol	0.11 Ton
Ácido sulfúrico	0.007 Ton

Plantas comerciales

Existe una planta de producción comercial de biodiesel que opera desde hace 2 años con una capacidad de 10 millones de galones por año en California, Estados Unidos.

Productos

El proceso genera biodiesel que cumple con las normas ASTM y glicerina con una pureza de 90%

Economía

La inversión está en el rango de 0.5 a 1.0 USDIs/galón/año de biodiesel producido.

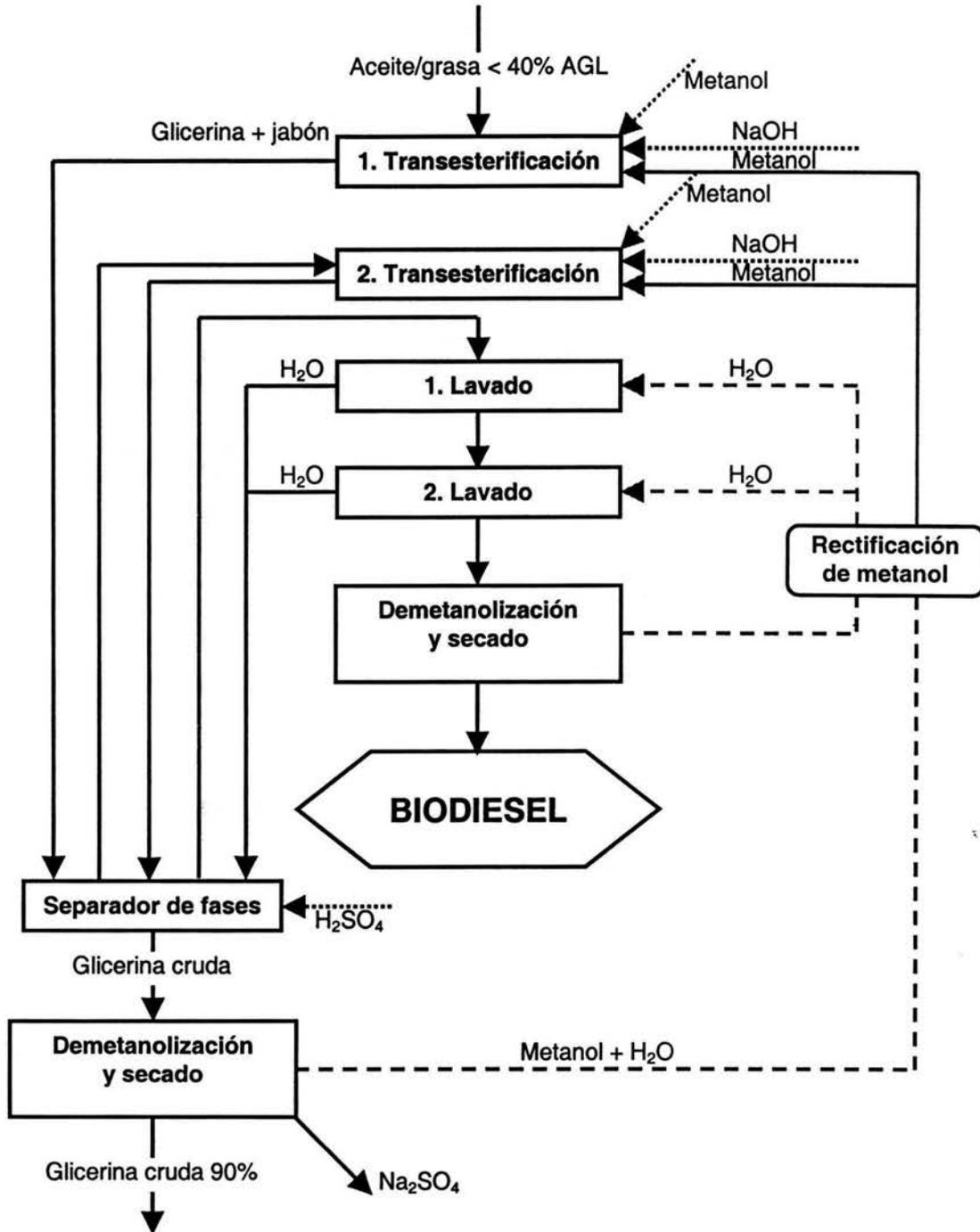


Figura 10. Diagrama de bloques del proceso IWP

CAPÍTULO IV.

MÉTODO EMPLEADO PARA LA EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS ^[33]

Para realizar una evaluación de las tecnologías, es común el uso del criterio basado en la experiencia para analizar los datos que ofrecen los tecnólogos acerca de las características de su tecnología, desplegándolos en un matriz comparativa y tomando decisiones según su sensibilidad hacia los datos propuestos. Para ello es necesario tener realmente la suficiente experiencia para poder hacer un dictámen certero y así poder seleccionar la o las tecnologías más convenientes.

Sin embargo, existen métodos que tratan de sistematizar toda esa experiencia y la esquematizan de forma heurística para realizar un chequeo según el tipo de análisis y el tipo de la tecnología que se está analizando.

Existe un método muy exitoso cuyos fundamentos radican en la teoría de la lógica y de los conjuntos, apoyada en el cálculo y el álgebra, con la cual es factible realizar evaluaciones como la propuesta en el presente trabajo.

IV.1 LÓGICA DIFUSA

La teoría toma el nombre de Lógica Difusa, desarrollada en 1965 por Lotti Zadeh y aplicada hacia el ramo industrial ha generado grandes beneficios. Ésta es capaz de modelar y generalizar un sistema de datos que no son precisos ni coherentes entre sí, pero que sin embargo poseen un significado que es común entre ellos y por lo tanto es requerido un método que pueda homologar los datos, atribuir valores y conseguir que exista entre ellos una correspondencia que permita clarificar la toma de decisiones.

El razonamiento nos permite conceptualizar, clasificar y estructurar la realidad con base en comparaciones, de ahí que para explicarla recurramos a las semejanzas que existen entre objetos, individuos o situaciones. Bajo el conocimiento de tales semejanzas es como podemos enfrentar la realidad mediante un proceso de aprendizaje; éste consiste en modelar la realidad percibida y aplicar el modelo a un contexto que según nuestra observación consideramos semejante y por lo tanto, susceptible de ser probado. A partir del resultado que obtengamos es como nuestro modelo queda comprobado o necesita ser modificado y en la medida en que una u otra suceda, será cómo el aprendizaje estructure el criterio. Finalmente, dicho criterio nuevamente nos servirá para pronosticar el resultado de un suceso que nos interesa mediante nuestro modelo personal ya actualizado.

El razonamiento humano funciona con criterios, lo que conviene o no, lo bueno o lo malo, lo que vale o lo que no vale, etc. y está influenciado por el contexto en el cual tales criterios tienen sus bases, el ambiente, el entorno, el momento en el que la observación rinde un aprendizaje. Sin embargo, ese aprendizaje varía de persona a persona, existe una inmensa cantidad de causas por las cuales cada persona reacciona de manera diferente ante un suceso, aunque el contexto en el que esté desarrollada sea el mismo en el que estén desarrolladas las demás personas.

Tal contexto puede ser impulsado por la cultura, la creencia, los conocimientos, etc., que tiene como recurso determinado un grupo de personas. Las personas de ese grupo tienen entonces ciertas características en común, una orientación a pensar en algo de manera

semejante (aunque no igual), es decir, una tendencia. Pero está claro que no maneja un pensamiento absoluto que aplique a otro grupo de personas que están adaptadas a otro contexto. Todo esto quiere decir que el raciocinio es de naturaleza individual y no es factible transferirlo completamente entre las personas, por lo tanto, es posible pronosticar (con base en posibilidades) de acuerdo a la tendencia, la decisión que alguien puede tomar según su particular punto de vista.

La decisión tomada puede ser puesta a juicio o discusión mediante cuestionamientos, si es necesario que la decisión sea aceptada, tendrá que haber un proceso de convencimiento o negociación, el cual consiste en transmitir la idea de la decisión tomada de la manera más apropiada y conveniente, de tal manera que quienes revisan la decisión queden de acuerdo y satisfechos con la determinación de ésta.

Para ello, cada quien aporta su criterio. Lo más relevante de ese proceso, es la precisión con la que los conceptos involucrados en la información original lleguen hasta la parte final y la forma en la que en ésta sean interpretados. Toda información durante el proceso es interpretada, adaptada y manejada con criterios personales.

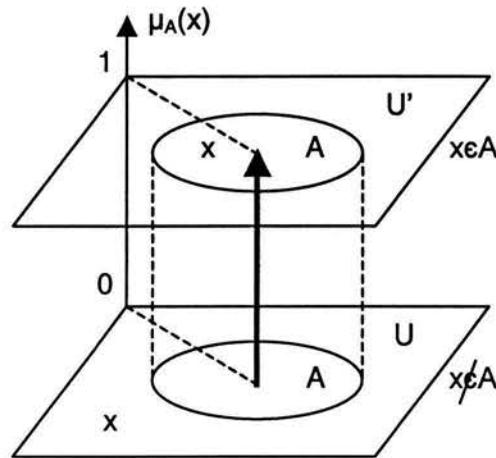
Las técnicas de toma de decisiones ofrecidas por la Lógica Difusa consisten cada una en un modelo que propone la unificación de criterios en procedimientos genéricos en los cuales podemos programar nuestro criterio individual para obtener un resultado o conjunto de resultados que pueden ser justificados mediante la teoría propuesta, a fin de cuentas, sólo quedaría explicar el origen y la naturaleza de los criterios contemplados, dado que la forma de obtener resultados con los criterios ya está fundamentada en la misma Lógica Difusa.

IV.1.1 Conjuntos difusos

Está claro que los criterios no son otra cosa más que aproximaciones y por lo tanto involucran una incertidumbre sobre si una decisión tomada es correcta o no. En un sistema en el que no existen aproximaciones, sino exactitud, existen únicamente dos opciones, falso y verdadero, la Lógica Matemática lo representa numéricamente en forma binaria como cero y uno y se indica de la siguiente manera:

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

De forma gráfica:



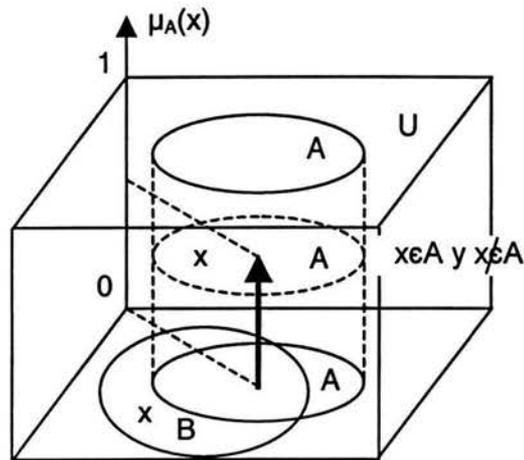
Donde A es un conjunto clásico, U y U' son universos bidimensionales de pertenencia, x es un elemento en el universo U o U' con grado de pertenencia a definir y $\mu_A(x)$ es el grado de pertenencia del elemento x . El esquema nos dice que si el elemento x no pertenece al conjunto clásico A en el universo U , su grado de pertenencia (o membresía) tiene el valor de cero. Sin embargo, si el elemento x sí pertenece al conjunto A en el universo U , entonces el elemento x tiene un grado de membresía igual a uno en el universo U .

De manera intuitiva entendemos el concepto de conjunto como una colección bien definida de elementos, en la que es posible determinar para un objeto cualquiera, en un universo dado, si acaso éste pertenece o no al conjunto. La decisión, naturalmente, es “sí pertenece” o bien “no pertenece”.

La Lógica Difusa aprovecha esta limitación y funciona entre el intervalo $[0,1]$, para lo cual explota el concepto de pertenencia o membresía, que es el grado con el cuál la característica cumple con las exigencias que le corresponden. Tales exigencias son propiedades que indican si cumple o no las condiciones para formar parte de un conjunto, el grado de membresía dice entonces qué tanto cumple con esas exigencias. Entonces tenemos una infinidad de opciones dentro del intervalo cerrado $[0,1]$.

$$x_A(x) \in [0,1] \rightarrow x \in A \text{ y } x \notin A$$

En forma gráfica



Donde A es un subconjunto difuso, U es el universo tridimensional de pertenencia, x es un elemento en el universo U con grado de pertenencia a definir y $\mu_A(x)$ es el grado de pertenencia del elemento x en el subconjunto difuso A . El esquema nos dice que si el elemento x posee características propias de un conjunto B , pero que cumple con las características requisitadas por el subconjunto A en forma parcial, su grado de pertenencia (o membresía) en el conjunto A tiene un valor determinado por el grado de apego o coincidencia de las características del conjunto B hacia el subconjunto A .

Un subconjunto difuso, es un conjunto que puede contener elementos de forma parcial, es decir que la propiedad $x \in A$ puede ser cierta, falsa o solamente posible. La métrica de esta posibilidad de pertenecer (grado de membresía o pertenencia) consiste de un número $\mu_A(x)$ entre 0 y 1, llamado grado de pertenencia de x a A . Si es 0, x no pertenece a A , si es 1, entonces $x \in A$, totalmente, y si $0 < \mu_A(x) < 1$, x pertenece a A de una manera parcial.

Un subconjunto A de B es por lo tanto caracterizado por esta función de pertenencia μ_A , de B hacia $[0,1]$. Es preciso fijar el conjunto B para definir la función μ_A que a su vez define A . Por eso hablamos de un subconjunto difuso, y no de conjunto difuso.

Aplica la definición de núcleo de un subconjunto difuso A al conjunto de los elementos x que pertenecen totalmente a A , es decir que verifican $\mu_A(x)=1$, mientras que el soporte de una

parte borrosa A es el conjunto de los x que pertenecen, aunque muy poco, a A , es decir que verifican $\mu_A(x) \geq 0$. Ambos conceptos pueden verse claramente en el segundo esquema.

Por ejemplo, podemos considerar como universo a la población económicamente activa en México, que interpretado como conjunto, está formado por las personas residentes en ese país con una edad entre 18 años (cumplidos) y 66 años (por cumplir). Consideremos un mes cualquiera; el conjunto de personas empleadas en México en ese mes aparentemente está bien determinado: una persona en nuestro universo que entonces vende su fuerza de trabajo bajo un contrato de empleo a una empresa legalmente constituida, definitivamente es una persona empleada, y alguien que no tiene salario alguno en ese mes y no está vinculado a ningún patrón bajo una relación contractual no es empleado. Es factible observar la sobresimplificación del criterio de pertenencia enunciado.

Sin embargo, algún funcionario de la Secretaría del Trabajo puede decir: "Todo ciudadano que haya trabajado al menos una hora en ese mes y por eso haya recibido un pago, es un empleado", pero alguna persona cualquiera dentro del universo definido puede decir: "¿Qué empleo? No hallé trabajo en todo el año y sólo hasta ahora, estoy ayudando a envolver mercancía en una tienda de gente que conozco: Yo no soy ningún empleado".

Para ilustrar el ejemplo dado, los siguientes son subconjuntos difusos, dados como funciones g , que pueden abarcar el concepto de empleado:

- **$g_E(x)$, de estadística optimista.** "Uno es empleado si trabaja al menos una hora, bajo pago, en un mes." Para cada persona x sea $t(x)$ el número de horas trabajadas bajo pago el mes en cuestión. Entonces $g_E(x)=1$ si $t(x) > 0$ y $g_E(x) = 0$ si $t(x)=0$.
- **$g_{PT}(x)$, de porcentaje en tiempo.** "Uno es empleado en proporción al tiempo trabajado." Suponiendo que el total de horas posibles a laborables en un mes sea 160. Entonces $g_{PT}(x)$ igual al valor mínimo que resulte de comparar 1 con la razón $t(x)/160$.
- **$g_{PI}(x)$, de porcentaje en ingreso.** "Uno es empleado en proporción con que pueda adquirir los bienes de consumo necesarios para su familia." Denotando con $p(x)$ a la paga que recibe el ciudadano x por hora de su trabajo. Suponiendo que la "canasta

básica” la evalúa la Secretaría de Comercio en M pesos al mes, por persona, y que cada trabajador tiene en promedio 2 dependientes económicos, además de él mismo. El salario del trabajador ha de mantener a 3 personas. Entonces $gPI(x)$ es igual al valor mínimo que resulte de comparar 1 con la razón $t(x)p(x)=(3M)$.

- **gPon(x), ponderación de tiempo e ingreso.** “Uno es empleado cuando trabaje mucho aunque no coma o no tenga apuros económicos aunque no trabaje.” Sean a y b dos coeficientes entre 0 y 1 tales que $a+b=1$. Entonces $gPon(x)=a \cdot gPT(x)+b \cdot gPI(x)$.

El grado de pertenencia gD de un conjunto difuso D puede ser interpretado de diversas maneras, en contextos diferentes. Las siguientes son sólo algunas posibles interpretaciones:

- **Proporción en la que se posee un atributo.** Si consideramos que D es un atributo, entonces para cada objeto x , $100 \cdot gD(x)$ es el “porcentaje” con el que x posee D .
- **Probabilidad.** Si consideramos que D es un evento probabilista (una variable aleatoria, según se dice en la Teoría de la Probabilidad, con valores en el conjunto de partes del universo), entonces para cada objeto x , $gD(x)$ es la probabilidad de que x ocurra en el evento D , es decir, $gD(x)=\text{Prob}(x \in D)$.
- **Medida de creencia.** Si consideramos que D es un atributo, entonces para cada objeto x , $gD(x)$ es un grado con el que se cree que x posee el atributo D . Por ejemplo, gPT , definida anteriormente, es ciertamente una proporción

Es notable que la Lógica Difusa fue desarrollada para operar con elementos que no encajan con la Lógica Matemática, cuya naturaleza no les permite ni operar ni existir en forma exacta, ni tampoco considerárseles de esa manera, sin embargo, tampoco está orientada a arrojar resultados exactos, dado que nos otorga una flexibilidad no matemática, que podemos considerar como incertidumbre.

Por lo tanto, el análogo de la exactitud en la Lógica Matemática, es la incertidumbre en la Lógica Difusa; esto tiene un valor incalculable para el correcto manejo de la información asociada a cualquier tipo de sistema, porque la complementación de ambas lógicas permiten

alcanzar resultados realistas; hay que tener en cuenta que si la realidad es exacta, no pueden existir resultados inciertos y por el contrario, si la realidad es incierta, no pueden existir resultados exactos.

Por ejemplo, ambos tipos de lógica aplican en el diseño de equipos de proceso, para los cuales existen diferentes metodologías de cálculo basadas en modelos matemáticos en los cuales operan valores reales e inmutables como presiones, temperaturas y flujos que imponen las propiedades de las sustancias que tales equipos manejan para brindar el servicio requerido, por ejemplo, para dimensionar una torre de destilación utilizamos procedimientos iterativos para encontrar las temperaturas de burbuja y de rocío de la mezcla multicomponentes, así como otros procedimientos similares, aunque llega el momento en el que es preciso recurrir al empleo de datos impuestos por normas y códigos de diseño que son datos no calculados, sino determinados por el criterio de quienes hicieron esas normas y códigos; ese criterio es la parte difusa de los cálculos, de tal manera que la combinación de ambas formas sirven para obtener los resultados que necesitamos.

Existen aplicaciones en las que solamente aplica la Lógica Matemática, tal puede ser el caso de un sistema de control de una planta, en el que existe un emisor y un receptor de señales, el cual codifica la señal recibida y envía una orden a un instrumento, que es el encargado de realizar los ajustes necesarios para que el proceso opere sin problemas. Entonces estamos hablando de un modelo matemático exacto, en donde la Lógica Difusa, nada tiene que hacer.

Las situaciones en las que aplica únicamente la Lógica Difusa tienen que ver exclusivamente con el raciocinio y el criterio humano, la toma de decisiones según la conveniencia de decidirnos por una de las alternativas existentes, que es la que preferimos por sobre las demás

Por ejemplo el siguiente análisis, el conductor de un automóvil maneja a alta velocidad y llega a un cruce en el momento en el que el semáforo cambia de luz verde a preventiva, la Lógica Matemática indica una orden de disminuir la velocidad para que en el instante en que aparezca la luz roja, el auto esté detenido y no hay más. Pero que tal si el conductor lleva mucha prisa. Entonces aparece la Lógica Difusa: "...si ignoro la preventiva y mejor acelero, me pasaré el alto y está el riesgo de que tenga que pagar multa o choque, o las dos juntas, pero tengo así la posibilidad de llegar a tiempo..., si me detengo, no puedo chocar ni tendría

que pagar multa, pero puede que ya no llegue a tiempo...". Según el contexto de la situación, en una pequeña fracción de segundo el conductor tomará la decisión, tiene que ponderar posibilidades, preferencias y conveniencias con su criterio para decidirse por una de las dos alternativas. En este caso, la Lógica Matemática es inexistente y la Lógica Difusa es la que existe para tomar la decisión.

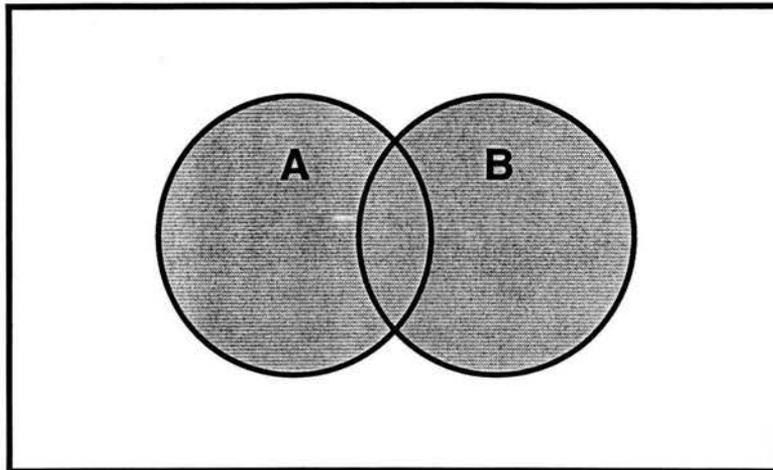
La aplicación de la Lógica Difusa a la evaluación de tecnologías resulta sumamente recomendable. Cuando es necesario realizar una evaluación entre diferentes tecnólogos con propósitos de licitación, implica el analizar y resumir toda la información que ofrecen, pero nunca hay que perder de vista la fuente, la naturaleza y la calidad de la información a analizar. Los tecnólogos nunca va a abrir completamente su tecnología a nadie, ni siquiera en un proceso licitatorio, seguramente entregarán la información más general, más descriptiva y algunos datos que no los comprometen pero que consideran suficientes para ser incluidos en la evaluación. Con ese antecedente, con información que no es posible demostrar ni confirmar al 100%, todavía hay que determinar a cada conjunto de valores que aplican a un solo criterio de evaluación, cuál elemento y en qué medida cumple con nuestro criterio de selección.

IV.1.2 Definiciones

Definiendo dos subconjuntos difusos A y B , para un elemento x en el universo X , las siguientes operaciones existen:

- **Unión**

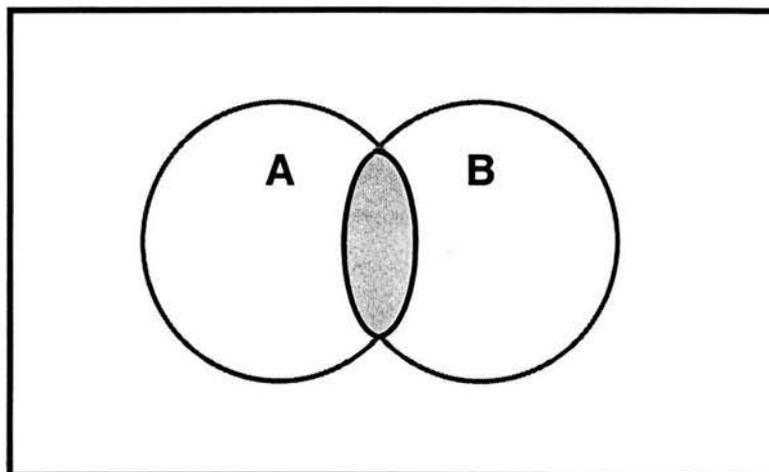
$$\mu_{(A \cup B)}(x) = \mu_A(x) \circ \mu_B(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$



El esquema representa la unión como el área máxima que ocupan dos subconjuntos difusos como está definido.

- **Intersección**

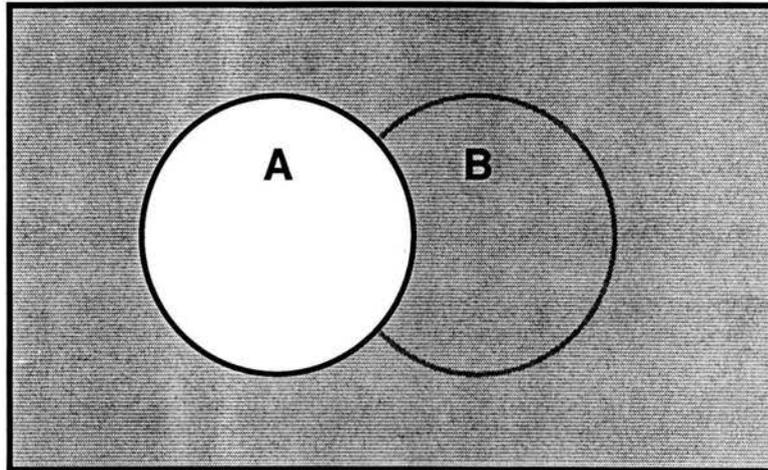
$$\mu_{(A \cap B)}(x) = \mu_A(x) \text{ y } \mu_B(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$



El esquema representa la intersección como el área mínima que ocupan dos subconjuntos difusos como está definido.

- **Complemento**

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x)$$



El esquema representa al complemento como el área externa a un subconjunto difuso como está definido.

IV.1.3 Propiedades

Las siguientes propiedades aplican a los subconjuntos difusos:

- **Conmutatividad**

$$A \cup B = B \cup A$$

$$A \cap B = B \cap A$$

- **Asociatividad**

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$$

- **Distributividad**

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

- **Idempotencia**

$$A \cup A = A$$

$$A \cap A = A$$

- **Identidad**

$$A \cup \emptyset = A \text{ y } A \cap X = A$$

$$A \cap \emptyset = \emptyset \text{ y } A \cup X = X$$

- **Transitividad**

Si $A \subset B \subset C$, entonces $A \subset C$

- **Involución**

$$\neg(\neg A) = A$$

IV.1.4 Herramientas para la toma de decisiones con Lógica Difusa

La Lógica Difusa ofrece diversas herramientas para tomar decisiones, algunas de ellas aparecen a continuación.

- **Evaluación Sintética Difusa.** Esta herramienta de evaluación aplica cuando es necesaria una comparación entre cada elemento del conjunto difuso a evaluar contra cada elemento de un conjunto patrón que está determinado por criterio, los elementos pueden ser numéricos o no numéricos y según el grado de coincidencia entre estos, aplica la selección de alguno de los conjuntos difusos o alternativas de evaluación.

El procedimiento de evaluación funciona por medio de la aplicación de un método que asigne valores a la relación entre los subconjuntos difusos:

$$\mu_R(x,y) = \mu_{A \square B}(x,y)$$

Donde $A \square B$ representa el empleo de un método como los siguientes:

- Producto cartesiano
- Expresión en forma cerrada
- Examinar datos
- Reglas lingüísticas basadas en conocimientos
- Clasificación
- Métodos similares en la manipulación de información

Por ejemplo, usando producto cartesiano entre los elementos de dos conjuntos:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$$

$$B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_m\}$$

$$A \times B = \begin{pmatrix} (a_1, b_1) & (a_1, b_2) & (a_1, b_3) & \dots & (a_1, b_m) \\ (a_2, b_1) & (a_2, b_2) & (a_2, b_3) & \dots & (a_2, b_m) \\ (a_3, b_1) & (a_3, b_2) & (a_3, b_3) & \dots & (a_3, b_m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_n, b_1) & (a_n, b_2) & (a_n, b_3) & \dots & (a_n, b_m) \end{pmatrix}$$

Procede el comparar (a_i, b_j) de cada elemento y seleccionar el menor para formar la matriz resultado. Entonces,

$$\mu_R(x,y) = \mu_{A \times B}(x,y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

$$\mu_{A \times B} = \begin{pmatrix} \min(a_1, b_1) & \min(a_1, b_2) & \min(a_1, b_3) & \dots & \min(a_1, b_m) \\ \min(a_2, b_1) & \min(a_2, b_2) & \min(a_2, b_3) & \dots & \min(a_2, b_m) \\ \min(a_3, b_1) & \min(a_3, b_2) & \min(a_3, b_3) & \dots & \min(a_3, b_m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \min(a_n, b_1) & \min(a_n, b_2) & \min(a_n, b_3) & \dots & \min(a_n, b_m) \end{pmatrix}$$

- **Ordenamiento difuso.** Esta herramienta sirve para determinar de un conjunto de alternativas, cuál es la que tiene ventaja sobre las demás y aplica cuando entre ellas no existe una regla general para atribuir ventajas o supremacías, pero que sí pueden ser incluidas en un conjunto y para tomar una decisión es necesario un criterio de selección. Para ello, es requerido predeterminar las preferencias entre todos los

elementos del conjunto de alternativas. El método de evaluación funciona por medio de una función de relatividad que puede ser la siguiente:

$$F(x_i / A) = \min\{f(x_i / x_j)\}$$

Donde x_i / x_j es cada elemento relativo del conjunto definido por criterio. El conjunto puede tomar la forma ordenada en forma de matriz:

$$\begin{pmatrix} x_1 / x_1 & x_1 / x_2 & x_1 / x_3 & \dots & x_1 / x_n \\ x_2 / x_1 & x_2 / x_2 & x_2 / x_3 & \dots & x_2 / x_n \\ x_3 / x_1 & x_3 / x_2 & x_3 / x_3 & \dots & x_3 / x_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n / x_1 & x_n / x_2 & x_n / x_3 & \dots & x_n / x_n \end{pmatrix}$$

Para obtener los elementos de la matriz de comparación tenemos la relación:

$$f(x_i / x_j) = \frac{x_i / x_j}{\max[x_i / x_j; x_j / x_i]}$$

La matriz de comparación queda de la siguiente manera

$$\begin{pmatrix} x_1 & f(x_1 / x_1) & f(x_1 / x_2) & f(x_1 / x_3) & \dots & f(x_1 / x_n) \\ x_2 & f(x_2 / x_1) & f(x_2 / x_2) & f(x_2 / x_3) & \dots & f(x_2 / x_n) \\ x_3 & f(x_3 / x_1) & f(x_3 / x_2) & f(x_3 / x_3) & \dots & f(x_3 / x_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n & f(x_n / x_1) & f(x_n / x_2) & f(x_n / x_3) & \dots & f(x_n / x_n) \end{pmatrix}$$

Entonces es necesario buscar los valores mínimos de cada renglón y ordenar las alternativas en orden descendente de esos valores que satisfagan la función de relatividad para seleccionar la mejor alternativa.

- **Consenso difuso.** Esta herramienta aplica cuando por acuerdo unánime de un grupo de personas involucradas en una evaluación para tomar una decisión, quedan

determinadas las relaciones recíprocas de valoración para propósitos de comparación de las características (una a una) que ofrecen las diferentes alternativas.

Las relaciones recíprocas forman un conjunto que acomodado en forma matricial dan por resultado una matriz cuadrada de $n \times n$ y la reciprocidad implica que sus elementos cumplan con las siguientes propiedades

$$r_{ii} = 0 \text{ y } r_{ij} + r_{ji} = 1$$

El método que usa la herramienta para calcular las preferencias consiste en el cálculo de los componentes relativos de la certidumbre y de la incertidumbre del criterio con que fueron consensadas las relaciones recíprocas por medio de las ecuaciones siguientes:

$$D(R) = \frac{\text{tr}(R^2)}{n(n-1)/2}$$

$$D(R) = \frac{\text{tr}(RR^T)}{n(n-1)/2}$$

Donde: $D(R)$ es la difusividad o incertidumbre promedio

$C(R)$ es la certidumbre promedio

$\text{tr}(R)$ es un parámetro denominado "traza de la relación difusa" y es la diagonal de la matriz generada por el producto de R^2 o RR^T donde R es la relación difusa y R^T es su transpuesta, y se calcula con la relación

$$\sum_{i=1}^n r_{ii} = \text{tr}(R)$$

$D(R)$ y $C(R)$ son complementarios entre sí y determinan el grado de preferencia de una alternativa. Para conocer el alejamiento del consenso, tenemos la ecuación siguiente que calcula una métrica:

$$m(R) = 1 - [2 C(R) - 1]^{1/2}$$

La alternativa cuya métrica esté más cercana al valor $1 - (2/n)^{1/2}$ tiene mayor preferencia y está más cercana del consenso que las demás.

-
- **Toma de decisiones multiobjetiva.** Esta herramienta es adecuada cuando es preciso tomar una decisión a partir de la evaluación global de todos los criterios de evaluación de cada una de las alternativas por medio de ponderaciones para realizar una comparación y seleccionar la alternativa ganadora.

Este medio de evaluación requiere un conjunto de alternativas, cada alternativa con su correspondiente conjunto de criterios de evaluación. Los valores de esos criterios necesitan estar representados en parámetros conocidos como grados de membresía mediante una función matemática a considerar que otorgue valores proporcionales o correspondientes de ponderación para cada criterio. Requiere además de la fijación de un conjunto de preferencias cuyos elementos ponderan según el criterio de selección del usuario, la importancia o prioridad que tiene cada criterio. Una vez definidos los conjuntos, el procedimiento de evaluación consiste en comparaciones para determinar máximos y mínimos, que son valores que definen la selección de una alternativa.

El procedimiento es como sigue:

Es preciso definir un conjunto de alternativas

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$$

Con su correspondiente conjunto de criterios de evaluación para cada alternativa

$$O = \{o_1, o_2, o_3, \dots, o_k\}$$

Cada valor del conjunto O de cada alternativa toma un valor paramétrico representado como grado de membresía

$$\{o_1, o_2, o_3, \dots, o_k\} = \{\mu_{o1}, \mu_{o2}, \mu_{o3}, \dots, \mu_{ok}\}$$

Es factible generar una matriz de grados de membresía de las alternativas

complican la evaluación por medio de la observación y la experiencia, aunque hay que aceptar que no por ello es imposible hacerlo de esa manera.

De las herramientas mencionadas, es preciso seleccionar la más adecuada para realizar la evaluación de las tecnologías del biodiesel. La evaluación requiere un resultado general, que permita comparar a todas las alternativas y seleccionar a la que ofrece un mejor desempeño en todos los sentidos.

Las dos primeras tienen su fundamento en comparar elementos uno a uno del conjunto de objetivos que ofrece cada alternativa con los demás. Pero no ofrecen una métrica global que compare a las alternativas como conjuntos de criterios de evaluación (objetivos) sino que dicen objetivo por objetivo, cual es el mejor.

La evaluación requiere de las características que dispone la herramienta llamada “Selección Difusa Multiobjetivo”, dado que a partir de los objetivos de cada una, resultará un valor numérico que representa el desempeño global de cada tecnología para poder determinar así, cuál es la más apropiada.

IV.1.5 Funciones aplicables para determinar los grados de membresía

Existen una extensa variedad de definiciones que pueden ser aplicadas para el cálculo de grados de membresía, de todas pueden ser aplicadas las siguientes:

- **La curva gaussiana.** Es apropiada para calcular grados de membresía de elementos para los cuales no existe un límite predeterminado (como por ejemplo, un porcentaje) y no resulta recomendable normalizar los datos respecto a un dato en particular, dado que el objetivo a ponderar no es considerable como un logro tecnológico con tendencia lineal o proporcional a los demás; sino que conviene calcular un valor que represente la correspondencia no proporcional en cuanto a los datos presentados para los criterios de evaluación y que guarde una relación con cada uno de los datos a comparar que por conveniencia se tome como dato base. Aplica para valores directos de criterios de evaluación.

La curva gaussiana está representada por la siguiente ecuación cuando es necesario tomar como base o referencia el valor máximo:

$$\mu_x(A) = e^{-\left(\frac{x - x_{\max}}{x_{\max}}\right)^2}$$

Cuando requiere tomar como referencia al valor mínimo, la ecuación toma la forma siguiente:

$$\mu_x(A) = e^{-\left(\frac{x - x_{\min}}{x_{\max}}\right)^2}$$

- **Ponderación simple.** Es útil en su forma de recta como función de membresía que aplica a los criterios de evaluación cuando tales criterios son resultado de una operación aritmética como puede ser la suma de otros criterios de evaluación que quedaron englobados en uno más general y que por lo mismo, no es necesario recurrir a la curva gaussiana, ya que esto consiste del manejo de datos ya parametrizados.

La función es la ecuación de una recta:

$$\mu_x(A) = mx + b$$

El cálculo de m y b resulta a partir de los valores máximo y mínimo de los datos parametrizados ya obtenidos.

La normalización al máximo es aceptable para calcular grados de membresía de criterios que pueden considerarse simples y que sólo basta calcular el cociente con respecto al valor máximo de entre los existentes, la relación es:

$$\mu_x(A) = \frac{x}{x_{\max}}$$

- **Fracción por ciento.** Aplica a datos expresados en forma de porcentaje aprovechando la naturaleza predeterminada del por ciento que permite mostrarlo como fracción en forma directa:

$$\mu_x(A) = \frac{x\%}{100\%}$$

Por tales motivos resulta interesante y conveniente emplear el método de la Lógica Difusa, ya que el sistema de datos obtenido para las tecnologías de biodiesel presenta claramente que algunos de los criterios poseen características que lo hacen plenamente aplicable. Sin embargo, el método no es un modelo “cuadrado”, ya que también depende del criterio del que lo aplica para atribuirle un valor numérico que califique el grado de conveniencia según el nivel de prioridad que haya sido asignado a alguno de los criterios de evaluación.

CAPÍTULO V.

DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN TECNOLÓGICA-FINANCIERA

Los criterios de evaluación tecnológica para la selección de tecnologías para la producción comercial de biodiesel son parámetros que caracterizan el funcionamiento y el desenvolvimiento tecnológico, comercial y financiero de cada tecnología a través del proceso en el que ésta aplica.

Para el caso del biodiesel, como en todas las tecnologías existentes de los diversos procesos químicos, existen criterios ya establecidos y reconocidos para conformar una matriz de tecnologías con el propósito de realizar una evaluación tecnológica entre ellas; estos criterios describen los atributos de cada tecnología, técnicos, financieros y de desempeño comercial, los atributos técnicos tienen que ver con los rasgos operativos del proceso, como son las condiciones de temperatura y presión, las propiedades de las materias primas y de los productos que son las que fijan finalmente las necesidades y requerimientos de aplicación de las operaciones unitarias, así como el arreglo y la disposición y tipo de los

equipos dentro del proceso, quedando establecida así la complejidad operativa. Por otro lado, los atributos comerciales tienen que ver con el historial comercial y de posicionamiento de la tecnología en el mercado, estamos hablando de parámetros que describen el prestigio y el éxito comercial de la tecnología, entre los que aparecen el estatus de la tecnología, el cual valora el potencial del proceso para convertirse en una planta confiable de producción, y los términos de contrato, definidos por las políticas comerciales del licenciador, así como los parámetros financieros, que definen la rentabilidad de las tecnologías.

Todos los criterios necesarios de evaluación financiera están definidos con los datos de operación suministrados por los tecnólogos o por fuentes confiables de información.

Los criterios empleados en este trabajo para evaluar las tecnologías del biodiesel aparecen en la tabla 3, está construida a partir de los datos disponibles y de información proveniente del licenciador; del conjunto de tecnólogos existentes que desarrollan procesos para la producción de biodiesel, solamente 5 de ellos ofrecen información suficiente para realizar la evaluación.

V.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN ^{[28][34] [40] [47]}

Los criterios de evaluación para los cuales hubo información disponible son:

- **Eficiencia productiva.** Refiere a las cualidades del proceso para convertir los triglicéridos y ácidos grasos libres del aceite utilizado como materia prima en biodiesel que cumpla con las especificaciones deseadas.
- **Rapidez de reacción.** En el proceso de producción de biodiesel, es la rapidez de reacción conseguida con la tecnología respectiva, la que impone el ritmo de producción, ya que condiciona la rapidez con la que las operaciones unitarias posteriores deben operar.
- **Pureza de los productos.** Refiere al valor de la pureza que permite la comercialización satisfactoria de los productos, que en el proceso del biodiesel son dos principalmente:

-
1. **La pureza del biodiesel**, implica el cumplimiento de las exigencias de los fabricantes de motores a diesel para evitar que las impurezas surgidas durante el proceso provoquen problemas a los usuarios de sus motores.
 2. **La pureza de la glicerina**, implica el valor atribuible a la glicerina para ofrecerla en el mercado según su pureza para su empleo en un uso específico.
- **Tipo de catalizador.** Refiere al catalizador o catalizadores empleados por cada tecnología según su conveniencia para acelerar o ejecutar la reacción.
 1. **Tetrahidrofurano.** Actúa como co-solvente de las fases que intervienen en la reacción permitiendo que su realización en una sola fase, lo que trae consigo grandes beneficios.
 2. **Hidróxido de sodio.** Es el catalizador más barato pero menos eficiente de los catalizadores comerciales alcalinos empleados en la producción de biodiesel, ya que al formar metóxido de sodio también produce agua, que en la reacción de transesterificación favorece la saponificación de los ácidos grasos libres y de las cadenas de metiléster.
 3. **Hidróxido de potasio.** Su situación es igual que en el hidróxido de sodio, pero éste permite la generación de sulfato de potasio, que tiene valor comercial.
 4. **Metóxido de sodio.** Es el mejor catalizador alcalino comercial, pero es también el más caro, evita la saponificación de los ácidos grasos y de los metilésteres durante la transesterificación.
 - **Calidad del aceite empleado como materia prima.** Según su contenido de ácidos grasos libres y de la tecnología que lo maneja, puede definir la necesidad de la implementación de una etapa más de reacción anterior a la reacción de transesterificación definida como esterificación, o bien imponer la adaptación en la misma etapa de transesterificación para esterificar los ácidos grasos libres. En cualquiera de los casos implica una cantidad de ácido y de metanol extra adicional.
-

-
- **Consumo de agentes químicos.** Éste está influenciado por la necesidad de esterificar los ácidos grasos libres presentes en el aceite, así como por la necesidad de neutralizar el pH básico producido por el catalizador.
 1. **Ácido sulfúrico.** El empleo del ácido sulfúrico concentrado está más enfocado hacia la esterificación de los ácidos grasos libres, mezclado con metanol.
 2. **Ácido clorhídrico.** El empleo del ácido clorhídrico diluido en una proporción que va del 10 al 40% persigue la neutralización en la etapa de lavado del metiléster.

 - **Presión y temperatura de operación.** Son las condiciones de operación que fija cada tecnología, para cada etapa de proceso y obedecen a la conveniencia tecnológica de procesamiento.

 - **Estatus de la tecnología.** Es un criterio que pondera el éxito comercial para llevarla a escala comercial de producción.
 1. **Cantidad de plantas comerciales en operación.** Es un parámetro que da idea de la trayectoria comercial de la tecnología.
 2. **Cantidad de plantas comerciales en proyecto.** Es un parámetro que da una idea acerca de la vigencia comercial de la tecnología.
 3. **Rango de capacidades.** Es un intervalo que define con claridad el potencial de producción que ofrece la tecnología.
 4. **Tiempo de implementación de la tecnología.** Es el tiempo de vigencia tecnológica desde el surgimiento de la tecnología en su conceptualización de proceso a escala de planta piloto hasta la fecha actual considerada hasta el año 2004.

 - **Términos de contrato.** Es el condicionamiento comercial impuesto por el tecnólogo y que obedece a las políticas comerciales de la empresa.
-

-
-
- 1. **Tiempo de entrega.** Es el plazo de tiempo en el que el licenciador considera que es capaz de cumplir satisfactoriamente con la entrega de la planta.
 - 2. **Garantía.** Es el compromiso que contrae el licenciador con el cliente de que su tecnología cumpla plena y satisfactoriamente con las cualidades y características ofrecidas por el tecnólogo.
- **Complejidad operativa.** Es un parámetro que representa la disposición, el arreglo y las interconexiones de las corrientes entre los equipos que definen el esquema de proceso para obtener el producto con las características deseadas.
 - 1. **Cantidad de ciclos de proceso.** Es un concepto que cuantifica las interconexiones que existen dentro del proceso entre las diferentes secciones que lo conforman tal y como aplican para el caso del proceso del biodiesel.
 - 2. **Cantidad de etapas de reacción.** Es la cuantificación del número de etapas de reacción que requiere el proceso según la tecnología para obtener el rendimiento óptimo de la reacción; este rubro tiene un significado capital para el proceso del biodiesel, dado que la tecnología centra su desarrollo justamente en esta sección del proceso.
 - 3. **Cantidad de reactores por etapa de reacción.** Es la cuantificación del número de reactores en cada etapa de reacción, según lo imponga la tecnología y el motivo es exactamente el ya explicado para la cantidad de etapas de reacción.
 - 4. **Número de secciones.** Refiere a las secciones requeridas para el proceso y depende de la calidad de las materias primas y de los productos manejados según su capacidad tecnológica.
- **Tasa interna de retorno.** Es la tasa de actualización a la cual el Valor Presente Neto toma el valor de cero, y representa la rentabilidad justa del proyecto.

-
-
- **Valor presente neto.** Representa el valor económico obtenido mediante la suma de las diferencias de todas las entradas y salidas de efectivo (flujos de efectivo) que suceden durante la vida de un proyecto a una tasa de descuento predeterminado.
 - **Período de recuperación de la inversión.** Pronostica el tiempo en el que pretendemos pagar la inversión total aplicada al proyecto con los ingresos obtenidos durante el tiempo de vida del proyecto.
 - **Retorno de la inversión.** Calcula el factor que representa la proporción de las ganancias logradas por el proyecto entre la inversión total aplicada a éste durante su tiempo de vida.

Para realizar los cálculos de los parámetros financieros para cada tecnología es necesario hacer ciertas suposiciones que apliquen a las 5 tecnologías acerca de algunas variables indispensables, además de definir costos de operación.

Las variables que a fijar son las siguientes:

- **Tasa de descuento.** Refiere a la tasa determinada por una organización o individuo, en la cual están incluidas las expectativas en términos de un rendimiento real de la inversión bancaria y del riesgo asumido.

Para el caso actual de México, consideremos una tasa de descuento de 15% apropiada al actual riesgo para invertir.

- **Horizonte de vida.** Para plantas químicas de proceso, el valor típico es de 10 años.
 - **Capacidad nominal de la planta.** La evaluación está enfocada al uso del biodiesel como combustible en la modalidad B20 (20% Biodiesel, 80% Diesel), el mercado del diesel es muy vasto, por lo cual consideramos de 40,000 toneladas anuales como una capacidad adecuada de introducción del biodiesel como producto en México.
 - **Cantidades de insumos y productos por tonelada de biodiesel.** A continuación aparecen las cantidades a manejar en cada tecnología.
-
-

Concepto	Unidad	Biox Co.	Lurgi Metallgesellschaft GmbH	Ölmühle Connemann Leer GmbH	Energiea Umwelttechnologie GmbH	Imperial Western Products Inc.
Aceite refinado	Ton/Ton	-----	-----	1.000	-----	-----
Aceite crudo	Ton/Ton	1.000	1.000	-----	1.000	1.020
Metanol	Ton/Ton	0.110	0.096	0.110	0.110	0.110
Hidróxido de sodio	kg/Ton	16.50	1.50	8.50	-----	33.00
Hidróxido de potasio	Ton/Ton	-----	-----	-----	30.0	-----
Metóxido de sodio	kg/Ton	-----	5.0	-----	-----	-----
Ácido sulfúrico	kg/Ton	45.0	28.0	-----	28.0	7.0
Ácido clorhídrico	kg/Ton	-----	10.0	11.0	-----	-----
Tetrahidrofurano	kg/Ton	5.0	-----	-----	-----	-----
Vapor de media	Ton/Ton	1.490	0.415	0.300	0.091	0.350
Electricidad	kWh/Ton	19.7	12.0	25.0	50.0	100.0
Agua de enfriamiento	Ton/Ton	3.52	3.20	3.20	1.38	2.04
Agua desmineralizada	kg/Ton	20	20	20	20	33

- **Inversión.** La inversión estimada para cada tecnología de producción de biodiesel aparece a continuación.

Tecnología	Inversión para una planta de 40,000 ton/año de capacidad
Biox Co. ^[28]	9,010,000 USDIs
Lurgi Metallgesellschaft GmbH ^[18]	10,698,198 USDIs
Ölmühle Connemann Leer GmbH ^[22]	11,771,968 USDIs
Energiea Umwelttechnologie GmbH *	8,184,615 USDIs
Imperial Western Products Inc. ^[32]	8,925,702 USDIs

- **Factor de servicio.** Fijamos un valor de 0.9, es apropiado para una planta que elabora un producto estratégico como es un combustible.
- **Costos unitarios de insumos, personal de operación y precios unitarios de productos.** En la tabla siguiente aparecen los valores empleados en la evaluación.

* Por licenciador

Insumos / Consumos	Precios y costos unitarios ^{[29][30][31]}
Aceite de soya crudo (consideración: 40% - 6%)	0.60 USDIs/kg
Aceite de soya refinado (consideración: 5% - 1%)	0.65 USDIs/kg
Metanol anhidro (pureza > 99.5%)	0.27 USDIs/kg
Hidróxido de potasio grado técnico (pureza 85%)	1.23 USDIs/kg
Hidróxido de sodio grado técnico (pureza 82%)	1.00 USDIs/kg
Metóxido de sodio (pureza = 97%)	1.00 USDIs/kg
Tetrahidrofurano anhidro (pureza > 99.5%)	3.74 USDIs/kg
Ácido clorhídrico grado técnico (pureza = 31.5%)	0.08 USDIs/kg
Ácido sulfúrico concentrado (pureza = 98%)	0.08 USDIs/kg
Vapor de media	0.018 USDIs/kg
Electricidad	0.123 USDIs/kWh
Agua de enfriamiento (subterránea zona 6)	0.0007 USDIs/kg
Agua desmineralizada	0.0012 USDIs/kg
Jefe de planta (1 por turno, 3 turnos)	6.01 USDIs/hr
Operador especialista (1 por turno, 3 turnos)	3.00 USDIs/hr
Obrero de primera (1 por turno, 3 turnos)	1.50 USDIs/hr
Obrero general (1 por turno, 3 turnos)	0.62 USDIs/hr
Biodiesel (normas ASTM, DIN y EN)	0.74 USDIs/kg
Glicerina cruda (80 – 90%)	1.34 USDIs/kg
Glicerina USP (pureza > 99.5%)	1.92 USDIs/kg
Sulfato de potasio grado técnico (pureza 85%)	0.21 USDIs/kg

- **Costo del terreno**^{[42][43]}. El lugar apropiado para localizar la planta es un lugar céntrico de la República Mexicana, por haber más vías de comunicación y encontrarse relativamente cerca de la Cd. de México, lugar donde el biodiesel puede tener mayor éxito, preferentemente el Estado de San Luis Potosí, por ser un importante productor de soya que es la materia prima más disponible en México para producir biodiesel. La ubicación de la planta puede ser en el parque industrial Tres Naciones, del Estado mencionado; el costo máximo (que es el que tomaremos para la evaluación financiera) es de 25 USDIs/m² y el lote disponible más pequeño es de 10,700 m², siendo éste el más apropiado debido a que el terreno requerido más grande corresponde al del proceso IWP con 6,064 m², entonces su costo es de 151,600 USDIs

En seguida aparecen las evaluaciones económico-financieras para cada tecnología en función de la información presentada, mostrando a detalle los resultados de cada etapa de evaluación.

**TABLA No. 2
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO BIOX**

INSUMOS/CONSUMOS/COSTOS UNITARIOS

	CONCEPTO	CONSUMO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	UNIDAD	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
	MATERIA PRIMA					(MILES DE DÓLARES)									
a1	ACEITE DE SOYA	40.0000	MTPA	0.60000	MDIs/Ton	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0
a2	METANOL	4.4000	MTPA	0.27000	MDIs/Ton	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2
A	TOTAL (a1+a2)					22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2
	QUÍMICOS Y CATALIZADORES														
b1	HIDRÓXIDO DE SODIO	0.6600	MTPA	1.00000	MDIs/Ton	594.0	594.0	594.0	594.0	594.0	594.0	594.0	594.0	594.0	594.0
b2	TETRAHIDROFURANO	0.2000	MTPA	3.74000	MDIs/Ton	673.2	673.2	673.2	673.2	673.2	673.2	673.2	673.2	673.2	673.2
b3	ÁCIDO SULFÚRICO	1.8000	MTPA	0.08000	MDIs/Ton	129.6	129.6	129.6	129.6	129.6	129.6	129.6	129.6	129.6	129.6
B	TOTAL (b1+b2+b3)					1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8
	SERVICIOS AUXILIARES														
c1	ENERGÍA ELÉCTRICA	89.9500	kWh	0.00012	MDIs/kWh	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2	87.2
c2	AGUA DE ENFRIAMIENTO	17.1531	m³/h	0.00070	MDIs/m³	94.7	94.7	94.7	94.7	94.7	94.7	94.7	94.7	94.7	94.7
c3	VAPOR DE MEDIA	6.8037	Ton/h	0.01800	MDIs/Ton	965.5	965.5	965.5	965.5	965.5	965.5	965.5	965.5	965.5	965.5
c4	AGUA DESMINERALIZADA	0.0917	Ton/h	0.00120	MDIs/Ton	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	TOTAL (c1+c2+c3+c4)					1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3
	MANO DE OBRA														
d1	JEFE DE PLANTA	3	PERS	0.00601	MDIs/h	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4
d2	OPERADOR ESPECIALISTA	3	PERS	0.00301	MDIs/h	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7
d3	OPERADOR DE PRIMERA	3	PERS	0.00150	MDIs/h	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
d4	OBRERO GENERAL	3	PERS	0.00062	MDIs/h	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
D	TOTAL (d1+d2)					87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8
	PRODUCTO			PRECIO DE VENTA											
e1	BIODIESEL	40.0000	MTPA	0.74160	MDIs/Ton	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6
e2	GLICERINA	4.0000	MTPA	1.92000	MDIs/Ton	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0
E	TOTAL VENTAS (e1+e2)					33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6

T A B L A No. 3
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO BIOX

C O S T O S A N U A L E S

CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
				(M I L E S D E D Ó L A R E S)						
A MATERIA PRIMA	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2
B QUÍMICOS	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8	1,396.8
C MANO DE OBRA DIRECTA	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8
D SUPERVISIÓN (5% de C)	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
F COSTOS DE PRODUCCIÓN (A+B+C+D)	24,158.2	24,158.2	24,158.2	24,158.2	24,158.2	24,158.2	24,158.2	24,158.2	24,158.2	24,158.2
G DEPRECIACIÓN (10% de W)	901.0	901.0	901.0	901.0	901.0	901.0	901.0	901.0	901.0	901.0
H SERVICIOS AUXILIARES	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3	1,148.3
I MANTENIMIENTO (2% del costo del equipo)	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1
J SUMINISTROS DE OPERACIÓN (10% de H)	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7
K TOTAL DE GASTOS DE OPERACIÓN (H+I+J)	1,277.1	1,277.1	1,277.1	1,277.1	1,277.1	1,277.1	1,277.1	1,277.1	1,277.1	1,277.1
L VENTAS Y DISTRIBUCIÓN (1% de E)	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1
M TOTAL DE GASTOS DE VENTAS (L)	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1
N GASTOS DE ADMINISTRACIÓN (2% de C)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
O INDIRECTOS DE PLANTA (2% de W)	180.2	180.2	180.2	180.2	180.2	180.2	180.2	180.2	180.2	180.2
P TOTAL DE GASTOS ADMINISTRACIÓN (N+O)	182.0	182.0	182.0	182.0	182.0	182.0	182.0	182.0	182.0	182.0
Q TOTAL DE GASTOS (K+M+P)	1,795.2	1,795.2	1,795.2	1,795.2	1,795.2	1,795.2	1,795.2	1,795.2	1,795.2	1,795.2
R TOTAL DE COSTOS ANUALES (F+G+Q)	26,854.4	26,854.4	26,854.4	26,854.4	26,854.4	26,854.4	26,854.4	26,854.4	26,854.4	26,854.4

TABLA No. 5
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO BIOX

CAPITAL DE TRABAJO

CONCEPTO		AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10	
					(MILES DE DÓLARES)							
y1	CAJA Y BANCOS (15 días de F)	992.8	992.8	992.8	992.8	992.8	992.8	992.8	992.8	992.8	992.8	
y2	CUENTAS POR COBRAR (15 días de E)	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	
y3	MATERIA PRIMA (15 días de B)	57.4	57.4	57.4	57.4	57.4	57.4	57.4	57.4	57.4	57.4	
y4	PRODUCTO TERMINADO (15 días de E)	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	
	INVENTARIOS (y3+y4)	1,438.6	1,438.6	1,438.6	1,438.6	1,438.6	1,438.6	1,438.6	1,438.6	1,438.6	1,438.6	
y5	CUENTAS POR PAGAR (30 días de E)	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	
Y	CAPITAL DE TRABAJO (y1+y2+y3+y4+y5)	6,575.1	6,575.1	6,575.1	6,575.1	6,575.1	6,575.1	6,575.1	6,575.1	6,575.1	6,575.1	

TABLA No. 7
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO LURGI

INSUMOS/CONSUMOS/COSTOS UNITARIOS

	CONCEPTO	CONSUMO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	UNIDAD	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10	
	MATERIA PRIMA								(MILES DE DÓLARES)							
a1	ACEITE DE SOYA	40.0000	MTPA	0.60000	MDIs/Ton	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	
a2	METANOL	3.8400	MTPA	0.27000	MDIs/Ton	933.1	933.1	933.1	933.1	933.1	933.1	933.1	933.1	933.1	933.1	
A	TOTAL (a1+a2)					22,533.1	22,533.1	22,533.1	22,533.1	22,533.1	22,533.1	22,533.1	22,533.1	22,533.1	22,533.1	
	QUÍMICOS Y CATALIZADORES															
b1	HIDRÓXIDO DE SODIO	0.0600	MTPA	1.00000	MDIs/Ton	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	
b2	METÓXIDO DE SODIO	0.3000	MTPA	1.00000	MDIs/Ton	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	
b3	ÁCIDO SULFÚRICO	1.1200	MTPA	0.08000	MDIs/Ton	270.0	270.0	270.0	270.0	270.0	270.0	270.0	270.0	270.0	270.0	
b4	ÁCIDO CLORHÍDRICO	0.4000	MTPA	0.08000	MDIs/Ton	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	
B	TOTAL (b1+b2+b3+b4)					433.4	433.4	433.4	433.4	433.4	433.4	433.4	433.4	433.4	433.4	
	SERVICIOS AUXILIARES															
c1	ENERGÍA ELÉCTRICA	54.7945	kWh	0.00012	MDIs/kWh	53.1	53.1	53.1	53.1	53.1	53.1	53.1	53.1	53.1	53.1	
c2	AGUA DE ENFRIAMIENTO	15.7809	m³/h	0.00070	MDIs/m³	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	
c3	VAPOR DE MEDIA	1.8950	Ton/h	0.01800	MDIs/Ton	268.9	268.9	268.9	268.9	268.9	268.9	268.9	268.9	268.9	268.9	
c4	AGUA-DESMINERALIZADA	0.0913	Ton/h	0.00120	MDIs/Ton	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	
C	TOTAL (c1+c2+c3+c4)					410.0	410.0	410.0	410.0	410.0	410.0	410.0	410.0	410.0	410.0	
	MANO DE OBRA															
d1	JEFE DE PLANTA	3	PERS	0.00601	MDIs/h	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	
d2	OPERADOR ESPECIALISTA	3	PERS	0.00301	MDIs/h	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	
d3	OPERADOR DE PRIMERA	3	PERS	0.00150	MDIs/h	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	
d4	OBRAERO GENERAL	3	PERS	0.00062	MDIs/h	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	
D	TOTAL (d1+d2)					87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	
	PRODUCTO			PRECIO DE VENTA												
e1	BIODIESEL	40.0000	MTPA	0.74160	MDIs/Ton	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	
e2	GLICERINA	4.0000	MTPA	1.92000	MDIs/Ton	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	
E	TOTAL VENTAS (e1+e2)					33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	

TABLA No. 9
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO LURGI

ESTADO PROFORMA DE RESULTADOS

CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
	(MILES DE DÓLARES)									
VENTAS NETAS (E)	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6
COSTOS DE PRODUCCIÓN (F)	23,058.8	23,058.8	23,058.8	23,058.8	23,058.8	23,058.8	23,058.8	23,058.8	23,058.8	23,058.8
S UTILIDAD BRUTA (E-F)	10,550.8	10,550.8	10,550.8	10,550.8	10,550.8	10,550.8	10,550.8	10,550.8	10,550.8	10,550.8
TOTAL DE GASTOS (R)	1,114.8	1,114.8	1,114.8	1,114.8	1,114.8	1,114.8	1,114.8	1,114.8	1,114.8	1,114.8
T UTILIDAD DE OPERACIÓN (S-R)	9,436.0	9,436.0	9,436.0	9,436.0	9,436.0	9,436.0	9,436.0	9,436.0	9,436.0	9,436.0
DEPRECIACIÓN (G)	1,069.8	1,069.8	1,069.8	1,069.8	1,069.8	1,069.8	1,069.8	1,069.8	1,069.8	1,069.8
U UTILIDAD NETA ANTES DE IMPUESTOS (T-G)	8,366.2	8,366.2	8,366.2	8,366.2	8,366.2	8,366.2	8,366.2	8,366.2	8,366.2	8,366.2
V IMPUESTO SOBRE LA RENTA (35% de U)	2,928.2	2,928.2	2,928.2	2,928.2	2,928.2	2,928.2	2,928.2	2,928.2	2,928.2	2,928.2
W PARTICIPACIÓN DE LOS TRABAJADORES A LAS UTILIDADES (10% de U)	836.6	836.6	836.6	836.6	836.6	836.6	836.6	836.6	836.6	836.6
X UTILIDAD NETA DESPUÉS DE IMP. (U-V-W)	4,601.4	4,601.4	4,601.4	4,601.4	4,601.4	4,601.4	4,601.4	4,601.4	4,601.4	4,601.4

TABLA No. 10
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO LURGI

CAPITAL DE TRABAJO

	CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10	
					(MILES DE DÓLARES)							
y1	CAJA Y BANCOS (15 días de F)	947.6	947.6	947.6	947.6	947.6	947.6	947.6	947.6	947.6	947.6	
y2	CUENTAS POR COBRAR (15 días de E)	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	
y3	MATERIA PRIMA (15 días de B)	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	
y4	PRODUCTO TERMINADO (15 días de E)	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	
	INVENTARIOS (v3+v4)	1,399.0	1,399.0	1,399.0	1,399.0	1,399.0	1,399.0	1,399.0	1,399.0	1,399.0	1,399.0	
y5	CUENTAS POR PAGAR (30 días de E)	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	
Y	CAPITAL DE TRABAJO (y1+y2+y3+y4+y5)	6,490.3	6,490.3	6,490.3	6,490.3	6,490.3	6,490.3	6,490.3	6,490.3	6,490.3	6,490.3	

TABLA No. 12
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO CD

INSUMOS/CONSUMOS/COSTOS UNITARIOS

CONCEPTO	CONSUMO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	UNIDAD	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
MATERIA PRIMA					(MILES DE DÓLARES)									
a1 ACEITE DE SOYA	40.0000	MTPA	0.65000	MDIs/Ton	23,400.0	23,400.0	23,400.0	23,400.0	23,400.0	23,400.0	23,400.0	23,400.0	23,400.0	23,400.0
a2 METANOL	4.4000	MTPA	0.27000	MDIs/Ton	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2
A TOTAL (a1+a2)					24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2
QUÍMICOS Y CATALIZADORES														
b1 HIDRÓXIDO DE SODIO	0.3400	MTPA	1.00000	MDIs/Ton	306.0	306.0	306.0	306.0	306.0	306.0	306.0	306.0	306.0	306.0
b2 ÁCIDO CLORHÍDRICO	0.4000	MTPA	0.08000	MDIs/Ton	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8
B TOTAL (b1+b2)					334.8	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8
SERVICIOS AUXILIARES														
c1 ENERGÍA ELÉCTRICA	114.1553	kWh	0.00012	MDIs/kWh	110.7	110.7	110.7	110.7	110.7	110.7	110.7	110.7	110.7	110.7
c2 AGUA DE ENFRIAMIENTO	15.7809	m³/h	0.00070	MDIs/m³	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1
c3 VAPOR DE MEDIA	1.3697	Ton/h	0.01800	MDIs/Ton	194.4	194.4	194.4	194.4	194.4	194.4	194.4	194.4	194.4	194.4
c4 AGUA DESMINERALIZADA	0.0913	Ton/h	0.00120	MDIs/Ton	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C TOTAL (c1+c2+c3+c4)					393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0
MANO DE OBRA														
d1 JEFE DE PLANTA	3	PERS	0.00601	MDIs/h	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4
d2 OPERADOR ESPECIALISTA	3	PERS	0.00301	MDIs/h	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7
d3 OPERADOR DE PRIMERA	3	PERS	0.00150	MDIs/h	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
d4 OBRERO GENERAL	3	PERS	0.00062	MDIs/h	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
D TOTAL (d1+d2)					87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8
PRODUCTO														
e1 BIODIESEL	40.0000	MTPA	0.74160	MDIs/Ton	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6
e2 GLICERINA	4.0000	MTPA	1.92000	MDIs/Ton	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0	6,912.0
E TOTAL VENTAS (e1+e2)					33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6	33,609.6

TABLA No. 13
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO CD

COSTOS ANUALES

CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
	(MILES DE DÓLARES)									
A MATERIA PRIMA	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2	24,469.2
B QUÍMICOS	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8	334.8
C MANO DE OBRA DIRECTA	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8
D SUPERVISIÓN (5% de C)	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
F COSTOS DE PRODUCCIÓN (A+B+C+D)	24,896.2	24,896.2	24,896.2	24,896.2	24,896.2	24,896.2	24,896.2	24,896.2	24,896.2	24,896.2
G DEPRECIACIÓN (10% de W)	1,177.2	1,177.2	1,177.2	1,177.2	1,177.2	1,177.2	1,177.2	1,177.2	1,177.2	1,177.2
H SERVICIOS AUXILIARES	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0	393.0
I MANTENIMIENTO (2% del costo del equipo)	153.0	153.0	153.0	153.0	153.0	153.0	153.0	153.0	153.0	153.0
J SUMINISTROS DE OPERACIÓN (10% de H)	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
K TOTAL DE GASTOS DE OPERACIÓN (H+I+J)	561.4	561.4	561.4	561.4	561.4	561.4	561.4	561.4	561.4	561.4
L VENTAS Y DISTRIBUCIÓN (1% de E)	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1
M TOTAL DE GASTOS DE VENTAS (L)	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1	336.1
N GASTOS DE ADMINISTRACIÓN (2% de C)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
O INDIRECTOS DE PLANTA (2% de W)	235.4	235.4	235.4	235.4	235.4	235.4	235.4	235.4	235.4	235.4
P TOTAL DE GASTOS ADMINISTRACIÓN (N+O)	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2	237.2
Q TOTAL DE GASTOS (K+M+P)	1,134.7	1,134.7	1,134.7	1,134.7	1,134.7	1,134.7	1,134.7	1,134.7	1,134.7	1,134.7
R TOTAL DE COSTOS ANUALES (F+G+Q)	27,208.1	27,208.1	27,208.1	27,208.1	27,208.1	27,208.1	27,208.1	27,208.1	27,208.1	27,208.1

TABLA No. 15
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO CD

CAPITAL DE TRABAJO

CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
	(MILES DE DÓLARES)									
y1 CAJA Y BANCOS (15 días de F)	710.2	710.2	710.2	710.2	710.2	710.2	710.2	710.2	710.2	710.2
y2 CUENTAS POR COBRAR (15 días de E)	1,023.8	1,023.8	1,023.8	1,023.8	1,023.8	1,023.8	1,023.8	1,023.8	1,023.8	1,023.8
y3 MATERIA PRIMA (15 días de B)	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
y4 PRODUCTO TERMINADO (15 días de E)	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2	1,381.2
INVENTARIOS (y3+y4)	1,395.0	1,395.0	1,395.0	1,395.0	1,395.0	1,395.0	1,395.0	1,395.0	1,395.0	1,395.0
y5 CUENTAS POR PAGAR (30 días de E)	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4	2,762.4
Y CAPITAL DE TRABAJO (y1+y2+y3+y4+y5)	6,561.8	6,561.8	6,561.8	6,561.8	6,561.8	6,561.8	6,561.8	6,561.8	6,561.8	6,561.8

TABLA No. 17
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO CTER

INSUMOS/CONSUMOS/COSTOS UNITARIOS

	CONCEPTO	CONSUMO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	UNIDAD	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
	MATERIA PRIMA														
						(MILES DE DÓLARES)									
a1	ACEITE DE SOYA	40.0000	MTPA	0.60000	MDIs/Ton	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0	21,600.0
a2	METANOL	4.4000	MTPA	0.27000	MDIs/Ton	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2
A	TOTAL (a1+a2)					22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2	22,669.2
	QUÍMICOS Y CATALIZADORES														
b1	HIDRÓXIDO DE POTASIO	1.2000	MTPA	1.23000	MDIs/Ton	1,328.4	1,328.4	1,328.4	1,328.4	1,328.4	1,328.4	1,328.4	1,328.4	1,328.4	1,328.4
b2	ÁCIDO SULFÚRICO	1.1200	MTPA	0.08000	MDIs/Ton	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6
B	TOTAL (b1+b2)					1,409.0	1,409.0	1,409.0	1,409.0	1,409.0	1,409.0	1,409.0	1,409.0	1,409.0	1,409.0
	SERVICIOS AUXILIARES														
c1	ENERGÍA ELÉCTRICA	228.3105	kWh	0.00012	MDIs/kWh	221.4	221.4	221.4	221.4	221.4	221.4	221.4	221.4	221.4	221.4
c2	AGUA DE ENFRIAMIENTO	6.3014	m³/h	0.00070	MDIs/m³	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8
c3	VAPOR DE MEDIA	0.4155	Ton/h	0.01800	MDIs/Ton	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0
c4	AGUA DESMINERALIZADA	0.0913	Ton/h	0.00120	MDIs/Ton	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	TOTAL (c1+c2+c3+c4)					316.0	316.0	316.0	316.0	316.0	316.0	316.0	316.0	316.0	316.0
	MANO DE OBRA														
d1	JEFE DE PLANTA	3	PERS	0.00601	MDIs/h	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4
d2	OPERADOR ESPECIALISTA	3	PERS	0.00301	MDIs/h	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7
d3	OPERADOR DE PRIMERA	3	PERS	0.00150	MDIs/h	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
d4	OBRERO GENERAL	3	PERS	0.00062	MDIs/h	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
D	TOTAL (d1+d2)					87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8
	PRODUCTO			PRECIO DE VENTA											
e1	BIODIESEL	40.0000	MTPA	0.74160	MDIs/Ton	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6
e2	SULFATO DE POTASIO	0.9200	MTPA	0.21000	MDIs/Ton	173.9	173.9	173.9	173.9	173.9	173.9	173.9	173.9	173.9	173.9
e3	GLICERINA	5.0000	MTPA	1.34000	MDIs/Ton	6,030.0	6,030.0	6,030.0	6,030.0	6,030.0	6,030.0	6,030.0	6,030.0	6,030.0	6,030.0
E	TOTAL VENTAS (e1+e2+e3)					32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5

T A B L A No. 19
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO CTER

ESTADO PROFORMA DE RESULTADOS

CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10		
				(MILES DE DÓLARES)								
VENTAS NETAS (E)	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5	32,901.5		
COSTOS DE PRODUCCIÓN (F)	24,170.5	24,170.5	24,170.5	24,170.5	24,170.5	24,170.5	24,170.5	24,170.5	24,170.5	24,170.5		
S UTILIDAD BRUTA (E-F)	8,731.0	8,731.0	8,731.0	8,731.0	8,731.0	8,731.0	8,731.0	8,731.0	8,731.0	8,731.0		
TOTAL DE GASTOS (R)	927.5	927.5	927.5	927.5	927.5	927.5	927.5	927.5	927.5	927.5		
T UTILIDAD DE OPERACIÓN (S - R)	7,803.5	7,803.5	7,803.5	7,803.5	7,803.5	7,803.5	7,803.5	7,803.5	7,803.5	7,803.5		
DEPRECIACIÓN (G)	818.5	818.5	818.5	818.5	818.5	818.5	818.5	818.5	818.5	818.5		
U UTILIDAD NETA ANTES DE IMPUESTOS (T-G)	6,985.1	6,985.1	6,985.1	6,985.1	6,985.1	6,985.1	6,985.1	6,985.1	6,985.1	6,985.1		
V IMPUESTO SOBRE LA RENTA (35% de U)	2,444.8	2,444.8	2,444.8	2,444.8	2,444.8	2,444.8	2,444.8	2,444.8	2,444.8	2,444.8		
W PARTICIPACIÓN DE LOS TRABAJADORES A LAS UTILIDADES (10% de U)	698.5	698.5	698.5	698.5	698.5	698.5	698.5	698.5	698.5	698.5		
X UTILIDAD NETA DESPUÉS DE IMP. (U-V-W)	3,841.8	3,841.8	3,841.8	3,841.8	3,841.8	3,841.8	3,841.8	3,841.8	3,841.8	3,841.8		

TABLA No. 20
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO CTER

CAPITAL DE TRABAJO

CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
	(M I L E S D E D Ó L A R E S)									
y1 CAJA Y BANCOS (15 días de F)	682.6	682.6	682.6	682.6	682.6	682.6	682.6	682.6	682.6	682.6
y2 CUENTAS POR COBRAR (15 días de E)	994.7	994.7	994.7	994.7	994.7	994.7	994.7	994.7	994.7	994.7
y3 MATERIA PRIMA (15 días de B)	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9	57.9
y4 PRODUCTO TERMINADO (15 días de E)	1,352.1	1,352.1	1,352.1	1,352.1	1,352.1	1,352.1	1,352.1	1,352.1	1,352.1	1,352.1
INVENTARIOS (y3+y4)	1,410.0	1,410.0	1,410.0	1,410.0	1,410.0	1,410.0	1,410.0	1,410.0	1,410.0	1,410.0
y5 CUENTAS POR PAGAR (30 días de E)	2,704.2	2,704.2	2,704.2	2,704.2	2,704.2	2,704.2	2,704.2	2,704.2	2,704.2	2,704.2
Y CAPITAL DE TRABAJO (y1+y2+y3+y4+y5)	6,459.7	6,459.7	6,459.7	6,459.7	6,459.7	6,459.7	6,459.7	6,459.7	6,459.7	6,459.7

TABLA No. 22
EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA PARA EL PROCESO IWP

INSUMOS/CONSUMOS/COSTOS UNITARIOS

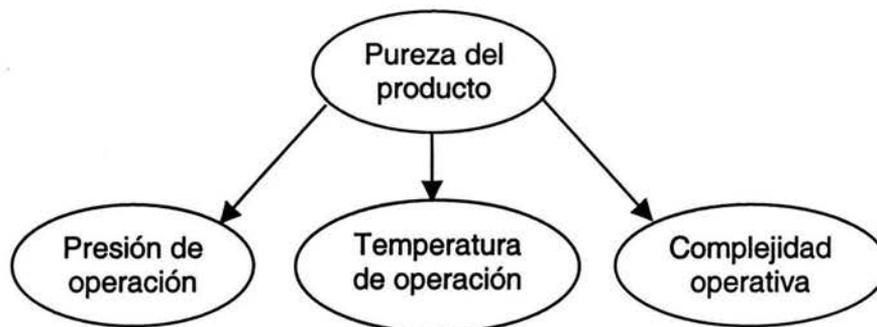
CONCEPTO	CONSUMO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	UNIDAD	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
MATERIA PRIMA					(MILES DE DÓLARES)									
a1 ACEITE DE SOYA	40.8000	MTPA	0.60000	MDIs/Ton	22,032.0	22,032.0	22,032.0	22,032.0	22,032.0	22,032.0	22,032.0	22,032.0	22,032.0	22,032.0
a2 METANOL	4.4000	MTPA	0.27000	MDIs/Ton	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2	1,069.2
A TOTAL (a1+a2)					23,101.2	23,101.2	23,101.2	23,101.2	23,101.2	23,101.2	23,101.2	23,101.2	23,101.2	23,101.2
QUÍMICOS Y CATALIZADORES														
b1 HIDRÓXIDO DE SODIO	1.3200	MTPA	1.00000	MDIs/Ton	1,188.0	1,188.0	1,188.0	1,188.0	1,188.0	1,188.0	1,188.0	1,188.0	1,188.0	1,188.0
b2 ÁCIDO SULFÚRICO	0.2800	MTPA	0.08000	MDIs/Ton	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2
B TOTAL (b1+b2)					1,208.2	1,208.2	1,208.2	1,208.2	1,208.2	1,208.2	1,208.2	1,208.2	1,208.2	1,208.2
SERVICIOS AUXILIARES														
c1 ENERGÍA ELÉCTRICA	456.6210	kWh	0.00012	MDIs/kWh	442.8	442.8	442.8	442.8	442.8	442.8	442.8	442.8	442.8	442.8
c2 AGUA DE ENFRIAMIENTO	9.3151	m³/h	0.00070	MDIs/m³	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4
c3 VAPOR DE MEDIA	1.5982	Ton/h	0.01800	MDIs/Ton	226.8	226.8	226.8	226.8	226.8	226.8	226.8	226.8	226.8	226.8
c4 AGUA DESMINERALIZADA	0.1507	Ton/h	0.00120	MDIs/Ton	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
C TOTAL (c1+c2+c3+c4)					722.4	722.4	722.4	722.4	722.4	722.4	722.4	722.4	722.4	722.4
MANO DE OBRA														
d1 JEFE DE PLANTA	3	PERS	0.00601	MDIs/h	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4
d2 OPERADOR ESPECIALISTA	3	PERS	0.00301	MDIs/h	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7
d3 OPERADOR DE PRIMERA	3	PERS	0.00150	MDIs/h	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
d4 OBRERO GENERAL	3	PERS	0.00062	MDIs/h	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
D TOTAL (d1+d2)					87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8
PRODUCTO														
e1 BIODIESEL	40.0000	MTPA	0.74160	MDIs/Ton	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6	26,697.6
e2 GLICERINA	4.4000	MTPA	1.63000	MDIs/Ton	6,454.8	6,454.8	6,454.8	6,454.8	6,454.8	6,454.8	6,454.8	6,454.8	6,454.8	6,454.8
E TOTAL VENTAS (e1+e2)					33,152.4	33,152.4	33,152.4	33,152.4	33,152.4	33,152.4	33,152.4	33,152.4	33,152.4	33,152.4

Están explicados los criterios de evaluación de tecnologías de proceso para la producción de biodiesel, pero fueron omitidos otros de importancia, en función de la disponibilidad de información.

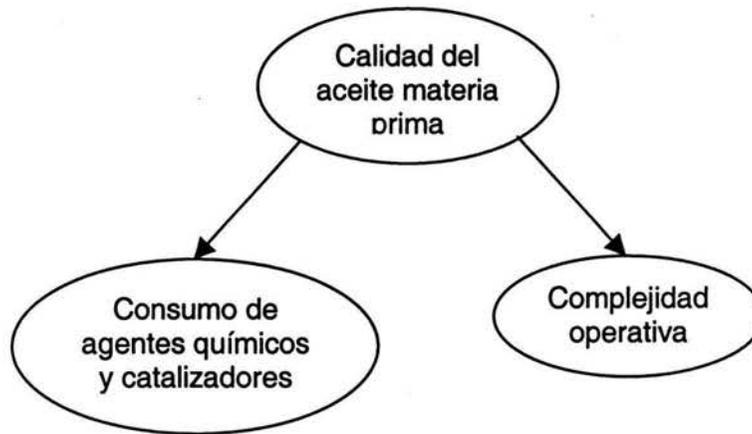
V.2 ESTABLECIMIENTO DE LAS PRIORIDADES ENTRE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Para ponderar el valor que tienen los criterios de evaluación propuestos y poder hacer comparaciones entre ellos, es necesario realizar un análisis para determinar sus importancias relativas y así poder determinar cual criterio ejerce un predominio sobre los demás, una manera de conseguir esto es mediante la fijación de objetivos de aplicación, hasta encontrar el criterio o los criterios que ya no representan objetivos para alcanzar otro de mayor importancia.

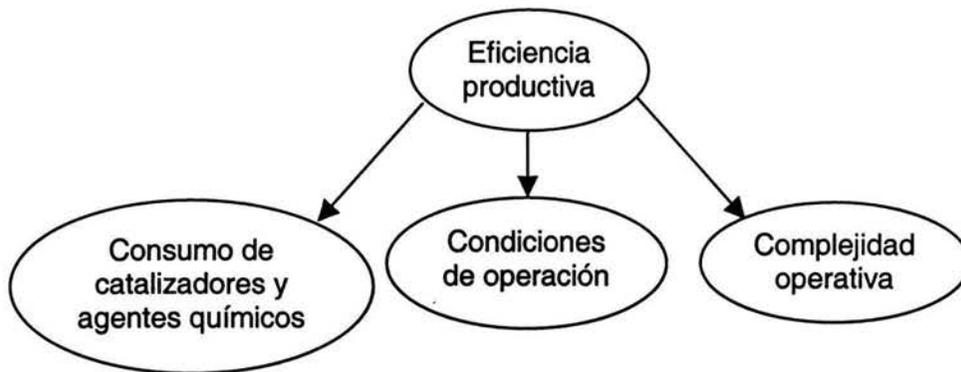
Según las definiciones de los criterios de evaluación de las tecnologías, aplicando el análisis mencionado tenemos las siguientes relaciones:



Este diagrama indica que el requerimiento de la pureza del producto impone las condiciones de operación y la complejidad operativa, puesto que el esquema del proceso está definido por los equipos necesarios que operan a las condiciones requeridas para conseguir la calidad deseada del biodiesel.



Este diagrama indica que la calidad del aceite impone el tipo y consumo de agentes químicos y catalizadores, así como la complejidad operativa para procesar con éxito las materias primas, según el contenido de ácidos grasos libres en el aceite.



Este diagrama indica que la eficiencia productiva impone el consumo y tipo de catalizadores, a la complejidad operativa y a las condiciones de operación, es decir, impone los medios de proceso ya que es, tecnológicamente hablando, la calidad que tiene la tecnología para obtener el producto deseado.

El estatus de la tecnología, los términos de contrato y los parámetros financieros son criterios independientes de los demás, por lo que no imponen predominio sobre ningún otro criterio.

Los diagramas nos muestran que el predominio de importancia de unos criterios sobre otros da lugar a niveles de importancia o prioridades, con lo que estamos en posibilidad de atribuir un valor de prioridad a cada criterio para conseguir así, una calificación para cada tecnología; de tal manera que el valor atribuible de prioridad para el criterio que impone su

importancia sobre los demás lo fijamos como 1 y los criterios del nivel inferior consideramos que tienen valor 2, en el caso del estatus de la tecnología, de los términos de contrato y los criterios de evaluación financiera, los podemos considerar de prioridad 1 por no tener criterios que les impongan prioridad. Para este caso están asignados valores de 0.85 al nivel de prioridad 1 y de 0.6 al nivel de prioridad 2, son valores asignados arbitrariamente y pueden ser modificados si es necesario según el criterio, obviamente respetando la jerarquía del nivel que sea valorado, los valores deben estar entre cero y uno, dado que así lo impone la Lógica Difusa. De la misma forma, las características de los criterios de evaluación deben estar con un valor entre cero y uno, para conseguirlo, es necesario proponer una función matemática que nos resulte un valor dentro del intervalo mencionado como función del dato correspondiente a la característica respectiva; las funciones empleadas para calcular el valor correspondiente a dicha característica fueron la curva gaussiana, el empleo de la ponderación simple ajustando una recta entre los valores máximo y mínimo de las características y los valores asignados arbitrariamente y la fijación de 0.75 o 0.5 según la prioridad o importancia técnica en la preferencia del uso de uno u otro catalizador o agente químico. El resultado de este proceso para las características es sujeto de comparación con los valores asignados para los criterios de evaluación.

Para el cálculo numérico del peso relativo de los criterios de evaluación, la Lógica Difusa propone una función muy sencilla que busca el valor mínimo al valor correspondiente al complemento del criterio calculado con una función del tipo de las mencionadas anteriormente para las características de cada criterio y del valor asignado según el nivel deducido para dicho criterio, el resultado nos lleva directamente a los valores dentro de los que, para cada tecnología, será buscado el valor máximo, encontrando así el orden de preferencias de tecnología. Cuando existe un empate, la Lógica Difusa propone una metodología muy sencilla de desempate, de la cual aparece un nuevo ordenamiento para conocer el nivel de preferencia entre las tecnologías restantes.

CAPÍTULO VI

EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS MEDIANTE SELECCIÓN DIFUSA MULTI OBJETIVO

La técnica de la Selección Difusa Multiobjetivo funciona con base en conjuntos de características definidos para cada alternativa. El procedimiento es el siguiente:

- 1) Definir un conjunto de alternativas a evaluar con sus correspondientes objetivos bien definidos, denotado como "A".
- 2) Del conjunto de datos de características definidas para realizar la evaluación, determinar cuales de ellas pueden estar agrupadas en una sola característica que tenga un significado más preciso que las que la forman por sí solas.
- 3) Establecer el conjunto de características (objetivos) de evaluación, denotado como "O".
- 4) Definir las características cualitativas no expresadas en valores numéricos.

-
-
- 5) Determinar el grado de membresía para cada característica de cada alternativa empleando las funciones recomendadas por la Lógica Difusa (la curva gaussiana, la fracción por ciento, la parametrización intuitiva de valores cualitativos y la normalización o adaptación de la ecuación de una recta) según aplique; si es un dato resultado de una agrupación de características, es apropiada la normalización o la adaptación de una recta, si es un dato en porcentaje basta con expresarlo en forma de fracción, si es un dato cualitativo, puede asignársele cierto valor según el criterio y si el dato no entra en ninguno de los casos anteriores, es recomendable el uso de la curva gaussiana ya que el dato no sigue ningún tipo de patrón y entonces una curva probabilística de este tipo es lo más apropiado. Es preciso recordar que los grados de membresía varían entre cero y uno.
 - 6) Determinar el conjunto de preferencias, denotado como “P”, que aplican a cada característica, esto procede por medio del juicio sobre la calidad, veracidad y credibilidad de la información disponible, así como de la importancia atribuida a las características u objetivos de evaluación, las preferencias son valores numéricos expresados por criterio y deben estar entre cero y uno.
 - 7) Calcular la incertidumbre asociada a las preferencias mediante el complemento de estas, de tal manera que la suma de la preferencia y su complemento den por resultado 1.
 - 8) Ya determinadas las incertidumbres y los grados de membresía, procede realizar la comparación del grado de membresía calculado para cada objetivo contra su correspondiente incertidumbre, es una comparación que sucede entre dos valores cada vez, entonces el resultado es el valor mayor de ambos que representa la maximización de la función de decisión; recordemos que por definición, la unión significa maximización.
 - 9) Una vez que este proceso de comparación ha ocurrido objetivo por objetivo para cada alternativa, procede la minimización de la función de decisión, ésta ocurre únicamente para cada alternativa, y para cada una de ellas resulta el valor mínimo de la comparación entre todos los valores correspondientes a cada objetivo de cada alternativa; recordemos que por definición, la intersección significa minimización.
 - 10) Después que tenemos el valor mínimo de cada alternativa, procede entonces a comparar los valores mínimos correspondientes a cada alternativa y seleccionamos el mayor de estos, correspondiente a la alternativa ganadora y los lugares subsecuentes en orden de conveniencia.
-
-

-
- 11) Finalmente en caso de empate, regresamos al inciso anterior y omitimos el objetivo en donde está el valor empatado y en las alternativas en donde esto haya sucedido, nuevamente procede la búsqueda de los valores mínimos y su comparación para encontrar el mayor; así procede cuantas veces sea necesario hasta encontrar al ganador de los empatados. El perdedor o los perdedores de este proceso nuevamente es o son sometidos a comparación con las otras alternativas y el método procede de la misma manera.

Según la herramienta de la Lógica Difusa denominada "Toma de Decisiones Multiobjetivo" descrita brevemente en los párrafos anteriores, que es la que aplica para nuestro caso, es necesario definir un universo de alternativas A:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

Donde: a1 es Biox Co.
a2 es Lurgi Metallgesellschaft GmbH
a3 es Ölmühle Connemann Leer GmbH
a4 es Energea GmbH
a5 es Imperial Western Products Inc.

Requiere definir un conjunto de objetivos o criterios O:

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_k\}$$

Donde: o1 es Eficiencia Productiva (Rendimiento del proceso)
o2 es Eficiencia Productiva (Rapidez de reacción)
o3 es Pureza de productos (Pureza del biodiesel)
o4 es Pureza de productos (Pureza de la glicerina)
o5 es Consumo de Catalizadores
o6 es Calidad del Aceite Materia Prima
o7 es Consumo de Agentes Químicos
o8 es Presión de Operación
o9 es Temperatura de Operación
o10 es Estatus de la Tecnología (Cantidad de plantas comerciales)
o11 es Estatus de la Tecnología (Rango de capacidades)
o12 es Estatus de la Tecnología (Tiempo de implementación de la tecnología)
o13 es Términos de Contrato
o14 es Complejidad Operativa
o15 es Tasa Interna de Retorno
o16 es Valor Presente Neto
o17 es Período de Recuperación de la Inversión
o18 es Retorno de la Inversión

Es preciso definir la membresía de la alternativa **ai** en el objetivo **oi**, que es la intensidad con la cual la alternativa **ai** cumple cada objetivo **oi**, o dicho de otra manera, el grado con el cual la alternativa **ai** satisface el criterio especificado en el objetivo **oi**, y se denota por $\mu_{oi}(a)$, el cual resulta de un cálculo numérico mediante una función matemática de las ya mencionadas para poder encontrar una función de decisión que satisface simultáneamente todos los objetivos de las decisiones:

$$D = o1 \cap o2 \cap \dots \cap o14$$

Cuya función de membresía para cada alternativa ai está dada por:

$$\mu_d(ai) = \min [\mu_{o1}(aj), \mu_{o2}(aj), \dots, \mu_{o14}(aj)]$$

Es necesario definir un conjunto de preferencias P cuyos elementos cuantifican la importancia o prioridad de cada objetivo.

$$P = \{b1, b2\}$$

Donde: b1 es igual a 0.85
b2 es igual a 0.60

Cuya función de membresía para cada objetivo **oi** de la alternativa **ai** está dada por:

Donde: $\mu_{b1}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b2}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b3}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b4}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b5}(ai)$ es 0.60
 $\mu_{b6}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b7}(aj)$ es 0.60
 $\mu_{b8}(aj)$ es 0.60
 $\mu_{b9}(aj)$ es 0.60
 $\mu_{b10}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b11}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b12}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b13}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b14}(aj)$ es 0.60
 $\mu_{b15}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b16}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b17}(aj)$ es 0.85
 $\mu_{b18}(aj)$ es 0.85

De tal manera, que para poder relacionar cada objetivo *oi* con su prioridad *bi* para una de las alternativas *aj*, es factible emplear la intersección conjunta de las 2 decisiones o preferencias.

$$D(ai) = \bigcap_{i=1}^{19} (\neg bi \cup oi)$$

La solución óptima que maximiza D resulta de la siguiente relación:

$$\mu_d(a^*) = \max_{a \in A} \{ \min [\max (\mu_{\neg bi}(aj), \mu_{oi}(ai))] \} \dots\dots\dots (eq. 1)$$

En caso de empate técnico, el desempate está previsto por medio de la siguiente expresión:

$$D(aj)^* = \min_{i \neq g, \dots} \{ \neg bi(aj) \cup oi(aj) \}$$

La solución del desempate en segundo lugar está dada por:

$$\mu_d(ai^*) = \max_{i \neq g, \dots} \{ \min [\max (\mu_{\neg bi}(aj), \mu_{oi}(aj))] \} \dots\dots\dots (eq. 2)$$

Donde g es la relación en donde está el elemento ganador ($\neg bi \cup oi$).

En caso dado, la solución del desempate en tercer lugar está dada por:

$$\mu_d(ai^*) = \max_{i \neq g, k, \dots} \{ \min [\max (\mu_{\neg bi}(aj), \mu_{oi}(aj))] \} \dots\dots\dots (eq. 3)$$

Donde g y k son la relaciones en donde están los elementos ganadores ($\neg bi \cup oi$).

Ver Anexo I

Los valores de membresía de los criterios empleados para la evaluación aparecen sombreados en la tabla 29, mencionando al final de ésta la función matemática con la cual fueron calculados a partir de los datos contenidos en la tabla 28, y aparecen en la tabla 30.

La tabla 27 presenta las preferencias asociadas a cada criterio mediante los valores propuestos para su nivel de prioridad y la tabla 31 muestra los primeros resultados de la evaluación, quedando como ganador Energea Umwelttechnologie GmbH con un empate en segundo lugar entre el resto de las tecnologías.

En la tabla 27 aparece el desempate entre las tecnologías restantes quedando IWP Inc., en segundo lugar, en tercer lugar BIOX Co., Lurgi GmbH en cuarto y finalmente Ölmühle Connemann GmbH en quinto.

Tabla 27. Preferencias Atribuidas		Valores Asignados Arbitrariamente por criterio de prioridad	
		Afirmación (bi)	Negación (\neg bi)
o1	Eficiencia Productiva (Rendimiento del proceso)	0.85	0.15
o2	Eficiencia Productiva (Rapidez de reacción)	0.85	0.15
o3	Pureza de productos (Pureza del biodiesel)	0.85	0.15
o4	Pureza de productos (Pureza de la glicerina)	0.85	0.15
o5	Consumo de Catalizadores	0.60	0.40
o6	Calidad Aceite Materia Prima	0.85	0.15
o7	Consumo Agentes Químicos	0.60	0.40
o8	Presión de Operación	0.60	0.40
o9	Temperatura de Operación	0.60	0.40
o10	Estatus de la Tecnología (Cantidad de plantas comerciales)	0.85	0.15
o11	Estatus de la Tecnología (Rango de capacidades)	0.85	0.15
o12	Estatus de la Tecnología (Tiempo de implementación de la tecnología)	0.85	0.15
o13	Términos de Contrato	0.85	0.15
o14	Complejidad Operativa	0.60	0.40
o15	Tasa interna de retorno	0.85	0.15
o16	Valor presente neto	0.85	0.15
o17	Período de recuperación de la inversión	0.85	0.15
o18	Retorno de la inversión	0.85	0.15

Tabla 28. Características Técnico-Financieras de las Tecnologías		a1	a2	a3	a4	a5
		Biox Co.	Lurgi Metallgesellschaft GmbH	Ölmühle Connemann Leer GmbH	Energiea Umwelttechnologie GmbH	Imperial Western Products Inc.
	Eficiencia productiva					
o1	Rendimiento del proceso (%)	99.4	99.2	99.6	99.9	98
o2	Rapidez de reacción (min)	1	60	40	0.33	70
	Pureza de productos					
o3	Pureza del biodiesel (%)	99.48	99.85	99.89	99.00	99.00
o4	Pureza de la glicerina (%)	99.0	99.8	99.5	80.0	90.0
o5	Consumo de catalizadores					
	Tetrahidrofurano	si	no	no	no	no
	Hidróxido de sodio	si	si	si	no	si
	Hidróxido de potasio	no	no	no	si	no
	Metóxido de sodio	no	si	no	no	no
	Calidad del aceite materia prima					
o6	Contenido de ácidos grasos libres (%)	30	20	5	100	40
o7	Consumo de agentes químicos					
	Ácido sulfúrico	si	si	no	si	si
	Ácido clorhídrico	no	si	si	no	no
o8	Presión de operación					
	Reacción de esterificación (atm)	-----	-----	-----	1	1
	Reacción de transesterificación (atm)	1	1	1	198	1
	Purificación de biodiesel (atm)	1	1	1	1	1
	Secado del biodiesel (atm)	1	1	0.88	1	1
	Purificación de la glicerina (atm)	1	1	1	-----	-----
	Secado de la glicerina (atm)	1	1	1	-----	1
o9	Temperatura de operación					
	Reacción de esterificación (°C)	-----	-----	-----	60	60
	Reacción de transesterificación (°C)	60	60	60	60	60
	Purificación de biodiesel (°C)	75	70	70	70	70
	Secado del biodiesel (°C)	120	120	120	120	120
	Purificación de la glicerina (°C)	110	110	110	-----	-----
	Secado de la glicerina (°C)	120	120	110	-----	110

Tabla 28. Características Técnico-Financieras de las Tecnologías (Continuación)		a1	a2	a3	a4	a5
		Biox Co.	Lurgi Metallgesellschaft GmbH	Ölmühle Connemann Leer GmbH	Energiea Umwelttechnologie GmbH	Imperial Western Products Inc.
Estatus de la tecnología						
o10	Cantidad de plantas comerciales en operación	0	9	5	4	1
	Cantidad de plantas comerciales en proyecto	1	1	1	1	0
o11	Rango de capacidades (millones de litros/año)	60.6	2.84 - 113.6	0.38 - 510	45 - 285	38
o12	Tiempo de implementación de la tecnología (planta piloto) (años)	3	16	13	6	2
Términos de contrato						
o13	Tiempo de entrega (meses)	6	13	15	10	12
o14	Complejidad operativa					
	Cantidad de ciclos de proceso	3	4	2	2	2
	Cantidad de etapas de reacción	3	3	2	3	2
	Cantidad de reactores por etapa de reacción	1	1	2	1	2
	Número de secciones	6	6	5	3	4
o15	Tasa interna de retorno (%)	31.47	35.21	25.66	34.57	30.02
o16	Valor presente neto (MUSDIs)	28,313	35,348	31,493	27,779	27,329
o17	Período de recuperación de la inversión (años)	4.74	4.11	5.93	4.28	5.01
o18	Retorno de la inversión (%)	516	533	402	573	504

Tabla 29. Grado de membresía de cada opción en cada criterio		$\mu_{oi}(a1)$	$\mu_{oi}(a2)$	$\mu_{oi}(a3)$	$\mu_{oi}(a4)$	$\mu_{oi}(a5)$	Función matemática
		Biox Co.	Lurgi Metallgesellschaft GmbH	Ölmühle Connemann Leer GmbH	Energiea GmbH	Imperial Western Products Inc.	
Eficiencia productiva							
o1	Rendimiento del proceso	0.9940	0.9920	0.9960	0.9990	0.9800	centésimas
o2	Rapidez de reacción	0.9999	0.1080	0.3740	1.0000	0.0480	curva gaussiana
Pureza de productos							
o3	Pureza del biodiesel	0.9948	0.9985	0.9989	0.9900	0.9900	centésimas
o4	Pureza de la glicerina	0.9900	0.9980	0.9950	0.8000	0.9000	centésimas
o5	Consumo de catalizadores	0.7500	0.7500	0.5000	0.5000	0.5000	máximo
	Tetrahydrofurano	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	valores arbitrarios
	Hidróxido de sodio	0.50	0.50	0.50	0.00	0.50	valores arbitrarios
	Hidróxido de potasio	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	valores arbitrarios
	Metóxido de sodio	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	valores arbitrarios
Calidad del aceite materia prima							
o6	Contenido de ácidos grasos libres	0.3000	0.2000	0.0500	1.0000	0.4000	centésimas
o7	Consumo de agentes químicos	0.7500	0.7500	0.5000	0.7500	0.7500	máximo
	Ácido sulfúrico	0.7500	0.7500	0.0000	0.7500	0.7500	valores arbitrarios
	Ácido clorhídrico	0.0000	0.5000	0.5000	0.0000	0.0000	valores arbitrarios
o8	Presión de operación	0.9943	0.9943	1.0000	0.0000	0.9994	recta
	Reacción de esterificación						
	Reacción de transesterificación	6.00	6.00	5.00	201.00	5.00	suma
	Purificación de biodiesel	5	1		-0.0051		pendiente
	Secado del biodiesel	201	0		1.0249		eje intersección
	Purificación de la glicerina						
	Secado de la glicerina	0.9943	0.9943	1.0000	0.0000	0.9994	recta
o9	Temperatura de operación	0.0000	0.0213	0.3191	1.0000	0.5319	recta
	Reacción de esterificación						
	Reacción de transesterificación	545	540	470	310	420	suma
	Purificación de biodiesel	310	1.0		-0.0043		pendiente
	Secado del biodiesel	545	0		2.3191		eje intersección
	Purificación de la glicerina						
	Secado de la glicerina	0.0000	0.0213	0.3191	1.0000	0.5319	recta

Tabla 29. Grado de membresía de cada opción en cada criterio (Continuación)		$\mu_{oi}(a1)$	$\mu_{oi}(a2)$	$\mu_{oi}(a3)$	$\mu_{oi}(a4)$	$\mu_{oi}(a5)$	Función matemática
		Biox Co.	Lurgi Metallgesellschaft GmbH	Ölmühle Connemann Leer GmbH	Energiea GmbH	Imperial Western Products Inc.	
Estatus de la tecnología							
o10	Cantidad de plantas comerc. en proyecto	0.1000	1.0000	0.6000	0.5000	0.1000	normalización al máximo
o11	Rango de capacidades	0.4601	0.5420	1.0000	0.7559	0.4247	curva gaussiana
o12	Tiempo de implem. de la tec. (planta piloto)	0.9608	0.0004	0.0079	0.5273	1.0000	curva gaussiana
Términos de contrato							
o13	Tiempo de entrega	0.4000	0.8667	1.0000	0.6667	0.8000	normalización al máximo
o14	Complejidad operativa	0.9551	0.9216	0.9949	0.9949	1.0000	recta
	Cantidad de ciclos de proceso	2	1		-0.0714286		pendiente eje intersección
	Cantidad de etapas de reacción	16	0		1.14285714		
	Cantidad de reactores por etapa de reacción						suma
	Número de secciones	13	14	11	11	10	
o15	Tasa interna de retorno	0.3147	0.3521	0.2566	0.3457	0.3002	centésimas
o16	Valor presente neto	0.9612	1.0000	0.9882	0.9552	0.9498	curva gaussiana
o17	Período de recuperación de la inversión	0.7630	0.7946	0.7037	0.7860	0.7493	recta
o18	Retorno de la inversión	0.9900	0.9951	0.9144	1.0000	0.9854	curva gaussiana

Tabla 30. Grado de membresía de cada opción en cada criterio		P1	P2	P3	P4	P5
		Biox Co.	Lurgi Metallgesellschaft GmbH	Ölmühle Connemann Leer GmbH	Energiea Umwelttechnologie GmbH	Imperial Western Products Inc.
o1	Eficiencia Productiva (Rendimiento del proceso)	0.9940	0.9920	0.9960	0.9990	0.9800
o2	Eficiencia Productiva (Rapidez de reacción)	0.9999	0.4835	0.7253	1.0000	0.3714
o3	Pureza de productos (Pureza del biodiesel)	0.9948	0.9985	0.9989	0.9900	0.9900
o4	Pureza de productos (Pureza de la glicerina)	0.9900	0.9980	0.9950	0.8000	0.9000
o5	Consumo de Catalizadores	0.7500	0.7500	0.5000	0.5000	0.5000
o6	Calidad Aceite Materia Prima	0.3000	0.2000	0.0500	1.0000	0.4000
o7	Consumo Agentes Químicos	0.7500	0.7500	0.5000	0.7500	0.7500
o8	Presión de Operación	0.9943	0.9943	1.0000	0.0000	0.9994
o9	Temperatura de Operación	0.0000	0.0213	0.3191	1.0000	0.5319
o10	Estatus de la Tecnología (Cantidad de plantas comerciales)	0.1000	1.0000	0.6000	0.5000	0.1000
o11	Estatus de la Tecnología (Rango de capacidades)	0.4601	0.5419	1.0000	0.7558	0.4247
o12	Estatus de la Tecnología (Tiempo de implementación de la tec.)	0.9286	0.0000	0.2143	0.7143	1.0000
o13	Términos de Contrato	1.0000	0.8043	0.6977	0.9314	0.8521
o14	Complejidad Operativa	0.9551	0.9216	0.9949	0.9949	1.0000
o15	Tasa interna de retorno	0.3147	0.3521	0.2566	0.3457	0.3002
o16	Valor presente neto	0.9612	1.0000	0.9882	0.9552	0.9498
o17	Período de recuperación de la inversión	0.7630	0.7946	0.7037	0.7860	0.7493
o18	Retorno de la inversión	0.9900	0.9951	0.9144	1.0000	0.9854

**Tabla 31. Evaluación Técnica
(Selección Difusa Multiobjetivo)**

		D(a1)	D(a2)	D(a3)	D(a4)	D(a5)	Función matemática
		Biox Co.	Lurgi Metallgesellschaft GmbH	Ölmühle Connemann Leer GmbH	Energiea Umwelttechnologie GmbH	Imperial Western Products Inc.	
o1	Eficiencia Productiva (Rendimiento del proceso)	0.9940	0.9920	0.9960	0.9990	0.9800	máximo
o2	Eficiencia Productiva (Rapidez de reacción)	0.9999	0.4835	0.7253	1.0000	0.3714	máximo
o3	Pureza de productos (Pureza del biodiesel)	0.9948	0.9985	0.9989	0.9900	0.9900	máximo
o4	Pureza de productos (Pureza de la glicerina)	0.9900	0.9980	0.9950	0.8000	0.9000	máximo
o5	Consumo de Catalizadores	0.7500	0.7500	0.5000	0.5000	0.5000	máximo
o6	Calidad Aceite Materia Prima	0.3000	0.2000	0.1500	1.0000	0.4000	máximo
o7	Consumo Agentes Químicos	0.7500	0.7500	0.5000	0.7500	0.7500	máximo
o8	Presión de Operación	0.9943	0.9943	1.0000	0.4000	0.9994	máximo
o9	Temperatura de Operación	0.4000	0.4000	0.4000	1.0000	0.5319	máximo
o10	Estatus de la Tecnología (Cant. de plantas comerc.)	0.1500	1.0000	0.6000	0.5000	0.1500	máximo
o11	Estatus de la Tecnología (Rango de capacidades)	0.4601	0.5419	1.0000	0.7558	0.4247	máximo
o12	Estatus de la Tecnología (Tiempo de implem. tec.)	0.9286	0.1500	0.1500	0.7143	1.0000	máximo
o13	Términos de Contrato	1.0000	0.8043	0.6077	0.9314	0.8521	máximo
o14	Complejidad Operativa	0.9551	0.9216	0.9949	0.9949	1.0000	máximo
o15	Tasa interna de retorno	0.3147	0.3521	0.2566	0.3457	0.3002	máximo
o16	Valor presente neto	0.9572	1.0000	0.9982	0.9552	0.9998	máximo
o17	Período de recuperación de la inversión	0.7630	0.7946	0.7037	0.7860	0.7493	máximo
o18	Retorno de la inversión	0.9900	0.9951	0.9144	1.0000	0.9854	máximo
Resultado de la Evaluación Técnica		0.1500	0.1500	0.1500	0.3457 1er lugar	0.1500	mínimo

Valores mínimos de los obtenidos para cada tecnología mediante la ecuación (1) que muestran una situación de empate en segundo lugar entre estas cuatro tecnologías, y que son objeto de la aplicación del primer criterio de desempate previsto en la Lógica Difusa.

Valor mínimo de los obtenidos mediante la ecuación (1) para el proceso CTER, que le otorga el primer lugar en la evaluación.

Tabla 32. Evaluación Técnica. Desempate 2º Lugar (Selección Difusa Multiobjetivo)		D(a1)*	D(a2)*	D(a3)*	D(a5)*	Función matemática
		Biox Co.	Lurgi Metallgesellschaft GmbH	Ölmühle Connemann Leer GmbH	Imperial Western Products Inc.	
o1	Eficiencia Productiva (Rendimiento del proceso)	0.9940	0.9920	0.9960	0.9800	máximo
o2	Eficiencia Productiva (Rapidez de reacción)	0.9999	0.4835	0.7253	0.3714	máximo
o3	Pureza de productos (Pureza del biodiesel)	0.9948	0.9985	0.9989	0.9900	máximo
o4	Pureza de productos (Pureza de la glicerina)	0.9900	0.9980	0.9950	0.9000	máximo
o5	Consumo de Catalizadores	0.7500	0.7500	0.5000	0.5000	máximo
o6	Calidad Aceite Materia Prima	0.3000	0.2000		0.4000	máximo
o7	Consumo Agentes Químicos	0.7500	0.7500	0.5000	0.7500	máximo
o8	Presión de Operación	0.9943	0.9943	1.0000	0.9994	máximo
o9	Temperatura de Operación	0.4000	0.4000	0.4000	0.5319	máximo
o10	Estatus de la Tecnología (Cantidad de plantas comerc.)		1.0000	0.6000		máximo
o11	Estatus de la Tecnología (Rango de capacidades)	0.4601	0.5819	1.0000	0.4247	máximo
o12	Estatus de la Tecnología (Tiempo de implem. de la tec.)	0.9286		0.1500	1.0000	máximo
o13	Términos de Contrato	1.0000	0.8043	0.6977	0.8521	máximo
o14	Complejidad Operativa	0.9551	0.9216	0.9949	1.0000	máximo
o15	Tasa Interna de Retorno	0.3147	0.3621	0.2666	0.3002	máximo
o16	Valor Presente Neto	0.9617	1.0000	0.9882	0.9498	máximo
o17	Período de Recuperación de la Inversión	0.7670	0.7046	0.7037	0.7493	máximo
o18	Retorno de la Inversión	0.9100	0.9251	0.9144	0.9354	máximo
Resultado de la Evaluación Técnica (Primer desempate)		0.3000 3er Lugar	0.2000 4o Lugar	0.1500 5o Lugar	0.3002 2o Lugar	mínimo

Valor mínimo de los obtenidos mediante la ecuación (2) para cada uno de los procesos restantes aplicando el primer criterio de desempate, que le otorga el segundo lugar en la evaluación al proceso IWP, el tercero al proceso BIOX, el cuarto al proceso LURGI y el último al proceso CD en la evaluación.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Habiendo sintetizado los atributos de cada tecnología en una matriz de evaluación y conociendo el manejo que cada tecnología da a sus atributos, ahora resulta factible justificar los resultados obtenidos haciendo un análisis de las características de las tecnologías.

Bajo un panorama general, el proceso de producción de biodiesel es esencialmente el mismo para las cinco tecnologías evaluadas, para evitar caer en redundancias, podemos distinguir dos etapas principales, la elaboración de los productos en sí y otra en la que a través de procesos de separación conseguimos los estándares impuestos de calidad por las normas que aplican; es en esta última etapa donde es posible detectar que las características técnicas y económicas tienen una notable semejanza para las cinco tecnologías, de alguna manera son iguales salvo las pequeñas diferencias asociadas por naturaleza a la misma diferencia de tecnologías.

La verdadera trascendencia de cada proceso lo impone el sello distintivo que cada tecnólogo muestra en la etapa de reacción de su proceso. Es justamente esta etapa la que requiere mayor investigación e innovación, en la que la búsqueda consiste en producir más con menos. Por lo menos para el caso del biodiesel, es suficiente analizar esta etapa para explicar el porqué de los resultados de las tablas 31, 32 y 33. Los insumos principales en lo que respecta a la cantidad, precio y significado tecnológico tienen acción en esta etapa y la forma en la que cada tecnólogo los aplica a dichos insumos hacen la diferencia.

Empezando por el primer lugar en la evaluación, que corresponde al proceso CTER, el resultado es evidentemente concordante con su propuesta tecnológica en la zona de reacción, donde su punto distintivo es el uso de una presión muy alta, esta situación favorece la separación de las fases formadas mediante nanofiltración y causa que el proceso sea 100% continuo sin recurrir a tiempos de residencia en ningún momento, consiguiendo así la máxima rapidez con la que en la actualidad es posible producir el biodiesel sin que este rasgo traiga consecuencias económicamente desfavorables, ya que solamente implica el uso de una mayor cantidad de energía eléctrica que financieramente resulta muy bien absorbida por los beneficios obtenidos. Las consecuencias del detalle de la reacción impactan directamente en la comercialización de la tecnología convirtiéndola en muy confiable y comercialmente exitosa, además de ofrecer una vasta flexibilidad para procesar aceites prácticamente de cualquier calidad, hecho que las demás tecnologías consiguen sólo de forma limitada.

En segundo lugar está el caso del proceso IWP, en el que el elemento tecnológico radica en su capacidad de procesar aceite de baja calidad sin la necesidad de añadir una etapa más al proceso, aunque no puede competir en este aspecto con CTER. Estamos hablando de la tecnología más reciente y ya en producción comercial, además de poseer una buena rentabilidad, situación que prácticamente la empareja con BIOX.

El tercer lugar lo tiene el proceso BIOX, nuevamente es la innovación tecnológica en la reacción lo que le vale el tercer lugar en la evaluación; esta tecnología impone que la reacción ocurra en una sola fase mediante el uso de un cosolvente inerte recuperable y recirculable casi en su totalidad registrando un consumo mínimo, ésta es una gran aportación tecnológica a la producción de biodiesel, ya que es el único proceso que consigue una muy alta (suficiente) conversión del aceite en metiléster en una sola etapa de reacción y con una

rapidez muy notable, aunque menor que la de CTER. Esta tecnología es muy reciente y la característica descrita le ha colocado en una posición de éxito comercial, ya que está demostrado que es capaz de producir biodiesel a gran escala.

Las tecnologías BIOX y CTER son las únicas que han innovado el método de reacción, el método típico implica un tiempo de residencia relativamente grande y por lo menos dos etapas de reacción en serie. Bajo esta limitación, las tecnologías restantes apuestan su capacidad en establecer arreglos y configuraciones para optimizar la reacción.

En cuarto lugar aparece el proceso LURGI, el más antiguo y que ha conseguido excelentes resultados en la optimización de la reacción por medio de la recirculación de la fase acuosa (glicerina) del separador de la segunda etapa de reacción hacia la primera, tal mecanismo implica un ahorro por reuso de catalizador y de metanol, que las demás tecnologías desperdician en el efluente del proceso. Aunque esta tecnología va siendo desplazada por la innovación de las demás, ha demostrado ser una tecnología muy confiable, con gran prestigio y muy rentable, lo que le ha valido mantenerse firme en el mercado.

Finalmente en quinto lugar queda el proceso CD, cuyo valor tecnológico consiste en alcanzar capacidades de producción muy grandes con respecto a la competencia, la adaptación de torres reactivas agiliza la reacción, seguidas de reactores de tanque agitado, y permiten el manejo de cargas muy grandes, consiguiendo al mismo tiempo una reducción en la duración de la reacción (40 min) con respecto a un proceso que usa solamente reactores de tanque agitado (60 min). Este proceso adolece de que requiere aceite refinado para producir biodiesel, motivo por el cual queda relegado por su baja rentabilidad con respecto a las demás tecnologías.

En este análisis de resultados comentamos las virtudes más importantes de cada proceso, más que hacer referencia a datos y valores numéricos, ya que observando la tabla de los criterios técnicos y financieros, es posible ver que fueron las diferencias determinantes las que mencionadas con brevedad en los párrafos anteriores.

Como es posible observar, cada tecnología cuenta con sus virtudes, sin embargo, el análisis difuso ha permitido realizar una evaluación comparativa entre ellas, midiendo la intensidad con que cada una cumple con cada criterio y la manera en que las demás asemejan a la mejor para cada criterio de evaluación; esto es, si bien una cumple mejor con un criterio que

las restantes, estas últimas son muy cercanas al valor con que la primera impone su superioridad, o bien, puede suceder que la primera cumpla con un criterio en forma clara y determinante sobre las demás.

Por ejemplo la tabla 34 muestra los criterios empleados en la evaluación, según el orden en que dichos criterios cumplen con cada tecnología. La tabla 35 es el resumen de la tabla 34 que muestra la cantidad de criterios de 1ª y 2ª prioridad en el orden en el que cumplen para cada tecnología, los datos a ponderar aparecen suponiendo que la prioridad 1 tiene un valor de 1 y la prioridad dos tiene un valor de 0.5 y que según el lugar que ocupan (desde el 1º al 5º) toman valores de 0.2 a 1 a intervalos de 0.2, dando por resultado la tabla 36, que puede dar un diagnóstico falso, además el orden mencionado no es coherente con los resultados obtenidos en la evaluación por Lógica Difusa. Esta tabla da una perspectiva cerrada, es decir, es posible tomar las decisiones con el aspecto que nos brinda, pero no otorga la sensibilidad del significado de cada criterio (preferencia) ni la manera en la cual cada criterio cumple con su significado (grado de membresía). Un análisis simplista, tomando en cuenta las prioridades establecidas, daría por resultado que el primer lugar sería CTER, en segundo BIOX, un empate en tercero entre LURGI y CD y en quinto IWP. Teniendo en cuenta lo que ofrece cada tecnología, es factible llegar a la conclusión de que de esta manera existe un error, además de que hablar de un empate en un resultado final no es apropiado.

En la tabla 28 es notable que existen algunos criterios que aunque alguna de las tecnologías demuestra cumplir con más apego, las otras le siguen de cerca con un margen muy estrecho, en otros criterios, tal diferencia es mucho más notable. Es justamente esta situación la que explota el concepto de grado de membresía asociado a cada criterio (tabla 30). Ahora bien, cada valor de membresía debe estar asociado al valor de preferencia, que es el concepto que emplea la Lógica Difusa para valorar la prioridad o importancia relativa de cada criterio (tabla 27), cuyo complemento fija el límite inferior (negación difusa) que puede adoptar el valor de un criterio.

De tal manera, que por medio de la combinación entre las tablas 27 y 30 mediante la ecuación de la solución óptima que maximiza D (capítulo anterior), obtenemos los resultados de la tabla 31 en la que aparece al ganador y el empate entre los demás concursantes, que mediante la ecuación dada para la solución del desempate, da por resultado el contenido de la tabla 32.

Tabla 33. Cuadro comparativo de evaluación de tecnologías

1er LUGAR		2o LUGAR		3er LUGAR		4o LUGAR		5o LUGAR	
ENERGEA UMWELTECHNOLOGIE GmbH									
Criterio	Prioridad								
Rendimiento del proceso	1	Rango de capacidades	1	Plantas comerciales	1	Tiempo de entrega	1		
Rapidez de la reacción	1	Tasa interna de retorno	1	Tiempo de implementación de la tecn.	1	Pureza del biodiesel	1		
Calidad del aceite	1	Periodo de recuperación de la inversión	1	Valor presente neto	1	Pureza de la glicerina	1		
Consumo agentes químicos	2	Complejidad operativa	2			Presión de operación	2		
Temperatura de operación	2	Consumo de catalizadores	2						
Retorno de la inversión	1								
BIOX Co.									
Criterio	Prioridad								
Consumo de catalizadores	2	Rapidez de la reacción	1	Rendimiento del proceso	1	Valor presente neto	1	Temperatura de operación	2
Consumo agentes químicos	2	Tiempo de implementación de la tecn.	1	Pureza del biodiesel	1	Plantas comerciales	1		
Tiempo de entrega	1			Pureza de la glicerina	1	Rango de capacidades	1		
				Calidad del aceite	1				
				Presión de operación	2				
				Complejidad operativa	2				
				Tasa interna de retorno	1				
				Periodo de recuperación de la inversión	1				
				Retorno de la inversión	1				
IMPERIAL WESTERN PRODUCTS Inc.									
Criterio	Prioridad								
Tiempo de implementación de la tecn.	1	Consumo de catalizadores	2	Tiempo de entrega	1	Plantas comerciales	1	Rendimiento del proceso	1
Consumo agentes químicos	2	Calidad del aceite	1			Pureza del biodiesel	1	Rapidez de la reacción	1
Complejidad operativa	2	Presión de operación	2			Tasa interna de retorno	1	Pureza de la glicerina	1
		Temperatura de operación	2			Periodo de recuperación de la inversión	1	Rango de capacidades	1
						Retorno de la inversión	1	Valor presente neto	1
ÖLMÖHLE CONNEMANN LEER GmbH									
Criterio	Prioridad								
Pureza del biodiesel	1	Rendimiento del proceso	1	Rapidez de la reacción	1	Tiempo de implementación de la tecn.	1	Calidad del aceite	1
Presión de operación	2	Complejidad operativa	2	Temperatura de operación	2			Tasa interna de retorno	1
Rango de capacidades	1	Consumo de catalizadores	2					Retorno de la inversión	1
Pureza de la glicerina	1	Consumo agentes químicos	2					Periodo de recuperación de la inversión	1
		Plantas comerciales	1					Tiempo de entrega	1
		Valor presente neto	1						
LURGI METALLGESELLSCHAFT GmbH									
Criterio	Prioridad								
Consumo de catalizadores	2	Pureza de la glicerina	1	Presión de operación	2	Tiempo de entrega	1	Tiempo de implementación de la tecn.	1
Consumo agentes químicos	2	Retorno de la inversión	1	Rango de capacidades	1	Rendimiento del proceso	1		
Plantas comerciales	1	Pureza del biodiesel	1			Rapidez de la reacción	1		
Tasa interna de retorno	1					Calidad del aceite	1		
Periodo de recuperación de la inversión	1					Temperatura de operación	2		
Valor presente neto	1					Complejidad operativa	2		

Tabla 34. Cantidad de criterios de evaluación por tecnología en orden										
Tecnólogo	1er LUGAR		2o LUGAR		3er LUGAR		4o LUGAR		5o LUGAR	
	Prioridad 1	Prioridad 2	Prioridad 1	Prioridad 2	Prioridad 1	Prioridad 2	Prioridad 1	Prioridad 2	Prioridad 1	Prioridad 2
Blox Co.	1	2	2	0	7	2	3	0	0	1
Lurgi Metallgesellschaft GmbH	4	2	3	0	1	1	4	2	1	0
Ölmühle Connemann Leer GmbH	3	1	3	3	1	1	1	0	5	0
Energiea Umwelttechnologie GmbH	4	2	4	2	3	0	2	1	0	0
Imperial Western Products Inc.	1	2	1	3	1	0	5	0	5	0

Tabla 35. Calificaciones según tabla 34		
TECNOLOGÍA	CALIFICACIÓN	LUGAR
Blox Co.	9.7	2o
Lurgi Metallgesellschaft GmbH	9.4	3er
Ölmühle Connemann Leer GmbH	9.4	3er
Energiea Umwelttechnologie GmbH	11.8	1o
Imperial Western Products Inc.	7.6	4o

Nota: Los valores mostrados en la tabla 34 obedecen al procedimiento aritmético de ponderación sugerida para contrastarlo con el criterio empleado en la Lógica Difusa por medio de las calificaciones y su correspondiente ordenamiento en la tabla 35.

Al comparar la tabla 35 con las tablas 31 y 32, observamos la diferencia aportada por la Lógica Difusa, que es el elemento que hace flexible y coherente la evaluación realizada.

A pesar de que la evaluación da por perdedor (cuarto lugar) al proceso LURGI, es sin embargo, una tecnología muy exitosa a nivel comercial; es un gigante consolidado y poderoso a nivel mundial, está en la posición de abrir información que los demás tecnólogos prefieren guardar en forma confidencial porque no tiene nada que perder, el proceso LURGI sobrevive con un proceso tecnológicamente inferior a los otras cuatro gracias al potencial de mercadotecnia de la empresa y económicamente a la optimización en el gasto de reactivos en la etapa de transesterificación. Tiene más apertura de información que ninguna otra, virtud que el cliente valora y premia con su confianza; a diferencia de las tecnologías más recientes, que son empresas muy pequeñas comparadas con Lurgi GmbH, que están forzadas a proteger su nascente tecnología limitando y condicionando su información hacia clientes potenciales para evitar que su tecnología sea robada o "pirateada", lo que tiene por resultado que aunque sean tecnologías superiores a Lurgi, adolezcan de la desconfianza del cliente.

VII.1 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Es factible comparar los resultados obtenidos con parámetros reales basados en el historial comercial de cada tecnología. El cálculo de tales parámetros toma en cuenta el número de plantas de proceso, la capacidad instalada y el tiempo de existencia de cada tecnología en el mercado.

Para contrastar los datos sobre una sola base, es conveniente manejarlas en forma de cocientes que presenten la capacidad tecnológica de cada proceso como reflejo de la preferencia de los clientes, suponiendo que estos han realizado estudios serios de evaluación de tecnologías como el propuesto en este trabajo.

Los parámetros a citar son 4:

- **CT:** Capacidad instalada a lo largo del tiempo de existencia de la tecnología (incluye plantas en etapa de diseño cuya ingeniería está contratada).

- **NT:** Cantidad de plantas instaladas a lo largo del tiempo de existencia de la tecnología (incluye plantas en etapa de diseño cuya ingeniería está contratada).
- **CN:** Capacidad instalada en número de plantas existentes (incluye plantas en etapa de diseño cuya ingeniería está contratada).
- **mC:** última pendiente de la curva da capacidad instalada con respecto al tiempo (incluye plantas en etapa de diseño cuya ingeniería está contratada).

Tales datos aparecen en la tabla 36.

	BIOX	LURGI	CD	CTER	IWP
NT	0.333	0.625	0.461	0.833	0.500
CT	20.2	6.92	39.2	40.0	19.0
CN	60.60	11.07	85.03	48.02	38.00
mC	20.2	162.0	18.2	283.9	19.0

Ningún parámetro está limitado dentro de un intervalo determinado; para definir con estos datos cuál ha sido la tecnología más preferida, es conveniente normalizar los valores de cada renglón con el mayor que existe en cada uno de ellos para obtener un promedio, dando los resultados de la tabla 37.

	BIOX	LURGI	CD	CTER	IWP
NT	0.400	0.750	0.553	1.000	0.600
CT	0.505	0.173	0.980	1.000	0.475
CN	0.713	0.130	1.000	0.565	0.447
mC	0.071	0.571	0.064	1.000	0.067
X	0.422	0.406	0.649	0.891	0.397

El promedio indica el siguiente orden:

-
1. **Proceso CTER**
 2. **Proceso CD**
 3. **Proceso BIOX**
 4. **Proceso LURGI**
 5. **Proceso IWP**

Este orden es un reflejo de la realidad y lo podemos considerar como la tendencia de las preferencias de los clientes, y es cumplido apegadamente, aunque en forma parcial, usando Lógica Difusa, la cual, según el criterio de validación de resultados empleado, falla para predecir el 2º y el 5º lugar, los restantes son acertados.

En el caso del proceso CD, es conveniente resaltar un detalle, la mayoría de las plantas del proceso CD están específicamente en Alemania, en donde la pureza del combustible supera a la de las demás tecnologías dado que es un país en donde los motores a diesel están adaptados para funcionar con biodiesel B100 (100% biodiesel, 0% diesel), además de que es preferida en Alemania por su gran capacidad de producción, que ninguna otra tecnología ha alcanzado.

Usar biodiesel B100 requiere que éste tenga un alto grado de pureza, como ya conocemos que alcanza el proceso CD, aunque ello significa un costo mayor al de las demás tecnologías en todos los aspectos. Por otro lado, Alemania por sí sola produce más biodiesel que todos los demás países juntos, llegando incluso a convertirse en exportador de combustible.

El éxito de Ölmühle Connemannn Leer está confinado a países en donde es posible usar biodiesel B100 y que por lo mismo necesitan una gran capacidad de producción (por ejemplo, Alemania y Suecia).

Esto puede ayudar a explicar el porqué de que Connemann aparece en 2º lugar usando datos reales y en último en la evaluación usando Lógica Difusa.

En este sentido, es conveniente dar una breve explicación.

Las variables tecnológicas que determinan la aptitud de un proceso para optar por su selección son principalmente la pureza del producto, la calidad de las materias primas y la eficiencia productiva; la eficiencia productiva depende de la misma tecnología, la cual es

susceptible de modificar u optimizar por los mismos tecnólogos. En el caso de la disponibilidad de la materia prima y del objetivo del uso del biodiesel la situación es diferente, estas variables son impuestas de forma independiente a la tecnología, la primera depende de la región geográfica donde estaría la fuente de la materia prima principal (aceite), de la tecnología agraria disponible, del área territorial del país o de la extensión disponible del terreno, de las necesidades secundarias de la agricultura local (respecto al biodiesel) y de la incertidumbre del clima. Estas variables no las puede controlar la tecnología y básicamente representan más limitantes que oportunidades. Hablando de la materia prima en sí (aceite), su producción estará fijada por las variables mencionadas y su calidad (refinado o crudo, recordando que la tendencia tecnológica es usar aceite crudo desgomado en lugar de aceite refinado para reducir los costos de procesamiento cuando esto sea factible), impondrán la capacidad y la tecnología de producción de biodiesel.

El caso de uso final del biodiesel marca otras pautas, depende del uso que tendrá, es la tecnología que aplica para su producción; el biodiesel tiene tres usos, como combustible total (sustituto del diesel), como componente de combustible (mezcla diesel-biodiesel) y como aditivo para diesel. En el primer caso, el usuario (motores diesel), exige alta pureza y producción para evitar problemas en los motores y para satisfacer la altísima demanda del mercado del diesel para lo cual la tecnología debe tener la capacidad y atributos para conseguir este objetivo. En el caso de un biodiesel BXX (mezcla), éste no requiere una pureza tan exigente como la marca la norma alemana DIN-51606 para el caso anterior, sino que puede cumplir con las normas EN-14214 o ASTM-D6751 por el mismo motivo de que estaría mezclado dado que el porcentaje del biodiesel en estas mezclas no excede el 30 % en volumen, por ello su contenido de impurezas usando estas dos normas para su elaboración queda minimizado por el efecto del mezclado. Por último, en la situación del uso del biodiesel como aditivo, basta y sobra cumplir solamente la norma ASTM-D6751, el caso es semejante al de la mezcla, siendo la única diferencia que el porcentaje en volumen del biodiesel es menor al 5%.

CAPÍTULO VIII.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para desarrollar un trabajo buscando que éste otorgue una aportación significativa y digna de consideración, tuve la necesidad de satisfacer los requisitos que requiere la metodología de evaluación que utilicé. El cuidado con que tuve que recabar la información y procesarla implicó el esmero suficiente para que ésta tuviera la calidad requerida para realizar la evaluación. Por otro lado, es preciso resaltar que el método de evaluación que apliqué fue desarrollado hace más de 30 años y probado una y otra vez por empresas dedicadas a innovar y crear tecnología, como es el caso de muchas empresas japonesas que han encontrado en la Lógica Difusa una herramienta invaluable para conseguir su propósito; dado que ésta es una metodología ya validada para ser aplicada en el campo de la tecnología, su aplicación para la evaluación de tecnologías de plantas químicas de proceso ha demostrado, según los resultados que obtuve, su efectividad y aplicabilidad hacia este campo. Es por ello que resulta justo que al reconocer el gran potencial de la técnica de la

Selección Difusa Multiobjetivo sustentada tan atinadamente por la teoría de la Lógica Difusa, los datos deban cumplir con un requisito mínimo de validez, de ahí mi preocupación de garantizar que estos fueran apropiados y con la mayor credibilidad posible, ya que no tiene caso utilizar una herramienta tan valiosa con información falsa, inviable y obsoleta.

Para dar un valor agregado a la tesis, procedí a utilizar el método de evaluación en una tecnología relativamente reciente, de gran importancia en la industria de los combustibles alternativos, de esta manera considero muy atinado el enfoque que di a este estudio al emplear la metodología mencionada de la cual no tengo noticia que haya sido empleada en el caso presente en este trabajo de investigación consistente en una evaluación integral de tecnologías para la producción de biodiesel, el cual es un combustible innovador y muy versátil, por lo que considero que las tecnologías que existen para su elaboración son un excelente material para realizar la evaluación.

Entonces procedí a verificar el cumplimiento de mi hipótesis para lo cual la cantidad y naturaleza de los objetivos de evaluación (las características de las tecnologías) considero que son las apropiadas y adecuadas, de la misma manera que los criterios que utilicé para emplear la técnica poniendo énfasis en el procedimiento de los cálculos, con lo cual obtuve resultados muy apegados a aquellos que obtuve con base en los parámetros de validación de resultados que procuré representaran la posición que las tecnologías comerciales de producción de biodiesel han conseguido según el éxito comercial correspondiente a su capacidad tecnológica y financiera.

Por lo tanto, concluyo que a técnica de la Selección Difusa Multiobjetivo correspondiente a la Lógica Difusa tiene un gran potencial y recomiendo su utilización como método confiable de evaluación de tecnologías, como quedó de manifiesto en el caso del biodiesel, así como su aplicabilidad para realizar la evaluación de tecnologías de diversos procesos químicos, debido a que la sensibilidad que concede la Lógica Difusa al proceso de evaluación que permite ponderar los atributos y potenciales de cada tecnología.

Es natural que las tecnologías recientes que ya han alcanzado el éxito comercial propicien un proceso de desplazamiento sobre aquellos que durante mucho tiempo estaban firmes en el mercado, lentamente las van volviendo obsoletas; las exigencias de procesamiento van exigiendo cada vez más, a lo cual la tecnología debe ceder para adaptarse a tales exigencias; de ahí que el método de evaluación empleado permite ver reflejado en el

ordenamiento final de las tecnologías, que las más recientes son las que han conseguido ese proceso de adaptación y que cumplen con las exigencias actuales de procesamiento que tienden a simplificar y economizar la producción de biodiesel, que consisten en procesar aceite no refinado, con condiciones de proceso no especiales y que dan por producto un biodiesel de especificaciones reconocidas.

La existencia simultánea de varias tecnologías diferentes para producir biodiesel obedece a distintos factores, entre los que podemos considerar como los más importantes la demanda y la necesidad. El caso de la demanda está definida por el volumen y la pureza del biodiesel a ser producido, la necesidad está impuesta por cuestiones ambientales, estratégicas, económicas y de mercado, de tal manera que cada país o grupo empresarial que decida comercializar biodiesel debe tener en cuenta estos puntos para invertir sus recursos.

En cada país existe una necesidad diferente, por ejemplo el caso de Alemania, decidida a independizarse energéticamente, enfoca su tecnología hacia la producción de muy grandes volúmenes de biodiesel, empleando como materia prima un aceite vegetal obtenido de una oleaginosa (colza) que tiene un gran rendimiento de aceite, así como optimizando y eficientando su agricultura para garantizar el abasto de aceite. En Brasil y Argentina actualmente existe una expansión muy significativa en la producción de soya, la cual tiene un rendimiento bajo de aceite, aunque recordemos que América Latina en general enfrenta problemas de alimentación, de tal manera que dicha fuente de aceite sirve también para atacar tales problemas y considerando que en estos países usan biodiesel B20, no es justificable el uso de una tecnología tan costosa como en el caso del proceso CD como sí lo es en Alemania. Otro caso es el de Australia, donde hay una abundante producción de grasa animal que tiene un considerable contenido de ácidos grasos libres comparado con el aceite vegetal crudo (no refinado); para convertirla en biodiesel requieren una tecnología que procese tal tipo de materia prima, la única que puede garantizar un procesamiento sin problemas para esta situación es Energea. Finalmente en el caso de México, tenemos la existencia de un diesel muy abundante derivado del petróleo que actualmente no justifica invertir en la producción de biodiesel como combustible, sin embargo sus propiedades como lubricante y oxigenante le colocan como un excelente aditivo que como tal sí puede tener un impacto en el mercado aunque la capacidad de producción y pureza requerida es mucho menor al caso de Brasil y Argentina, por lo que el tamaño de la planta y la tecnología tendrán que ser los apropiados para este caso. Así como para estos casos, puedo hacer un análisis

mayor para las diversas situaciones existentes en otros países y definir el tipo de tecnología que le es más adecuada según sus recursos y el objetivo de producir el biodiesel. Además de todo, hay que tomar en cuenta el efecto de la competencia debida al surgimiento de nuevas tecnologías; estas tendrán que coexistir con las ya establecidas en un estado de competencia hasta que alguna de ellas sea la que predomine, para que esto último suceda tendremos que esperar unos cuantos años.

Conociendo las tecnologías evaluadas, es factible incluso intuir el resultado de la evaluación, aunque la herramienta para realizar el análisis es necesaria, sólo basta con programarla con datos correspondientes a nuestra intuición, para que nos otorgue resultados coherentes y por lo mismo, confiables.

La Lógica Difusa no sólo nos ha permitido ir mas allá del aspecto superficial de los datos respecto de sus prioridades, sino que también predice con notable acierto la conveniencia de cada alternativa visualizando en forma global el conjunto de criterios de evaluación, de forma muy distinta a evaluar criterio por criterio, como quedó explicado en el capítulo anterior, y nos concede el grande beneficio de poder representar nuestro juicio de manera mecanizada y simplificada, en un orden que puede ser presentado en un documento físico y editable para realizar evaluaciones.

La aplicación de este método de evaluación al caso del biodiesel y los resultados obtenidos, invitan a su empleo para realizar más evaluaciones de otros tipos de procesos químicos, la realidad es que las tecnologías de producción de biodiesel muestran plantas de proceso muy pequeñas con características de operación muy benignas y relativamente sencillas (presión atmosférica, temperaturas no altas y equipos no muy sofisticados), lo que da por resultado que el método no enfrente situaciones causadas por el manejo un gran número de variables de evaluación, sería interesante probarlo para evaluar otros procesos más complejos y con mayor cantidad de información disponible

Por otro lado, puedo mencionar que la producción de biodiesel en México ofrece grandes y diversos beneficios, es una tecnología limpia, considerando desde su operación en una planta como proceso hasta el empleo de su producto como combustible, en la producción del biodiesel no existen subproductos peligrosos ni altamente contaminantes, lo único que podemos considerar contaminante son las sales de sodio disueltas en agua que van en el

efluente del proceso, en el caso del proceso CTER ni siquiera eso, ya que éste incluye la recuperación de las sales de potasio.

Haciendo una análisis de beneficios por la inclusión del biodiesel a gran escala en México, tenemos que éste es un producto derivado de la agricultura, México es un país con una extensión territorial grande y con amplias tierras de cultivo que le permitirían producir sin ningún problema enormes cantidades de semillas oleaginosas, lo que implicaría un aumento considerable en la agricultura del país; siendo la semilla de soya de la que es factible tener mayor producción en México según datos de la SAGARPA, existe entonces la oportunidad de atacar otro tipo de problemas mediante la producción en gran escala de esta semilla, misma que ayudaría en grande manera al inmenso déficit de producción de soya que hay en México, ya que mientras la producción nacional asciende a 122,864 toneladas de 2003 a 2004 en 76,000 hectáreas de cultivo, mientras que las importaciones ascienden hasta 4,479,680 toneladas anuales (procedentes de Estados Unidos) y las exportaciones apenas alcanzan las 157 toneladas por año, por lo tanto queda más que justificado el uso de la soya para producir biodiesel en México.

Por un lado, de esta oleaginosa es factible extraer miel de soya, aceite de soya y harina de soya, la miel y el aceite son materia prima para la industria de los alimentos y el aceite es la materia prima para la elaboración del biodiesel, con esto podemos decir que en lo que corresponde a la agricultura de la soya, no hay pierde; la producción masiva de alimentos a base de soya puede generar ganancias grandes en el mercado de los alimentos, o bien puede involucrarse en programas gubernamentales de apoyo alimenticio a comunidades marginadas.

Por otra parte, si analizamos lo que es la producción del biodiesel en sí, la producción implica sólo dos productos principales, el biodiesel y la glicerina, nuevamente ambos tienen un gran valor y grandes mercados, el primero como combustible y el segundo como lubricante en la industria química o como componente en la industria farmacéutica.

Por estos motivos, el negocio del biodiesel tiene grandes beneficios, y es un excelente negocio; si quien lo produce es dueño de la agricultura y del procesamiento correspondiente, por las razones expuestas en los párrafos anteriores, lo puede ser aún mucho más, aunque para determinar esta sentencia, es preciso realizar un análisis cuantitativo y preciso, que no está incluido en este trabajo. Para ello debemos partir del siguiente análisis:

Para optimizar la producción de la soya, es necesario obtener la tecnología que permite conseguirlo, tomemos en cuenta que la tecnología agraria de México produce 1.6 toneladas de soya por hectárea de cultivo, mientras que Estados Unidos produce 2.6 toneladas de por hectárea. Si consideramos el modelo estadounidense del combustible alternativo B20, entonces debemos tener la capacidad de sustituir al 20% del volumen de consumo interno del diesel, si tomamos en cuenta que PEMEX ha reportado un volumen total de ventas internas de casi 14,000 millones de litros de pemex diesel en 2003, tendríamos que tener la capacidad de producir casi 2,800 millones de litros al año de biodiesel para satisfacer esa demanda interna; ahora bien, el poder calorífico del biodiesel es aproximadamente 10% menor al del diesel, por lo que en la misma proporción aumentaría la demanda, teniendo por resultado una demanda de casi 3,100 millones de litros al año; con el mismo análisis, en caso de ya no contar con petróleo para producir diesel, la demanda de biodiesel aumentaría hasta 15,400 millones de litros al año usando datos del año 2003. Si por relación estequiométrica para producir un litro de biodiesel necesitamos 0.962 litros de aceite de soya, para satisfacer la demanda de aceite de soya para producir biodiesel necesitaríamos 3,222 millones de litros por año de aceite de soya para el caso de usar B20 y 16,008 millones de litros anuales para el segundo caso (uso de B100). Por otro lado, si consideramos que podemos adaptar la tecnología de Estados Unidos al campo mexicano, podemos obtener 453 litros de aceite de soya por hectárea por cosecha, dado que cada cosecha queda lista en 3 meses aproximadamente, tenemos 4 cosechas al año, entonces obtenemos 1,812 litros de aceite por hectárea por año, por lo tanto, para producir 3,100 millones de litros de biodiesel son necesarios 2,982.2 millones de litros de aceite de soya correspondientes a 1 millón 646 mil hectáreas y para producir 15,400 millones de litros de biodiesel necesitamos 14,185 millones de litros de aceite al año que corresponden a un área de 8 millones 176 mil hectáreas. Para tener idea de lo que esto significa, la superficie total de la República Mexicana es de 197 millones 245 mil 700 hectáreas.

Si consideramos la capacidad de producción necesaria para continuar con nuestro análisis, considerando plantas de la tecnología CTER en el mayor tamaño que ésta ofrece para sus plantas, tenemos que para el primer caso necesitamos 11 plantas de 285 millones de litros al año operando a su máxima capacidad y en el segundo caso 54 plantas de 285 millones de litros al año operando a su máxima capacidad.

Es factible pensar en el uso de otro tipo de oleaginosas que ofrecen más rendimiento de aceite, sacrificando el uso de la soya como fuente de alimentos.

Rendimiento por hectárea de biodiesel	
Nombre de la oleaginosa	Litros
Soya (Glicine max)	453
Arroz (Oriza sativa)	770
Tung (Aleurites fordii)	880
Girasol (Helianthus annuus)	890
Cacahuete (Arachis hipogaea)	990
Colza (Brassica napus)	1,100
Ricino (Ricinus communis)	1,320
Piñón (Jatropha Curcas)	1,590
Aguacate (Persea americana)	2,460
Coco (Cocos nucifera)	2,510
Cocotero (Acrocomia aculeata)	4,200

Con ello es posible disminuir considerablemente la extensión de terreno destinada al cultivo de oleaginosas con propósito de producir biodiesel.

Sin embargo, la idea del uso del biodiesel como sustituto del diesel en México es una expectativa que solamente es posible considerar factible de mediano a largo plazo; la existencia aún de grandes reservas de petróleo colocan al biodiesel en una situación competitivamente inferior en cuanto al precio de venta, el precio promedio del combustible diesel pemex en 2003 fue de 0.45 USDls por litro (5.01 pesos por litro) y haciendo una proyección, en 2004 el precio fue de 0.46 USDls por litro (5.10 pesos por litro), mientras que el del biodiesel está reportado en 0.66 USDls por litro (7.26 pesos por litro), por lo que debido a que es un excelente lubricante y oxigenante, su uso actual en México puede ser como aditivo para diesel.

APÉNDICE 1.

MEMORIA DE CÁLCULO DE LA APLICACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA PARA EVALUAR LA TECNOLOGÍA BIOX

A continuación describimos la aplicación de la Lógica Difusa para evaluar la tecnología BIOX.

A1.1 Cálculo de los grados de membresía para la tecnología BIOX

- Rendimiento del proceso. La información aparece en forma de porcentaje, de tal forma la tomamos como fracción:

$$\mu_{o1}(a1) = \frac{99.40\%}{100\%} = 0.9940$$

- Rapidez de la reacción. Ésta puede estar en un intervalo entre cero e infinito, de tal manera que usamos los valores máximo y mínimo para la aplicación de la curva

gaussiana como función adecuada para este tipo de datos, en los que no existe un criterio predeterminado, sino que se requiere uno relativo:

$$\mu_{02}(a1) = e^{-\left(\frac{x-0.33}{70}\right)^2} = 0.9999$$

Para BIOX, $x = 1$

- Pureza del biodiesel y de la glicerina. La información aparece en forma de porcentaje, de tal forma que la tomamos como fracción:

$$\mu_{03}(a1) = \frac{99.48\%}{100\%} = 0.9948$$

$$\mu_{04}(a1) = \frac{99.00\%}{100\%} = 0.9900$$

- Consumo de catalizadores. Según su desempeño tecnológico es necesario atribuir valores arbitrarios que representan su efectividad tecnológica, así es que tomamos el valor máximo entre estos según apliquen a la tecnología:

$$\left. \begin{array}{l} \text{THF} \rightarrow 0.75 \\ \text{NaOH} \rightarrow 0.5 \end{array} \right\} \rightarrow \mu_{05}(a1) = 0.75$$

- Contenido de ácidos grasos libres en el aceite. La información aparece en forma de porcentaje, de tal forma la tomamos como fracción:

$$\mu_{06}(a1) = \frac{30.00\%}{100\%} = 0.3000$$

- Consumo de agentes químicos. Según su desempeño tecnológico es necesario atribuir valores arbitrarios que representan su efectividad tecnológica y tomamos el valor máximo entre estos según apliquen a la tecnología:

$$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \mu_{07}(a1) = 0.75$$

- Presión de operación. Para nuestro propósito es conveniente expresar este valor como un parámetro representativo de la presión empleada en todas las secciones del proceso, de tal forma que una manera de calcularlo es mediante la suma de las presiones de cada etapa del proceso para cada tecnología y ponderar con 0 el valor máximo y con 1 al mínimo para ajustar una recta que calcule el grado de membresía. Para el caso de la presión:

	Suma (x)	Grado de membresía
Valor mínimo	4.88	1
Valor máximo	201.00	0

Ecuación de la recta: $\mu_{08}(a1) = -0.0051x + 1.0249 = 0.9943$

Para BIOX, x = 6.

- Temperatura de operación. Es un caso similar al de la presión y la podemos calcular igual igual.

	Suma (x)	Grado de membresía
Valor mínimo	310	1
Valor máximo	545	0

Ecuación de la recta: $\mu_{09}(a1) = -0.004255x + 2.31915 = 0.0000$

Para BIOX, x = 545.

- Cantidad de plantas comerciales. Semejante a la ponderación simple con el empleo de una recta, es posible calcular este parámetro con el cociente del valor respectivo dividido entre el valor máximo de los 5:

$$\mu_{010}(a1) = \frac{x}{10} = 0.1000$$

Para BIOX x = 1

- Rango de capacidades. De la misma manera que la rapidez de reacción, empleamos la curva gaussiana:

$$\mu_{011}(a1) = e^{-\left(\frac{x-510}{510}\right)^2} = 0.4601$$

Para BIOX, x = 61

- Tiempo de implementación de la tecnología. Es ponderable de manera similar al de la presión y temperatura de operación.

	Valor (x)	Grado de membresía
Valor mínimo	2	0
Valor máximo	16	1

Ecuación de la recta: $\mu_{012}(a1) = -0.07143x + 1.14286 = 0.9286$

Para BIOX, x = 3.

- Tiempo de entrega. Es conveniente emplear la curva gaussiana para calcular el grado de membresía.

$$\mu_{013}(a1) = e^{-\left(\frac{x-6}{15}\right)^2} = 1.0000$$

Para BIOX, x = 6

- Complejidad operativa. De la misma manera que con la presión y la temperatura de operación, primero es necesario calcular un parámetro representativo a partir de las características de este criterio de evaluación, para así poder usar la curva de gauss:

$$\mu_{014}(a1) = e^{-\left(\frac{x-10}{14}\right)^2} = 0.9551$$

Para BIOX, x = 13

- Tasa interna de retorno. La información aparece en forma de porcentaje, de tal forma la tomamos como fracción:

$$\mu_{015}(a1) = \frac{31.47\%}{100\%} = 0.3147$$

- Valor presente neto. Es conveniente emplear la curva gaussiana para calcular el grado de membresía.

$$\mu_{016}(a1) = e^{-\left(\frac{x - 35,348}{35,348}\right)^2} = 0.9612$$

Para BIOX, $x = 28,313$

- Período de recuperación de la inversión. Es factible ponderarlo de manera similar al de la presión y temperatura de operación, aunque hay valores predeterminados que acotan el tiempo de recuperación, solamente entre 0 y 10 años que es el horizonte de vida considerado para el proyecto.

	Valor (x)	Grado de membresía
Valor mínimo	0	1
Valor máximo	10	0

Ecuación de la recta: $\mu_{017}(a1) = -0.1x + 1 = 0.7630$

Para BIOX, $x = 4.74$

- Retorno de la inversión. Es necesario usar la curva de Gauss:

$$\mu_{019}(a1) = e^{-\left(\frac{x - 402}{402}\right)^2} = 0.9900$$

Para BIOX, $x = 516$

A1.2 Cálculo de los valores de decisión para la tecnología BIOX

El cálculo consiste en una comparación simple entre el valor asignado a la negación difusa de la tabla de preferencias ($\mu_{-bi}(a_j)$, tabla 27) perteneciente a cada criterio y su correspondiente valor del grado de membresía para obtener el menor de los dos mediante la siguiente relación:

$$D(a_j) = \min [\max \{ \mu_{-bi}(a_j), \mu_{oi}(a_j) \}]$$

$$\begin{aligned} D(a_1) &= \max \{0.15, 0.9940\} = 0.9940 \\ D(a_2) &= \max \{0.15, 0.9999\} = 0.9999 \\ D(a_3) &= \max \{0.15, 0.9948\} = 0.9948 \\ D(a_4) &= \max \{0.15, 0.9900\} = 0.9900 \\ D(a_5) &= \max \{0.40, 0.7500\} = 0.7500 \\ D(a_6) &= \max \{0.15, 0.3000\} = 0.3000 \\ D(a_7) &= \max \{0.40, 0.7500\} = 0.7500 \\ D(a_8) &= \max \{0.40, 0.9943\} = 0.9943 \\ D(a_9) &= \max \{0.40, 0.0000\} = 0.4000 \\ \underline{D(a_{10})} &= \underline{\max \{0.15, 0.1000\} = 0.1500} \\ D(a_{11}) &= \max \{0.15, 0.4601\} = 0.4601 \\ D(a_{12}) &= \max \{0.15, 0.9608\} = 0.9608 \\ D(a_{13}) &= \max \{0.15, 1.0000\} = 1.0000 \\ D(a_{14}) &= \max \{0.40, 0.9551\} = 0.9551 \\ D(a_{15}) &= \max \{0.15, 0.3147\} = 0.3147 \\ D(a_{16}) &= \max \{0.15, 0.9612\} = 0.9612 \\ D(a_{17}) &= \max \{0.15, 0.7630\} = 0.7630 \\ D(a_{18}) &= \max \{0.15, 0.9900\} = 0.9900 \end{aligned}$$

Con los valores obtenidos buscamos el valor mínimo, que en la evaluación para primer lugar corresponde a 0.1500 en $D(a_{10})$, sin embargo, éste lo ocupa CTER con 0.3321, que es mayor que 0.1500, además existen cuatro empates con el mismo valor, por lo tanto verificamos que esté en segundo lugar buscando el valor menor después de eliminar $D(a_{10})$

$$\begin{aligned} D(a_1) &= \max \{0.15, 0.9940\} = 0.9940 \\ D(a_2) &= \max \{0.15, 0.9999\} = 0.9999 \\ D(a_3) &= \max \{0.15, 0.9948\} = 0.9948 \\ D(a_4) &= \max \{0.15, 0.9900\} = 0.9900 \\ D(a_5) &= \max \{0.40, 0.7500\} = 0.7500 \\ \underline{D(a_6)} &= \underline{\max \{0.15, 0.3000\} = 0.3000} \\ D(a_7) &= \max \{0.40, 0.7500\} = 0.7500 \\ D(a_8) &= \max \{0.40, 0.9943\} = 0.9943 \\ D(a_9) &= \max \{0.40, 0.0000\} = 0.4000 \\ D(a_{10}) &= \text{eliminado} \\ D(a_{11}) &= \max \{0.15, 0.4601\} = 0.4601 \end{aligned}$$

$$D(a_{12}) = \max \{0.15, 0.9608\} = 0.9608$$

$$D(a_{13}) = \max \{0.15, 1.0000\} = 1.0000$$

$$D(a_{14}) = \max \{0.40, 0.9551\} = 0.9551$$

$$D(a_{15}) = \max \{0.15, 0.3147\} = 0.3147$$

$$D(a_{16}) = \max \{0.15, 0.9612\} = 0.9612$$

$$D(a_{17}) = \max \{0.15, 0.7630\} = 0.7630$$

$$D(a_{18}) = \max \{0.15, 0.9900\} = 0.9900$$

El siguiente valor está en $D(a_6)$, con 0.3000, sin embargo, IWP tiene un valor mayor, 0.3002, con lo cual BIOX queda en tercero.

Si hubiera nuevamente empate con valor en 0.3000, nuevamente sería necesario eliminar el término $D(a_6)$ y buscaríamos nuevamente el valor menor, que correspondería a 0.3147 en $D(a_{15})$, para encontrar el desempate con las otras tecnologías.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) www.mty.itesm.mx
- 2) www.ciara.com.ar
- 3) enginemanufacturers.org
- 4) em.wikipedia.org
- 5) Transesterification of vegetable oils: a review. Ulf Schuchardt. J. Braz. Chem. Soc. Vol. 9, No. 3. may/jun 1988
- 6) www.esemag.com
- 7) www.bioalberta.com
- 8) www.biodiesel.org
- 9) www.chemsoc.org
- 10) www.wmpc.com
- 11) journeytoforever.org
- 12) www.oilprocess.com
- 13) www.ingenieroambiental.com
- 14) www.bioxcorp.com
- 15) www.irap-pari.nrc-cnrc.gc.ca
- 16) www.vcr-nvr.ca
- 17) Process for production of fatty acid methyl esters from fatty acid triglycerides. CA patent 2,316,141. Feb 18, 2001. David Boocock.
- 18) www.ghgenius.ca
- 19) www.energea.at
- 20) www.hrccc.org
- 21) Method for producing fatty acid methyl ester and equipment for realizing the same. US patent 6,440,057 B1. Ago. 27, 2002. Ergün et. al.
- 22) europa.eu.int
- 23) Process for the continuous production of lower alkyl esters of higher fatty acids. US patent 5,354,878. Oct. 11, 1994. Connemann et. al.
- 24) www.aie.org.au
- 25) Verfahren zum Erzeugen von Fettsäure-Methylester oder Fettsäure-Äthylester und Glycerin durch Umesterung von Ölen oder Fetten. EP 523,767 A2. Ene 20, 1993. Henning Buchhold

-
- 26) Verfahren zum Erzeugen von Fettsäure-Methylester oder Fettsäure-Äthylester und Glycerin durch Umesterung von Ölen oder Fetten. EP 706,988 b1. Sep 9, 1995. Peter König
 - 27) Method for the preparation of fatty acid alkyl ester. US patent 5,849,939. Dic. 15, 1998. Martin Mittelbach
 - 28) www.rendermagazine.com
 - 29) Chemical Market Reporter. Mar. 2001
 - 30) The alternative fuel price. Dic. 30, 2003
 - 31) www.carc-crac.ca
 - 32) www.arb.ca.gov
 - 33) Aplicación de las técnicas de toma de decisión difusa para la selección de licenciadores y subcontratistas de un proyecto. Rodolfo Téllez Schmill. Tesis UNAM. Maestría. 2004.
 - 34) Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable Oils. B. Freedman, E.H. Pryde, T.L. Mounts. J. of Am. Oil and Chem. Soc. Vol. 61, No. 10. Oct. 1984.
 - 35) Transesterification kinetics of soybean oil. B. Freedman, R.O. Butterfield, E.H.Pryde. J. of Am. Oil and Chem. Soc. Vol. 63, No. 10. Oct. 1986.
 - 36) Fast formation of high purity methyl esters from vegetable oils. David G. B. Boocock, Samir K. Konar, V. Mao, Sonia Buligan. J. of Am. Oil and Chem. Soc. Vol. 75, No. 9. Oct. 1998.
 - 37) Phase diagrams for oil/methanol/ethers mixtures. David G. B. Boocock, Samir K. Konar, Hanif Sidi. J. of Am. Oil and Chem. Soc. Vol. 73, No. 10. Oct. 1996.
 - 38) Kinetics of transesterification of soybean oil. H. Nouredini, D. Zhu. J. of Am. Oil and Chem. Soc. Vol. 74, No. 11. Oct. 1997.
 - 39) Vegetable oils: from table to gas tank. Jayadev Chowduhry, Ken Fouhy. Chem. Eng. Feb 1993.
 - 40) El análisis económico en los proyectos de ingeniería. L. N. Solórzano, N. Domínguez A. Revista del Instituto Mexicano del Petróleo. Vol. 1, No. 4. Oct. 1969.
 - 41) www.amadeusenergy.com
 - 42) www.contactopyme.gob.mx
 - 43) www.sagarpa.gob.mx
-