

BIODIESEL

RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LA EFECTIVIDAD DE LA PRODUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DEL BIODIESEL

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Resumen

Este documento es el resultado de un análisis sobre la utilización del biodiésel como combustible para motores, realizado originalmente en la década de 2000. Sin embargo, su contenido mantiene plena vigencia, ya que las bioenergías aún no han alcanzado el lugar que les corresponde dentro de la matriz energética mundial.

La obra constituye una recopilación cuidadosamente seleccionada y organizada de información técnica y económica, diseñada para facilitar una comprensión rápida, clara y orientada a objetivos específicos. Además de examinar la situación y las perspectivas del mercado del biodiésel, presenta de forma sintética los conocimientos fundamentales relacionados con toda la cadena de producción, distribución y utilización de este biocombustible.

El documento está dirigido a profesionales, estudiantes, empresarios, investigadores y a todas aquellas personas interesadas en comprender los aspectos esenciales del biodiésel. Entre los temas abordados se incluyen las materias primas utilizadas en su producción, las tecnologías disponibles, los requerimientos energéticos del proceso, su contribución al balance energético, los impactos ambientales asociados, los equipos empleados en las plantas de producción y el comportamiento del biocombustible en motores de combustión interna.

Asimismo, se analizan las oportunidades, desafíos y perspectivas de desarrollo del sector, ofreciendo una visión integral sobre el papel que el biodiésel puede desempeñar tanto en el corto como en el mediano plazo como alternativa sostenible dentro del panorama energético global.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Índice

1. Introducción 5
2. Antecedentes de la época. 8
3. Escenario del BioDiesel y la sustentación como relevo del Diesel Fósil 11
4. Aceites, Materias Primas y sus Especificaciones 17
4.1 Aceites y Grasas. 17
4.2 Selección de materias primas y tecnologías de producción 21
4.3 Principales rutas tecnológicas de producción 21
4.4. Importancia del pretratamiento 22
4.5 Tendencias actuales 23
4.6 Influencia de la composición química de los aceites vegetales en la producción de biodiésel 24
4.7 Utilización de materias primas alternativas y sostenibles para la producción de biodiésel 25
5. Utilización directa de aceites vegetales como combustible para motores diésel 29
5.1 Aceite Vegetal Puro (SVO) y Aceite Vegetal Usado (WVO) 29
5.2 Principales limitaciones técnicas 29
5.3 Sistemas de doble combustible 30
5.4 Compatibilidad con motores modernos 30
5.5 Comparación entre aceite vegetal y biodiésel 30
5.6 Situación actual 31
6. Otras materias primas complementarias y servicios auxiliares requeridos 32
6.1 Metanol 32
6.2 Hexano 32
6.3 Hidróxido de sodio 32
6.4 Ácido fosfórico 33
6.5 Agua 33
6.6 Electricidad 33
6.7 Vapor y energía térmica 34
7. Proceso tecnológico y su control 35
7.1 Descripción del proceso tecnológico 35
7.2 Principio de la reacción 35
7.3 Etapas principales del proceso industrial 36
7.5 Importancia del control tecnológico 41

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

8. Control de calidad, métodos analíticos y preparación de la materia prima 42
8.1. Control de calidad de la materia prima 42
8.2 Principales métodos analíticos empleados 43
8.3 Especificaciones recomendadas para transesterificación alcalina 43
8.4. Principales determinaciones y marchas analíticas para evaluar la composición química del Aceite. Métodos empleados. 44
8.5. Normativas y métodos de análisis 49
8.6. Parámetros críticos para el control operativo de la planta 50
9. Balance de Materia y Energía. Demanda Energética Acumulada 51
9.1. Fase Agrícola (siembra, cultivo y cosecha) 52
9.2. Fase producción de Aceite Vegetal. (Incluye la extracción y refinación) 52
9.3 Fase Transporte y Distribución, hasta la gasolinera 54
9.4 Demanda de Energía Acumulada. (DEA) 56
9.5 Medidas para mejorar la sostenibilidad y el balance de carbono del biodiésel 58
10. Características del equipamiento, seguridad industrial y gestión ambiental 60
10.1 Principios generales de diseño 60
10.2 Equipos principales del proceso 61
10.3 Emisiones atmosféricas 62
10.4 Efluentes líquidos 63
10.5 Residuos sólidos 63
10.6 Tendencias actuales 64
10.7. Comportamiento de los parámetros de control e interpretación de resultados 64
10.8 Efectos de las desviaciones de los parámetros de calidad sobre la producción, distribución y utilización del biodiésel 68
11. Conclusiones 76
12. Referencias técnicas, normas y fuentes de consulta 79
12.1 Normas y especificaciones internacionales 79
12.2 Normas analíticas utilizadas 79
12.3 Publicaciones técnicas sobre biodiésel 79
12.4 Manuales y textos de ingeniería química 80
12.5 Balance energético y análisis de ciclo de vida (LCA) 80
12.6 Organismos y asociaciones especializadas 80

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

1. Introducción

El presente análisis fue desarrollado durante la década de 2000, por lo que las cifras, estadísticas, escenarios de mercado, costos, tecnologías disponibles y perspectivas de crecimiento reflejan la realidad existente en ese período. No obstante, gran parte de sus contenidos conserva plena actualidad, especialmente en lo relacionado con los fundamentos técnicos de la producción de biodiésel, los procesos industriales, las materias primas, los balances energéticos, los aspectos ambientales y los factores que condicionan su viabilidad. Si bien la industria de los biocombustibles ha continuado evolucionando desde entonces, los conceptos, criterios de análisis y conclusiones generales expuestos en este trabajo constituyen una base sólida para comprender el desarrollo histórico, la situación actual y las perspectivas futuras de esta fuente de energía renovable.

Durante los años he dedicado una parte importante de mi actividad profesional al estudio y análisis de la industria de los biocombustibles, revisando una extensa cantidad de información técnica, científica y comercial. Esta labor ha incluido la consulta de artículos especializados, publicaciones académicas, informes de mercado, tecnologías de producción, políticas energéticas, evaluaciones ambientales, estudios de factibilidad, proyecciones de desarrollo y experiencias prácticas de diversos países.

Como resultado de este esfuerzo, he seleccionado, organizado y estructurado la información más relevante en el presente documento, titulado "Recopilación de Información sobre la Realidad y Efectividad de la Producción y Utilización del Biodiésel", con el propósito de ofrecer una visión integral, objetiva y fundamentada sobre esta importante fuente de energía renovable.

La motivación para desarrollar esta recopilación surgió inicialmente de la intensa controversia generada en torno a la producción de biocombustibles obtenidos a partir de materias primas agrícolas destinadas también a la alimentación humana y animal, tales como la soya, el maíz, el trigo y otros cultivos. Este debate ha planteado interrogantes sobre la posible influencia de tales producciones en los precios internacionales de los alimentos, así como sobre su verdadero aporte al desarrollo sostenible.

Posteriormente, y como resultado del propio proceso de investigación, surgió una segunda motivación de igual importancia: la constatación del enorme potencial que poseen los biocombustibles como alternativa energética limpia y renovable, junto con la dificultad existente para encontrar documentos técnicos que presentaran de forma ordenada y progresiva los conocimientos necesarios para comprender esta tecnología desde sus fundamentos hasta sus aplicaciones industriales.

Una vez concluido este trabajo, mi convicción es que la producción de biocombustibles constituye una de las vías más prometedoras para diversificar las fuentes energéticas y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Más que una tecnología emergente, representa la evolución y perfeccionamiento de conceptos que han sido utilizados con éxito desde hace décadas.

Existen antecedentes históricos que demuestran la viabilidad técnica de estos combustibles. Desde principios del siglo XX varios países europeos experimentaron con combustibles obtenidos a partir de recursos vegetales para alimentar motores de combustión interna. Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, estas alternativas adquirieron una relevancia estratégica debido a las limitaciones en el acceso a los combustibles fósiles. Sin embargo, con la reducción de los precios del

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

petróleo durante los años posteriores, muchos de estos desarrollos perdieron competitividad económica y fueron desplazados.

Décadas más tarde, Brasil protagonizó uno de los ejemplos más exitosos de aprovechamiento energético de recursos renovables mediante el desarrollo de una amplia industria de bioetanol producido a partir de caña de azúcar. La evolución sostenida de este programa permitió generar empleo, estimular el desarrollo tecnológico y reducir significativamente la dependencia de combustibles importados. Actualmente, Brasil continúa siendo una referencia mundial en la producción y utilización de biocombustibles.

Es cierto que el crecimiento de la industria de los biocombustibles ha enfrentado desafíos importantes. Las preocupaciones relacionadas con la competencia entre la producción de alimentos y la producción de energía provocaron la revisión e incluso la suspensión de diversos proyectos. Sin embargo, lejos de representar un retroceso, esta situación impulsó la investigación y el desarrollo de nuevas materias primas que no compiten directamente con la alimentación, incluyendo especies adaptadas a terrenos marginales, residuos agrícolas, aceites usados y otras fuentes con mejores indicadores ambientales y sociales.

De esta forma, la propia controversia ha contribuido a fortalecer la sostenibilidad de la industria, promoviendo tecnologías más eficientes, materias primas más apropiadas y una mejor comprensión de los impactos asociados a toda la cadena de producción.

Otro elemento de gran importancia es el potencial de los biocombustibles para impulsar el desarrollo económico de numerosos países que disponen de extensas áreas de tierras improductivas o de recursos agrícolas subutilizados. En muchas regiones, especialmente en países en desarrollo, esta actividad puede convertirse en una fuente significativa de empleo, inversión y generación de riqueza, contribuyendo al desarrollo rural y a la mejora de la calidad de vida de sus habitantes.

Todo indica que las bioenergías continuarán incrementando su participación en la matriz energética mundial durante las próximas décadas. Su consolidación dependerá principalmente de factores tecnológicos, económicos y regulatorios, así como de su capacidad para competir con los combustibles fósiles tradicionales. Sin embargo, la tendencia global hacia sistemas energéticos más sostenibles favorece claramente su expansión.

Precisamente por ello, la demanda de información confiable, técnica y organizada sobre el biodiésel ha crecido de manera constante. Disponer de una fuente documental que reúna antecedentes, fundamentos científicos, tecnologías, materias primas, procesos industriales, equipamientos, costos, normas de calidad, impactos ambientales y criterios de evaluación técnico-económica constituye una herramienta de gran valor para estudiantes, profesionales, inversionistas, investigadores y responsables de la toma de decisiones.

El presente documento responde a esa necesidad. Su contenido se ha elaborado a partir de la revisión comparativa de numerosas fuentes procedentes de universidades, centros de investigación, organismos internacionales, instituciones energéticas, laboratorios de control de calidad, publicaciones especializadas y empresas vinculadas a la industria de los biocombustibles.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Más allá de la recopilación de información, el valor añadido de esta obra radica en la integración, organización y presentación sistemática de los conocimientos fundamentales relacionados con toda la cadena de producción y utilización del biodiésel, facilitando al lector una comprensión progresiva de la tecnología desde una perspectiva técnica, económica y ambiental.

En las páginas siguientes se abordan el escenario energético mundial de aquella época, la relación entre energía y medio ambiente, las materias primas empleadas, los procesos de producción, el control de calidad, las características del equipamiento industrial, el balance energético de la cadena productiva, el impacto ambiental del biodiésel y su viabilidad técnico-económica. Todo ello con el objetivo de proporcionar una visión equilibrada, documentada y práctica de una tecnología que continúa desempeñando un papel relevante en la transición hacia un modelo energético más sostenible.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

2. Antecedentes de la época.

El período en que se elaboró este trabajo estuvo marcado por una acelerada evolución tecnológica a escala mundial, acompañada de crecientes preocupaciones relacionadas con el medio ambiente, la seguridad energética y la estabilidad de los sistemas económicos y financieros. Los cambios se sucedían con gran rapidez, exigiendo una mayor capacidad de adaptación y una preparación especializada para comprender y afrontar las profundas transformaciones que comenzaban a manifestarse.

En aquellos años se consolidó un consenso internacional sobre la necesidad de promover un desarrollo más sostenible, capaz de equilibrar el crecimiento económico con la preservación de los recursos naturales. La protección del aire, el agua, el suelo, los recursos energéticos y la estabilidad de las economías pasó a ocupar un lugar prioritario en las agendas de gobiernos, organismos internacionales y sectores productivos. Dentro de este contexto, la energía y su impacto ambiental adquirieron una importancia estratégica para el futuro de la humanidad.

El biodiésel surgió entonces como una alternativa capaz de contribuir a estos objetivos, incorporando al mercado un combustible renovable con potencial para reducir las emisiones contaminantes asociadas al transporte y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Mientras que durante la década de 1970 la principal preocupación energética estuvo centrada en el agotamiento de las reservas de petróleo, en el nuevo siglo los desafíos comenzaron a orientarse hacia la sostenibilidad ambiental, la mitigación del cambio climático y la utilización responsable de los recursos naturales.

Un aspecto esencial: las externalidades ambientales

El biodiésel es un combustible obtenido a partir de materias primas vegetales renovables mediante procesos industriales sostenibles. A diferencia de los combustibles derivados del petróleo, que dependen de recursos fósiles finitos formados durante millones de años, el biodiésel se integra en un ciclo biológico renovable basado en la capacidad de las plantas para captar energía solar y transformar dióxido de carbono atmosférico en biomasa.

Una de las principales ventajas atribuidas al biodiésel es su contribución favorable al ciclo del carbono. Como se analizará posteriormente, diversos estudios han demostrado que el balance neto de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) asociado a su producción y utilización puede resultar significativamente inferior al correspondiente al diésel fósil.

Durante la combustión del biodiésel se libera CO_2 a la atmósfera. Sin embargo, una parte importante de dicho carbono fue previamente capturada por las plantas utilizadas como materia prima durante su crecimiento mediante el proceso de fotosíntesis. Como consecuencia, el carbono emitido durante la combustión tiende a compensarse, al menos parcialmente, con el carbono absorbido durante la etapa agrícola del ciclo productivo.

Este efecto puede cuantificarse mediante el análisis del denominado crédito ambiental, el cual evalúa la diferencia entre la cantidad de dióxido de carbono capturada por los cultivos y la cantidad emitida a lo largo de la producción y utilización del biocombustible.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

El valor de este crédito ambiental depende de múltiples factores, entre ellos el tipo de cultivo empleado, los rendimientos agrícolas obtenidos, la eficiencia energética del proceso industrial, las distancias de transporte y las características operativas de los motores donde será utilizado el combustible. No obstante, incluso considerando estas variables, los combustibles renovables presentan una ventaja inherente frente a los combustibles fósiles, debido a que incorporan una etapa biológica de captura de carbono que no existe en la extracción y utilización del petróleo.

Precisamente la consideración de estas externalidades ambientales y sociales constituye uno de los fundamentos que han respaldado históricamente las políticas de promoción de los biocombustibles en países y regiones como Estados Unidos y la Unión Europea. Más allá de los criterios estrictamente económicos, dichas políticas han buscado reconocer los beneficios asociados a la reducción de emisiones, la diversificación energética, el desarrollo rural y la disminución de la dependencia de recursos fósiles importados.

En este contexto, el biodiésel fue considerado una de las alternativas más prometedoras para avanzar hacia sistemas energéticos más sostenibles, capaces de satisfacer la creciente demanda mundial de energía sin comprometer la conservación de los recursos naturales y el equilibrio ambiental del planeta.

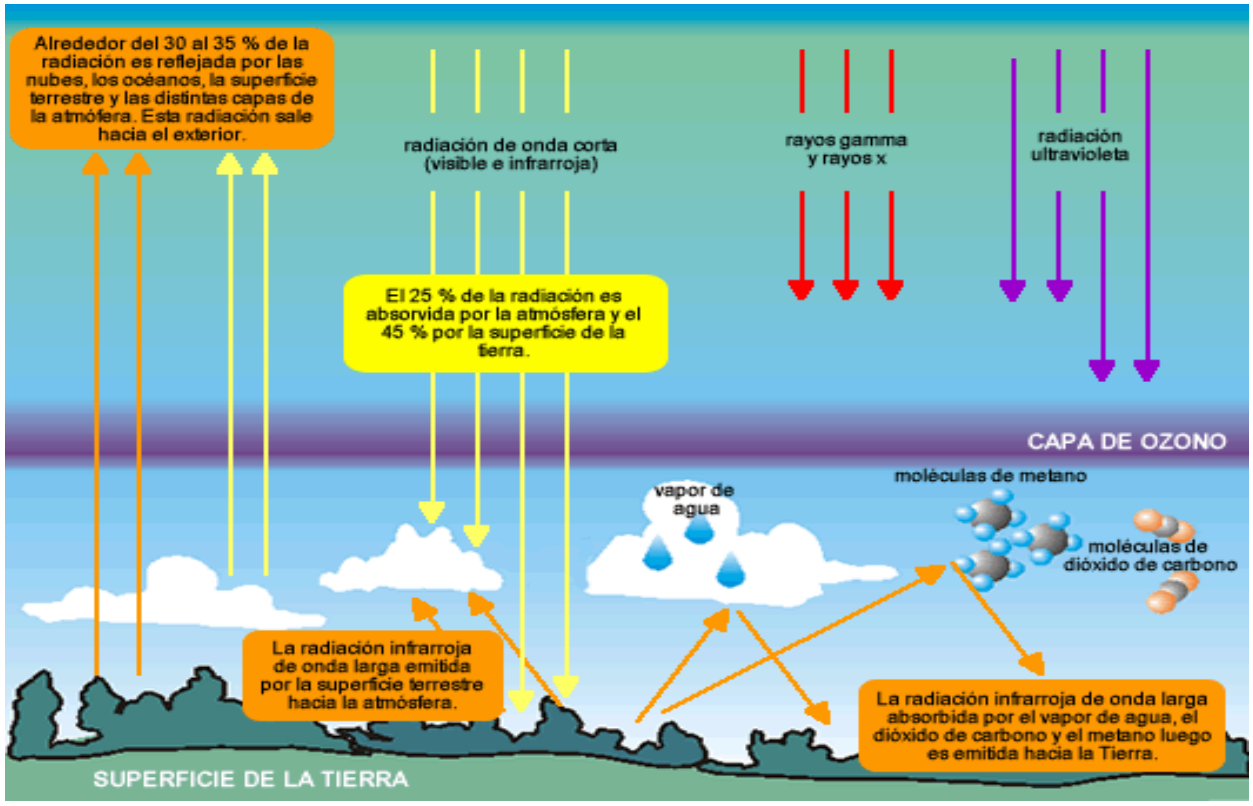


Figura 1: Representación simplificada del efecto invernadero.
Tomado de: LOS BIOCOMBUSTIBLES: SITUACIÓN ACTUAL, ANÁLISIS Y PERSPECTIVAS DE LA PRODUCCIÓN EN MERCOSUR Y DEL COMERCIO CON LA UE

La Figura 1 ilustra de manera simplificada el mecanismo del efecto invernadero y la influencia que ejercen determinados gases presentes en la atmósfera sobre el balance energético del planeta. Una parte de la radiación solar que llega a la Tierra es absorbida por la superficie terrestre y

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

posteriormente reemitida en forma de radiación infrarroja de onda larga. Los gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua (H_2O) y el metano (CH_4), absorben una fracción de esta energía y la reemiten en distintas direcciones, incluyendo nuevamente hacia la superficie terrestre.

Como consecuencia, una parte del calor queda retenida en el sistema atmósfera-superficie, contribuyendo al mantenimiento de una temperatura compatible con la vida. Sin embargo, cuando la concentración de estos gases aumenta de forma significativa debido a las actividades humanas, el equilibrio natural se altera y se intensifica el efecto invernadero. Este fenómeno se asocia al incremento progresivo de la temperatura media global y a diversos cambios observados en los sistemas climáticos, meteorológicos y ecológicos del planeta.

En el período en que fue elaborado este estudio existía ya un amplio consenso internacional sobre la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover fuentes energéticas más sostenibles. Como resultado, la producción y utilización de biocombustibles, entre ellos el biodiésel, comenzó a expandirse de manera significativa en numerosos países, respaldada por políticas energéticas y ambientales orientadas a disminuir las emisiones contaminantes, diversificar la matriz energética y fortalecer la seguridad en el suministro de combustibles.

Dentro de este contexto, el biodiésel surgió como una alternativa con potencial para reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero, al ser producido a partir de materias primas renovables de origen vegetal. Aunque su impacto ambiental depende de factores como la materia prima utilizada, las prácticas agrícolas, el proceso industrial y la logística de distribución, su desarrollo se ha considerado una de las estrategias disponibles para avanzar hacia sistemas energéticos más sostenibles y con menor huella de carbono.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

3. Escenario del BioDiesel y la sustentación como relevo del Diesel Fósil

Una vez analizado el efecto de las externalidades ambientales favorables asociadas al uso de los biocombustibles, resulta conveniente examinar otros factores que contribuyen a considerar al biodiésel como una alternativa energética sostenible y con potencial de aplicación a escala global.

El biodiésel es un combustible renovable que puede sustituir total o parcialmente una parte significativa del diésel derivado del petróleo utilizado en los sectores del transporte, la agricultura, la industria y la generación eléctrica. Se produce a partir de aceites vegetales, grasas animales y, más recientemente, de otras materias primas renovables, mediante procesos industriales que transforman estos recursos en un combustible apto para motores diésel.

Una de las principales ventajas del biodiésel es su flexibilidad de utilización. Puede emplearse en estado puro (B100) o mezclado con diésel fósil en diferentes proporciones. Las mezclas más comunes son B5 (5 % de biodiésel y 95 % de diésel fósil) y B20 (20 % de biodiésel y 80 % de diésel fósil), las cuales pueden utilizarse en una amplia variedad de motores diésel modernos con pocas o ninguna modificación, dependiendo de las especificaciones del fabricante.

El mercado natural del biodiésel está constituido por todos aquellos equipos y vehículos que utilizan motores diésel, incluyendo camiones de carga, autobuses, maquinaria agrícola, equipos de construcción, embarcaciones, locomotoras y grupos electrógenos. Esta característica permite aprovechar la infraestructura existente de almacenamiento, distribución y consumo de combustibles líquidos, facilitando su incorporación progresiva al mercado energético.

La expansión del uso del biodiésel ofrece múltiples beneficios. Entre ellos se destacan la reducción del consumo de derivados del petróleo, la disminución de determinadas emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero, la diversificación de las fuentes energéticas y el fortalecimiento de la seguridad energética de los países importadores de combustibles fósiles. Asimismo, su producción puede impulsar el desarrollo económico local mediante la creación de nuevas actividades agrícolas, industriales, logísticas y comerciales vinculadas a toda la cadena de valor de los biocombustibles.

Otro aspecto relevante es que la producción de biodiésel genera oportunidades de empleo e inversión en zonas rurales, promoviendo el aprovechamiento productivo de recursos agrícolas y contribuyendo al desarrollo de nuevas industrias asociadas a la transformación de biomasa en energía.

No obstante, el crecimiento de esta industria también depende de la solución de diversos desafíos técnicos, económicos y ambientales. Entre ellos se encuentran la disponibilidad sostenible de materias primas, la competitividad frente a los combustibles fósiles, la calidad del producto final, la eficiencia energética de los procesos de producción y la evaluación integral de sus impactos ambientales y sociales. Precisamente estos aspectos serán analizados en detalle a lo largo del presente documento, con el objetivo de valorar de forma objetiva el verdadero alcance y potencial del biodiésel como alternativa energética para el futuro.

Aunque este análisis fue elaborado originalmente durante la década de 2000, cuando el mercado mundial del biodiésel se encontraba en una etapa de rápido crecimiento, los principios técnicos,

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

energéticos y ambientales aquí expuestos continúan siendo válidos para comprender los fundamentos de esta tecnología y su evolución posterior dentro del proceso de transición energética global.

Tabla 1. Consumos de Diesel Fósil (Gasoil), Aceites y Grasas y Producción de Aceites y Grasas de las principales áreas del planeta.

Necesidades de Biodiesel	Consumo de Gas Oil	Corte Gas Oil 5%	Equiv. Aceites y Grasas	Cons. de Aceites y Grasas	ConsumoTotal (Alim. + Biod.)	Produc. Actual Aceites y Grasas	Balance
	Mill. M3	*Mill. M3*	*Mill. M3*	*Mill. M3*	*Mill. M3*	*Mill. M3*	*Mill. M3*
Total Mundial	**1.335,0**	**66,75**	**66,75**	**135,49**	**202,24**	**136,6**	**-65,68**
Unión Europea 25	**350,00**	**17,50**	**17,50**	**22,98**	**40,48**	**17,42**	**-23,06**
Estados Unidos	**234,00**	**11,70**	**11,70**	**14,72**	**26,42**	**15,52**	**-10,90**
China	**91,00**	**4,55**	**4,55**	**25,41**	**29,96**	**18,30**	**-11,66**
India	**46,00**	**2,30**	**2,30**	**12,81**	**15,11**	**7,95**	**-7,16**
Brasil	**41,00**	**2,05**	**2,05**	**4,60**	**6,65**	**7,39**	**0,74**
Argentina	**12,20**	**0,61**	**0,61**	**0,90**	**1,51**	**6,90**	**5,39**

Fuente: OIL WORLD y Consumo de Gas Oil Proyectados en función del crecimiento de las distintas economías 2005

En la Tabla 1 se presenta una comparación entre el consumo de gasóleo (diésel fósil), las necesidades potenciales de biodiésel para una mezcla B5 (5 % de biodiésel), el consumo total de aceites y grasas, y la producción disponible de estas materias primas en las principales regiones del mundo.

Aun cuando las cifras corresponden al contexto analizado durante la década de 2000, la tabla permite comprender una realidad que continúa siendo relevante en la actualidad: la enorme magnitud del mercado mundial del diésel y el desafío que representa sustituir una fracción significativa de este consumo mediante biodiésel producido a partir de aceites y grasas convencionales.

El análisis evidencia que incluso niveles relativamente modestos de incorporación, como una mezcla B5, requieren volúmenes considerables de materias primas agrícolas. En regiones con un elevado consumo de combustibles para el transporte, la demanda potencial de aceites vegetales y grasas supera ampliamente la producción disponible para usos alimentarios e industriales, generando déficits estructurales que deben compensarse mediante importaciones, incrementos de productividad agrícola o el desarrollo de nuevas fuentes de biomasa.

Esta situación fue precisamente uno de los factores que impulsó el desarrollo de biocombustibles de segunda generación, basados en residuos agrícolas, aceites usados, grasas residuales, cultivos

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

no alimentarios y otras materias primas alternativas, con el objetivo de reducir la competencia con la cadena alimentaria y mejorar la sostenibilidad global de la producción de bioenergía.

Aunque desde la elaboración de este estudio la producción mundial de biodiésel ha aumentado de forma significativa, la experiencia acumulada demuestra que la disponibilidad sostenible de materias primas continúa siendo uno de los principales factores que condicionan el crecimiento futuro del sector.

Tabla 1-A Escenario Actualizado 2024-2025 Necesidades Teóricas de Biodiésel para una Mezcla B10

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	Mill. m³	Mill. m³	Mill. m³	Mill. m³	Mill. m³	Mill. m³	Mill. m³
Total Mundial	1 500	150	150	220	370	285	-85
Unión Europea	290	29	29	26	55	20	-35
Estados Unidos	250	25	25	22	47	18	-29
China	205	20,5	20,5	42	62,5	39	-23,5
India	108	10,8	10,8	30	40,8	24	-16,8
Brasil	78	7,8	7,8	9	16,8	13	-3,8
Argentina	16	1,6	1,6	2	3,6	10	+6,4

Lecturas:
(1) Necesidades de Biodiésel,
(2) Consumo de Gas Oil,
(3) Corte Gas Oil 10%,
(4) Equiv. Aceites y Grasas,
(5) Cons. Aceites y Grasas,
(6) Consumo Total (Alim.+Biod.),
(7) Produc. Actual Aceites y Grasas,
(8) Balance

Fuentes: Estadísticas recientes de consumo de diésel y biocombustibles, datos FAO de bioenergía y aceites vegetales, EIA, CEIC, European Biodiesel Board y organismos nacionales de energía.
[fao.org], [fao.org], [ebb-eu.org], [ceicdata.com], [energy.eco...atimes.com], [epe.gov.br]

La Tabla 1-A muestra un escenario representativo de la década de 2020, considerando los niveles actuales de consumo de diésel en las principales regiones del mundo. A pesar del crecimiento acelerado de la industria de los biocombustibles durante las dos últimas décadas, puede observarse que la magnitud del consumo de combustibles diésel continúa siendo extraordinariamente elevada. Incluso para alcanzar una mezcla moderada del 10 % de biodiésel (B10), serían necesarios volúmenes muy significativos de aceites y grasas renovables.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

El análisis pone de manifiesto que las regiones con mayor consumo energético, como Estados Unidos, la Unión Europea, China e India, continúan presentando déficits estructurales entre sus necesidades potenciales de materias primas y su capacidad interna de producción. Por el contrario, países con una fuerte base agroindustrial, como Argentina y Brasil, mantienen ventajas competitivas derivadas de la disponibilidad de tierras agrícolas, producción de oleaginosas y experiencia acumulada en biocombustibles.

Esta realidad explica por qué, además de los aceites vegetales tradicionales, la expansión futura del biodiésel depende cada vez más del aprovechamiento de aceites residuales, grasas recicladas, cultivos energéticos no alimentarios, combustibles renovables avanzados y nuevas tecnologías capaces de incrementar la disponibilidad de materias primas sin competir directamente con la producción mundial de alimentos.

El crecimiento del biodiésel durante las últimas décadas ha sido significativo, impulsado por las políticas de descarbonización, la diversificación energética y la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, a pesar de su expansión, su participación en el consumo total de combustibles para el transporte continúa siendo relativamente limitada en comparación con la enorme magnitud del mercado mundial del diésel.

Uno de los principales desafíos para aumentar su participación radica en la disponibilidad sostenible de materias primas. La demanda potencial de aceites vegetales, grasas animales, aceites usados y otras fuentes renovables crece a medida que los países incrementan los porcentajes obligatorios de mezcla, lo que exige ampliar la capacidad productiva y desarrollar nuevas fuentes de abastecimiento que no compitan con la producción de alimentos.

Desde el punto de vista tecnológico, la industria ha alcanzado una notable madurez. Los principales fabricantes de motores reconocen actualmente la viabilidad del uso de mezclas de biodiésel dentro de los límites establecidos por las normas internacionales. No obstante, se continúa trabajando en aspectos relacionados con la estabilidad del combustible durante el almacenamiento, el comportamiento a bajas temperaturas, la compatibilidad con sistemas avanzados de control de emisiones y la utilización de mezclas con mayores proporciones de biodiésel.

La Unión Europea, Estados Unidos, Brasil, Argentina y otros países han incorporado el biodiésel como parte de sus estrategias energéticas y ambientales. Su utilización se ha extendido principalmente al transporte de cargas, flotas públicas, maquinaria agrícola, equipos industriales y generación eléctrica, aprovechando la infraestructura existente para combustibles líquidos.

Más allá de sus beneficios ambientales, el biodiésel contribuye al desarrollo económico mediante la creación de cadenas productivas asociadas a la agricultura, la industria oleaginosa, el procesamiento de biomasa y la distribución de combustibles. Asimismo, fortalece la seguridad energética al reducir la dependencia de las importaciones de petróleo y diversificar las fuentes de suministro.

En síntesis, el biodiésel se ha consolidado como uno de los principales combustibles renovables para motores diésel. Aunque su expansión futura dependerá de factores económicos, tecnológicos y de disponibilidad de materias primas, continúa desempeñando un papel relevante

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

dentro de la transición energética mundial y en las estrategias orientadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte.

Producción artesanal de biodiésel: una visión realista

En los primeros años del desarrollo del biodiésel surgieron numerosas publicaciones que presentaban su fabricación artesanal como un proceso sencillo, económico y al alcance de cualquier persona. Era común encontrar mensajes que transmitían la idea de que producir biodiésel en casa resultaba tan simple como seguir una receta doméstica, utilizando aceites vegetales usados y materiales de fácil adquisición.

Sin embargo, la experiencia práctica demostró que esta percepción es una simplificación excesiva de una realidad mucho más compleja. Aunque es técnicamente posible producir biodiésel a pequeña escala, obtener un combustible de calidad adecuada exige conocimientos de química, seguridad industrial, control de procesos y manejo de sustancias peligrosas. Como reflejan numerosos foros técnicos y comunidades de usuarios, gran parte de los problemas encontrados por los productores artesanales están relacionados con errores en la selección de materias primas, el control de las reacciones químicas, la separación de subproductos y la verificación de la calidad final del combustible.

La producción de biodiésel se basa en un proceso químico denominado **transesterificación,** en el que intervienen aceites o grasas, alcoholes y catalizadores químicos. Para lograr buenos rendimientos y una calidad aceptable es necesario controlar variables tales como la temperatura, la agitación, las proporciones de reactivos, el contenido de agua, la acidez de las materias primas y la adecuada separación de la glicerina generada durante el proceso.

Además, la fabricación de biodiésel implica la manipulación de productos químicos que pueden representar riesgos importantes para la salud y la seguridad. Sustancias como el metanol y los hidróxidos alcalinos requieren procedimientos adecuados de almacenamiento, manipulación y protección personal. Por esta razón, cualquier actividad relacionada con la producción experimental de biodiésel debe realizarse observando estrictamente las normas de seguridad aplicables y utilizando equipamiento apropiado.

También debe considerarse que la obtención de un combustible apto para motores modernos requiere procesos adicionales de purificación, control de calidad y verificación de sus propiedades físico-químicas. Aspectos como la estabilidad, la viscosidad, el contenido de contaminantes y el cumplimiento de las especificaciones técnicas son determinantes para garantizar un funcionamiento seguro y confiable de los motores.

En la práctica, la producción artesanal suele tener fines educativos, experimentales o de investigación, permitiendo comprender los fundamentos de una tecnología que ha adquirido una importancia creciente dentro de la transición energética mundial. Sin embargo, cuando se persiguen objetivos comerciales o de abastecimiento a gran escala, resulta imprescindible contar con instalaciones industriales, sistemas de control de calidad, equipamiento especializado y procedimientos normalizados que aseguren una producción eficiente, segura y conforme a las normas vigentes.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

En definitiva, producir biodiésel no es simplemente mezclar ingredientes en un recipiente. Es un proceso tecnológico que requiere conocimientos, disciplina operativa, control de calidad y una adecuada gestión de la seguridad. Precisamente por ello, el éxito de esta industria ha estado ligado al desarrollo de tecnologías, normas y procesos que garantizan la producción de un combustible renovable capaz de competir con los combustibles fósiles tradicionales.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

4. Aceites, Materias Primas y sus Especificaciones

4.1 Aceites y Grasas.

El biodiésel es un combustible renovable compuesto principalmente por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, obtenidos a partir de aceites vegetales, grasas animales o residuos grasos mediante procesos químicos de conversión. Debido a sus propiedades físicas y de combustión, puede utilizarse como sustituto total o parcial del diésel de origen fósil en motores de encendido por compresión.

La tecnología predominante para su producción es la **transesterificación**, una reacción química mediante la cual los triglicéridos presentes en aceites y grasas reaccionan con un alcohol de cadena corta, generalmente metanol o etanol, en presencia de un catalizador. Como resultado se obtienen ésteres de ácidos grasos, que constituyen el biodiésel, y glicerina como subproducto de valor industrial.

Desde el punto de vista químico, los aceites vegetales y las grasas animales están formados principalmente por triglicéridos, moléculas constituidas por tres cadenas de ácidos grasos unidas a una molécula de glicerol. Durante la reacción de transesterificación, estas cadenas son separadas y reaccionan con el alcohol para formar moléculas de menor viscosidad, adecuadas para su utilización en motores diésel modernos.

Una de las principales ventajas de esta tecnología es su flexibilidad respecto a las materias primas que puede procesar. Aunque inicialmente la producción comercial se concentró en aceites refinados de origen vegetal, el desarrollo tecnológico actual permite aprovechar una amplia variedad de recursos renovables, incluyendo materias primas con elevados contenidos de ácidos grasos libres que anteriormente resultaban difíciles de procesar.

Principales materias primas utilizadas

- Aceites vegetales convencionales
- Aceite de soja
- Aceite de colza (canola)
- Aceite de palma
- Aceite de girasol
- Aceite de coco
- Aceites vegetales alternativos y cultivos energéticos
- Camelina (Camelina sativa)
- Carinata (Brassica carinata)
- Cardo (Cynara cardunculus)
- Crambe (Crambe abyssinica)
- Jatropha (Jatropha curcas)

Estas especies han sido estudiadas por su capacidad de crecer en terrenos marginales, su resistencia a condiciones climáticas adversas y su potencial para reducir la competencia directa con la producción de alimentos.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Materias primas residuales

- Aceites de cocina usados
- Grasas de fritura recuperadas
- Residuos grasos industriales
- Subproductos de la industria alimentaria

En la actualidad estas fuentes tienen una importancia creciente debido a sus ventajas económicas y ambientales, ya que permiten valorizar residuos que de otro modo requerirían tratamiento o disposición final.

Grasas animales

- Sebo bovino
- Grasas porcinas
- Grasas avícolas
- Otros subproductos de la industria cárnica

Gracias a las mejoras en los procesos de pretratamiento y esterificación, estas materias primas pueden transformarse eficientemente en biodiésel de calidad comercial.

Materias primas avanzadas

- Aceites obtenidos de microalgas
- Aceites producidos por microorganismos
- Biomasa oleaginosa de nueva generación
- Aceites procedentes de residuos lignocelulósicos mediante procesos avanzados

Aunque algunas de estas tecnologías aún se encuentran en etapas de desarrollo o expansión comercial, representan oportunidades importantes para incrementar la producción de biocombustibles sin aumentar la presión sobre las tierras agrícolas.

Evolución de las materias primas.

Cuando este análisis fue elaborado originalmente durante los años 2007-2009, la producción mundial de biodiésel estaba basada principalmente en los aceites de soja, colza y palma. Desde entonces, la industria ha experimentado una evolución significativa hacia el aprovechamiento de materias primas residuales y de segunda generación, motivada por la necesidad de mejorar la sostenibilidad ambiental, reducir costos y minimizar el impacto sobre la producción de alimentos.

Actualmente, muchos programas de incentivos y normativas internacionales favorecen el uso de aceites reciclados, grasas residuales y otras materias primas con menor huella de carbono, contribuyendo a mejorar el balance ambiental del biodiésel.

Importancia económica de la materia prima

La materia prima continúa siendo el componente de mayor peso dentro de los costos de producción del biodiésel. Dependiendo de la tecnología utilizada, la ubicación geográfica y el tipo

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

de insumo empleado, su participación puede representar entre el 60 % y el 85 % del costo total de fabricación.

Por esta razón, la selección de materias primas adecuadas constituye uno de los factores más importantes que determinan la competitividad técnica, económica y ambiental de un proyecto de producción de biodiésel.

La disponibilidad de materias primas es el factor que define el potencial de crecimiento de la industria del biodiésel. Si bien los aceites vegetales tradicionales continúan siendo la principal fuente de producción, las tendencias actuales favorecen la incorporación de residuos, grasas recicladas, cultivos energéticos alternativos y tecnologías avanzadas capaces de incrementar la producción de biocombustibles de manera más sostenible. Por ello, el estudio de las características, rendimientos y contenidos de aceite de las distintas especies vegetales continúa siendo un aspecto clave para evaluar la viabilidad de esta industria.

Tabla 2. Contenido típico de aceite por tonelada de materia prima

Especie vegetal	Aceite recuperable (kg/t)
Coco (copra)	650
Sésamo	500
Girasol	430
Maní (cacahuete)	480
Canola / Colza	420
Mostaza	370
Palma (palmiste o kernel)	500
Palma (fruto)	200
Soya	200
Semilla de algodón	200
Jatropha curcas	350
Maíz (germen)	80

- **Coco (copra)** continúa siendo una de las materias primas con mayor contenido de aceite, alcanzando entre **60 y 70 %**, equivalentes a aproximadamente **600-700 kg de aceite por tonelada**. [academic.oup.com], [oilprocessinghub.com]
- **Sésamo** presenta contenidos típicos entre **48 y 55 %** de aceite. [oilprocessinghub.com], [doingoilmachine.com]
- **Canola (colza)** contiene generalmente entre **38 y 44 %** de aceite. [oilprocessinghub.com], [academic.oup.com], [doingoilmachine.com]
- **Soya** sigue siendo la principal materia prima mundial para biodiésel en numerosos países, aunque su contenido de aceite es relativamente bajo, del orden de **18-20 %**. [academic.oup.com], [oilprocessinghub.com], [doingoilmachine.com]

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

- **Girasol** contiene normalmente entre **38 y 48 %** de aceite, dependiendo de la variedad cultivada. [oilprocessinghub.com], [academic.oup.com]
- **Jatropha curcas**, ampliamente promovida durante la década de 2000 como cultivo energético, presenta contenidos de aceite entre **35 y 40 %**, superiores a los reflejados en la tabla original. [intechopen.com], [hub.sivo.it.com]

Referencias recomendadas para citar en el documento

1. USDA Foreign Agricultural Service (FAS). *Major Vegetable Oils: World Supply and Distribution*. [apps.fas.usda.gov]
2. Oxford Academic. *Global production of major oilseed crops and oil content, 2023/2024*. [academic.oup.com]
3. Farm Energy Extension. *Feedstock Yields and Prices for Biodiesel*. [farm-energ...ension.org]
4. Oil Processing Hub. *Oil Content of Oilseeds Comparison Table*. [oilprocessinghub.com]

Tabla 3. Producción típica de aceite por hectárea cultivada

Cultivo oleaginoso	Litros de aceite (L/ha·año)
Maíz	172
Algodón	325
Soya	446
Mostaza	572
Camelina	583
Sésamo	696
Girasol	952
Maní (cacahuete)	1.059
Colza / Canola	1.190
Jatropha curcas	1.892
Coco	2.689
Palma aceitera	5.950
Microalgas*	95.000

*Valor teórico reportado para sistemas de alta productividad; no representa rendimientos comerciales generalizados. [en.wikipedia.org]

Tabla 4. Clasificación por productividad

Categoría	Cultivos
Baja (< 600 L/ha)	Maíz, Algodón, Soya, Mostaza, Camelina
Media (600-1.500 L/ha)	Sésamo, Girasol, Maní, Canola
Alta (1.500-3.000 L/ha)	Jatropha, Coco
Muy Alta (> 3.000 L/ha)	Palma aceitera

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

4.2 Selección de materias primas y tecnologías de producción

La productividad de una especie oleaginosa, medida en litros de aceite por hectárea, constituye únicamente uno de los múltiples factores que deben evaluarse al seleccionar una materia prima para la producción de biodiésel. Aunque este parámetro resulta fundamental para estimar el potencial productivo de un cultivo, la viabilidad real de un proyecto depende de un análisis integral que considere aspectos agronómicos, tecnológicos, económicos, ambientales y logísticos.

Cada especie vegetal presenta características particulares en cuanto a rendimientos agrícolas, contenido de aceite, requerimientos de agua y fertilizantes, resistencia a plagas, adaptación climática, disponibilidad regional, impacto sobre el uso del suelo y costos de producción. Asimismo, deben considerarse el valor comercial alternativo de los productos alimentarios obtenidos a partir de estas materias primas, la existencia de mercados consolidados y los posibles efectos ambientales asociados a su cultivo.

Por esta razón, la selección de una materia prima adecuada requiere evaluar toda la cadena de valor, desde la producción agrícola hasta la obtención del biocombustible final. Entre los factores más importantes se encuentran el rendimiento de aceite por hectárea, el balance energético del proceso, la intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero, los costos de transformación, la disponibilidad de materia prima durante todo el año y la competitividad del producto obtenido frente a otros combustibles renovables o fósiles.

Un aspecto especialmente importante es que la naturaleza de la materia prima determina en gran medida la tecnología de procesamiento requerida y, por consiguiente, los costos de inversión y operación de la planta de biodiésel.

4.3 Principales rutas tecnológicas de producción

Actualmente existen varias tecnologías para convertir aceites y grasas en biodiésel. La selección de una u otra depende fundamentalmente del contenido de ácidos grasos libres, humedad e impurezas presentes en la materia prima.

a) Transesterificación alcalina

Es el proceso más utilizado a nivel industrial para aceites refinados o materias primas de buena calidad, con bajo contenido de ácidos grasos libres y humedad.

Durante esta reacción, los triglicéridos reaccionan con metanol o etanol en presencia de catalizadores alcalinos, generalmente hidróxido de sodio, hidróxido de potasio o sus correspondientes alcoxilatos.

Sus principales ventajas son:

- Altos rendimientos de conversión.
- Bajos tiempos de reacción.
- Menores costos operacionales.
- Amplia experiencia industrial acumulada.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Por estas razones, esta tecnología continúa siendo la predominante en la producción mundial de biodiésel.

b) Esterificación ácida seguida de transesterificación

Cuando las materias primas contienen cantidades importantes de ácidos grasos libres, como ocurre con algunos aceites usados, grasas residuales o determinados aceites vegetales crudos, suele realizarse una etapa previa de esterificación ácida.

En esta fase, los ácidos grasos libres reaccionan con alcohol para formar ésteres, reduciendo su concentración y permitiendo posteriormente aplicar la transesterificación convencional con un mayor rendimiento.

Esta alternativa implica mayores costos de proceso, pero posibilita utilizar materias primas de menor precio y mejorar la sostenibilidad económica del proyecto.

c) Procesamiento de grasas animales y residuos grasos

Las grasas animales, aceites de fritura usados y otros residuos grasos presentan generalmente mayores niveles de acidez e impurezas, por lo que requieren etapas adicionales de tratamiento y acondicionamiento.

Gracias a los avances tecnológicos de las últimas dos décadas, estas materias primas han adquirido una importancia creciente dentro de la industria mundial del biodiésel, permitiendo transformar residuos en combustibles renovables con una menor huella de carbono.

4.4. Importancia del pretratamiento

Independientemente de la tecnología seleccionada, la calidad de la materia prima tiene una influencia decisiva sobre los rendimientos del proceso.

La presencia de agua, sólidos suspendidos y ácidos grasos libres puede provocar reacciones secundarias indeseables, como la formación de jabones, que dificultan la separación de productos y reducen la eficiencia global de la planta.

Por esta razón, las materias primas suelen someterse a tratamientos previos tales como:

- Filtración.
- Desgomado.
- Neutralización.
- Secado.
- Eliminación de impurezas.
- Reducción de acidez.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

En los aceites usados y grasas residuales, estas operaciones de acondicionamiento son particularmente importantes para garantizar una producción estable y de calidad.

Tradicionalmente se consideró que algunas variedades de **aceite de girasol** presentaban limitaciones debido a su contenido de ceras, lo que requería etapas adicionales de descerado o "winterización". Sin embargo, los avances en los procesos de refinación y el desarrollo de nuevas variedades han reducido significativamente estas dificultades.

Actualmente, la elección entre girasol, soya, colza, palma u otras materias primas depende principalmente de factores económicos, disponibilidad regional, sostenibilidad y políticas energéticas, más que de limitaciones tecnológicas insalvables.

4.5 Tendencias actuales

Durante la década de 2000 la industria dependía principalmente de aceites vegetales vírgenes, especialmente soya, colza y palma. En la actualidad, la tendencia mundial se orienta hacia el aprovechamiento creciente de:

- Aceites de cocina usados.
- Grasas animales.
- Residuos agroindustriales.
- Materias primas de segunda generación.
- Aceites procedentes de microalgas y otras fuentes avanzadas.

Este cambio responde a la necesidad de reducir costos, minimizar la competencia con la producción de alimentos y mejorar el balance ambiental de los biocombustibles.

Tabla 5. Propiedades típicas de los principales aceites vegetales utilizados en la producción de biodiésel

Propiedad	Girasol Refinado	Soya Refinado	Canola Refinado	Palma Refinado
Índice de yodo	130-145	120-140	95-120	45-60
Densidad a 25 °C (g/cm³)	0,917	0,920	0,910	0,899
Estado físico a 25 °C	Líquido	Líquido	Líquido	Semisólido
Índice de refracción	1,473	1,473	1,472	1,454 (40 °C)
Índice de saponificación	190	192	188	200
Ácidos grasos saturados (%)	11	16	7	50
Ácidos grasos insaturados (%)	89	84	93	50
Ácidos grasos libres (%)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Materia insaponificable (%)	<1,5	<1,5	<1,5	<1,0

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

4.6 Influencia de la composición química de los aceites vegetales en la producción de biodiésel

Las propiedades físico-químicas mostradas en la Tabla 5 permiten comprender por qué determinados aceites vegetales resultan más adecuados que otros para determinadas aplicaciones dentro de la industria del biodiésel. Parámetros como el contenido de ácidos grasos saturados e insaturados, el índice de yodo, la acidez y el estado físico influyen directamente sobre la tecnología de procesamiento, los costos operativos y la calidad del combustible obtenido.

Puede observarse que el aceite de palma presenta aproximadamente un 50 % de ácidos grasos saturados, proporción significativamente superior a la encontrada en los aceites de girasol, soya y canola. Esta característica explica su comportamiento semisólido a temperatura ambiente y la necesidad de disponer de sistemas de calentamiento en tanques, conducciones y equipos de proceso para facilitar su almacenamiento, bombeo y manipulación.

El índice de saponificación está relacionado con el peso molecular promedio de los ácidos grasos presentes en el aceite. Aunque constituye un parámetro de interés para la caracterización de las materias primas, en la práctica industrial tienen mayor relevancia factores como el contenido de humedad, los ácidos grasos libres y la estabilidad del aceite durante el almacenamiento.

Uno de los parámetros más importantes es el índice de yodo, utilizado como medida indirecta del grado de insaturación de los aceites. Los aceites de girasol y soya presentan los valores más elevados, indicando una mayor presencia de dobles enlaces en sus moléculas. Por el contrario, el aceite de palma posee un índice de yodo considerablemente menor debido a su mayor contenido de componentes saturados.

Esta diferencia tiene implicaciones directas sobre las propiedades del biodiésel. En general, los aceites más insaturados producen biodiéseles con mejor comportamiento a bajas temperaturas, reduciendo el riesgo de cristalización y obstrucción de filtros en climas fríos. Sin embargo, estos combustibles son más susceptibles a la oxidación durante el almacenamiento prolongado. Por el contrario, los biodiéseles obtenidos a partir de materias primas más saturadas presentan una mayor estabilidad oxidativa, aunque pueden mostrar peores propiedades de flujo en frío.

La composición de los ácidos grasos también determina el estado físico de aceites y grasas. Los ácidos grasos saturados poseen estructuras lineales que permiten un empaquetamiento molecular más compacto, favoreciendo la formación de materiales sólidos o semisólidos a temperatura ambiente. Los ácidos grasos insaturados contienen uno o más dobles enlaces que generan curvaturas en las cadenas carbonadas, dificultando dicho empaquetamiento y favoreciendo su permanencia en estado líquido.

Por esta razón, la mayoría de los aceites vegetales utilizados en la producción de biodiésel permanecen líquidos a temperatura ambiente, mientras que muchas grasas animales y aceites tropicales presentan una tendencia natural a la solidificación parcial.

En la actualidad, las tecnologías industriales de producción de biodiésel permiten procesar eficientemente una amplia variedad de materias primas, incluyendo aceites de soya, canola, girasol, palma, aceites usados de cocina y grasas animales. No obstante, cada una requiere condiciones

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

específicas de pretratamiento y operación para garantizar altos rendimientos y el cumplimiento de las especificaciones de calidad establecidas en normas internacionales como ASTM D6751 y EN 14214.

En consecuencia, no existe una materia prima universalmente superior. La elección óptima dependerá de factores como la disponibilidad regional, el costo de adquisición, los rendimientos agrícolas, los requerimientos de procesamiento, las condiciones climáticas de utilización y las propiedades finales deseadas para el biodiésel producido. Mientras la palma destaca por su extraordinaria productividad agrícola, la canola ofrece excelentes propiedades de combustión y comportamiento en frío; la soya posee una enorme disponibilidad mundial; y los aceites residuales constituyen actualmente una de las opciones más atractivas desde el punto de vista económico y ambiental.

En definitiva, la selección de la materia prima representa una de las decisiones más importantes en el diseño y operación de una planta de biodiésel, ya que condiciona simultáneamente la tecnología empleada, los costos de producción y la calidad del combustible final.

4.7 Utilización de materias primas alternativas y sostenibles para la producción de biodiésel

Uno de los principales desafíos de la industria de los biocombustibles ha sido reducir la dependencia de materias primas que también forman parte de la cadena alimentaria humana y animal. Durante las primeras etapas de desarrollo del biodiésel, la producción se concentró principalmente en aceites de soya, colza, girasol y palma. Sin embargo, el crecimiento sostenido del sector impulsó la búsqueda de nuevas fuentes renovables capaces de proporcionar aceites y grasas sin competir directamente con la producción de alimentos.

Como resultado, han adquirido especial importancia los cultivos energéticos no alimentarios, los residuos agrícolas, los aceites usados, las grasas animales y otras materias primas avanzadas que permiten producir combustibles renovables con una menor huella ambiental y una mayor sostenibilidad económica.

4.7.1 Jatropha curcas

La Jatropha curcas, conocida en diversos países como jatrofa, piñón de tempate o piñón mexicano, es un arbusto o árbol perteneciente a la familia de las Euphorbiáceas, originario de América Central y posteriormente difundido hacia África y Asia.

El interés despertado por esta especie radica en que sus semillas contienen aceites no comestibles con contenidos típicos comprendidos entre el 35 % y el 40 %, mientras que la almendra puede alcanzar concentraciones superiores al 50 %. Debido a que sus semillas son tóxicas y no forman parte de la cadena alimentaria convencional, fue considerada durante años como una alternativa prometedora para la producción sostenible de biodiésel.

Entre sus principales ventajas destacan:

- Capacidad para crecer en zonas semiáridas.
- Adaptación a suelos de baja fertilidad.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

- Resistencia relativa a la sequía.
- Menor competencia con cultivos destinados a la alimentación.
- Posibilidad de integrarse en programas de desarrollo rural.

Durante las décadas de 2000 y 2010 numerosos países impulsaron plantaciones comerciales de Jatropha con fines energéticos. Sin embargo, la experiencia práctica demostró que los rendimientos reales eran frecuentemente inferiores a los inicialmente proyectados, especialmente cuando se cultivaba en terrenos excesivamente marginales.

Hoy se reconoce que la Jatropha puede constituir una materia prima viable en determinadas condiciones climáticas y agronómicas, pero que requiere niveles adecuados de manejo agrícola para alcanzar rendimientos económicamente competitivos. La experiencia internacional ha demostrado que la productividad sostenible depende de factores como la calidad genética del cultivo, la disponibilidad de agua, las prácticas agrícolas y la logística de recolección.

Aun así, continúa siendo una especie de interés para programas de bioenergía en regiones tropicales y subtropicales donde pueden coexistir objetivos energéticos, ambientales y sociales.

4.7.2 Otros cultivos energéticos alternativos

Además de la Jatropha, se han estudiado numerosas especies vegetales destinadas específicamente a la producción de energía. Entre ellas destacan:

- Camelina sativa
- Brassica carinata
- Crambe abyssinica
- Pongamia pinnata
- Cynara cardunculus (cardo)
- Diversas especies forestales y cultivos lignocelulósicos

Estas materias primas buscan aprovechar terrenos menos aptos para la agricultura intensiva y reducir la competencia entre la producción de alimentos y combustibles.

En paralelo, ha surgido un creciente interés por tecnologías avanzadas capaces de transformar biomasa sólida en combustibles líquidos de alta calidad.

Biomass-to-Liquid (BTL)

La tecnología **Biomass-to-Liquid (BTL)** permite convertir residuos forestales, biomasa agrícola y otros materiales orgánicos en combustibles sintéticos mediante procesos de gasificación y síntesis química.

Generalmente, la biomasa es transformada primero en un gas de síntesis y posteriormente convertida en combustibles líquidos mediante tecnologías como la síntesis Fischer-Tropsch.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Aunque estos procesos aún presentan mayores costos de inversión que la producción convencional de biodiésel, ofrecen ventajas importantes:

- Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales.
- Menor competencia con cultivos alimentarios.
- Elevada calidad del combustible producido.
- Potencial de reducción significativa de emisiones.

Por estas razones, los combustibles BTL continúan siendo considerados una de las rutas más prometedoras para los biocombustibles avanzados de próxima generación.

4.7.3 Grasas animales y materias primas residuales

El aprovechamiento de grasas animales y residuos grasos constituye actualmente una de las áreas de mayor crecimiento dentro de la industria mundial de los combustibles renovables.

Subproductos procedentes del procesamiento de carne bovina, porcina y avícola, junto con aceites de cocina usados y otras corrientes residuales, son transformados en biodiésel o en combustibles renovables avanzados mediante tecnologías de transesterificación o hidrotratamiento.

Esta tendencia responde a varias ventajas importantes:

- Menor costo de la materia prima.
- Aprovechamiento de residuos existentes.
- Reducción de impactos ambientales asociados a su disposición.
- Menor competencia con los mercados alimentarios.
- Menores emisiones de gases de efecto invernadero en determinados escenarios.

Durante los últimos años, numerosas refinerías de combustibles renovables han incrementado significativamente el uso de grasas animales, aceites usados y residuos industriales para producir lo que hoy se conoce como diésel renovable (HVO), combustible químicamente muy similar al diésel fósil pero obtenido a partir de materias primas renovables.

4.7.4 Tendencia actual de la industria

Si bien durante la década de 2000 la atención estaba centrada principalmente en aceites vegetales vírgenes como la soya, la colza y el girasol, la evolución tecnológica y las exigencias de sostenibilidad han transformado profundamente el sector.

Actualmente, el crecimiento más dinámico se observa en el aprovechamiento de:

- Aceites de cocina usados.
- Grasas animales.
- Residuos agrícolas.
- Biomasa lignocelulósica.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

- Cultivos energéticos de segunda generación.
- Materias primas avanzadas derivadas de microorganismos y microalgas.

La tendencia mundial apunta hacia materias primas que permitan maximizar la producción de energía renovable, minimizar la competencia con la producción de alimentos y reducir la huella de carbono de los combustibles para el transporte.

La experiencia acumulada durante más de dos décadas demuestra que la sostenibilidad futura de los biocombustibles dependerá en gran medida de la diversificación de las materias primas empleadas. Aunque los aceites vegetales tradicionales continúan desempeñando un papel relevante, las mayores oportunidades de crecimiento se encuentran hoy en el aprovechamiento de residuos, grasas recuperadas, cultivos energéticos especializados y tecnologías avanzadas capaces de producir combustibles renovables con menor impacto ambiental y una mayor integración dentro de los principios de la economía circular.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

5. Utilización directa de aceites vegetales como combustible para motores diésel

Antes del desarrollo masivo del biodiésel, numerosos estudios y experiencias prácticas evaluaron la posibilidad de utilizar aceites vegetales directamente como combustible en motores diésel. De hecho, el propio Rudolf Diesel presentó en la Exposición Universal de París de 1900 un motor capaz de funcionar con aceite de cacahuete, demostrando que los aceites vegetales podían emplearse como fuente de energía para motores de combustión interna.

Sin embargo, aunque técnicamente es posible utilizar aceites vegetales puros como combustible, la experiencia acumulada durante más de un siglo ha demostrado que esta alternativa presenta limitaciones importantes cuando se compara con el biodiésel obtenido mediante transesterificación.

5.1 Aceite Vegetal Puro (SVO) y Aceite Vegetal Usado (WVO)

Actualmente se distinguen dos variantes principales:

SVO (Straight Vegetable Oil): aceite vegetal nuevo o sin transformar utilizado directamente como combustible.
WVO (Waste Vegetable Oil): aceite usado procedente de procesos de cocción y fritura, sometido a procesos de filtración y acondicionamiento antes de su utilización.

En ambos casos, la principal ventaja radica en evitar el proceso químico de producción de biodiésel. Sin embargo, esta aparente simplicidad se ve compensada por la necesidad de realizar modificaciones mecánicas y adoptar procedimientos operativos específicos para proteger el motor.

5.2 Principales limitaciones técnicas

El principal problema del uso directo de aceites vegetales es su elevada viscosidad, que puede ser entre 10 y 20 veces superior a la del diésel convencional.

Esta alta viscosidad afecta la pulverización del combustible en los inyectores y dificulta la formación de una mezcla homogénea con el aire dentro de la cámara de combustión. Como consecuencia pueden producirse:

- Combustión incompleta.
- Formación de depósitos carbonosos.
- Obstrucción de inyectores.
- Pegado de segmentos.
- Dilución y degradación del aceite lubricante.
- Incremento de los costos de mantenimiento.
- Reducción de la vida útil del motor.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Asimismo, algunos aceites vegetales poseen una mayor tendencia a la oxidación o polimerización cuando son sometidos a las elevadas temperaturas presentes en la cámara de combustión, generando depósitos duros que afectan negativamente el funcionamiento del motor.

5.3 Sistemas de doble combustible

Para reducir estos problemas se desarrollaron sistemas específicos para el funcionamiento con aceites vegetales.

Los sistemas más difundidos utilizan dos depósitos independientes:

- Un depósito para diésel fósil o biodiésel.
- Un depósito para aceite vegetal.

El motor arranca utilizando diésel o biodiésel convencional. Una vez alcanzada la temperatura de operación, el aceite vegetal es calentado mediante intercambiadores de calor alimentados por el circuito de refrigeración del motor o mediante calentadores eléctricos.

Cuando el aceite alcanza una temperatura suficiente para reducir su viscosidad, generalmente entre 60 y 80 °C, el sistema conmuta automáticamente al depósito de aceite vegetal. Antes de detener el motor, debe volver a utilizarse diésel o biodiésel durante algunos minutos para purgar el sistema de alimentación y evitar obstrucciones durante el enfriamiento.

Este esquema permite mejorar significativamente la fiabilidad, aunque incrementa la complejidad y el costo del sistema.

5.4 Compatibilidad con motores modernos

La utilización de aceite vegetal puro puede resultar relativamente satisfactoria en algunos motores diésel mecánicos antiguos, caracterizados por sistemas de inyección robustos y tolerancias menos exigentes.

Sin embargo, los motores modernos equipados con tecnologías de alta presión, sistemas Common Rail, inyectores electrónicos, filtros de partículas (DPF), catalizadores y sistemas avanzados de control de emisiones presentan mayores exigencias respecto a la calidad del combustible. Por ello, la utilización de aceite vegetal puro suele ser desaconsejada por la mayoría de los fabricantes, salvo en aplicaciones específicamente diseñadas o adaptadas para ello.

5.5 Comparación entre aceite vegetal y biodiésel

Aunque ambos combustibles tienen origen renovable, presentan diferencias importantes.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Tabla 6. Diferencias entre el aceite vegetal y biodiésel

Característica	Aceite Vegetal	Biodiésel
Procesamiento previo	Bajo	Medio
Compatibilidad con motores modernos	Limitada	Alta
Viscosidad	Elevada	Similar al diésel
Emisiones	Variables	Reducidas
Necesidad de modificaciones	Frecuente	Generalmente no
Riesgo de depósitos	Alto	Bajo
Facilidad de utilización	Menor	Mayor

La transesterificación transforma los triglicéridos del aceite vegetal en ésteres metílicos o etílicos, reduciendo significativamente la viscosidad y mejorando las propiedades del combustible. Como resultado, el biodiésel se comporta de forma mucho más similar al diésel convencional y puede emplearse en la mayoría de los motores actuales dentro de las mezclas aprobadas por los fabricantes.

5.6 Situación actual

Durante los primeros años del desarrollo de los biocombustibles existió un gran interés en la utilización directa de aceites vegetales como combustible. Sin embargo, la evolución tecnológica y las exigencias ambientales actuales han favorecido claramente la producción de biodiésel y, más recientemente, de combustibles renovables avanzados como el HVO (Hydrotreated Vegetable Oil o diésel renovable).

Actualmente el uso directo de aceites vegetales se limita principalmente a aplicaciones experimentales, educativas o a determinadas flotas especializadas. En contraste, el biodiésel y el diésel renovable se han consolidado como las principales alternativas renovables para la sustitución parcial o total del diésel fósil en el transporte y otros sectores energéticos.

La experiencia acumulada confirma que, aunque los aceites vegetales pueden utilizarse directamente como combustible en determinadas condiciones, la alternativa técnicamente más adecuada, segura y compatible con los motores modernos sigue siendo su conversión a biodiésel mediante transesterificación o su transformación en combustibles renovables avanzados. Estas tecnologías permiten aprovechar los beneficios energéticos de los aceites vegetales reduciendo simultáneamente los problemas operativos, el impacto sobre los motores y los costos de mantenimiento.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

6. Otras materias primas complementarias y servicios auxiliares requeridos

Además de los aceites y grasas que constituyen la materia prima principal, la producción de biodiésel requiere diversos reactivos químicos, solventes y servicios auxiliares indispensables para el desarrollo eficiente y seguro del proceso. La disponibilidad, calidad y costo de estos insumos tienen una influencia significativa tanto en la rentabilidad como en el desempeño ambiental de una planta de biodiésel.

6.1 Metanol

El metanol (CH_3OH) es el alcohol más utilizado en la producción industrial de biodiésel debido a su elevada reactividad, amplia disponibilidad comercial y costo relativamente competitivo. Tradicionalmente se produce a partir de gas natural mediante procesos catalíticos, aunque actualmente también se encuentra disponible metanol renovable obtenido a partir de biomasa, residuos orgánicos, captura de CO_2 e hidrógeno de origen renovable.

Dentro del proceso de transesterificación, el metanol reacciona con los triglicéridos presentes en aceites y grasas para formar los ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiésel) y glicerina como subproducto.

El metanol es un líquido incoloro, inflamable y tóxico que requiere estrictas medidas de seguridad durante su manipulación, almacenamiento y transporte. La inhalación de vapores, la ingestión o el contacto prolongado pueden provocar graves afectaciones a la salud.

Por esta razón, los reactores, tanques y sistemas de almacenamiento deben operar cerrados, con ventilación adecuada, sistemas de detección de vapores y procedimientos específicos de seguridad industrial.

6.2 Hexano

El hexano (C_6H_{14}) es un hidrocarburo derivado principalmente de la refinación del petróleo y constituye el solvente más ampliamente utilizado para la extracción industrial de aceites vegetales a partir de semillas oleaginosas como la soya, canola, girasol y algodón.

Gracias a su elevada capacidad de disolución de aceites, permite maximizar los rendimientos de extracción y reducir las pérdidas de aceite residual en las harinas resultantes.

Sin embargo, se trata de una sustancia inflamable y potencialmente perjudicial para la salud si se manipula de forma inadecuada. Por ello, las plantas extractoras modernas incorporan sistemas cerrados de recuperación de solvente mediante destilación y condensación que permiten minimizar las emisiones, reducir el consumo de hexano y mejorar la seguridad operacional.

6.3 Hidróxido de sodio

El hidróxido de sodio (NaOH), también conocido como soda cáustica, es uno de los catalizadores más utilizados en los procesos de transesterificación alcalina.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Su función consiste en favorecer la reacción entre el alcohol y los triglicéridos, incrementando la velocidad de conversión y mejorando el rendimiento del proceso.

Se trata de un producto altamente corrosivo que puede ocasionar quemaduras severas en contacto con la piel, los ojos o las vías respiratorias. Por esta razón, debe manipularse utilizando equipos de protección personal adecuados y empleando materiales resistentes a la corrosión.

En la industria también es frecuente la utilización de hidróxido de potasio (KOH), especialmente en determinados procesos donde la recuperación o valorización de subproductos resulta ventajosa.

6.4 Ácido fosfórico

El ácido fosfórico (H_3PO_4) se emplea habitualmente en diferentes etapas del procesamiento de aceites y biodiésel.

Entre sus aplicaciones más comunes se encuentran:

Neutralización de residuos alcalinos.
Control de pH.
Desgomado de aceites vegetales.
Mejora de la calidad del producto final.

Aunque es menos agresivo que otros ácidos minerales fuertes, continúa siendo una sustancia corrosiva que requiere medidas adecuadas de manipulación y almacenamiento.

6.5 Agua

El agua constituye un insumo fundamental en numerosas operaciones de una planta de biodiésel.

Dependiendo de la tecnología utilizada puede emplearse en:

Lavado del biodiésel.
Preparación de soluciones químicas.
Producción de vapor.
Sistemas de enfriamiento.
Servicios auxiliares.
Operaciones de limpieza.

Las tendencias más recientes de la industria buscan reducir el consumo de agua mediante tecnologías de lavado en seco, adsorbentes sólidos y sistemas avanzados de purificación, disminuyendo tanto los costos operativos como la generación de efluentes.

6.6 Electricidad

La electricidad es uno de los principales servicios auxiliares requeridos en el proceso productivo.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Su consumo está asociado a:

- Bombas de transferencia.
- Agitadores de reactores.
- Sistemas de extracción y ventilación.
- Instrumentación y control.
- Equipos de laboratorio.
- Sistemas de iluminación.
- Compresores de aire.
- Equipos de calentamiento y tratamiento.

En las instalaciones modernas, la eficiencia energética se ha convertido en un factor clave para reducir los costos operativos y mejorar la competitividad de la producción de biodiésel.

6.7 Vapor y energía térmica

La mayoría de las plantas industriales también requieren energía térmica para diversas operaciones, entre ellas:

- Calentamiento de materias primas.
- Control de temperatura de reacción.
- Recuperación de metanol.
- Destilación de productos.
- Secado y acondicionamiento del biodiésel.

Esta energía térmica puede generarse mediante calderas que emplean gas natural, biomasa, biogás u otros combustibles disponibles localmente.

Importancia de los insumos auxiliares

Aunque el aceite o la grasa constituyen la principal materia prima del proceso y suelen representar entre el 60 % y el 85 % del costo de producción, los reactivos químicos, solventes y servicios auxiliares tienen una influencia significativa sobre la eficiencia global de la planta.

La selección adecuada de estos insumos, junto con una correcta gestión energética y ambiental, permite optimizar los rendimientos, reducir los costos operativos y mejorar la sostenibilidad de la producción de biodiésel, aspectos que cada vez adquieren mayor relevancia dentro de la industria mundial de los combustibles renovables.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

7. Proceso tecnológico y su control

7.1 Descripción del proceso tecnológico

El biodiésel es un combustible renovable obtenido a partir de aceites vegetales, grasas animales o residuos grasos mediante procesos de transformación química que permiten convertir estas materias primas en un combustible compatible con los motores diésel modernos. A diferencia de los combustibles derivados del petróleo, el biodiésel se produce a partir de recursos renovables que participan en el ciclo biológico del carbono, contribuyendo potencialmente a la reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero cuando su producción se realiza de manera sostenible.

Como se explicó anteriormente, existen tres rutas tecnológicas fundamentales para la fabricación de biodiésel:

a) Transesterificación catalítica en medio alcalino.
b) Esterificación ácida seguida de transesterificación.
c) Conversión de aceites o grasas en ácidos grasos y posterior esterificación.

Aunque las tres alternativas continúan utilizándose industrialmente, la tecnología más difundida a nivel mundial sigue siendo la transesterificación alcalina con metanol, debido a sus ventajas económicas y operativas. Este proceso permite trabajar a temperaturas y presiones moderadas, alcanzar elevadas conversiones de reacción, generalmente superiores al 95 %, y minimizar la formación de productos secundarios indeseables.

Además, esta tecnología presenta una elevada madurez industrial, siendo la base de la mayoría de las plantas de producción de biodiésel construidas durante las últimas décadas.

7.2 Principio de la reacción

La reacción de transesterificación consiste en la transformación de los triglicéridos presentes en aceites y grasas en ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, Fatty Acid Methyl Esters), que constituyen el biodiésel.

Durante el proceso, cada molécula de triglicérido reacciona con metanol en presencia de un catalizador alcalino, generalmente hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH) o metóxido de sodio (CH_3ONa), produciendo biodiésel y glicerina como subproducto.

De forma simplificada:

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Los reactivos

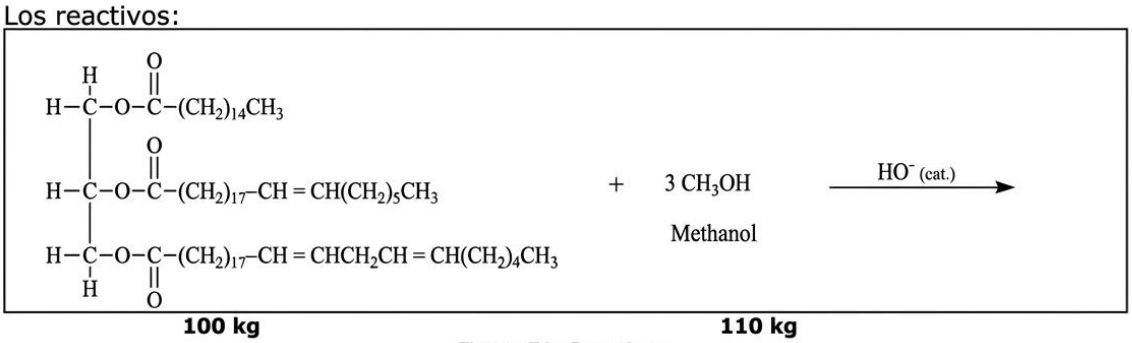


Figura 7A: Reactivos

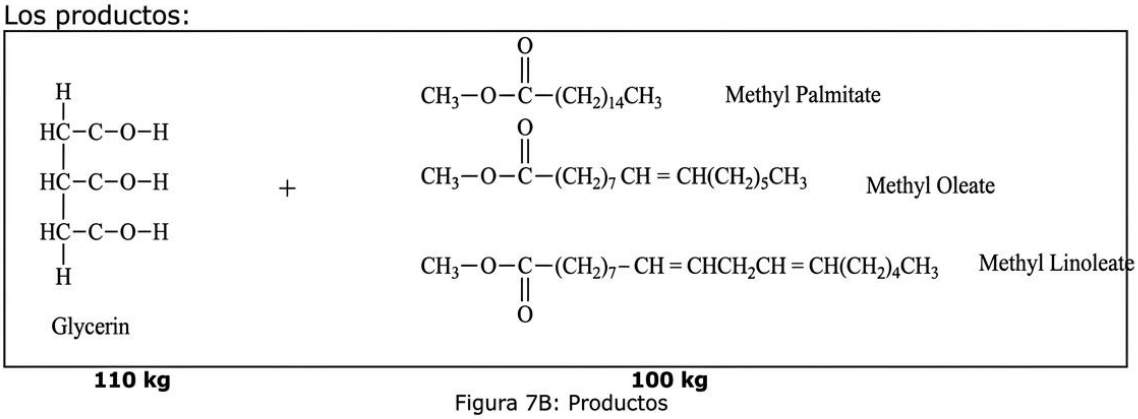


Figura 7B: Productos

Los cuadros 7A y 7B muestran esquemáticamente la reacción química y los principales productos generados durante el proceso.

Aspectos estequiométricos

Desde el punto de vista teórico, un mol de triglicérido requiere tres moles de metanol para completar la reacción. Sin embargo, en la práctica industrial se emplea un exceso de metanol para desplazar el equilibrio químico hacia la formación de biodiésel y maximizar el rendimiento de conversión.

Posteriormente, el metanol no reaccionado es recuperado mediante sistemas de separación y reutilizado en el proceso, reduciendo los costos operativos.

7.3 Etapas principales del proceso industrial

Aunque existen diferentes configuraciones tecnológicas, una planta moderna de biodiésel suele incluir las siguientes etapas:

1. Preparación de la materia prima

La materia prima es sometida a:

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

- Filtración.
- Eliminación de sólidos.
- Deshidratación.
- Control de acidez.
- Pretratamientos específicos cuando se utilizan aceites usados o grasas animales.

La calidad de esta etapa tiene una influencia decisiva sobre el rendimiento global del proceso.

2. Preparación del catalizador

El catalizador seleccionado se disuelve en metanol para formar la solución catalítica que posteriormente será incorporada al reactor.

Esta operación debe realizarse en sistemas cerrados debido al carácter inflamable y tóxico del metanol.

3. Reacción de transesterificación

La mezcla de aceite y solución catalítica se introduce en el reactor.

Las condiciones típicas de operación son:

Temperatura: 55-65 °C.
Presión cercana a la atmosférica.
Agitación continua.
Tiempo de reacción: 1 a 2 horas.

Durante esta etapa se produce la conversión de los triglicéridos en biodiésel y glicerina.

4. Separación de fases

Finalizada la reacción, la mezcla se deja reposar o pasa a sistemas de separación continua.

Debido a su mayor densidad, la glicerina se separa naturalmente del biodiésel formando una fase inferior.

5. Recuperación de metanol

Tanto la fase de biodiésel como la fase de glicerina contienen metanol remanente que debe recuperarse mediante evaporación o destilación para su reutilización.

6. Purificación del biodiésel

El biodiésel bruto contiene trazas de catalizador, jabones, agua, metanol residual y otras impurezas.

Actualmente se utilizan dos tecnologías principales:

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Lavado húmedo con agua.
Purificación en seco mediante resinas absorbentes o materiales adsorbentes.

Las tecnologías modernas tienden a favorecer los sistemas secos por su menor consumo de agua y menor generación de efluentes.

7. Secado y almacenamiento

Finalmente, el biodiésel es secado para eliminar trazas de humedad y almacenado antes de ser despachado o mezclado con diésel fósil.

8. Variables críticas de control

El éxito del proceso depende fundamentalmente del control de diversos parámetros operacionales:

- Calidad de la materia prima.
- Contenido de agua.
- Ácidos grasos libres.
- Relación alcohol/aceite.
- Concentración del catalizador.
- Temperatura de reacción.
- Intensidad de agitación.
- Tiempo de residencia.
- Calidad del biodiésel final.

Pequeñas variaciones en estos parámetros pueden afectar significativamente los rendimientos de producción y la calidad final del combustible.

9. Influencia de las variables de operación en la reacción de transesterificación

La experiencia industrial ha demostrado que la transesterificación catalizada por álcalis es significativamente más rápida que la catalizada por ácidos, razón por la cual constituye actualmente la tecnología predominante en la producción mundial de biodiésel. Sus principales ventajas son los elevados rendimientos de conversión, los menores tiempos de reacción y las condiciones moderadas de temperatura y presión requeridas para su operación.

Sin embargo, para alcanzar altos rendimientos es imprescindible que tanto los aceites o grasas como el alcohol utilizado presenten bajos contenidos de agua. La presencia de humedad favorece reacciones secundarias de hidrólisis y saponificación, reduciendo la cantidad de biodiésel formada y aumentando la generación de jabones, emulsiones y otros compuestos indeseables que dificultan las operaciones posteriores de separación y purificación.

De igual forma, la concentración de ácidos grasos libres (AGL) de la materia prima tiene una influencia decisiva sobre la viabilidad de la transesterificación alcalina. Cuando los AGL

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

reaccionan con el catalizador básico (NaOH o KOH), se forman jabones que consumen parte del catalizador y reducen la eficiencia global de la reacción. Además, estos jabones dificultan la separación de la glicerina y del biodiésel, incrementando los costos de procesamiento.

Por esta razón, la transesterificación alcalina se utiliza preferentemente con materias primas que presentan bajos niveles de acidez. Cuando se emplean aceites usados, grasas animales o materias primas con mayor contenido de ácidos grasos libres, suele incorporarse una etapa previa de esterificación ácida, mediante la cual estos ácidos son transformados en ésteres antes de realizar la transesterificación principal. Esta estrategia permite aprovechar materias primas de menor costo y amplia disponibilidad, mejorando la rentabilidad económica del proceso.

Entre todas las variables de operación, una de las más importantes es la relación molar alcohol/aceite. Aunque desde el punto de vista estequiométrico la reacción requiere tres moles de alcohol por cada mol de triglicérido, en la práctica industrial se emplean cantidades superiores para desplazar el equilibrio químico hacia la formación de ésteres y maximizar la conversión. El exceso de alcohol utilizado es posteriormente recuperado y reciclado al proceso.

La temperatura también ejerce una influencia significativa sobre la velocidad de reacción. En general, el aumento de temperatura acelera la cinética de transesterificación y disminuye el tiempo necesario para completar la conversión. Industrialmente se opera habitualmente entre 55 y 65 °C, temperaturas cercanas al punto de ebullición del metanol, lo que permite obtener elevados rendimientos sin incrementar excesivamente el consumo energético.

La reacción no ocurre instantáneamente, sino mediante una secuencia de etapas reversibles. Inicialmente los triglicéridos reaccionan con el alcohol formando diglicéridos, posteriormente monoglicéridos y finalmente glicerina. En cada una de estas etapas se libera una molécula de éster metílico. Esta secuencia explica la presencia, en pequeñas cantidades, de mono-, di- y triglicéridos residuales en el biodiésel bruto, los cuales deben ser controlados para cumplir las especificaciones internacionales de calidad.

Una vez finalizada la transesterificación, la mezcla de reacción contiene biodiésel, glicerina, alcohol no reaccionado, trazas de catalizador, jabones y pequeñas cantidades de mono-, di- y triglicéridos. Mediante procesos de decantación, centrifugación, recuperación de alcohol y purificación se obtienen dos corrientes principales: biodiésel y glicerina cruda.

En las plantas modernas, una parte importante del alcohol utilizado se recupera mediante sistemas de evaporación o destilación y se reutiliza en el proceso, reduciendo significativamente los costos operativos. Asimismo, la glicerina generada se purifica para su aprovechamiento en las industrias química, farmacéutica, cosmética y alimentaria.

Los ácidos grasos, jabones y otros subproductos recuperados durante las etapas de purificación también pueden reincorporarse a procesos de esterificación para producir biodiésel adicional o utilizarse como materias primas en la fabricación de detergentes, jabones y otros productos químicos de valor comercial.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

En consecuencia, el rendimiento económico de una planta de biodiésel depende no solo de la conversión alcanzada en el reactor, sino también de la eficiencia con que se recuperan y valorizan los subproductos generados a lo largo de todo el proceso productivo.

10. Preparación del aceite para la transesterificación

Una vez verificadas las especificaciones, la materia prima es acondicionada antes de ingresar al reactor. Las operaciones más comunes incluyen:

Filtración

Elimina partículas sólidas, residuos orgánicos y materiales extraños que podrían afectar bombas, válvulas, intercambiadores de calor y equipos de proceso.

Desgomado

Permite eliminar fosfolípidos y compuestos coloidales que pueden formar emulsiones y afectar la calidad del biodiésel.

Secado

Reduce el contenido de agua hasta niveles compatibles con la transesterificación alcalina.

La presencia de humedad favorece la hidrólisis de los triglicéridos y la formación de jabones, reduciendo el rendimiento de producción.

Reducción de acidez

Cuando el contenido de ácidos grasos libres es elevado, suele incorporarse una etapa previa de esterificación ácida para convertir dichos ácidos en ésteres y evitar pérdidas de catalizador.

Descerado (Winterización)

En determinados aceites, especialmente algunos aceites de girasol, se realiza la eliminación de ceras mediante enfriamiento controlado y posterior filtración.

Resumiendo:

La preparación adecuada de la materia prima tiene un impacto directo sobre:

- El rendimiento de conversión.
- El consumo de catalizador.
- La calidad del biodiésel producido.
- La facilidad de separación de la glicerina.
- La reducción de pérdidas de producción.
- Los costos operativos de la planta.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Por esta razón, muchas plantas modernas consideran el acondicionamiento de la materia prima como una etapa tan importante como la propia reacción de transesterificación. Una materia prima correctamente preparada permite maximizar la eficiencia del proceso y asegurar una producción estable, rentable y conforme a las especificaciones internacionales de calidad.

7.5 Importancia del control tecnológico

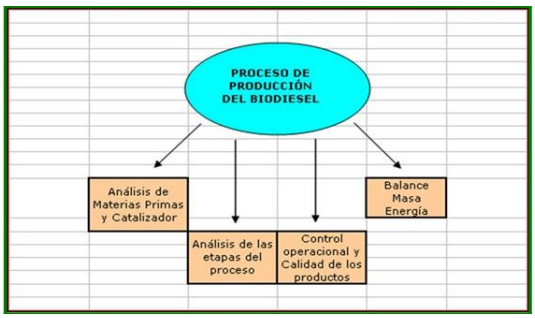
El biodiésel es un producto sujeto a estrictas especificaciones internacionales, tales como las establecidas en las normas ASTM D6751, EN 14214 y otras regulaciones nacionales. Por ello, la producción moderna requiere sistemas de control de calidad que permitan verificar propiedades como:

- Densidad.
- Viscosidad.
- Punto de inflamación.
- Estabilidad oxidativa.
- Contenido de agua.
- Metanol residual.
- Glicerina libre y total.
- Contenido de ésteres.

El cumplimiento de estas especificaciones garantiza la compatibilidad del biodiésel con los motores actuales y asegura un desempeño seguro, eficiente y ambientalmente adecuado.

La transesterificación alcalina continúa siendo la tecnología dominante para la producción mundial de biodiésel debido a su simplicidad, elevada eficiencia y bajo costo operativo. No obstante, la calidad de la materia prima, el control riguroso de las condiciones de reacción y la adecuada purificación del producto final siguen siendo factores determinantes para obtener un biodiésel que cumpla los estándares internacionales y pueda competir eficazmente con los combustibles convencionales y renovables de nueva generación.

Los pasos o etapas anteriores forman el Control Operacional del Proceso. Hay diversas variables que influyen y que hay que mantener en constante supervisión control y corrección. Podemos resumirlas en el cuadro siguiente:



Control operacional integral del proceso

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

8. Control de calidad, métodos analíticos y preparación de la materia prima

La calidad de la materia prima constituye uno de los factores más importantes para garantizar la eficiencia del proceso de transesterificación, el rendimiento de producción y el cumplimiento de las especificaciones finales del biodiésel. En la práctica industrial, una parte importante de los problemas operativos tiene su origen en materias primas que no cumplen los requisitos mínimos de calidad exigidos por la tecnología seleccionada.

Las materias primas más utilizadas para la producción de biodiésel pueden clasificarse en las siguientes categorías:

a) Aceites vegetales crudos

Incluyen aceites procedentes de soya, canola, girasol, palma y otras oleaginosas. Antes de ser procesados suelen requerir operaciones de acondicionamiento tales como:

Filtración mecánica.
Desgomado.
Eliminación de sólidos suspendidos.
Secado para reducir el contenido de humedad.
Ajuste de la acidez cuando resulte necesario.

b) Aceites y grasas residuales

Comprenden aceites de cocina usados, grasas recuperadas de la industria alimentaria y otros residuos grasos.

Estas materias primas son especialmente atractivas por su bajo costo y su contribución a la economía circular, aunque suelen requerir tratamientos más intensivos para eliminar:

- Humedad.
- Sólidos en suspensión.
- Productos de oxidación.
- Restos alimentarios.
- Ácidos grasos libres.
- Compuestos causantes de olores indeseables.

Dependiendo de su estado inicial, el rendimiento útil recuperado durante el pretratamiento puede experimentar pérdidas variables asociadas a la eliminación de impurezas y contaminantes.

8.1. Control de calidad de la materia prima

Antes de su utilización, los aceites y grasas deben someterse a un programa de control de calidad que permita verificar su aptitud para el proceso.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

El objetivo es comprobar que la materia prima cumple las especificaciones técnicas establecidas para la tecnología de producción seleccionada.

Cuando alguno de los parámetros se encuentra fuera de los valores aceptables, resulta necesario aplicar tratamientos correctivos antes de alimentar los reactores de producción.

8.2 Principales métodos analíticos empleados

Los laboratorios de control de calidad utilizan métodos estandarizados ASTM, EN e ISO para verificar la composición y propiedades de los aceites.

Entre los análisis más frecuentes se encuentran:
Tabla 7. Análisis frecuentes y sus objetivos

Parámetro	Objetivo
Índice de acidez	Determinar el contenido de ácidos grasos libres
Humedad	Evaluar el riesgo de hidrólisis y saponificación
Índice de yodo	Medir el grado de insaturación
Índice de saponificación	Caracterizar los triglicéridos presentes
Fósforo total	Cuantificar fosfolípidos y gomas
Impurezas insolubles	Determinar sólidos suspendidos
Cromatografía de gases	Analizar la composición de ácidos grasos
Punto de enturbiamiento	Evaluar el comportamiento a bajas temperaturas

Estos análisis permiten definir el pretratamiento más adecuado y predecir el comportamiento del aceite durante la producción de biodiésel.

8.3 Especificaciones recomendadas para transesterificación alcalina

Las plantas modernas suelen establecer límites de aceptación para las materias primas, con el objetivo de minimizar pérdidas de catalizador y evitar problemas de separación de fases.
Un conjunto típico de especificaciones podría ser:
Tabla 8. Valores especificados

Parámetro	Valor recomendado
Ácidos Grasos Libres (AGL)	< 0,5 % peso
Humedad	< 0,05 % peso
Gomas	Ausencia o niveles mínimos
Ceras	Ausencia o niveles controlados
Sólidos suspendidos	Ausencia
Índice de yodo	Generalmente < 140
Fósforo	Lo más bajo posible según tecnología

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Debe destacarse que estos límites pueden variar según el tipo de materia prima y el diseño específico de la planta de producción.

8.4. Principales determinaciones y marchas analíticas para evaluar la composición química del Aceite. Métodos empleados.

8.4.1. Índice de saponificación de una grasa. Determinación

Objetivos:
· Comprender el mecanismo de las reacciones de esterificación y saponificación.
· Determinar la calidad de un determinado éster.
· Sacar consecuencias en cuanto a su pureza y composición, si se trata de una mezcla.
· Extender las consecuencias a otras áreas de conocimiento.

Material y reactivos:
- Dos matraces y reflujos para cada uno.
- Bureta.
- Pie y pinza.
- Baño María
- Muestra puede ser grasa o ácido acetilsalicílico.
- Alcohol etílico de 95 º
- Hidróxido de potasio.
- Ácido clorhídrico 0,5 M.
- Fenolftaleína.

Fundamento teórico:
Se define como "índice de saponificación" de una grasa o de un éster en general, la cantidad de hidróxido de potasio, expresada en mg, que se precisa para saponificar un gramo de problema (Aceite).

La reacción en conjunto es, por tanto:

RCOOR' + KOH = RCOOK + R'OH,

En el caso de las grasas, se produce el "jabón " y glicerina.

Método operativo:
Se prepara potasa alcohólica 0,5 molar. Para ello se pesa la cantidad deseada de potasa y se disuelve en una mínima cantidad de agua, enrasándose con etanol hasta la cantidad precisa.

Se mide una cantidad de muestra, alrededor de 1,5 g de grasa. Se lleva la muestra a uno de los balones y se le agrega 20 ml de potasa alcohólica muy bien medida.

Se prepara de forma análoga el otro balón, pero sin muestra. Ambos balones se ponen a calentar a reflujo en un baño María durante unos 20 minutos. Al cabo de ellos se enfría y se añade al balón problema 2 ml de agua. Si la disolución se enturbia es señal de que todavía no ha completado la

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

saponificación (el éster es soluble en alcohol, pero no en agua). En este caso se añade 10 ml más de potasa y se vuelve poner al baño
20 minutos más.

Completada la saponificación se valora el contenido de ambos matraces con ácido clorhídrico que se habrá titulado previamente usando como indicador fenolftaleína.

Tomando como volumen gastado la diferencia entre ambas pruebas se obtiene el número de equivalentes de potasa saponificados.

8.4.2. Ácidos grasos libres. determinación

Objetivo y campo de aplicación:
Esta marcha analítica establece el procedimiento para la determinación de ácidos grasos libres en grasas y aceites. Esta norma se aplica a aceites vegetales crudos y refinados, aceites marinos y grasas animales.

Fundamento:
Los ácidos grasos libres causantes de la acidez en grasas y aceites se extraen con alcohol caliente y es determinada por titulación con una base valorada hasta el cambio de color del indicador.

Material y equipo:
- Balanza analítica, sensibilidad 0,000 1 g;
- Placa de calentamiento;
- Bureta de 25 cm3;
- Probeta de 100 cm3;
- Pipeta graduada de 5 cm3, y
- Matraces Erlenmeyer de 250 cm3.

Reactivos:
- Solución de alcohol etílico al 95 % en agua;

- Neutralizar la solución con hidróxido de sodio 0,1 N a rosa tenue, utilizando como indicador la solución de fenolftaleína.
- Solución de fenolftaleína al 1 % en alcohol etílico;
- Solución de hidróxido de sodio 0,1 N, y
- Agua destilada.

Procedimiento:
- Homogeneizar la muestra.
- Pesar en un matraz Erlenmeyer de 250 cm3 de 2 g a 5 g de muestra dependiendo de la concentración de ácidos grasos libres esperados.
- Adicionar 75 cm3 de alcohol caliente.
- Agitar hasta disolución de la muestra.
- Adicionar 2 cm3 de indicador.
- Titular con hidróxido de sodio 0,1 N con agitación vigorosa hasta la aparición y permanencia por aproximadamente 30 s de un color rosa tenue.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Expresión de resultados:

$$\%\ \text{ácidos grasos libres como oleico} = \frac{\text{cm3 de hidróxido de sodio X N X 28,2}}{\text{peso de la muestra}}$$

$$\%\ \text{ácidos grasos libres como láurico} = \frac{\text{cm3 de hidróxido de sodio X N X 20,0}}{\text{peso de la muestra}}$$

$$\%\ \text{ácidos grasos libres como palmítico} = \frac{\text{cm3 de hidróxido de sodio X N X 25,6}}{\text{peso de la muestra}}$$

8.4.3. Determinación del índice de yodo introducción

Se define como el peso de yodo absorbido por la muestra en las condiciones de trabajo que se especifican. El índice de yodo se expresa en gramos de yodo por 100 g de muestra.

Reactivos:
- Yoduro potásico, solución de 100 g/L, exento de yodatos o de yodo libre.
- Engrudo de almidón (Mezclar 5 g de almidón soluble con 30 ml de agua, añadir la mezcla a 1000 ml de agua en ebullición, hervir durante 3 minutos y dejar enfriar.)
- Solución volumétrica patrón de tiosulfato sódico. (0,1 mol/l de $Na2S2O3{\cdot}5H2O$, valorada como máximo 7 días antes de su uso).
- Disolvente, preparado mezclando volúmenes iguales de ciclohexano y ácido acético.
- Reactivo de Wijs, que contenga monocloruro de yodo en ácido acético. Se utilizará reactivo de Wijs comercializado (el reactivo contiene 9 g de ICl3 + 9 g de I2 en ácido acético)

Material:
- Frascos pequeños de vidrio, apropiados para la muestra problema y que puedan introducirse en los matraces.
- Matraces Erlenmeyer de 500 ml de capacidad con boca esmerilada, provistos de sus correspondientes tapones de vidrio y perfectamente secos.

Preparación de la muestra que deberá analizarse:
Secar la muestra homogeneizada con sulfato sódico y filtrarla.

Procedimiento:
El peso de la muestra varía en función del índice de yodo previsto, como se indica en el cuadro:

Índice de yodo previsto.	Peso de la muestra problema:
menos de 5	3,00 g
5 - 20	1,00 g
21 - 50	0,40 g
51 - 100	0,20 g
101 - 150	0,13 g
151 - 200	0,10 g

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

• Pesar la muestra problema con precisión de 0,1 mg en un frasco o capsula cápsula de pesadas de vidrio.
• Introducir la muestra problema en un matraz de 500 ml. Añadir 20 ml del disolvente para disolver la grasa. Agregar exactamente 25 ml del reactivo de Wijs, tapar el matraz, agitar el contenido y colocar el
matraz al abrigo de la luz. No deberá utilizarse la boca para pipetear el reactivo de Wijs.
• Preparar del mismo modo un ensayo en blanco con el disolvente y el reactivo, pero sin la muestra problema.
• Para las muestras con un índice de yodo inferior a 150, mantener los matraces en la oscuridad durante 1 hora; para las muestras con un índice de yodo superior a 150, así como en el caso de productos polimerizados o considerablemente oxidados, mantener en la oscuridad durante 2 horas.
• Una vez transcurrido el tiempo correspondiente, agregar a cada uno de los matraces 20 ml de solución de yoduro potásico y 150 ml de agua.
• Valorar con la disolución de tiosulfato sódico hasta que haya desaparecido casi totalmente el color amarillo producido por el yodo. Añadir unas gotas de engrudo de almidón y continuar la valoración hasta el momento preciso en que desaparezca el color azul después de una agitación muy intensa. (Se permite la determinación potenciométrica del punto final).
• Efectuar 2 determinaciones de la muestra problema.

Expresión de los resultados:
El índice de yodo se expresa del siguiente modo:

$$\frac{12{,}69\ c\ (V1 - V2)}{P}$$

siendo:
• c : valor numérico de la concentración exacta, expresada en moles por litro, de la solución volumétrica patrón de tiosulfato sódico utilizada
• V1 : valor numérico del volumen, expresado en mililitros, de la solución de tiosulfato sódico utilizada para el ensayo en blanco.
• V2 : valor numérico del volumen, expresado en mililitros, de la solución de tiosulfato sódico utilizada para la determinación.
• p : valor numérico del peso, expresado en gramos, de la muestra problema. Se tomará como resultado la media aritmética de las dos determinaciones, siempre que se cumpla el requisito establecido con respecto a la repetibilidad

8.4.4. Determinación del contenido de agua mediante el valorador columbimétrico Karl Fischer.

Para muestras con bajo contenido de humedad (aceites comestibles, aceites de freideras, grasas sólidas) Primero, secar la celda hasta que la constante de la misma sea inferior a 10 µg/min, entonces endulce la jeringuilla (sin su aguja) tres veces con el aceite muestra. Cárguela finalmente, tomado entre 0,5 a 1 gr de muestra para introducir la celda de titración y determine el contenido de agua. Las grasas sólidas hay que derretirlas previamente.

Utilice el método volumétrico para las muestras con alto contenido de agua. (mantequillas, margarinas). Los valores aproximados:

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Aceite de Oliva	= 260.0 +/- 1.5 ppm
Aceite cacahuete	= 253.7 +/- 1.1 ppm
Mantequilla	= 15.40 +/- 0.22 %
Margarina	= 18.87 +/- 0.13 %

8.4.5. Proceso de decantación y lavado de los productos obtenidos.

Método a seguir.
Una vez separado el BioDiesel procederemos a su lavado. Juntos estarán mezclados ácidos grasos libres, metanol y restos de glicerina.

Procederemos a realizar múltiples lavados o por etapas, como mínimo debemos asegurar que el volumen de agua de lavado en las etapas realizadas sea igual o algo superior al volumen de bioDiesel lavado. Para la tecnología por bache, el procedimiento recomendado es que se haga cada lavado y se deje reposar el BioDiesel una o dos horas para realizar el segundo lavado. Por ejemplo, si el volumen de Biodiesel a lavar es de 1000 l procederíamos de la siguiente forma:

Primer lavado:	250 l agua pura
Segundo lavado:	250 l Igual al primero
Tercer lavado:	250 l + 50 l Salmuera. Con agua con el 5 al 10 % de Salmuera
Cuarto lavado:	250 l agua pura.

Entre lavados se dejaría reposar de 1 a 2 horas el Biodiesel.

En la medida que se hagan más lavados con menos volumen de agua en cada uno, el resultado final es mejor, hay menor riesgo de emulsión. Se lavaría con Salmuera cada dos lavados. En caso de que se produzca una emulsión se lavaría con una Salmuera concentrada. La salmuera neutraliza la saponificación y con ello la formación de emulsión. Los jabones se mezclan con el BioDiesel dando una mala calidad.

La temperatura del BioDiesel deberá mantenerse a 60 ºC al efectuar los lavados.
Al volumen de agua resultante del primer y segundo lavado la cual arrastra los jabones de los ácidos grasos del BioDiesel en forma de mezclas, si la acidificamos, llevándola a PH 3 a 4 y la dejamos reposar de 2 a 3 días, se separaran los ácidos grasos los que pudieran se usados como combustibles de calentamiento. El agua entonces nos queda cristalina y podemos reusarla.

Finalmente pasamos a la neutralización del BioDiesel, (generalmente se utiliza el ácido fosfórico diluido), con el propósito de eliminar los residuos de lejía que pudieran haber quedado sin reaccionar durante el proceso de la transesterificación (recordemos que el catalizador es una combinación de alcohol metílico e hidróxido de sodio).

Los ésteres son lavados dos veces con agua acidificada. De esta manera podemos llevar el BioDiesel a la pureza requerida para combustible completando el proceso con una etapa de Destilación al Vacío. (>98%).

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

La glicerina obtenida es separada de los ésteres en pocos segundos, de ese modo es posible obtener BioDiesel de muy alta calidad, el cual cumple con todos los requerimientos de las normas estándar americanas. El glicerol posteriormente, para ser utilizado debe ser refinado.

8.4.6. Recuperación del metanol

Posteriormente en la unidad de destilación flash se despoja al producto de los volátiles, compuestos fundamentalmente por el alcohol metílico (Metanol) en exceso. Los vapores de metanol se condensan y se envían al tanque de almacenamiento, del cual será nuevamente introducido en el ciclo.

8.5. Normativas y métodos de análisis

La calidad final del biodiésel depende directamente del control analítico realizado durante las distintas etapas de producción. Por esta razón, las normas internacionales establecen límites estrictos para propiedades físicas, químicas y de contaminación que garantizan la compatibilidad del combustible con los motores diésel modernos.

Tabla 9. Métodos de análisis, parámetros de control y límites de calidad del biodiésel (B100)
Basada en EN 14214 e ASTM D6751

Análisis	Método de Referencia	Límites	Unidades
Calcio + Magnesio	EN 14538	≤ 5	mg/kg
Sodio + Potasio	EN 14538	≤ 5	mg/kg
Densidad a 15 °C	EN ISO 12185	860 - 900	kg/m³
Agua	EN ISO 12937	≤ 500	mg/kg
Viscosidad cinemática a 40 °C	EN ISO 3104	3,5 - 5,0	mm²/s
Punto de inflamación	EN ISO 3679	≥ 120	°C
Residuo carbonoso	EN ISO 10370	≤ 0,30	% masa
Cenizas sulfatadas	ISO 3987	≤ 0,02	% masa
Azufre	EN ISO 20846 / 20884	≤ 10	mg/kg
Corrosión lámina de cobre	EN ISO 2160	Clase 1	-
Índice de cetano	EN ISO 5165	≥ 51	-
Estabilidad oxidativa (110 °C)	EN 15751	≥ 8	horas
Contaminación total	EN 12662	≤ 24	mg/kg
Contenido de fósforo	EN 14107	≤ 4	mg/kg
Metanol residual	EN 14110	≤ 0,20	% masa
Glicerina libre	EN 14105 / EN 14106	≤ 0,020	% masa
Glicerina total	EN 14105	≤ 0,25	% masa
Monoglicéridos	EN 14105	≤ 0,70	% masa
Diglicéridos	EN 14105	≤ 0,20	% masa

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Triglicéridos	EN 14105	≤ 0,20	% masa
Ésteres metílicos (pureza FAME)	EN 14103	≥ 96,5	% masa
Número de acidez	EN 14104	≤ 0,50	mg KOH/g
Punto de enturbiamiento (Cloud Point)	ASTM D2500	Reportar	°C
CFPP (Punto límite de filtración en frío)	EN 116	Según clima local	°C
Destilación T90	ASTM D1160	≤ 360	°C

La Tabla 12 presenta los principales parámetros de control, los métodos analíticos utilizados y las especificaciones normalmente exigidas por las normas EN 14214 y ASTM D6751. Entre todos los parámetros analizados, el contenido de agua, la glicerina libre y total, el metanol residual, la estabilidad oxidativa y la pureza de ésteres constituyen los indicadores más importantes para verificar la correcta conversión de los triglicéridos y asegurar un desempeño satisfactorio del biodiésel durante su almacenamiento y utilización.

El cumplimiento de estas especificaciones permite garantizar que el combustible producido sea seguro para los sistemas modernos de inyección, reduzca la formación de depósitos y mantenga sus propiedades durante el transporte, almacenamiento y uso final.

8.6. Parámetros críticos para el control operativo de la planta

Desde la perspectiva del productor de biodiésel, los parámetros más importantes que deben controlarse rutinariamente durante la fabricación son:

Tabla 10. Parámetros críticos

Prioridad	Parámetro
Muy Alta	Humedad
Muy Alta	Ácidos grasos libres
Muy Alta	Metanol residual
Muy Alta	Glicerina libre
Muy Alta	Pureza de ésteres
Alta	Viscosidad
Alta	Estabilidad oxidativa
Alta	Contaminación total
Alta	Sodio y Potasio
Media	Índice de cetano
Media	Punto de inflamación
Media	Fósforo
Media	Corrosión cobre

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

9. Balance de Materia y Energía. Demanda Energética Acumulada

Comparación del insumo de energía fósil con la bioenergía producida en la cadena de producción. Efecto energético de la producción del BioDiesel en el medio ambiente. Materia Prima Grano de Soya.
Referencias consultadas:
Base de Datos ECOINVENT Data v2.0 (2007) y RENEWABLE RESOURCES • CASE STUDY Life cycle assessment of soybean- based biodiesel in Argentina for export. November 2008)

Con el propósito de evaluar de manera integral la sostenibilidad del biodiésel, se ha definido en este documento un escenario de referencia basado en la producción de biodiésel a partir de aceite de soya cultivado y procesado en América del Sur, posteriormente exportado y utilizado como combustible en Europa.

El análisis adopta el enfoque moderno de Evaluación del Ciclo de Vida (LCA, Life Cycle Assessment), considerando todas las etapas relevantes de la cadena de suministro, desde la producción agrícola de la materia prima hasta la utilización final del combustible. El objetivo es cuantificar tanto la energía fósil consumida como las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a cada etapa del proceso.

Las fases principales evaluadas son las siguientes:

Producción agrícola de la soya, incluyendo la preparación de los terrenos, siembra, fertilización, aplicación de agroquímicos, riego cuando corresponda, cosecha y transporte inicial de la biomasa.

Extracción y acondicionamiento del aceite vegetal, incorporando las operaciones de molienda, extracción del aceite, refinación y tratamiento previo de la materia prima.

Producción de biodiésel mediante transesterificación, considerando el consumo de metanol, catalizadores, electricidad, vapor, agua y demás insumos auxiliares requeridos por el proceso industrial.

Transporte, almacenamiento y distribución, incluyendo el transporte terrestre y marítimo desde Sudamérica hacia Europa, así como las operaciones de almacenamiento, mezcla y distribución hasta el usuario final.

A partir de este escenario se determinan dos indicadores fundamentales:

Demanda Energética Acumulada (DEA) o energía fósil requerida durante todo el ciclo de vida del biocombustible.
Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) generadas en cada etapa de la cadena productiva, expresadas generalmente como dióxido de carbono equivalente (CO_2e).

Estos resultados permiten calcular la denominada Relación de Energía Fósil (REF) o balance energético del biocombustible, que compara la energía renovable contenida en el biodiésel obtenido con la energía fósil consumida para producirlo.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Un valor favorable de esta relación indica que el sistema produce más energía renovable de la que consume en forma de energía fósil, condición indispensable para considerar al biodiésel como una alternativa energética sostenible. Del mismo modo, la cuantificación de las emisiones de GEI permite comparar el desempeño ambiental del biodiésel frente al diésel derivado del petróleo y determinar el potencial de reducción de emisiones alcanzado mediante su utilización.

El análisis que se presenta en los capítulos siguientes permitirá identificar cuáles son las etapas de mayor consumo energético y mayor impacto ambiental, así como valorar objetivamente la contribución del biodiésel de soya a la transición hacia sistemas energéticos con menores emisiones de carbono y una menor dependencia de los combustibles fósiles.

9.1. Fase Agrícola (siembra, cultivo y cosecha)

Tabla 10. Consumos energéticos en la Fase Agrícola del cultivo de Soya -
Base de cálculo: 1 kg de grano de soya producido

Datos e Insumos	Unidades	Valores medios	%
Datos			
Rendimiento agrícola	kg grano/ha	3.400	
Poder calorífico superior (PCS) del grano de soya	MJ/kg	20,4	
Energía fósil consumida			
Fertilizantes, correctivos y fitosanitarios	MJ/kg	0,42	35
Preparación del suelo y siembra	MJ/kg	0,14	12
Labores de cultivo y cosecha	MJ/kg	0,39	33
Transporte agrícola interno	MJ/kg	0,10	8
Transporte a planta de extracción	MJ/kg	0,15	12
Total energía fósil consumida	**MJ/kg**	**1,20**	**100**
Energía fósil consumida	kcal/kg	287	
Relación Energética Fósil (REF)	MJ/MJ	**17,0**	

La Tabla 7 muestra la distribución típica de los consumos energéticos fósiles asociados a la producción agrícola de soya utilizada como materia prima para la obtención de biodiésel. A pesar de la energía requerida para la fabricación de fertilizantes, la operación de la maquinaria agrícola, la cosecha y el transporte del grano, la energía contenida en la biomasa producida supera ampliamente la energía fósil consumida durante esta etapa. Este resultado confirma que la agricultura constituye el punto de partida para la captura de energía solar y carbono atmosférico que posteriormente serán transformados en biocombustibles renovables. Sin embargo, una evaluación completa de la sostenibilidad energética debe considerar todas las etapas posteriores de la cadena de producción y utilización del biodiésel.

9.2. Fase producción de Aceite Vegetal. (Incluye la extracción y refinación)

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Una vez cosechado y acondicionado el grano de soya, la siguiente etapa de la cadena productiva consiste en la extracción y refinación del aceite vegetal que posteriormente servirá como materia prima para la producción de biodiésel.

Los procesos industriales modernos de molienda y extracción utilizan principalmente prensado mecánico combinado con extracción por solvente (generalmente hexano), alcanzando recuperaciones superiores al 97 % del aceite contenido en el grano. Además del aceite, se obtiene como coproducto una importante cantidad de harina proteica destinada principalmente a la alimentación animal.

Considerando una composición típica actual del grano de soya, de 1 tonelada de soya procesada se obtienen aproximadamente:

Tabla 11. Consumos energéticos en la Fase de producción de BioDiesel
Base: 1 kg de aceite refinado de soya

Datos e Insumos	Unidades	Valor Medio	%
Datos			
Aceite refinado producido	kg	1,00	
Harina de soya coproducto	kg	4,0	
PCS del aceite de soya	MJ/kg	39,8	
PCS harina de soya	MJ/kg	18,5	
Consumos energéticos			
Energía incorporada fase agrícola	MJ/kg	6,40	58,4
Vapor y energía térmica extracción	MJ/kg	2,20	20,1
Electricidad molienda y extracción	MJ/kg	0,95	8,7
Recuperación de solventes (hexano)	MJ/kg	0,55	5,0
Refinación y desgomado	MJ/kg	0,42	3,8
Transporte interno y almacenamiento	MJ/kg	0,24	2,2
Tratamiento de efluentes y auxiliares	MJ/kg	0,20	1,8
Total	**MJ/kg**	**10,96**	**100**
Total	**kcal/kg**	**2.618**	
REF		**3,63**	

Interpretación de los resultados

El grano de soya debe ser sometido a procesos de molienda, extracción, desgomado y refinación para obtener el aceite que será utilizado posteriormente en la producción de biodiésel.

Actualmente, las plantas modernas de procesamiento de soya alcanzan recuperaciones de aceite superiores al 97 %, obteniendo simultáneamente importantes cantidades de harina proteica destinada

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

a la alimentación animal. Este coproducto tiene un elevado valor económico y energético, aspecto que debe considerarse en cualquier evaluación moderna del ciclo de vida.

Tomando como referencia un contenido medio de aceite del 19 %, se requieren aproximadamente 5,3 kg de soya para producir 1 kg de aceite refinado. Durante este proceso se consumen energía térmica, electricidad, solventes y diversos insumos auxiliares necesarios para la extracción y refinación del aceite.

Los resultados muestran que la principal contribución al consumo energético acumulado continúa procediendo de la fase agrícola, mientras que la extracción y refinación representan una fracción comparativamente menor gracias a las mejoras tecnológicas incorporadas por la industria durante las últimas décadas.

El análisis indica que para obtener un kilogramo de aceite refinado de soya se requiere una Demanda Energética Acumulada (DEA) cercana a 11 MJ/kg, mientras que el propio aceite contiene aproximadamente 39,8 MJ/kg de energía química útil.

En consecuencia, la Relación de Energía Fósil (REF) obtenida para esta etapa (incluyendo la agrícola) es aproximadamente 3,6, lo que significa que por cada unidad de energía fósil consumida se obtienen más de tres unidades de energía renovable contenidas en el aceite producido.

Este resultado confirma que la fase agrícola más la de extracción y refinación mantienen un balance energético favorable y constituyen un paso eficiente dentro de la cadena de producción del biodiésel de soya. Además, la valorización de la harina de soya como coproducto mejora aún más los indicadores energéticos y ambientales del sistema global.

9.3 Fase Transporte y Distribución, hasta la gasolinera

Una vez producido y acondicionado el biodiésel, este debe ser transportado desde la planta de producción hasta los centros de consumo. Aunque esta etapa representa una fracción relativamente pequeña de la demanda energética total del ciclo de vida, su contribución resulta relevante cuando las distancias son elevadas y existe transporte intercontinental.

Para el presente análisis se considera un escenario de exportación internacional en el cual el biodiésel producido a partir de aceite de soya en América del Sur es enviado hacia Europa para su comercialización y consumo. El sistema incluye las siguientes etapas:

- Transporte terrestre desde la planta de biodiésel hasta la terminal portuaria de exportación.
- Almacenamiento y manipulación en puerto de origen.
- Transporte marítimo transoceánico.
- Descarga, almacenamiento y recepción en puerto europeo.
- Transporte terrestre hasta los centros de distribución y mezcla.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

- Distribución final a terminales de combustible y estaciones de servicio.

Se considera una distancia marítima aproximada de 10 000 a 12 000 km, representativa de las rutas comerciales habituales entre Sudamérica y Europa.

En comparación con las fases agrícola, extracción de aceite y producción de biodiésel, el transporte presenta una intensidad energética menor debido a la elevada eficiencia del transporte marítimo moderno, especialmente cuando se realiza en grandes buques tanque.

No obstante, el transporte terrestre continúa siendo uno de los componentes más importantes dentro de esta etapa, debido a su mayor consumo energético por tonelada transportada.

Tabla 12. Consumos energéticos en la Fase de Transporte y Distribución
Base de Cálculo: 1 kg de metil ester de soya producido en la Planta de BioDiesel.

Base de cálculo: 1 kg de biodiésel (FAME) entregado para consumo

Datos e Insumos	Unidades	Valor Medio	%
Datos			
PCS del Biodiésel (FAME)	MJ/kg	40,8	
Energía consumida			
Energía incorporada fase agrícola	MJ/kg	1,20	20,2
Extracción y refinación del aceite	MJ/kg	1,90	32,1
Producción de biodiésel (transesterificación)	MJ/kg	1,55	26,2
Transporte terrestre país de origen	MJ/kg	0,42	7,1
Operaciones portuarias y almacenamiento	MJ/kg	0,10	1,7
Transporte marítimo transoceánico	MJ/kg	0,48	8,1
Distribución en país de destino	MJ/kg	0,23	3,9
Total	**MJ/kg**	**5,88**	**100**
Total	**kcal/kg**	**1.405**	
Relación Energética Fósil (REF)		**6,94**	

Interpretación de los resultados

Los resultados muestran que la etapa de transporte y distribución representa una contribución relativamente moderada dentro del balance energético global del biodiésel. Incluso cuando se considera una exportación transoceánica desde América del Sur hacia Europa, el consumo energético asociado al transporte marítimo continúa siendo bajo en comparación con la energía contenida en el combustible transportado.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Puede observarse que las mayores contribuciones energéticas continúan correspondiendo a las fases de producción agrícola, extracción y refinación del aceite y producción de biodiésel. Esto confirma que las oportunidades más importantes de mejora en la sostenibilidad del biocombustible se encuentran generalmente en la optimización de los procesos productivos y no en la reducción de las distancias de transporte.

Asimismo, la elevada eficiencia del transporte marítimo internacional explica por qué numerosos estudios modernos de evaluación del ciclo de vida concluyen que la exportación de biocombustibles a largas distancias tiene una influencia relativamente reducida en el balance energético total del producto.

En este escenario, la energía renovable contenida en el biodiésel (40,8 MJ/kg) supera ampliamente la demanda energética fósil acumulada asociada a su producción y distribución (5,9 MJ/kg), obteniéndose una Relación de Energía Fósil (REF) cercana a 7, indicativo de un balance energético favorable.

En los capítulos siguientes se integrarán todas las etapas analizadas para calcular los indicadores globales de sostenibilidad energética y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al ciclo completo de vida del biodiésel de soya.

9.4 Demanda de Energía Acumulada. (DEA)

Tabla 13. Evaluación energética y ambiental integrada del ciclo de vida del biodiésel de soya
Base de cálculo: 1 kg de biodiésel (FAME) entregado al consumidor

Etapa del proceso	DEA (MJ/kg Biodiésel)	Participación (%)	Emisiones GEI (kg CO_2e/kg Biodiésel)
Producción agrícola de la soya	1,20	20,4	0,12
Extracción y refinación del aceite	1,90	32,3	0,17
Producción de biodiésel (transesterificación)	1,55	26,3	0,13
Transporte y distribución	1,23	21,0	0,08
Total ciclo de vida	**5,88**	**100**	**0,50**

Tabla 14. Indicadores globales

Indicador	Valor
PCS Biodiésel (FAME)	40,8 MJ/kg
Demanda Energética Acumulada (DEA)	5,88 MJ/kg
Relación Energética Fósil (REF)	6,94
Energía fósil requerida por MJ de biodiésel	0,144 MJ/MJ
Emisiones totales del ciclo de vida	0,50 kg CO_2e/kg Biodiésel
Emisiones equivalentes por unidad de energía	12,3 g CO_2e/MJ

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Tabla 15. Comparación entre Diésel Fósil y Biodiésel de Soya

Parámetro	Biodiésel de Soya (B100)	Diésel Fósil
Poder calorífico (MJ/kg)	40,8	42,5
Recurso de origen	Renovable	No renovable
Participación en el ciclo biológico del carbono	Sí	No
Energía fósil requerida para producir 1 kg de combustible	5,88 MJ	45-50 MJ*
Relación de Energía Fósil (REF)	6,94	0,85-0,95
Emisiones ciclo de vida (kg CO_2e/kg combustible)	0,50	3,2
Intensidad de carbono (g CO_2e/MJ)	12,3	74-95
Contenido de azufre	Prácticamente nulo	Variable según especificación
Biodegradabilidad	Alta	Baja
Toxicidad ambiental por derrames	Baja	Moderada-Alta

* Incluye exploración, extracción, transporte, refinación, distribución y combustión del petróleo.

Interpretación de los resultados

Los resultados muestran que el biodiésel obtenido a partir de aceite de soya presenta un balance energético favorable a lo largo de todo su ciclo de vida. Para producir y entregar un kilogramo de biodiésel al consumidor final se requieren aproximadamente 5,9 MJ de energía fósil, mientras que el combustible contiene alrededor de 40,8 MJ de energía renovable útil, generando una Relación de Energía Fósil de 6,9.

Esta relación indica que, por cada unidad de energía fósil consumida durante la producción, transporte y distribución del biodiésel, se entregan casi siete unidades de energía renovable al usuario final.

Desde el punto de vista ambiental, las emisiones asociadas al ciclo de vida completo del biodiésel de soya resultan considerablemente inferiores a las del diésel fósil. El análisis indica una intensidad de carbono del orden de 12 g CO_2e/MJ, frente a valores típicos comprendidos entre 74 y 95 g CO_2e/MJ para el diésel derivado del petróleo. Esto representa reducciones potenciales de emisiones superiores al 80 %, dependiendo del origen de la materia prima, la tecnología utilizada y los criterios de asignación aplicados a los coproductos.

En consecuencia, el biodiésel de soya constituye una alternativa energética técnicamente viable para el sector transporte, con ventajas significativas en términos de sostenibilidad energética, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, biodegradabilidad y disminución de la dependencia de combustibles fósiles. Aunque su producción requiere energía y recursos, el análisis demuestra que el balance energético y ambiental global continúa siendo claramente favorable frente al diésel convencional.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

9.5 Medidas para mejorar la sostenibilidad y el balance de carbono del biodiésel

La evolución tecnológica experimentada por la industria de los biocombustibles durante las últimas décadas ha permitido identificar diversas estrategias orientadas a mejorar el balance energético, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y reforzar la sostenibilidad ambiental de la producción de biodiésel.

Los resultados obtenidos en los análisis de ciclo de vida muestran que aún existen importantes oportunidades de mejora a lo largo de toda la cadena de valor, desde la producción agrícola hasta la utilización final del combustible. Entre las medidas más relevantes destacan las siguientes:

Adaptación de los motores al uso de biocombustibles

A medida que los motores diésel y los sistemas de inyección evolucionan para admitir mayores porcentajes de biodiésel o incluso biodiésel puro (B100), aumenta la posibilidad de sustituir combustibles fósiles en todas las etapas de transporte y logística asociadas a la propia cadena productiva. Esta sustitución progresiva permite disminuir el consumo de energía fósil y mejorar la Relación de Energía Fósil (REF) del sistema.

Incremento de la productividad agrícola

La mejora genética de los cultivos, la agricultura de precisión, la optimización de la fertilización, el uso eficiente del agua y la mecanización moderna contribuyen a aumentar los rendimientos por hectárea. Como consecuencia, se reduce la cantidad de energía necesaria por unidad de biomasa producida y disminuye la intensidad energética de la fase agrícola, tradicionalmente una de las más importantes dentro del ciclo de vida del biodiésel.

Mejora de los rendimientos industriales

El perfeccionamiento de las tecnologías de extracción de aceites, refinación y transesterificación permite incrementar los rendimientos de conversión y reducir las pérdidas de materia prima. Cada punto porcentual de mejora en la recuperación de aceite o en la conversión a biodiésel se traduce en una reducción directa del consumo específico de energía y de las emisiones asociadas a la producción.

Incremento de la eficiencia energética de las plantas

Las instalaciones modernas incorporan sistemas de recuperación de calor, integración energética, optimización de procesos, cogeneración y automatización avanzada. Estas medidas permiten reducir significativamente el consumo de vapor, electricidad y combustibles auxiliares por unidad de biodiésel producido.

Asimismo, la valorización energética de subproductos como la glicerina, la biomasa residual o el biogás puede contribuir a sustituir parcialmente el consumo de combustibles fósiles dentro de la propia planta.

Selección de materias primas más eficientes

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

La elección de cultivos con mayores rendimientos de aceite por hectárea reduce la superficie agrícola necesaria y disminuye los requerimientos energéticos asociados al transporte y procesamiento de materias primas.

Además de los cultivos tradicionales, existe un creciente interés por especies como Camelina, Carinata, Pongamia y otras oleaginosas adaptadas a condiciones de menor disponibilidad de agua y nutrientes, así como por el aprovechamiento de residuos y subproductos industriales.

Incorporación de materias primas residuales y economía circular

Una de las tendencias más favorables desde el punto de vista energético y ambiental es la utilización de:

- Aceites de cocina usados.
- Grasas animales.
- Subproductos de la industria alimentaria.
- Residuos agroindustriales.
- Corrientes residuales con contenido graso.

Estas materias primas ya han cumplido previamente su función principal dentro de la economía y requieren una menor carga energética agrícola. Como resultado, suelen presentar balances energéticos y reducciones de emisiones significativamente mejores que los obtenidos mediante cultivos específicamente destinados a biocombustibles.

Desarrollo de biocombustibles avanzados

Las nuevas tecnologías orientadas a la producción de combustibles renovables a partir de biomasa lignocelulósica, residuos forestales, algas, residuos urbanos y otras fuentes no alimentarias permiten ampliar la oferta de materias primas sin aumentar la presión sobre las tierras destinadas a la producción de alimentos.

Estas alternativas constituyen una de las principales líneas de desarrollo para mejorar la sostenibilidad futura del sector.

La sostenibilidad del biodiésel no depende exclusivamente de la materia prima utilizada, sino de la optimización integral de toda la cadena de valor. Los avances en agricultura, logística, eficiencia energética, recuperación de subproductos y aprovechamiento de residuos permiten mejorar progresivamente el balance energético y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En consecuencia, la tendencia actual apunta hacia sistemas de producción cada vez más eficientes, basados en principios de economía circular y orientados a maximizar la energía renovable obtenida por cada unidad de energía fósil consumida.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

10. Características del equipamiento, seguridad industrial y gestión ambiental

La producción moderna de biodiésel ha evolucionado significativamente desde las primeras plantas construidas durante las décadas de 1990 y 2000. Actualmente, las instalaciones industriales se diseñan no sólo para maximizar la producción y la rentabilidad, sino también para minimizar el consumo de recursos, reducir las emisiones ambientales, mejorar la seguridad operacional y cumplir estrictas normativas ambientales y de calidad.

Como principio general, toda planta de biodiésel debe concebirse bajo criterios de eficiencia energética, economía circular, seguridad de procesos y sostenibilidad ambiental, integrando tecnologías que permitan aprovechar al máximo las materias primas y reducir la generación de residuos.

10.1 Principios generales de diseño

Las tecnologías modernas de producción de biodiésel deben cumplir los siguientes objetivos fundamentales:

Minimizar la generación de residuos

La planta debe diseñarse para maximizar la conversión de aceites y grasas en biodiésel y minimizar la formación de corrientes residuales.

Los subproductos generados deben ser susceptibles de valorización económica o energética, reduciendo la necesidad de tratamientos finales o disposición controlada.

Utilizar materias primas seguras y sostenibles

Aunque la producción de biodiésel requiere sustancias químicas como metanol, hidróxidos alcalinos y ácidos minerales, las instalaciones deben estar diseñadas para garantizar una manipulación segura mediante sistemas cerrados, detección de fugas, ventilación adecuada y procedimientos operativos estandarizados.

Asimismo, debe priorizarse el uso de materias primas renovables, residuos valorizables y productos de menor impacto ambiental.

Maximizar la recuperación de materiales

Las plantas modernas incorporan sistemas para recuperar y reutilizar:

- Metanol no reaccionado.
- Calor residual.
- Corrientes de proceso.
- Glicerina.
- Aguas tratadas.
- Catalizadores cuando resulte técnicamente viable.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Este enfoque reduce el consumo de recursos vírgenes y mejora el balance energético global.

Optimizar el uso de materias primas

La tecnología seleccionada debe garantizar elevados rendimientos de conversión.

Actualmente es posible alcanzar conversiones de triglicéridos superiores al 98 %, reduciendo significativamente las pérdidas de aceite y aumentando la rentabilidad del proceso.

Optimizar el consumo energético

El diseño moderno incorpora:

- Recuperación de calor.
- Intercambiadores de alta eficiencia.
- Variadores de velocidad.
- Automatización de procesos.
- Integración térmica.
- Cogeneración cuando resulte factible.

Estas medidas permiten reducir significativamente el consumo energético específico por tonelada de biodiésel producida.

Minimizar riesgos operacionales

Toda instalación debe contar con:

- Sistemas de contención secundaria.
- Protección contra incendios.
- Monitoreo de gases inflamables.
- Equipos de protección personal.
- Procedimientos de emergencia.
- Sistemas instrumentados de seguridad.

El almacenamiento y manipulación de metanol requieren especial atención debido a su inflamabilidad y toxicidad.

10.2 Equipos principales del proceso

Una planta industrial típica de biodiésel incorpora los siguientes equipos principales:

- Recepción y almacenamiento de materias primas
- Tanques de aceite.
- Tanques de metanol.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

- Sistemas de filtración.
- Sistemas de calentamiento.
- Equipos de bombeo y transferencia.
- Preparación de reactivos
- Tanques de preparación de metóxido.
- Agitadores mecánicos.
- Sistemas de dosificación.
- Equipos de medición y control.
- Transesterificación
- Reactores agitados.
- Intercambiadores de calor.
- Sistemas de control de temperatura.
- Instrumentación de presión y caudal.
- Separación y purificación
- Decantadores.
- Centrífugas.
- Columnas de recuperación de metanol.
- Equipos de lavado y secado.
- Tratamiento de subproductos
- Sistemas de purificación de glicerina.
- Unidades de tratamiento de aguas.
- Equipos de recuperación de alcohol.
- Sistemas de almacenamiento de subproductos.

10.3 Emisiones atmosféricas

Comparada con otras industrias químicas o petroquímicas, la producción de biodiésel presenta emisiones relativamente reducidas.

Las principales fuentes de emisiones atmosféricas son:

- Sistemas de combustión
- Calderas de vapor.
- Generadores térmicos.
- Quemadores de aceite térmico.

Las emisiones asociadas están compuestas principalmente por:

- CO_2.
- NO_x.
- CO.
- Material particulado (según combustible utilizado).
- Emisiones fugitivas

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

La principal sustancia de interés es el metanol debido a su volatilidad.

Las instalaciones modernas emplean:

- Tanques cerrados.
- Sistemas de recuperación de vapores.
- Condensadores.
- Antorchas de seguridad cuando resulte necesario.

Las emisiones del biodiésel, la glicerina y los aceites son normalmente muy reducidas debido a su baja volatilidad.

10.4 Efluentes líquidos

Las corrientes líquidas generadas por una planta de biodiésel pueden incluir:

- Aguas pluviales
- Aguas pluviales limpias.
- Aguas pluviales potencialmente contaminadas.
- Aguas sanitarias

Procedentes de servicios auxiliares y áreas administrativas.

Aguas de proceso

Originadas en:

- Lavado del biodiésel.
- Limpieza de equipos.
- Operaciones de mantenimiento.
- Purificación de glicerina.
- Aguas contaminadas con aceites

Procedentes de:

- Derrames controlados.
- Separadores de hidrocarburos.
- Operaciones de carga y descarga.

Las plantas modernas incorporan sistemas de tratamiento físico-químico y biológico que permiten cumplir las normativas ambientales antes de la descarga o reutilización interna.

10.5 Residuos sólidos

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Los residuos sólidos generados suelen ser relativamente limitados y están asociados principalmente a actividades de mantenimiento y tratamiento de corrientes residuales.

Entre ellos se encuentran:

- Cartuchos filtrantes agotados.
- Filtros de metanol.
- Lodos de tratamiento de aguas.
- Carbón activo agotado.
- Tierras filtrantes usadas.
- Residuos de limpieza industrial.
- Material absorbente utilizado en contención de derrames.
- Residuos procedentes de la purificación de glicerina.

En una instalación correctamente diseñada, buena parte de estos materiales pueden ser valorizados, reciclados o gestionados mediante operadores especializados.

10.6 Tendencias actuales

Las nuevas plantas de biodiésel y diésel renovable incorporan cada vez más tecnologías orientadas a:

- Reducir el consumo de agua.
- Eliminar etapas de lavado húmedo.
- Recuperar más del 99 % del metanol.
- Valorizar la glicerina y otros coproductos.
- Reducir la huella de carbono.
- Integrar energías renovables en la operación de la planta.
- Utilizar materias primas residuales como aceites usados y grasas animales.

La tendencia global apunta hacia instalaciones altamente automatizadas, eficientes energéticamente y alineadas con los principios de sostenibilidad y economía circular, reforzando el papel del biodiésel como una alternativa renovable dentro de la transición energética mundial.

10.7. Comportamiento de los parámetros de control e interpretación de resultados

La determinación analítica de los parámetros de calidad del biodiésel no constituye únicamente una exigencia normativa. Cada propiedad medida está directamente relacionada con el comportamiento del combustible durante su almacenamiento, manipulación, transporte, distribución y combustión en motores diésel, calderas, hornos y otros equipos consumidores de energía.

Las desviaciones respecto a los límites establecidos por las normas internacionales ASTM D6751 y EN 14214 pueden provocar problemas operativos, reducción de la eficiencia energética, aumento de emisiones contaminantes, formación de depósitos, corrosión, dificultades de almacenamiento e incluso daños prematuros en los sistemas de inyección modernos.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Por esta razón, la interpretación de los resultados analíticos constituye una herramienta fundamental para diagnosticar posibles problemas de producción, almacenamiento o contaminación del biodiésel.

Tabla 16. Interpretación de los resultados analíticos y efectos operacionales del biodiésel

Parámetro	Valor Bajo	Valor Alto
Calcio + Magnesio	Sin efectos significativos.	Formación de depósitos inorgánicos, incrustaciones, cenizas y obstrucción de inyectores y filtros.
Sodio + Potasio	Operación normal.	Indica contaminación por catalizador residual, formación de cenizas, depósitos y aumento de desgaste en sistemas de inyección.
Punto de inflamación	Presencia de metanol residual. Incrementa riesgos de seguridad durante almacenamiento y transporte.	Sin impacto significativo, aunque puede indicar excesiva purificación o variaciones de composición.
Densidad	Posible presencia de alcohol residual o combustibles ligeros.	Conversión incompleta o contaminación con aceites, glicerina o impurezas pesadas.
Agua	Valor adecuado.	Crecimiento microbiológico, corrosión, formación de ácidos, hidrólisis de ésteres y obstrucción de filtros.
Viscosidad cinemática	Posible presencia de alcohol o combustibles ligeros. Menor lubricidad.	Mala atomización, combustión deficiente, mayores depósitos y dificultades de bombeo.
Residuo carbonoso	Combustión limpia.	Formación de coque, depósitos en inyectores, cámaras de combustión y sistemas térmicos.
Cenizas sulfatadas	Operación normal.	Presencia de catalizadores, metales o contaminantes inorgánicos que generan depósitos sólidos.
Azufre	Menores emisiones contaminantes.	Incremento de emisiones de SO_2 y corrosión asociada.
Corrosión de lámina de cobre	Combustible no corrosivo.	Presencia de compuestos corrosivos u oxidación avanzada del combustible.
Índice de cetano	Arranque difícil, retraso de ignición, incremento de ruido y emisiones.	Mejor combustión, arranque más suave y menor retraso de ignición.
Cloud Point (Punto de enturbiamiento)	Mejor comportamiento en climas fríos.	Aparición temprana de cristales y riesgo de taponamiento de filtros.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

CFPP	Mejor operabilidad en bajas temperaturas.	Problemas de bombeo y filtración en clima frío.
Número de acidez	Operación normal.	Oxidación del combustible, formación de ácidos, corrosión y degradación durante almacenamiento.
Índice de yodo	Mayor estabilidad oxidativa.	Mayor susceptibilidad a oxidación, envejecimiento y formación de gomas.
Estabilidad oxidativa	El combustible envejece prematuramente.	Mayor vida útil durante almacenamiento y transporte.
Metanol residual	Correcta purificación.	Disminución del punto de inflamación, riesgos operativos y posible ataque a elastómeros.
Glicerina libre	Adecuada separación de fases.	Problemas de combustión, obstrucción de filtros y formación de depósitos.
Glicerina total	Conversión completa.	Reacción incompleta o mala separación de productos.
Monoglicéridos	Conversión adecuada.	Conversión incompleta de triglicéridos.
Diglicéridos	Conversión adecuada.	Indican avance parcial de la reacción.
Triglicéridos	Conversión adecuada.	Presencia de aceite sin reaccionar y bajo rendimiento de transesterificación.
Contenido total de ésteres (FAME)	Conversión insuficiente.	Indica correcta calidad y pureza del biodiésel.
Contenido de fósforo	Operación normal.	Presencia de fosfolípidos, gomas o deficiencias en el desgomado; posible daño a catalizadores de emisiones.
Cont	Combustible limpio.	Presencia de sólidos, jabones, óxidos, productos de degradación e impurezas diversas.

Interpretación general de los resultados

Desde el punto de vista operativo, los parámetros más críticos para evaluar la calidad del biodiésel son:

- Seguridad
- Punto de inflamación.
- Metanol residual.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

- Agua.
- Contaminación total.

Estos parámetros determinan las condiciones de almacenamiento, transporte y manipulación segura del combustible.

- Calidad de la reacción de transesterificación
- Glicerina libre.
- Glicerina total.
- Monoglicéridos.
- Diglicéridos.
- Triglicéridos.
- Contenido total de ésteres.

Su evaluación permite verificar la eficiencia del reactor y la correcta conversión del aceite en biodiésel.

- Estabilidad durante almacenamiento
- Índice de yodo.
- Número de acidez.
- Estabilidad oxidativa.
- Agua.

Estos parámetros permiten estimar la vida útil del combustible durante períodos prolongados de almacenamiento.

- Comportamiento en motores y equipos térmicos
- Viscosidad.
- Índice de cetano.
- Densidad.
- Contaminación total.
- Cenizas sulfatadas.
- Metales alcalinos y alcalinotérreos.

Su control es especialmente importante en motores diésel modernos equipados con sistemas de inyección de alta presión, filtros de partículas (DPF), catalizadores de oxidación y sistemas SCR para reducción de emisiones.

- Comportamiento en clima frío
- Cloud Point.
- CFPP.

Estos parámetros adquieren especial relevancia en regiones templadas o frías, donde la cristalización del combustible puede ocasionar problemas de bombeo, filtración y suministro.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

La calidad del biodiésel no depende de un único parámetro, sino del cumplimiento simultáneo de todas las especificaciones establecidas por las normas internacionales. El análisis conjunto de los resultados permite identificar problemas de producción, contaminación, degradación o almacenamiento, garantizando que el combustible mantenga un comportamiento seguro, eficiente y compatible con los modernos sistemas de combustión e infraestructura de distribución.

10.8 Efectos de las desviaciones de los parámetros de calidad sobre la producción, distribución y utilización del biodiésel

Los parámetros especificados en la Tabla 13 no son simples requisitos normativos. Cada uno está asociado a fenómenos físicos, químicos o mecánicos que pueden afectar la producción, el almacenamiento, el transporte, la distribución o la utilización final del biodiésel. Por esta razón, la interpretación correcta de cada resultado analítico constituye una herramienta fundamental para el diagnóstico de problemas operacionales.

Calcio + Magnesio
Valores elevados

Generalmente indican contaminación por aguas duras, arrastre de catalizadores o deficiencias en los procesos de lavado y purificación.

Efectos:

Formación de cenizas durante la combustión.
Depósitos sólidos en inyectores.
Obstrucción de filtros.
Acumulación de residuos en válvulas y cámaras de combustión.
Incremento del desgaste de sistemas de postratamiento de gases.

Sodio + Potasio
Valores elevados

Normalmente son consecuencia del arrastre de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio empleado como catalizador.

Efectos:

Formación de cenizas incombustibles.
Incrustaciones en inyectores.
Daños en filtros de partículas (DPF).
Envenenamiento de catalizadores de emisiones.
Reducción de la vida útil de motores modernos.

Además, constituye uno de los indicadores más sensibles de una purificación deficiente del biodiésel.

Punto de inflamación
Valores bajos

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Casi siempre indican presencia excesiva de metanol residual.

Efectos:

Incremento del riesgo de incendio y explosión.
Problemas durante almacenamiento y transporte.
Incumplimiento de normas de seguridad industrial.
Mayor evaporación durante el manejo del producto.

Valores altos

No generan problemas operativos y suelen indicar una adecuada eliminación del metanol.

Densidad
Valores bajos

Pueden indicar:

Alcohol residual.
Contaminación con combustibles ligeros.

Efectos:

Alteración de la dosificación volumétrica del combustible.
Variaciones en la potencia desarrollada por el motor.

Valores altos

Indican frecuentemente:

Presencia de aceite no reaccionado.
Glicerina residual.
Conversión incompleta.

Efectos:

Mayor formación de depósitos.
Problemas de combustión.
Dificultades de arranque.

Agua

Es uno de los contaminantes más críticos.

Valores elevados

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Efectos durante almacenamiento

Proliferación microbiológica.
Formación de lodos.
Corrosión de tanques.

Efectos durante transporte

Separación de fases.
Sedimentación.

Efectos durante utilización

Corrosión de bombas e inyectores.
Formación de ácidos grasos libres.
Obstrucción de filtros.

Viscosidad cinemática
Viscosidad elevada

Indica:

Aceites sin reaccionar.
Conversión incompleta.
Contaminación.

Efectos:

Mala atomización.
Combustión incompleta.
Mayor emisión de partículas.
Formación de coque y depósitos.
Viscosidad baja

Puede indicar:

Exceso de alcohol.
Mezclas inadecuadas.

Efectos:

Menor lubricidad.
Incremento del desgaste de bombas e inyectores.

Residuo carbonoso
Valores elevados

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Representan tendencia a la formación de carbón durante la combustión.

Efectos:

Ensuciamiento de inyectores.
Formación de depósitos en pistones.
Incremento de emisiones.
Menor eficiencia térmica en hornos y calderas.

Cenizas sulfatadas
Valores elevados

Indican presencia de contaminantes inorgánicos.

Efectos:

Formación de residuos sólidos.
Obstrucción de inyectores.
Acumulación de cenizas en equipos térmicos.
Daños en sistemas SCR y DPF.

Azufre
Valores elevados

Efectos:

Aumento de emisiones de SO_2.
Formación de lluvia ácida.
Corrosión de equipos.
Incremento de partículas de sulfatos.

Precisamente una de las grandes ventajas del biodiésel es su contenido extremadamente bajo de azufre.

Corrosión en lámina de cobre
Valores elevados

Indican presencia de compuestos corrosivos.

Efectos:

Ataque a componentes metálicos.
Deterioro de tanques.
Degradación de sistemas de combustible.

Índice de cetano
Índice bajo

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Efectos:

Arranque difícil.
Retraso de ignición.
Combustión ruidosa.
Mayor emisión de hidrocarburos y CO.

Índice alto

Efectos:

Encendido más rápido.
Mejor combustión.
Menores emisiones.
Mayor suavidad de funcionamiento.

Cloud Point y CFPP

Son esenciales para climas fríos.

Valores altos

Efectos:

Formación de cristales.
Taponamiento de filtros.
Pérdida de bombeabilidad.
Problemas de suministro al motor.

Número de acidez
Valores elevados

Indican oxidación o degradación del combustible.

Efectos:

Corrosión.
Ataque a juntas y elastómeros.
Formación de depósitos.
Menor vida útil del biodiésel.

Índice de yodo
Valores elevados

Indican mayor contenido de enlaces dobles.

Ventaja:

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Mejor comportamiento a bajas temperaturas.

Desventaja:

Menor estabilidad oxidativa.
Mayor tendencia al envejecimiento.
Formación de gomas durante almacenamiento.

Estabilidad oxidativa
Valores bajos

Efectos:

Envejecimiento prematuro.
Formación de lodos.
Incremento del número de acidez.
Obstrucción de filtros.

Es uno de los parámetros más importantes para el almacenamiento prolongado.

Metanol residual
Valores elevados

Efectos:

Disminución del punto de inflamación.
Riesgos de seguridad.
Ataque a elastómeros.
Problemas de almacenamiento y transporte.

Glicerina libre
Valores elevados

Efectos:

Obstrucción de filtros.
Formación de depósitos.
Sedimentación durante almacenamiento.
Problemas de combustión.

Además indica separación deficiente de fases.

Glicerina total
Valores elevados

Indican:

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Conversión incompleta.
Presencia de mono, di o triglicéridos residuales.

Efectos:

Depósitos.
Mayor viscosidad.
Problemas de almacenamiento.

Monoglicéridos, Diglicéridos y Triglicéridos
Valores elevados

Revelan problemas en la transesterificación.

Efectos:

Conversión incompleta.
Menor pureza del biodiésel.
Formación de depósitos.
Tendencia a cristalización.
Incremento de la viscosidad.

Particularmente los triglicéridos indican la presencia de aceite sin reaccionar.

Contenido de ésteres (FAME)
Valores bajos

Significan que parte del aceite no ha sido transformado correctamente.

Efectos:

Menor calidad del biodiésel.
Pérdida de rendimiento energético.
Problemas operativos en motores.

Fósforo
Valores elevados

Proceden generalmente de fosfolípidos y gomas mal eliminadas.

Efectos:

Formación de depósitos.
Obstrucción de inyectores.
Daños en catalizadores de emisiones.
Problemas en sistemas SCR.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Contaminación total
Valores elevados

Indican presencia de:

Jabones.
Lodos.
Óxidos.
Partículas sólidas.
Productos de oxidación.

Efectos:

Obstrucción de filtros.
Desgaste prematuro.
Daños a bombas e inyectores.
Pérdida de confiabilidad operacional.

Conclusión

En términos prácticos, los parámetros que generan más problemas económicos y operativos en una planta de biodiésel y en su utilización final son:

- Agua
- Metanol residual
- Glicerina libre y total
- Sodio y potasio
- Estabilidad oxidativa
- Contaminación total
- Monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos

Estos parámetros son los primeros que se investigan cuando aparecen problemas de calidad, almacenamiento, distribución o fallas en motores, calderas y hornos alimentados con biodiésel.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

11. Conclusiones

El análisis realizado a lo largo de este trabajo permite comprender la evolución tecnológica, económica y ambiental del biodiésel, así como su papel actual dentro de la transición energética mundial. A partir de los antecedentes históricos, el estudio de las materias primas, los procesos industriales, los balances energéticos y los requisitos de calidad, pueden establecerse las siguientes conclusiones generales:

11.1. El biodiésel se ha consolidado como una alternativa técnicamente viable al diésel fósil

Después de más de tres décadas de desarrollo industrial, el biodiésel ha demostrado ser un combustible renovable capaz de sustituir parcial o totalmente al diésel derivado del petróleo en numerosas aplicaciones de transporte, generación eléctrica, equipos agrícolas y procesos industriales. La experiencia acumulada ha permitido desarrollar normas internacionales, tecnologías de producción eficientes y sistemas de control de calidad que garantizan su utilización segura en motores modernos.

11.2. La disponibilidad sostenible de materias primas continúa siendo el principal factor limitante

El crecimiento de la industria está condicionado por la disponibilidad de aceites y grasas aptos para la producción de biocombustibles. Aunque los aceites de soya, canola, palma y girasol siguen siendo las materias primas predominantes, la tendencia mundial apunta hacia una mayor utilización de aceites usados, grasas animales, residuos agroindustriales y materias primas de segunda generación para minimizar la competencia con la producción de alimentos.

11.3. La calidad de la materia prima determina el rendimiento y el costo del proceso

Los contenidos de humedad, ácidos grasos libres, gomas, ceras y contaminantes influyen directamente sobre la eficiencia de la transesterificación y sobre la calidad final del biodiésel. Una adecuada preparación y acondicionamiento de los aceites permite reducir el consumo de reactivos, mejorar las conversiones y disminuir los costos operativos.

11.4. La transesterificación alcalina continúa siendo la tecnología dominante

A pesar de los avances en nuevas tecnologías de producción, la transesterificación catalizada con álcalis mantiene su posición como la ruta industrial más utilizada debido a sus altos rendimientos, tiempos cortos de reacción, simplicidad operativa y menores costos de inversión y operación.

11.5. El control de calidad constituye un elemento esencial del proceso productivo

La calidad del biodiésel no depende únicamente de su producción, sino también de su almacenamiento, transporte y utilización. Parámetros como el contenido de agua, la estabilidad oxidativa, el contenido de metanol, la glicerina libre y total, los metales alcalinos y la contaminación total tienen una influencia decisiva sobre el comportamiento del combustible y sobre la confiabilidad de los motores y equipos consumidores.

11.6. El uso directo de aceites vegetales presenta limitaciones importantes

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Aunque técnicamente es posible utilizar aceites vegetales como combustible en determinadas condiciones, la experiencia industrial demuestra que la conversión de estos aceites en biodiésel mediante transesterificación ofrece ventajas significativas en términos de viscosidad, estabilidad, desempeño en motores modernos y compatibilidad con la infraestructura existente de distribución y consumo de combustibles.

11.**7. El biodiésel presenta un balance energético favorable**

Los resultados obtenidos durante el análisis de la Demanda Energética Acumulada (DEA) muestran que la energía renovable contenida en el biodiésel obtenido supera ampliamente la energía fósil necesaria para producirlo. En el escenario analizado para biodiésel de soya, la Relación de Energía Fósil (REF) se sitúa alrededor de 7, lo que indica que por cada unidad de energía fósil consumida se generan aproximadamente siete unidades de energía renovable disponibles para el consumidor final.

11.**8. El biodiésel contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero**

El análisis del ciclo de vida demuestra que las emisiones asociadas a la producción y utilización de biodiésel son significativamente inferiores a las del diésel fósil. Dependiendo de la materia prima empleada, de la localización geográfica y de la tecnología utilizada, las reducciones de emisiones pueden superar el 80 %, contribuyendo a los objetivos globales de descarbonización del transporte.

11.**9. La sostenibilidad futura dependerá cada vez más de la economía circular**

Las tendencias actuales muestran un crecimiento sostenido del uso de aceites de cocina usados, grasas animales, residuos industriales y otras materias primas no alimentarias. Estos recursos permiten mejorar el balance energético y ambiental del biodiésel al aprovechar materiales previamente descartados, reduciendo simultáneamente los costos de producción.

11.**10. Las mejoras tecnológicas continúan ampliando el potencial de los biocombustibles**

La incorporación de agricultura de precisión, nuevos cultivos energéticos, optimización de los procesos industriales, recuperación de energía, digitalización, automatización y valorización de subproductos permite mejorar continuamente la eficiencia técnica y económica de la cadena de producción del biodiésel.

11.**11. El biodiésel forma parte de una estrategia energética más amplia**

El biodiésel no debe considerarse como una solución única a los retos energéticos y ambientales actuales. Su principal fortaleza radica en complementar otras alternativas renovables como la electrificación, los combustibles renovables avanzados (HVO), el biometano, el hidrógeno renovable y otras tecnologías bajas en carbono. Su importancia resulta especialmente relevante en sectores donde la sustitución inmediata de los combustibles líquidos continúa siendo difícil, como el transporte pesado, la maquinaria agrícola, la minería, la navegación y determinadas aplicaciones industriales.

La evidencia técnica, energética y ambiental analizada en este trabajo demuestra que el biodiésel constituye una alternativa renovable madura, eficiente y ambientalmente favorable frente al diésel

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

fósil. Aunque persisten desafíos relacionados con la disponibilidad sostenible de materias primas y la optimización continua de la cadena productiva, los avances tecnológicos alcanzados durante las últimas décadas confirman que el biodiésel seguirá desempeñando un papel relevante dentro del proceso global de transición hacia sistemas energéticos más sostenibles, diversificados y con menores emisiones de carbono.



Sobre el Autor: René Francisco Ruano Domínguez realizo trabajos de ingeniería y reparaciones en sistemas y equipos energéticos por más de 40 años, tanto en los sistemas que utilizan energía fósil como fuentes renovables. Se inició como Operador de Planta, posteriormente Tecnólogo y más tarde, Gerente Técnico en Plantas de Conversión y Refinación de Fuel Oil y Nafta. Fue Fundador y Gerente Técnico de Organizaciones de Ingeniería Energética, dirigidos al Proyecto, al Montaje y a los Servicios Técnicos en los Sistemas de Calor y Frío, abarcando la generación, distribución, uso y control del vapor y el agua caliente. En los Sistemas de Frío, en equipos de bajas temperaturas (refrigeración y producción de hielo), medianas temperaturas (conservación) y altas temperaturas (Aire Acondicionado), tanto en industrias como en comercios. Desde hace 20 años, se dedica a la programación de Calculadores, Instructivos y Artículos Técnicos, con el fin de expresar experiencias simplificando la información de alto valor agregado, programando materiales online que transmiten y miden la eficiencia y los niveles de contaminación por el uso de la energía, en equipos y sistemas energéticos. Sus trabajos están disponibles online de forma gratuita. Aspira que todos los interesados puedan acceder, informarse y actuar para bien de nuestro Planeta y de sus economías.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

12. Referencias técnicas, normas y fuentes de consulta

La elaboración y actualización de este trabajo se ha sustentado en la experiencia acumulada de la industria mundial de los biocombustibles, así como en documentación técnica, normas internacionales, manuales de ingeniería química, publicaciones científicas y organismos especializados reconocidos internacionalmente.

Las principales referencias empleadas o recomendadas para la profundización en los temas tratados son las siguientes:

12.1 Normas y especificaciones internacionales
Biodiésel

EN 14214. Automotive fuels - Fatty Acid Methyl Esters (FAME) for diesel engines - Requirements and test methods. Comité Europeo de Normalización (CEN).

ASTM D6751. Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels. ASTM International.

EN 590. Automotive Fuels - Diesel Fuel - Requirements and Test Methods. CEN.

ASTM D7467. Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blend (B6 to B20). ASTM International.

12.2 Normas analíticas utilizadas

EN 14103 – Determinación del contenido de ésteres.
EN 14104 – Determinación del número de acidez.
EN 14105 – Determinación de glicerina libre, total y glicéridos.
EN 14110 – Determinación de metanol residual.
EN 14111 – Determinación del índice de yodo.
EN 14112 – Determinación de estabilidad oxidativa.
EN 14538 – Determinación de sodio, potasio, calcio y magnesio.
EN 12662 – Contaminación total.
EN ISO 12185 – Densidad.
EN ISO 3104 – Viscosidad cinemática.
EN ISO 20846 y EN ISO 20884 – Determinación de azufre.

12.3 Publicaciones técnicas sobre biodiésel

The Biodiesel Handbook. Gerhard Knothe, Jon Van Gerpen, Jürgen Krahl. AOCS Press.

Biodiesel Production Technologies. United States Department of Energy (DOE).

Biodiesel Handling and Use Guide. National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Biodiesel Technology and Applications. James G. Speight.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

Industrial Vegetable Oils and Their Utilization. Erhan, Biresaw & Sharma.

12.4 Manuales y textos de ingeniería química

Perry's Chemical Engineers' Handbook.
Chemical Process Industries, Shreve & Brink.
Transport Processes and Separation Process Principles, Geankoplis.
Unit Operations of Chemical Engineering, McCabe, Smith & Harriott.
Elements of Chemical Reaction Engineering, H. Scott Fogler.

12.5 Balance energético y análisis de ciclo de vida (LCA)

Life Cycle Assessment of Biodiesel Production and Use, NREL.

Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus, U.S. Department of Energy.

Biofuels and Life Cycle Analysis, International Energy Agency (IEA).

Renewable Energy Directive (RED II / RED III), European Commission.

Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

12.6 Organismos y asociaciones especializadas

International Energy Agency (IEA).
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
U.S. Department of Energy (DOE).
National Renewable Energy Laboratory (NREL).
American Society for Testing and Materials (ASTM).
European Committee for Standardization (CEN).
European Biodiesel Board (EBB).
United States Department of Agriculture (USDA).
International Renewable Energy Agency (IRENA).
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
12.7 Materias primas, oleaginosas y aceites vegetales
USDA Oilseeds: World Markets and Trade.
FAOSTAT Crops and Livestock Products Database.
AOCS Official Methods and Recommended Practices.
Oil Processing Handbook.
Bailey's Industrial Oil and Fat Products.
12.8 Seguridad industrial y gestión ambiental
NFPA 30 - Flammable and Combustible Liquids Code.
NFPA 70 - National Electrical Code.
OSHA Process Safety Management Guidelines.

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net

EPA Guidelines for Biodiesel Production Facilities.
ISO 14001 Environmental Management Systems.
ISO 45001 Occupational Health and Safety Management Systems.
Referencia final

Las conclusiones, balances energéticos, análisis de sostenibilidad, criterios de diseño de plantas y especificaciones técnicas presentadas en este documento se fundamentan en la combinación de:

Normas ASTM, EN e ISO.
Literatura científica especializada.
Manuales de ingeniería química y procesos industriales.
Estudios de ciclo de vida (LCA).
Estadísticas agrícolas y energéticas internacionales.
Experiencia operacional acumulada por la industria mundial del biodiésel.

Esta combinación de fuentes permite que el trabajo refleje tanto los fundamentos teóricos de la tecnología como las mejores prácticas industriales y ambientales actualmente aplicadas en la producción moderna de biodiésel.

Noviembre 7, 2026

El documento, marcas, logo es propiedad de su Autor e Ingeniería Energética General
La utilización de estos por parte del usuario requiere que se haga referencia a nuestra propiedad y se debe señalar en el destino como
© Derechos Reservados Ingeniería Energética General.
info@energianow.net