

## Titulo

# Planta Piloto, con Fines Experimentales, para la Producción de Biodiesel Pilot Plants, with Experimental purpose, for Biodiesel Production

Romel García<sup>(1)</sup>, Carlos René Gómez Pérez <sup>(2)</sup>. Erenio González Suárez <sup>(2)</sup>

Gretel Villanaueva Ramos<sup>(2)</sup>, [romelguaich@yahoo.com](mailto:romelguaich@yahoo.com);  
[crene@uclv.edu.cu](mailto:crene@uclv.edu.cu); [erenio@uclv.edu.cu](mailto:erenio@uclv.edu.cu); [gretel@uclv.edu.cu](mailto:gretel@uclv.edu.cu)

1. Universidad San Carlos de Guatemala (USAC).

2. *Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV).*

### Resumen.

En el trabajo se abordan algunos criterios metodológicos para el diseño mecánico de una planta para el estudio experimental de la obtención de biodiesel a partir de residuos de cachaza de la caña de azúcar. Se aborda la concepción ingenieril para el diseño mecánico de una Planta Piloto para estudiar el escalado de la tecnología de producción de biodiesel de la referida materia prima, partiendo del procedimiento convencional para el diseño de plantas piloto y la concepción empleada en el proyecto, esbozándose un esquema estratégico conceptual para el desarrollo de la planta piloto. Se tratan específicamente las particularidades de la planta de biodiesel instalada en la Universidad San Carlos de Guatemala (USAC).

**Palabras clave:** Residuos lignocelulósicos; biodiesel, cachaza de caña, planta piloto.

### Abstract

Presently work some methodological approaches are approached for mechanical design of experimental study plant for biodiesel obtaining, starting from residuals mud sugar cane. The ingenieril conception is approached for the one climbed, leaving of the conventional procedure for the design of pilot plants prototypes and the conception used in the project, sketched a outline strategic conceptual for the plant pilot development. The particularities of the biodiesel plant installed in the University San Carlos from Guatemala specifically (USAC) are exposed.

**Key words:** Lignin-cellulosic residuals; biodiesel, cane phlegm, pilot plants.

## Introducción

La ASTM (American Society for Testing and Materials) define el Biodiesel como “*el éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o aceites animales, para utilizarlos en motores Diesel*”, que se obtiene a partir de recursos renovables, tales como los aceites vegetales de soja, colza/canola, girasol, palma y otros, como así también de aceites animales, a través de un proceso denominado transesterificación.<sup>6</sup> La transesterificación básicamente consiste en el mezclado del aceite vegetal o aceites con un alcohol (generalmente metanol) y un álcali (soda cáustica). Al cabo de un tiempo de reposo, se separa, por decantación, el biodiesel de su subproducto Glicerol. Luego, el biodiesel es un éster alquílico obtenido por la transesterificación de aceites vegetales o aceites animales. El poder calórico del biodiesel es menor que el combustible fósil, por lo tanto en proporción 1 litro de diesel equivale a 1,1 (app) litro de biodiesel.<sup>6</sup> La densidad y la viscosidad aumentan con respecto al diesel, por lo tanto influyen en el transporte y almacenamiento del combustible.

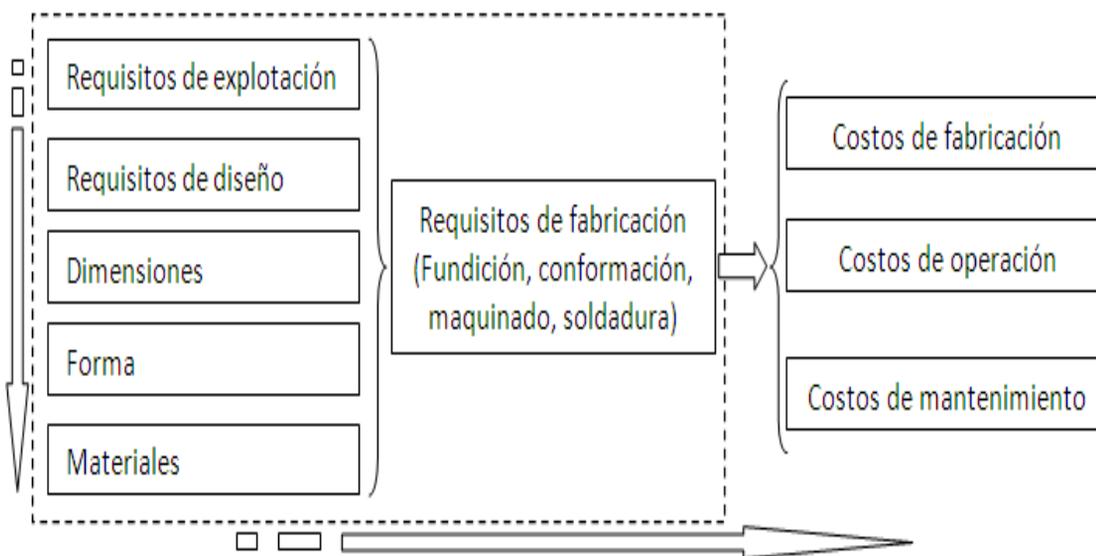
Al estudiar situaciones industriales reales, la necesidad de adaptarse a un entorno muy complejo y cambiante, con una serie de características propias que difícilmente pueden introducirse en un modelo matemático sencillo (por ejemplo, políticas de empresa), suele llevar a situaciones inabordables a través de las formulaciones y los procedimientos de cálculo que habitualmente se aplican a diferentes problemas de optimización. Por otra parte, la utilización de modelos simplificados suele ser en detrimento del rigor necesario, dando lugar a soluciones incorrectas o incluso irrealizables. En consecuencia, para conseguir resultados aceptables será necesario utilizar procedimientos basados en el conocimiento específico de cada caso concreto.<sup>7</sup>

## Desarrollo

### Criterios Metodológico-conceptuales

Un procedimiento convencional para el diseño mecánico de plantas piloto se puede enmarcar (Figura 1) en el escalado de las experiencias de laboratorio, a partir de consideraciones estándares de diseño.

A partir de la concepción<sup>8</sup> (Figura 2) y de las etapas u operaciones del flujo productivo (Figura 3) se establecen los requisitos de explotación de cada una de las etapas y sus equipos particulares, sobre los cuales se establecen los requisitos de diseño (dimensiones, formas, materiales) y, a partir de los mismos, se estiman los requisitos de fabricación; es decir, los procesos de elaboración más convenientes para la obtención de las formas y los acabados superficiales requeridos en el proceso en cuestión (fundición, conformación, maquinado, soldadura).



**Figura 1. Procedimiento convencional para el desarrollo de diseño de prototipo de plantas piloto**

**Figura 2. Concepción empleada para la elaboración del biodiesel**

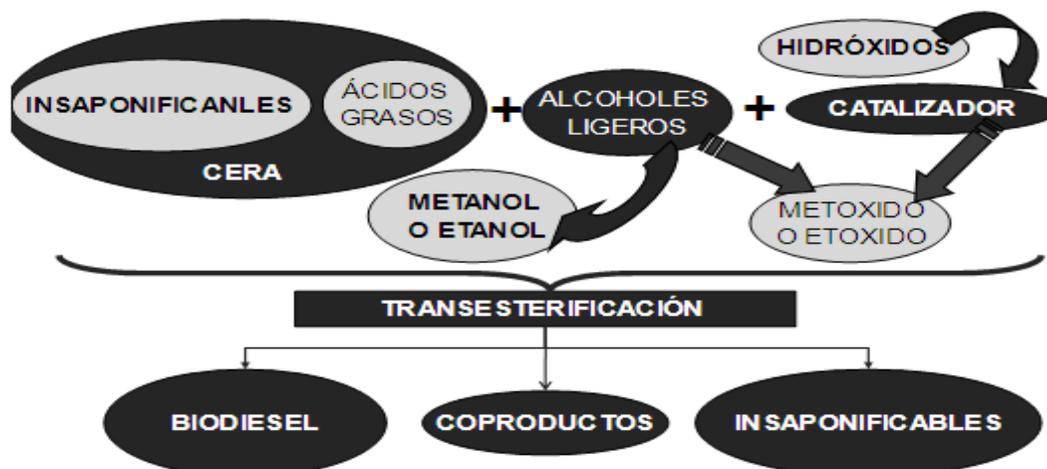
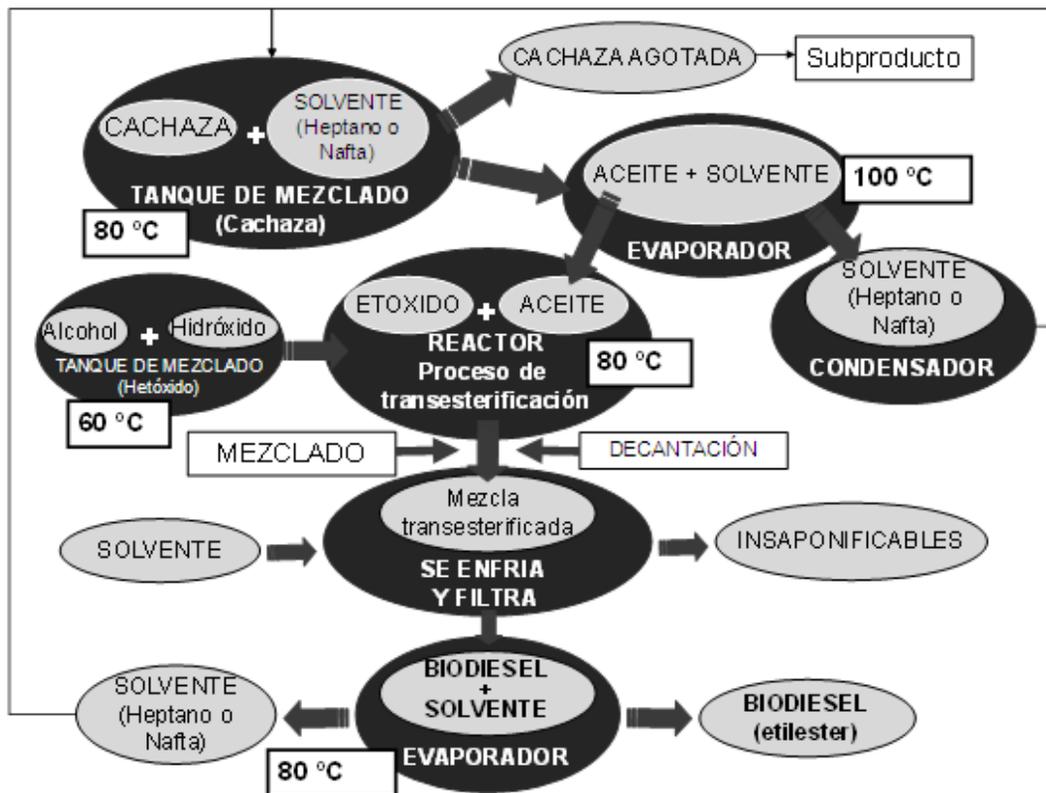


Figura 3. Concepción empleada en el proyecto



A partir de un análisis integral de estos aspectos se desglosan los costos de fabricación, explotación y mantenimiento. El equilibrio del presupuesto asignado para cada etapa establece, en muchas ocasiones, la estrategia de diseño.

Precisamente por ello, comúnmente<sup>1,9</sup> son reconocidos los costos de fabricación, de explotación y de mantenimiento como las bases esenciales a considerar para el escalado de plantas. Sin embargo, a criterio de los autores se requiere la consideración de otros principios esenciales, tales como:

Proporcionalidad equilibrada.

2. Flexibilidad operativa o multifuncionalidad.
3. Independencia operacional.
4. Simplicidad operativa.
5. Independencia energética.
6. Economía del mantenimiento.
7. Economía de la fabricación.
1. Economía de la explotación.
2. Seguridad en el diseño.

2. Seguridad en el diseño.

3. Responsabilidad ambiental.

El principio de la proporcionalidad equilibrada se sustenta en la necesidad de mantener una correspondencia unívoca entre los procesos o etapas de la escala de laboratorio y la escala de planta piloto; es decir, proporcionalidad equivalente entre los flujos productivos, respecto a los volúmenes de los equipos para eliminar los llamados “cuellos de botella”, lo que tiende a complicar el diseño de las instalaciones y sus respectivas interconexiones productivas.

El principio de la flexibilidad operativa o multifuncionalidad de las etapas incluye la potencialidad para la modificación de tipos de materias primas, rangos de tratamiento o su independencia, si fuera necesario, para su uso en otra actividad. Este principio conduce a incrementar las posibilidades de explotación de la planta, pero introduce un potencial incremento de los costos constructivos y de instalación. La flexibilidad es una

ventaja clave para el desarrollo del mercado, pero las economías de escala son también importantes en el contexto de construcción de plantas, porque el coste de una planta con el doble de capacidad normalmente no se duplica.<sup>1</sup> El reto ingenieril está en la solución de esta contradicción.

Una posible solución a la problemática anterior es el *principio de independencia operacional de las etapas*. Este supuesto se basa en el diseño de la planta como una suma de operaciones unitarias diferentes asociadas a equipos para las mismas (en reactores: tratamiento enzimático o transesterificación, etc.) con alta potencialidad de independencia o compartimentación en bloques asociados (evaporación y condensación). Esta estrategia permite, a partir de una planta inicial, crecer en la obtención de coproductos o sobre la base de una anterior, desarrollar una nueva, solo adicionando las operaciones unitarias necesarias, reduciendo a largo plazo los costos de las nuevas inversiones.

El *principio de simplicidad operativa* de las etapas basa su fundamento en la simplificación del diseño constructivo de los equipos; es decir, en la reducción a escala mínima del número de operaciones y de equipos relacionados, su grado de accionamiento mecánico requerido (fácil manipulación para las operaciones de carga y descarga, uso de las partes móviles indispensables, empleo de controles mínimos necesarios, etc.).

El *principio de independencia energética de las etapas* consiste en la potencialización de la sustentabilidad energética de cada etapa de forma independiente. Este principio permite la operación por secciones y la regulación de la carga energética con mayor eficiencia.

La materialización de un ciclo sencillo del control productivo con el diseño y la colocación en planta de equipos accesibles, además de la construcción de los mismos a partir de piezas estandarizadas, conforman el *principio de economía del mantenimiento* durante el diseño de plantas multipropósito, que se conjuga con el *principio de la economía de la fabricación* y el *principio de la economía de la explotación*.

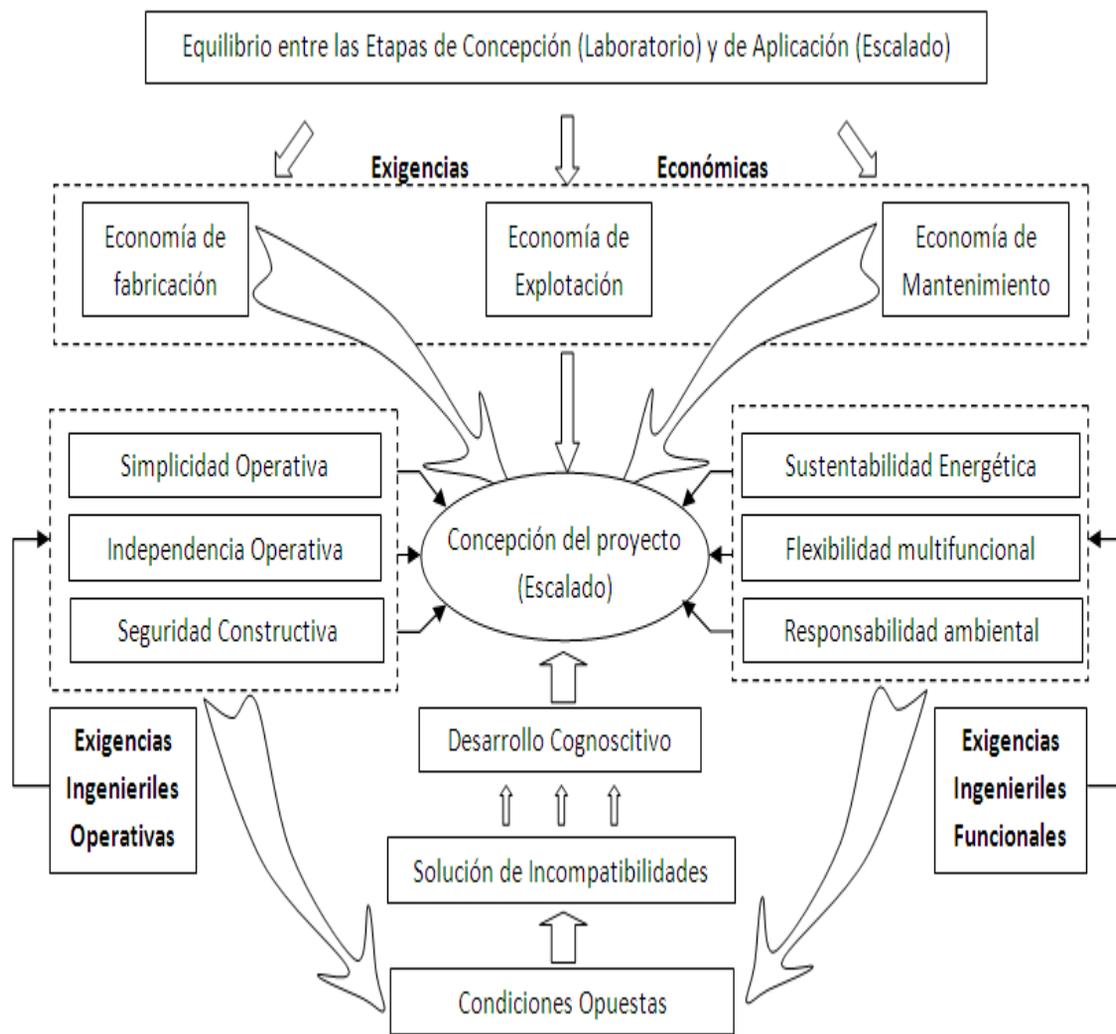
La *seguridad en el diseño (constructiva)* se enmarca en tres consideraciones básicas.<sup>2</sup> La primera directamente relacionada con las condiciones de diseño, garantiza que las personas i

intervenientes no sufran daño ni peligro alguno en su ambiente de trabajo. La segunda consideración es la relacionada con la confiabilidad de los equipos de proceso y el proceso en su conjunto. La tercera encierra todos los dispositivos auxiliares, su cálculo y/o adopción para dar garantía al cumplimiento de los dos primeros presupuestos básicos considerados.

Unido a este principio se plantea el de *responsabilidad ambiental*, que debe ajustarse<sup>3</sup> a las normas y procedimientos legales de cada país y región en particular.

La consideración de todos los aspectos antes mencionados conduce a meditar sobre los *criterios que deben ser considerados para la evaluación de proyectos mecánicos de plantas piloto* destinadas a la obtención de biocombustibles.

La aplicación integral de todos los principios anteriormente expuestos presupone contradicciones, algunas veces insalvables. Una forma de exponer (Figura 4) las contradicciones producidas por la aplicación de los principios anteriormente mencionados se puede analizar, a través de una propuesta de estrategia integral, para lograr un equilibrio entre las etapas de concepción (laboratorio) y de aplicación (escalado) durante el diseño de plantas piloto.



**Figura 4. Esquema estratégico conceptual para el desarrollo de plantas piloto**

Según la experiencia de los autores del presente trabajo, dentro de los *presupuestos generales en el desarrollo constructivo de una planta piloto para la obtención de biocombustibles* se encuentra los siguientes:

1. Diversidad constructiva.
2. Complejidad constructiva.
3. Flexibilidad constructiva.

La *diversidad constructiva* está asociada a la variedad de tipos de equipos y de las funciones que realizan, así como de los parámetros explotacionales con los cuales trabajarán (según el tipo de materia prima a tratar y las cantidades y tipos de coproductos a obtener).

La *complejidad constructiva* se define por el orden operacional y condiciones de funcionamiento (requisitos técnicos de operación, reactividades de las sustancias, necesidad de enfriamiento y calentamiento, medio empleado para ello, inocuidad, presiones de trabajo, etc.).

La *flexibilidad constructiva* estará dada por la adaptabilidad a otros procesos, áreas o locales preestablecidos, requisitos de funcionamiento de equipos auxiliares existentes (sus capacidades de trabajo y ubicación), etc.

Observando los presupuestos generales anteriormente expuestos, uno de los aspectos a considerar para el diseño mecánico del escalado de equipamiento para procesos a volúmenes de planta piloto lo constituye *el lugar de emplazamiento de la instalación terminada*. Atendiendo a estos criterios es recomendable considerar los aspectos siguientes:

1. Área disponible.
2. Condiciones energéticas existentes (vapor, energía eléctrica y su potencia)
3. Servicios auxiliares disponibles (agua, alcantarillado).
4. Ubicación (respecto a los suministradores de materia prima y a los clientes).
5. Relación con el entorno (parque tecnológico, universidad, parque industrial, etc.).

Relativa alta importancia poseen los cuatro primeros aspectos; sin embargo, no es así respecto a la relación con el entorno. Las potencialidades del marco externo al emplazamiento constituyen un eslabón importante para abaratar los costos de fabricación, montaje, operación y mantenimiento. Las capacidades instaladas y la experiencia desarrollada en el entorno son de suma importancia durante la concepción de la nueva planta.

Además de lo anteriormente expuesto, es de suma importancia tener en cuenta consideraciones relativas a la *selección y trabajo con los especialistas* que abordarán el diseño de plantas piloto, a saber:

1. El grado de especialización de cada uno de los miembros del grupo de trabajo.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

1. Especialistas en materiales (propiedades mecánicas, anticorrosivas, etc.).
2. Especialistas en procesos (flujos productivos, tiempos de carga y descarga, etc.).
3. Especialistas mecánicos (resistencia de materiales, flujos, temperaturas, etc.).

1. Especialistas en explotación (operación, mantenimiento, economía, etc.).

De forma similar, es necesario considerar algunos de los *criterios para la selección del constructor*:

1. Experiencia en la producción de equipos para plantas químicas (especializado en el tema).
2. Experiencia en la producción de equipos pequeños (conocimiento sobre la tecnología de explotación flexible).
3. Experiencia en la producción de equipos por encargo (capacidad de producción adaptativa).
4. Experiencia en el montaje de mini plantas (capacidad de integrar la obra).
5. Capacidad de realizar modificaciones sobre los prototipos "in situ".

Muchos son los factores y consideraciones necesarios para conducir al éxito la extrapolación científica de la concepción (idea, incluso probada en el laboratorio por los especialistas químicos) a la materialización de una planta química. Las transformaciones en el equipamiento, en los procedimientos operativos, en las concepciones de trabajo son extraordinarias.

De la experiencia práctica de los autores, en el desarrollo de proyectos de construcción de miniplantas químicas, puede afirmarse que en muchas ocasiones no se cuenta con el presupuesto necesario para la fabricación de recintos para albergar plantas piloto, lo que no permite considerar aspectos esenciales sobre los aspectos que afectan la selección del lugar.<sup>4</sup> Para solventar esta dificultad se ha optado por escoger recintos ya existentes, diseñados para otros fines. Sin embargo, estas soluciones constituyen verdaderas camisas de fuerza para el correcto aprovechamiento lógico secuencial de los procesos a instalar. Precisamente, uno de los aspectos importantes a considerar en cuanto a ello es la *relación entre el espacio disponible para la instalación y el diseño mecánico de los equipos*. En cuanto a este aspecto han de considerarse las relaciones entre:

1. El espacio disponible y las operaciones de carga y descarga.
  1. La altura disponible y la consecutividad operacional.
  2. El área periférica de cada equipo con las operaciones de control de proceso, mantenimiento y reparaciones asociadas.

Dentro de las condiciones para el planteamiento de la planta experimental, que deciden las capacidades de los equipos, y con ello sus dimensiones, espesores de pared, costos, etc., se encuentran:

1. La cantidad de jornadas laborales, en correspondencia con el tiempo de permanencia de cada proceso (específicamente define los volúmenes a trabajar en cada equipo).
2. La cantidad de personal involucrado en la operación del proceso tecnológico a escala de planta (define el costo de operación).
3. La cultura técnica y la idiosincrasia social del personal involucrado en la operación de la planta (decide la exigencia en el diseño del equipamiento y de los controles necesarios).
4. Las políticas nacionales sobre seguridad, protección e higiene del trabajo y de conservación del medio ambiente.

Una vez instaladas, a las plantas piloto ha de realizárseles una revisión a fondo del equipamiento y de su instalación, para lo cual han de desarrollarse, entre otras, las actividades siguientes:

1. *Revisión de la calidad constructiva de cada uno de los equipos*, en comparación con los estándares preestablecidos por diseño y empleando las técnicas y medios adecuados (inspección “in situ” empleando líquidos penetrantes, ultrasonido o inspección radiográfica, según se necesite, sobre las uniones soldadas de los equipos presurizados o sometidos a relativa alta temperatura), independientemente de la garantía del fabricante.
2. *Revisión de la instalación y del estado técnico de la instrumentación* añadida a los equipos, en función de los parámetros operativos de funcionamiento del equipamiento y de las normas de seguridad previamente establecidas para su colocación.
3. *Inspección de posicionamiento espacial* acorde al plano de instalación preestablecido.
4. *Revisión de las conexiones de alimentación y extracción de sustancias* (sólidos, vapor, líquidos, etc.) *y de energía eléctrica*.
5. *Inspección de conductos presurizados y no presurizados y de su aislamiento térmico*.

1. *Realización de las pruebas en vacío para cada equipo*, según las especificaciones de diseño.
2. *Realización de una prueba sin carga de la planta*.
3. *Realización de una prueba de la planta con carga al 80 % y al 100 %*.

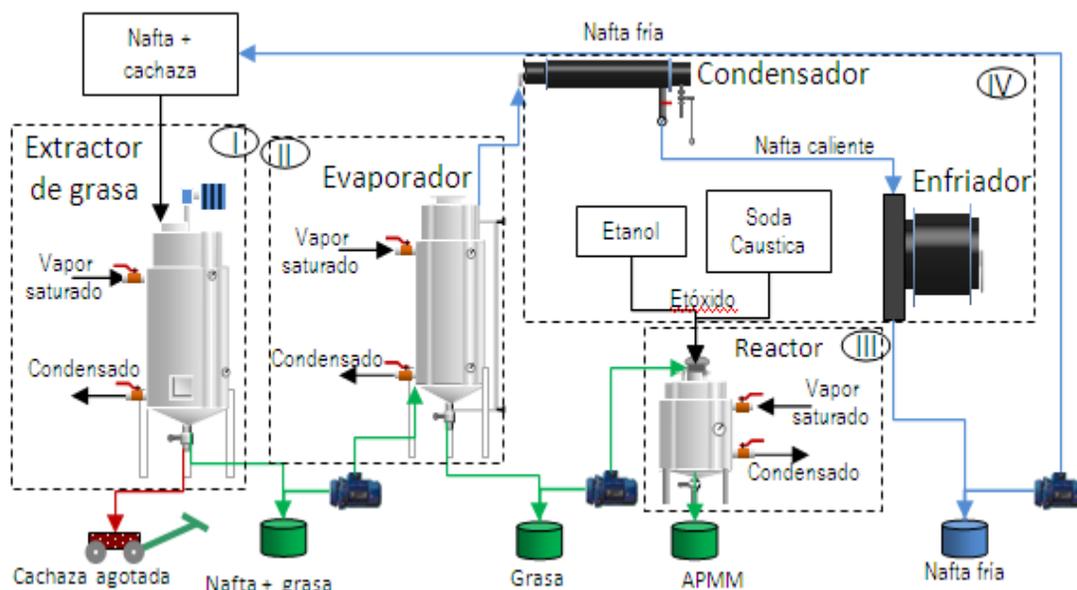
Las plantas piloto destinadas a la obtención de biocombustibles, atendiendo al criterio de flexibilidad operativa o multifuncionalidad, deben considerar las *perspectivas en el diseño integrado de procesos de plantas para biocombustibles*, dentro de las cuales ha de tenerse en cuenta que:

1. No solo son importantes los biocombustibles, como productos fundamentales del proceso, sino los coproductos, que del proceso se derivan (atención al concepto de biorrefinería).
  2. La obtención de coproductos y su procesamiento conduce a complejizar las plantas hacia áreas de menores volúmenes productivos y mayores requisitos de explotación (equipos complejos de construir, instalar y mantener).
  3. La reducción del volumen y el incremento de la temperatura, junto a la operación con sustancias corrosivas conducen a la complicación del diseño mecánico.
  4. Aparecen reactores presurizados, sometidos a ciclos térmicos de enfriamiento brusco, con volúmenes pequeños de trabajo, pero también en sus áreas superficiales, donde han de instalarse las conexiones necesarias para su funcionamiento.
  5. El diseño mecánico de estos equipos no está estereotipado en códigos de prestigio internacionales.
  6. Se requiere de herramientas investigativas conjugadas en el campo de la modelación de las condiciones de explotación, que no siempre son confiables ni están disponibles.
- Planta piloto para la obtención de biodiesel
- Un esquema general del flujo productivo de planta piloto para la obtención de biodiesel (Figura 5), puede ser simple o complejo, en función de los volúmenes a tratar o de los tipos de materias primas que se deseen procesar.



La planta se enmarca en un área de 67 m<sup>2</sup>, empleando instalaciones civiles existentes en la facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala (USAC). Su esquema tecnológico (Figura 7) está constituido por dos sistemas fundamentales: Sistema de extracción de aceite (I) y Sistema de transesterificación (III); y los sistemas auxiliares de .- Sistema de evaporación (II) y Sistema de enfriamiento de nafta (IV).

**Figura 7. Esquema tecnológico de la planta de biodiesel y AAPM construida en la USAC**



diámetro, opera a 90 °C por calentamiento con encamisado externo, de 1,0 kg/cm<sup>2</sup>, con un agitador de tipo ancla, movido por un motorreductor de ejes perpendiculares. El material de esta marmita es acero inoxidable AISI 304, de buena soldabilidad y adecuado para trabajos donde se requiere evitar la proliferación de material bacteriológico. Su presión máxima de trabajo es de hasta 4.5 kg/cm<sup>2</sup>.

El evaporador (Figura 9) está construido también de acero AISI 304, con un diámetro en la zona de trabajo de 550 mm y un alto de 1 220 mm, con patas de 80 mm. El evaporador se calcula para operar a 120 °C con una presión de vapor de 1,0 kg/cm<sup>2</sup>.

El condensador (Figura 10) está construido [9] de acero al carbono tipo AISI 1010 y posee 1500 mm de largo, un diámetro de 200 mm y 32 tubos de cobre (Ø ¾"; 1 200 mm de largo) con un simple pase y conexiones tipo "clamp" de diámetro 3,81 cm (1½").

Dentro de los materiales recomendados<sup>6</sup> para la construcción de los equipos estándar están el acero al carbono (AISI 304), y los materiales plásticos (PRFV, PP).

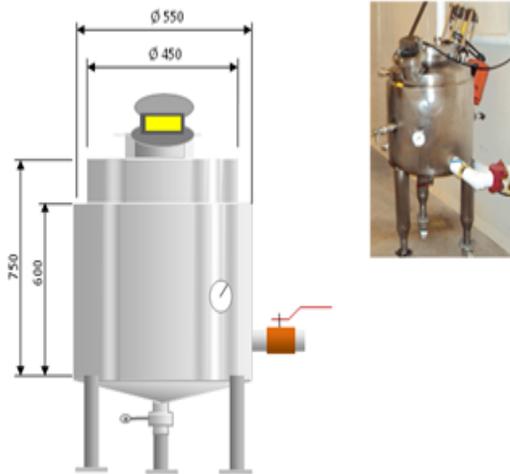
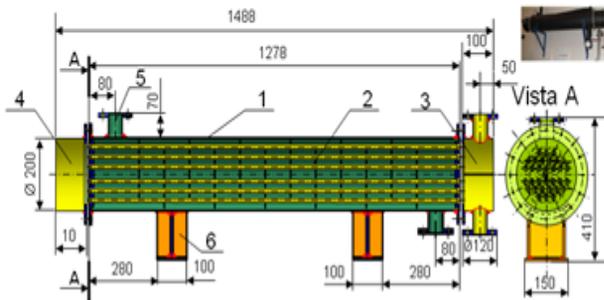
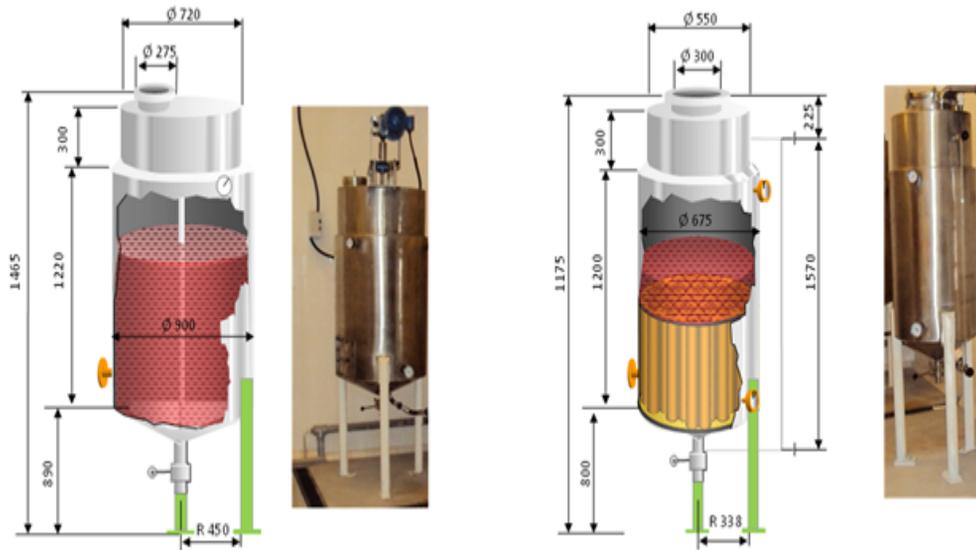
En el tanque de mezclado de cachaza (Figura 8), perteneciente al sistema de extracción de aceite, se mezclan la nafta y la cachaza, que contiene la cera. Este equipo posee 1 220 mm de alto y 720 mm de

En el reactor (Figura 11), es donde se produce la reacción de esterificación. En este equipo entra el etanol necesario para la transesterificación y el catalizador (soda cáustica). Este equipo lo constituye una marmita de acero inoxidable AISI 304, que posee 1 220 mm de alto y 720 mm de diámetro, preparada para operar hasta 90 °C, por calentamiento con encamisado eterno, de 1,0 kg/cm<sup>2</sup>, con un agitador de paletas, movido por un motorreductor de ejes perpendiculares (3 Caballos). Su presión máxima de trabajo es de hasta 4,5 kg/cm<sup>2</sup>.

La tanquería necesaria para el acopio temporal de subproductos está constituida por receptáculos (material PVC) fácilmente desplazables.

Las bombas necesarias son de baja capacidad de flujo (inferiores a 35 l/min), considerando los volúmenes de producto a trasegar.

**Figura 8. Extractor de cachaza**  
**Figura 9. Evaporador de nafta**



**Figura 10: Condensador de nafta**

**Figura 11: Reactor para el proceso de transesterificación**

La capacidad del tanque de mezclado (Figura 8) es de 500 litros de cachaza más la nafta. Atendiendo al contenido de cera en la cachaza (1 %, aproximadamente) pueden extraerse en el evaporador (Figura 10) 5 kg de aceite el reactor .

(aproximadamente 5 litros) lo que permite obtener 2,5 litros de biodiesel en cada tanda introducida en (Figura 11).

## Bibliografía

1. Colectivo de Autores: *Resumen de los biocombustibles*. 2008 [cited 2009 18/11/]; Available from: <http://www.ingenieriaquimica.net/recursos/descarga.php?id=250>
2. Espuña-Camarasa, A.: *Contribución al estudio de plantas químicas multiproducto de proceso discontinuo*. septiembre de 1994, Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona (UPC).
3. Ley Chong, N.: *Contribución a los métodos de asimilar tecnologías, aplicado a un caso de producción de biocombustibles, Tesis de doctorado en Ingeniería Química*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, p. 100, 2006.
4. Speight, J.G.: *Chemical and Process Design Handbook*, Mcgraw-Hill, 2548 pp, 2002.
5. Anónimo: *Cambios radicales en la construcción y diseño de plantas químicas. Química*. Dechema. 2009 [cited 2009 23-09-2009]; Available from: <http://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/Articulo.asp?A=33974>.
6. Anónimo: *Consideraciones de seguridad en el diseño de plantas químicas*. 2009 [cited 23-09-2009]; Available from: <http://www.modeloingenieria.edu.ar/unl/proyind/apuntes/seguridad.pdf>.
7. Gómez, C. *La industria de la re-refinación de aceite mineral usado en Argentina*. 2007 [cited 2009 18/11]; Available from: [http://www.cema.edu.ar/posgrado/download/tesinas2007/MADE\\_Hernandez.pdf](http://www.cema.edu.ar/posgrado/download/tesinas2007/MADE_Hernandez.pdf)
8. Anónimo: *Diseño de plantas químicas*. 2009 [cited 29-03-2009]; Available from: [http://www.uca.edu.sv/deptos/dae/seleccion\\_de\\_tamano\\_y\\_localizacion.pdf](http://www.uca.edu.sv/deptos/dae/seleccion_de_tamano_y_localizacion.pdf)
9. Anónimo: *Diseño mecánico de intercambiadores* 2009 [cited 2009 18/11]; Available from: <http://www.ingenieriaquimica.net/recursos/descarga.php?id=248&accion=descargar>