

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

**DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA PLANTA PILOTO
PARA LA PRODUCCION DE METIL-ESTERES
(BIODIESEL)**

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA ENERGETICA**

POR:

JESUS OMAR RODRIGUEZ REVOREDO

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 2003

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA
PRODUCCIÓN DE METIL-ESTERES (BIODIESEL)**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ENERGÉTICA**

POR:

JESÚS OMAR RODRÍGUEZ REVOREDO

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE 2003

AGRADECIMIENTOS

Mi experiencia con el proyecto biodiesel ha sido una etapa enriquecedora de mi formación pues la oportunidad de estar involucrado en el desarrollo de un bio-combustible es un acontecimiento sumamente positivo para mis estudios en el área de la energía.

El crecimiento de tecnologías renovables para la producción de potencia en un futuro cercano nos da la esperanza de lograr convivir en armonía con la naturaleza.

Quiero agradecer al Ing. Javier Garza, a Don Pedro Medrano y a los muchachos del departamento de Planta Física del Tecnológico de Monterrey su invaluable ayuda para la construcción de la planta piloto.

A mis compañeros y amigos, en especial a Nadhiely Martínez y Javier Aranda, coparticipes de este proyecto, les doy las gracias por el apoyo brindado y los momentos compartidos tanto en el ámbito académico como en el personal.

A mi asesor, el Dr. Oliver Probst por la confianza depositada al asignarme esta responsabilidad, y al Dr. Joaquín Acevedo y Dr. Pablo Morales por concederme el honor de tenerlos en mi comité de tesis.

A quienes ya se han ido, dejando su recuerdo y su cariño.

“La vida es tan breve que no tiene caso tomarla muy en serio”

Jesús Omar Rodríguez Reveredo

ÍNDICE GENERAL**Capítulo I**

Introducción	5
1.1. Antecedentes	9
1.2. Objetivos	10
1.3. Justificación	10
1.4. Metodología	12

Capítulo II

Tecnologías para la producción de biodiesel	13
2.1. Amidación	13
2.2. Catálisis enzimática	14
2.3. Cracking térmico (pirólisis)	14
2.4. Tratamiento del metanol supercrítico	14
2.5. Transesterificación	14
2.6. Selección de materias primas	16
2.6.1. Selección del aceite o grasa	16
2.6.2. Selección del alcohol	16
2.6.3. Selección del catalizador	16
2.7. Subproductos	17
2.7.1. Glicerina	17
2.7.2. Sales	17
2.8. Reacciones involucradas	18

Capítulo III

Elaboración de lotes de biodiesel en la planta pre-piloto	19
3.1. Resultados	20
3.2. Conclusiones	21

Capítulo IV

Diseño de la planta y procesos	23
4.1. Inventario de espacios y materiales	23
4.2. Filosofía básica del diseño	23
4.3. Diseño del proceso de recepción y preparación de la materia prima	26
4.3.1. Recepción del aceite	26
4.3.2. Recepción del sebo de res u otras grasas	26
4.3.3. Bombeo del aceite o grasa al reactor	27
4.3.4. Manejo del metanol y preparación del metóxido de sodio	27

4.4. Diseño del proceso de reacción y separación por sedimentación	28
4.4.1. Reacción	28
4.4.2. Extracción de glicerina	29
4.4.3. Transferencia del biodiesel del tanque de sedimentación al tanque de lavado	30
4.5. Diseño del proceso de neutralización	31
4.6. Diseño del proceso de lavado	31
4.7. Diseño del proceso de separación por centrifugación	33
4.8. Entrega de producto terminado y subproductos	33

Capítulo V

Especificaciones de los componentes de la planta piloto	34
5.1 Análisis de requerimientos energéticos	34
5.2. Componentes	35
5.3. Hoja de seguridad de la planta Piloto	39

Capítulo VI

Cálculos técnicos	40
6.1. Intercambiador de calor para agua de lavado	40
6.2. Bomba de transferencia para el reactor	45
6.3. Bomba de descarga de biodiesel	49
6.4. Bomba de metanol	51
6.5. Soportes para reactor y tanques de lavado	52
6.6. Construcción de carrito para recolección de aceite	53
6.7 Selección de tubería	54
6.8. Cálculos térmicos del reactor	55

Capítulo VII

Conclusiones y Recomendaciones	61
--------------------------------	----

Referencias	63
--------------------	----

Auxiliares	64
-------------------	----

Anexos	65
---------------	----

Anexo 1. Protocolo para la elaboración de biodiesel en la planta pre-piloto	
Anexo 2. Programas en Matlab	
Anexo 3. Diagrama de Moody	
Anexo 4. Curva de operación de bomba de engranes	
Anexo 5. Especificaciones y curva de la bomba neumática para metanol	
Anexo 6. Vistas de la planta piloto	

Lista de figuras

Figura 1.1. Esquema de la producción de biodiesel	7
Figura 1.2. CO ₂ en la utilización del biodiesel	10
Figura 3.1. Diagrama esquemático de experimentos realizados	19
Figura 3.2. Planta pre-piloto	22
Figura 3.3. Muestras de biodiesel producido	22
Figura 4.1. Configuración de la planta piloto	24
Figura 4.2. Diagrama de flujo de la producción de biodiesel en la planta piloto	25
Figura 4.3. Suministro del aceite a la planta	26
Figura 4.4. Bomba de transferencia de aceite o grasa	27
Figura 4.5. Recipiente para metóxido	28
Figura 4.6. Proceso de transesterificación y separación	29
Figura 4.7. Tanques de sedimentación y lavado	30
Figura 4.8. Proceso de lavado con un lecho de agua	33
Figura 6.1. Condiciones del intercambiador de calor	41
Figura 6.2. Esquema de temperaturas para calcular la media logarítmica	42
Figura 6.3. Intercambiador de calor	43
Figura 6.4. Dibujo técnico del intercambiador de calor	44
Figura 6.5. Diagrama de la tubería al reactor	45
Figura 6.6. Bomba neumática para metóxido	51
Figura 6.7. Soporte para el reactor	52
Figura 6.8. Soporte para tanques de sedimentación y lavado	52
Figura 6.9. Carrito para la recolección de aceite en el campus	53
Figura 6.10. Reactor	55
Figura 7.1. Planta piloto	62

Lista de tablas

Tabla 1.1. Propiedades del diesel vs. Biodiesel	6
Tabla 1.2. Parámetros importantes a evaluar en el biodiesel	7
Tabla 2.1. Comparativo de las tecnologías para producir biodiesel	13
Tabla 2.2. Análisis cuantitativo del proceso de transesterificación básica	15
Tabla 2.3. Reacciones involucradas en la producción de biodiesel	18
Tabla 3.1. Resultados del análisis vía húmeda del contenido de glicerina	20
Tabla 5.1. Fuentes de energía para la planta	34
Tabla 5.2. Consumidores de energía en la planta	34
Tabla 5.3. Riesgos y medidas de seguridad	39
Tabla 6.1. Perdidas por accesorios para aceite	47
Tabla 6.2. Perdidas por accesorios en descarga de biodiesel	49

Lista de gráficas

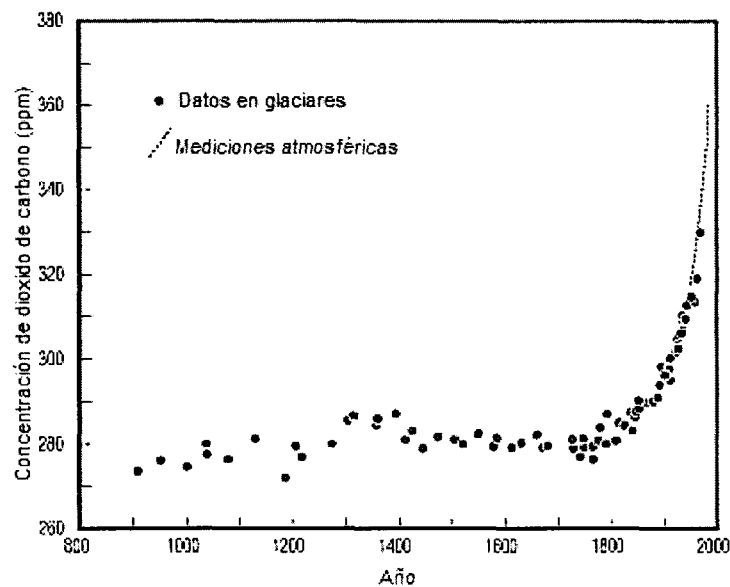
Gráfica 1.1. Concentración de CO ₂ a través de la historia	5
Gráfica 1.2. Emisiones de las mezclas de biodiesel	11
Gráfica 1.3. Cronograma de trabajo	12
Gráfica 6.1. Comportamiento de la pérdida de velocidad en la tubería	54
Gráfica 6.2. Comportamiento del factor de fricción en las tuberías	54
Gráficas 6.3 y 6.4 Comportamiento térmico del reactor sin aislamiento	58
Gráfica 6.5 y 6.6 Comportamiento térmico del reactor con aislante térmico	58
Gráficas 6.7 y 6.8 Comportamiento térmico del reactor con un serpentín de vapor para calentamiento	60

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la revolución industrial hasta la fecha el la concentración de CO₂ en la atmósfera se incrementó de 280 hasta 360 ppm, (Gráfica 1.1) gran parte de este aumento tuvo su origen en la contaminación generada por los motores de combustión cuyo número se ha duplicado en los últimos 20 años. [21]

Esto hace necesario el uso de combustibles menos contaminantes para reducir el impacto ambiental ocasionado por el aumento del número de estos equipos.



Gráfica 1.1. Concentración de CO₂ a través de la historia [21]

El término Diesel proviene del nombre del ingeniero Alemán Rudolph Diesel, quien es considerado el inventor del motor de combustión por autoignición. Por cuestiones económicas el aceite destilado del petróleo fue el adoptado para este tipo de motores y se le conoció como combustible Diesel. Desde entonces este motor de combustión interna ha sido desarrollado para este combustible, sin embargo es posible quemar aceites vegetales en estas máquinas [1].

Pero aunque es posible quemar aceites vegetales en un motor de compresión, se requieren varias adaptaciones debido a que la viscosidad de los mismos es considerablemente mayor que la del diesel, lo cual trae consigo problemas en la bomba de inyección y los inyectores. [2]

El Biodiesel es un combustible elaborado a partir de aceites vegetales y grasas animales tratados mediante un proceso llamado transesterificación que tiene como resultado una reducción importante de su viscosidad. Este combustible ha demostrado ser utilizable en cualquier motor diesel y puede ser tratado de la misma manera que el diesel de petróleo. [2]

El biodiesel puede ser utilizado directamente como combustible, pero en la práctica se maneja una mezcla con el diesel de petróleo. El B20, es una mezcla que contiene 20% biodiesel y 80% diesel. Aunque cualquier proporción es factible actualmente se comercializa en algunos lugares de EU y Europa el B5, B20, B100, etc. [3].

Además, el motor no requiere modificaciones significativas para poder operar con biodiesel, salvo la sustitución de algunos empaques y mangueras que pueden ser atacados por este combustible. La tabla 1.1 nos presenta un comparativo de los principales parámetros.

Propiedad	Unidad	Diesel Norma europea 590	Biodiesel (PME) DIN V 51.606
Propiedades estándar			
Densidad (15°C)	kg/m ³	820..860	875..900
Viscosidad (40°C)	mm ² /s	2.00..4.50	3.5..5.0
Punto de ignición	°C	>55	>110
Contenido de azufre	%(peso)	<0.20	<0.01
# de cetano		>49	>49
Propiedades adicionales			
contenido de oxígeno	%(peso)	0.0	10.9
poder calorífico	MJ/dm ³	35.6	32.9
grado de eficiencia	%	38.2	40.7

Tabla 1.1. Propiedades del diesel vs biodiesel [4].

La producción del biodiesel es un proceso conceptualmente simple; los pasos básicos se resumen en la figura 1.1. Aceite vegetal de características conocidas reacciona a temperaturas moderadas (~60 C) con metanol en presencia de un catalizador alcalino o ácido; típicamente se utiliza hidróxido de sodio o de potasio. Después de aproximadamente dos horas bajo condiciones de constante agitación, los triglicéridos, las moléculas complejas que forman el aceite y que le dan su consistencia viscosa, reaccionaron completamente con el metanol para formar cadenas de metil-éster (biodiesel) y glicerina, un producto secundario de valor comercial [4]. El producto final es analizado en varios aspectos. (Tabla 1.2)

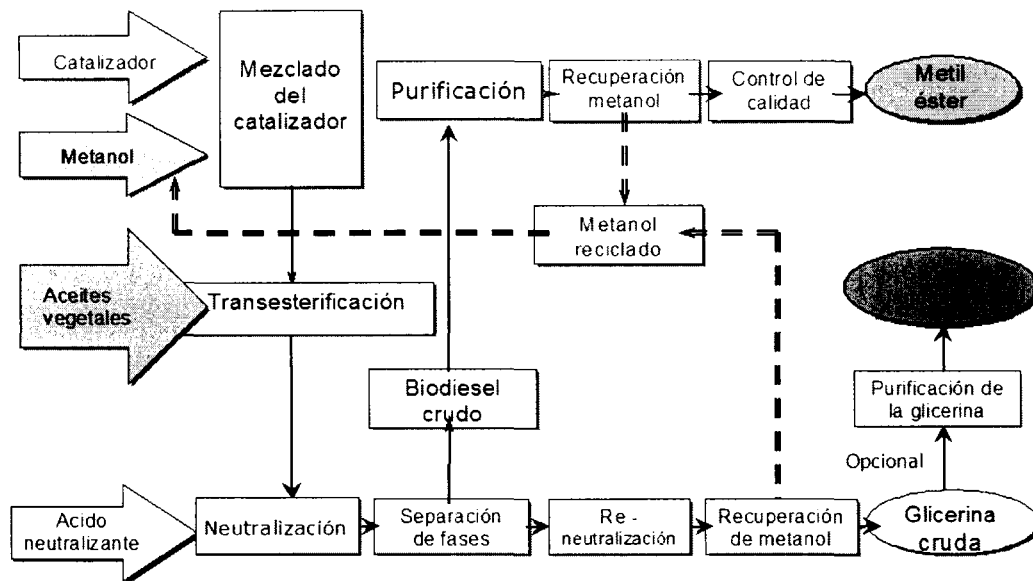


Figura 1.1. Esquema de la producción de biodiesel.

Parámetros críticos para la utilización de Biodiesel en motores de combustión interna.	
☐	Residuos de agua
☐	Residuos de glicerina libre y ligada (triglicéridos no reaccionados)
☐	PH, residuos de catalizador
☐	Residuos de metanol (reducen flash-point)
☐	Pour point (fluidez a bajas temperaturas)
☐	Etc.

Tabla 1.2. Parámetros importantes a evaluar en el biodiesel.

Las materias primas que se pueden emplear en la obtención de biodiesel son muy variadas y pueden clasificarse en: [13]

a) Aceites vegetales nuevos.

- Aceites de semillas oleaginosas: girasol, colza, soya y coco.
- Aceites de frutos oleaginosos: palma.
- Aceites de semillas oleaginosas alternativas: Brassica carinata, Camelina sativa, Pogianus
- Aceites de semillas oleaginosas modificadas genéticamente: Aceite de girasol de alto contenido oleico.

b) Aceites vegetales usados.

El aceite usado de los negocios de comida, principalmente los de comida rápida generan estos residuos que pueden ser reciclados para producir biodiesel.

c) Grasas animales: Sebo de distintas calidades.

Los rastros son la principal fuente de esta clase de desechos, aunque no hay un protocolo establecido aún para el manejo y comercialización de estas grasas en nuestro país.

Conclusión

El biodiesel, obtenido a partir de materias primas renovables, es un combustible líquido no contaminante y biodegradable, que se puede utilizar en el sector del transporte urbano, minero, agrícola y marino, así como en calderas de calefacción, incorporándolo directamente o mezclado como combustible líquido, presenta ventajas energéticas, medioambientales y económicas [16]:

- Desarrollo sostenible tanto en agricultura como en energía.
- Menor impacto ambiental: Reducción de las emisiones contaminantes: SO_2 , partículas, humos visibles, hidrocarburos y compuestos aromáticos.
- Reduce el calentamiento global: contribuye a la reducción de la concentración de CO_2 en el ambiente cumpliendo con el protocolo de Kioto, teniendo un balance energético positivo. Además obtenemos un producto que se degrada 85 % en 28 días.
- Desarrollo local y regional: Mejora la cohesión económica y social y posibilita la creación de puestos de trabajo.
- Industrial: Puede sustituir a las gasolinas convencionales en motores, quemadores y turbinas y es utilizable en flotas de autobuses, taxis y maquinaria agrícola.
- Favorece el mercado doméstico.
- Reducción de la importación de combustibles.

1.1. Antecedentes

El Tec de Monterrey, Campus Monterrey, cuenta con 18 centros de investigación en diversas áreas especializadas que se dedican a la investigación aplicada y a proveer servicios de consultoría al sector empresarial.

Estos proyectos en muchas ocasiones, cuentan con patrocinio principalmente de empresas, creándose así un vínculo de interrelación entre empresa y centro de investigación. Algunos proyectos reciben apoyo económico de otras organizaciones, del CONACYT, de fondos internacionales y del mismo Tec de Monterrey.

La construcción de la planta piloto para la producción de biodiesel en el tecnológico de Monterrey está patrocinada por la empresa GRUPO ENERGÉTICOS, se cuenta con el apoyo del Centro de Estudios de Energía y del Departamento de Ingeniería Química que ha tenido la gentileza de brindarnos un espacio para este proyecto así como diversos materiales que hemos requerido.

Así mismo, el Proyecto Biodiesel involucra el trabajo de varios tesis de la maestría en Ingeniería Energética tanto en el área de producción como en la analítica.

Actividades realizadas en el ITESM previas a esta tesis

- Producción y caracterización físico-química de biodiesel a partir de diferentes materias primas a nivel laboratorio. (Tesis de maestría de José Luis Sánchez)
- Análisis de la cinética de la transesterificación (Tesis de maestría de Javier Aranda Alarcón)
- Desarrollo de una planta provisional de producción de biodiesel previa a la planta piloto en la cual se han realizado varias corridas de síntesis de biodiesel y separación biodiesel-glicerina. (Parte de las tesis de Javier Aranda y Nadhiely Martínez, y de la presente)
- Análisis de emisiones provenientes del biodiesel al utilizarlo como combustible en un motor diesel facilitado por la empresa VW. (Tesis de maestría de Jerónimo Coronado)

1.2. Objetivos

- Diseñar la configuración más adecuada de los elementos que conforman la planta piloto para la elaboración de biodiesel en base a los materiales y espacio disponibles, asegurando que el proceso se lleve a cabo de manera adecuada en la misma.
- Establecer la logística para la recepción de la materia prima y la entrega de producto terminado.

1.3. Justificación

Las emisiones de gases y partículas se reducen con el uso de combustibles de origen vegetal, pues tales combustibles son parte del ciclo natural (la asimilación de CO_2 por parte de las plantas para su desarrollo), y por tanto no hay ganancia neta de emisiones de óxidos de carbono (figura 1.2). Los aceites vegetales contienen niveles insignificantes de azufre y por tanto reducen las emisiones de dióxido de azufre, responsable de la lluvia ácida. Son amables con el ambiente pues son biodegradables, lo que previene de una contaminación a futuro del suelo y el agua. El balance energético del biodiesel es altamente favorable ya que hasta 4.2 BTU's son obtenidos por cada BTU usado en la producción y procesamiento. [14]

Los costos de producción dependen del origen del aceite, el valor de la glicerina obtenida como subproducto, el precio del alcohol y de los impuestos y subsidios que se tengan. [14]

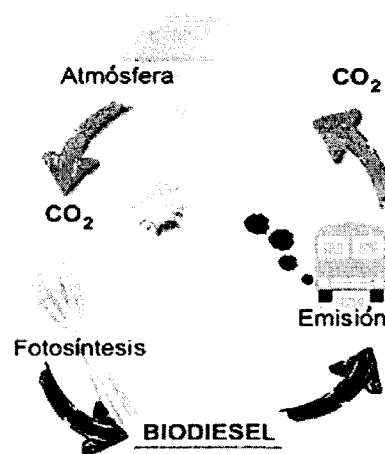
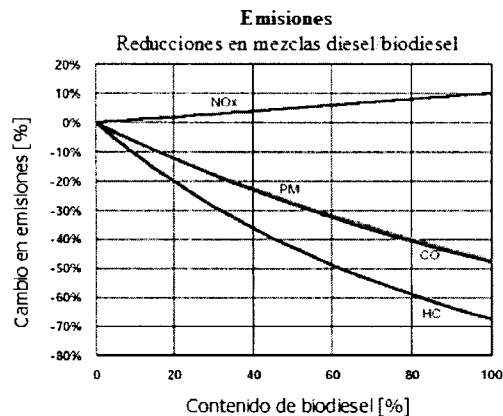


Figura 1.2. CO_2 en la utilización del biodiesel.

Además a diferencia del diesel de petróleo sus emisiones tienen un menor nivel de hidrocarburos aromáticos que son causantes de cáncer. Las pruebas indican que estos compuestos se reducen de 75 a 85% con respecto al diesel común, a excepción del benzoantraceno que se reduce 50% [6]. Notamos en la grafica 1.2 que solo los NOx aumentan ligeramente.



Grafica 1.2. Emisiones de las mezclas de biodiesel. [6]

El menor poder calorífico de biodiesel en comparación con el petrodiesel es parcialmente compensado por su mayor eficiencia de combustión, sin embargo esto puede traer algunos cambios en el desempeño del motor pues requerirá mayor cantidad de combustible en la inyección si se usa biodiesel. Dado que este se puede mezclar en cualquier proporción con el diesel de petróleo estos cambios serán proporcionales al porcentaje de biodiesel que contenga la mezcla.

Si la composición del combustible puede ser conocida justo antes de ser inyectada al motor en marcha los posibles inconvenientes podrían ser eliminados por la computadora corrigiendo la cantidad de combustible a inyectar y el momento de hacerlo.

Se ha planteado la idea de utilizar un sensor de metanol que está en el mercado para este fin [2].

1.4. Metodología

- Conocimiento del proceso para hacer biodiesel.
- Elaboración de lotes de biodiesel en la planta piloto variando parámetros para encontrar el método más adecuado.
- Inventario de los espacios y materiales disponibles
- Toma de medidas de espacios, recipientes y equipos existentes.
- Elaboración de bocetos en AUTOCAD de la configuración de la planta a construir.
- Justificar la ubicación de los componentes de la planta en base a las necesidades del proceso y por economía y funcionalidad.
- Especificación de los componentes y servicios que será necesario adquirir.
- Elaboración de la documentación que será la guía para construir y operar la planta.
- Supervisión de la construcción de la planta piloto.
- Pruebas del equipo y corrección de posibles inconvenientes.

Actividad	Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Conocimiento del proceso de fabricación del biodiesel.		■									
Elaboración de lotes de 20L de biodiesel.			■	■							
Inventario de materiales y espacios.				■							
Toma de medidas de materiales y espacios existentes.				■	■						
Elaboración de planos					■	■					
Especificación de materiales y servicios que se requerirán						■	■				
Elaboración del documento								■	■	■	
Defensa de tesis											■
Examen de grado.											■
Si es posible construir la planta:											
Supervisión de la construcción							■	■	■		
Puesta en marcha									■	■	
Corridas de prueba.									■	■	

Gráfica 1.3. Cronograma de trabajo

CAPÍTULO II

TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Existen muchas tecnologías registradas en la literatura y utilizadas en la industria para producir biodiesel. Analizando las tecnologías cuya efectividad ha sido probada en alguna escala y que son económicamente viables podemos elegir la más adecuada para nuestro proceso. La siguiente tabla 2.1 deja al descubierto los puntos débiles y ventajas de los principales procesos utilizados:

Tecnología	CRITERIOS															
	Tasa de conversión de la reacción	Valor bruto de los co-productos	Contaminantes atmosféricos	Desperdicio de agua	Ciclo de vida en el efecto invernadero	Aceptación social	Requerimientos energéticos	Agentes de separación de masa	Requerimientos de transporte	Capacidad de producción	Capacidad para usar distintas materias primas	Calidad del producto	Riesgos	Tecnología confiable	Costos de producción	Factibilidad económica
Amidación	-	+	()	-	()	+	()	()	()	?	()	+	()	-	?	?
Catálisis enzimática	()	+	()	+	+	+	+	()	+	?	+	+	()	-	-	-
Pirólisis	-	()	()	()	-	()	-	()	+	+	()	-	-	+	-	-
Tratamiento de metanol supercrítico	+	-	()	()	-	()	-	()	+	?	+	()	-	-	()	?
Transesterificación																
-Proceso continuo	()	+	()	-	()	+	()	()	()	+	()	()	()	()	+	+
-Lotes	()	+	()	-	()	+	()	()	()	()	+	()	()	+	()	()
-Reacción con catalizador ácido	-	+	()	-	-	+	-	()	()	()	()	()	+	+	()	()
-Reacción con catalizador básico	+	+	()	-	()	+	()	()	()	()	()	()	()	+	+	+
Significado	+ Deseable - Indeseable ? Incierto () Neutral															

Tabla 2.1. Comparativo de las tecnologías para producir biodiesel. [12]

2.1. Amidación

La amidación ha sido considerada por debido a las ventajas que de una conversión de mezclas de triglicéridos hacia dietil-amidas en un proceso químico simple, y que estas dietil-amidas tienen un número de cetano mayor que un biodiesel a base de un metil-ester regular. Desgraciadamente pese a esas ventajas, no se alcanza una completa conversión para la mayoría de los aceites vegetales aún después de largos periodos de

tiempo. Esto implicaría la necesidad de un paso de destilación por vacío que traería un incremento en el costo más allá de lo económicamente viable. Además se tiene la desventaja de ser una tecnología nueva. Por esto está descartada por el momento como una opción viable para ser utilizada en un proceso industrial. [17]

2.2. Catálisis enzimática

La catálisis enzimática ofrece una opción tecnológica simple, con menores requerimientos energéticos y de materia prima (catalizador y alcohol), sin embargo ha sido descartada debido a la inmadurez de esta tecnología y a los altos costos que implica trabajarla a pequeña escala. [12]

2.3. Cracking térmico (pirólisis)

La pirólisis es la más antigua forma de producción de biodiesel, junto con la transesterificación. Es una de las pocas tecnologías usadas actualmente a nivel industrial. Esta ofrece la ventaja de producir biodiesel sin generar ningún desperdicio de agua ni contaminación del aire. Este proceso se descartó para nuestra planta debido a que el equipo requerido es costoso para modestos volúmenes de producción y a que produce una amplia gama de químicos, de los cuales el biodiesel es solo uno de ellos y el valor de los demás es mínimo. [18] Más aún, el biodiesel pirolizado a menudo contiene inaceptables cantidades de cenizas y residuos carbónicos. [19]

2.4. Tratamiento del metanol supercrítico

Este método ofrece la posibilidad de procesar materias primas continuamente con alto contenido de ácidos grasos libres sin necesidad de un pre-tratamiento o un catalizador. Kusdiana y Saka reportaron éxito con esta tecnología a nivel laboratorio. [20] Sin embargo, esta opción tecnológica se descarta por no estar apenas en desarrollo y por el alto requerimiento energético y el riesgo proveniente de las altas temperaturas y presiones de operación.

2.5. Transesterificación

Este proceso, ya sea continuo o por lotes fue calificado como la tecnología más viable. Esta estimación es corroborada por el hecho de que este es el método más ampliamente usado para producir biodiesel. Ambas variantes de este proceso son cuantitativamente comparadas en la tabla 2.2. Dentro de esas dos opciones se presentan dos vías para

producir el biodiesel que son: el uso de un catalizador básico o uno ácido. El catalizador básico fue seleccionado debido a que se alcanzan mayores tasas de conversión. [12]

Así podemos concluir que la transesterificación con catálisis básica es el proceso que mejor se adapta a nuestras necesidades y podemos ver que el proceso de lotes es mejor para el uso de distintas materias primas, además de que construir una planta de producción por lotes es mucho más económico que una de proceso continuo.

Tecnología	CRITERIO																	
	Tasa de conversión de la reacción	Valor bruto de los co-productos	Contaminantes atmosféricos	Desperdicio de agua	Ciclo de vida en el efecto invernadero	Aceptación social	Requerimientos energéticos	Requerimientos de transporte	Capacidad de producción	Capacidad para usar distintas materias primas	Calidad del producto	Trabajo manual	Riesgos	Tecnología confiable	Costos de producción	Inversión inicial	Factibilidad económica	Puntaje total
Prioridad	7	5	6	6	6	4	4	2	7	5	6	4	6	7	7	6	10	
Transesterificación (catalizador básico)																		
Proceso continuo	4	3	3	3	3	4	5	3	5	3	4	4	3	4	5	3	4	368
Lotes	4	4	3	3	3	4	4	3	4	5	4	4	4	5	4	4	4	384

Notas:

- a) La prioridad es un factor de 1 a 10 que corresponden a lo menos importante y lo más importante respectivamente.
- b) El puntaje dado a cada criterio va de 1 a 5, que es desde poco favorable hasta muy favorable respectivamente.
- c) El puntaje total es la suma de los productos de la prioridad por el puntaje obtenido.

Tabla 2.2. Análisis cuantitativo del proceso de transesterificación básica. [12]

Aún cuando la diferencia es mínima, la infraestructura con la que contamos no nos permite por el momento tener un proceso continuo además de que el tener la facilidad de cambiar de materia prima es una de las principales preocupaciones.

2.6. Selección de las materias primas

2.6.1. Selección del aceite o grasa

Aún cuando es posible producir biodiesel a partir de una gran cantidad de aceites y grasas, el utilizar materia prima nueva no es una opción económicamente viable sin incentivos gubernamentales. Por ejemplo, un litro de aceite de soya cuesta aproximadamente \$ 11.00, mientras que un litro de Diesel común cuesta \$5.00, por esta razón se busca manejar aceites y grasa recicladas que son mucho más baratas y pueden llegar a competir con el precio del Diesel (el diesel sin subsidio).

Dada la disponibilidad que se tiene aquí en el tec de obtener aceite usado de buena calidad y a un precio muy accesible, esta será nuestra principal materia prima, aunque la planta piloto podrá manejar sebo u otras materias primas ya sean líquidas o semisólidas.

La literatura recomienda cualquier grasa o aceite reciclados que se pueda obtener con una calidad aceptable y de preferencia con bajo contenido de ácidos grasos libres.

El aceite o grasa puede contener ácidos grasos libres, la literatura recomienda un máximo de 0.5% para la reacción de transesterificación, en caso de que la materia prima no cumpla con esto habrá que realizar una esterificación previa para reducirlos. El agua es otro elemento indeseable, la materia prima debe estar libre de ella.

2.6.2. Selección del alcohol

Las opciones comercialmente al alcance son etanol y metanol. Aunque el etanol tiene una mejor cinética de reacción y su manejo implica menores riesgos pues es menos tóxico y menos inflamable, el metanol es más económico por esta razón se ha trabajado con este último.

2.6.3. Selección del catalizador

Los dos catalizadores probados y disponibles comercialmente son KOH y NaOH, aunque alguna literatura sugiere que el NaOH provee hasta 1% mayor conversión. [12]

Sin embargo, este último presenta una desventaja, forma una sal que es soluble en la glicerina y que es difícil de remover. En cambio, el KOH no presenta este inconveniente pues forma una sal que se precipita y que puede ser separada fácilmente para ser vendida como fertilizante, además de reducir el costo de refinamiento de la glicerina.

Por tanto el KOH es el que se debería usar a escala comercial, pero debido a que el NaOH es más económico es el que hemos estado utilizando durante la experimentación.

2.7. Sub-productos

2.7.1. Glicerina

La glicerina es el subproducto de valor comercial obtenido durante la transesterificación, y se tienen dos opciones para comercializarla, vender la glicerina cruda (80% de pureza) o refinarla para obtener un producto de grado farmacéutico. Esta última requiere un proceso complejo de purificación para lograr producir un producto puro de gran calidad 99%. [12]

Cualquiera que sea la decisión es necesario primero evaporar el metanol que contenga; esto se puede lograr fácilmente gracias al bajo punto de ebullición del metanol. Otra opción sería incorporar un proceso de flash (evaporación al vacío) para evitar consumir energía térmica. Si se tienen pequeñas cantidades una opción simple es colocar la glicerina al sol para que el metanol se evapore.

2.7.2. Sales

Cuando se utiliza KOH como catalizador, se forma una sal que se separa por sedimentación y que puede ser usado como fertilizante. En el caso de NaOH la sal es soluble en la glicerina y es difícil de separar.

2.8. Reacciones Involucradas

La tabla que se presenta a continuación muestra las reacciones (deseadas o no deseadas) que se llevan o se pueden llevar a cabo en el proceso de producción de biodiesel, sin profundizar mucho en ellas pues trabajos anteriores se han dedicado al análisis de la cinética química. Se recomienda consultar la tesis del M.C. Javier Aranda [15] si se requiere información más detallada.

Proceso	Reacción	Descripción
Esterificación previa	$\underset{\text{AGL}}{\text{RCOOH}} + \underset{\text{Metanol}}{\text{CH}_3\text{OH}} \xrightarrow{\text{H}_2\text{SO}_4} \underset{\text{Metil-éster}}{\text{RCOOCH}_3} + \underset{\text{Agua}}{\text{H}_2\text{O}}$	Se usa para convertir los ácidos grasos libres (AGL) en ésteres útiles
Reacción del metanol y el hidróxido de sodio	$\underset{\text{Metanol}}{\text{NaOH}} + \underset{\text{Metanol}}{\text{CH}_3\text{OH}} \leftrightarrow \underset{\text{Catalizador}}{\text{CH}_3\text{ONa}} + \underset{\text{Agua}}{\text{H}_2\text{O}}$	Reacción de producción del catalizador.
Transesterificación	$\underset{\text{Triglicérido}}{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OOCR})_3} + 3\underset{\text{Metanol}}{\text{CH}_3\text{OH}} \xrightarrow{\text{NaOH}} 3\underset{\text{Metil-éster}}{\text{RCOOCH}_3} + \underset{\text{Glicerina}}{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3}$	Reacción global de transesterificación
	$\text{Diglicérido} + \text{Metanol} \leftrightarrow \text{Monoglicérido} + \text{R}'\text{COOR}_2$ $\text{Monoglicérido} + \text{Metanol} \leftrightarrow \text{Glicerina} + \text{R}'\text{COOR}_3$	Pasos intermedios de la reacción anterior.
Hidrólisis	$\underset{\text{Triglicérido}}{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OOCR})_3} + 3\underset{\text{Agua}}{\text{H}_2\text{O}} \xrightarrow{\text{NaOH}} 3\underset{\text{AGL}}{\text{RCOOH}} + \underset{\text{Glicerina}}{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3}$	El agua es indeseable porque reacciona y produce ácidos grasos libres.
Saponificación	$\underset{\text{AGL}}{\text{RCOOH}} + \underset{\text{Catalizador}}{\text{CH}_3\text{ONa}} \rightarrow \underset{\text{Jabón}}{\text{RCOONa}} + \underset{\text{Metanol}}{\text{CH}_3\text{OH}}$	Los ácidos grasos libres reaccionan con el metóxido para producir jabones no deseados, consumiendo nuestro catalizador.
Neutralización	$\underset{\text{Ácido}}{\text{H}_2\text{SO}_4} + 2\underset{\text{Catalizador}}{\text{NaOH}} \rightarrow \underset{\text{Sal}}{\text{NaSO}_4} + 2\underset{\text{Agua}}{\text{H}_2\text{O}}$	Es una reacción que utiliza ácido para neutralizar el excedente de catalizador.

Tabla 2.3. Reacciones involucradas en la producción de biodiesel. [12]

Como se puede apreciar, la presencia de ácidos grasos libres ocasiona un consumo del catalizador, lo cual se va a reflejar en una disminución de la velocidad de la transesterificación y en una tasa más baja de conversión. La presencia de agua lleva a la formación de esos ácidos grasos libres, por lo cual es sumamente importante estar libre de ella.

Una opción para asegurarse de no tener agua presente sería elevar la temperatura del aceite a 100°C antes de la reacción aunque esto requeriría adicionar más energía térmica al proceso, pues un flash requerirá demasiada energía mecánica.

CAPITULO III

ELABORACIÓN DE LOTES DE BIODIESEL EN LA PLANTA PRE-PILOTO

Como parte de las actividades previas a la construcción de la planta piloto y con el objetivo de aprender la técnica de elaboración del biodiesel se hicieron lotes de 20 l de biodiesel en una planta pre-piloto, ubicada en el laboratorio de Ing. Química del ITESM Campus Monterrey.

Se elaboraron varios lotes de biodiesel siguiendo las diversas rutas que se pueden apreciar en el siguiente diagrama esquemático (Fig. 3.1) siguiendo el protocolo del anexo 2.

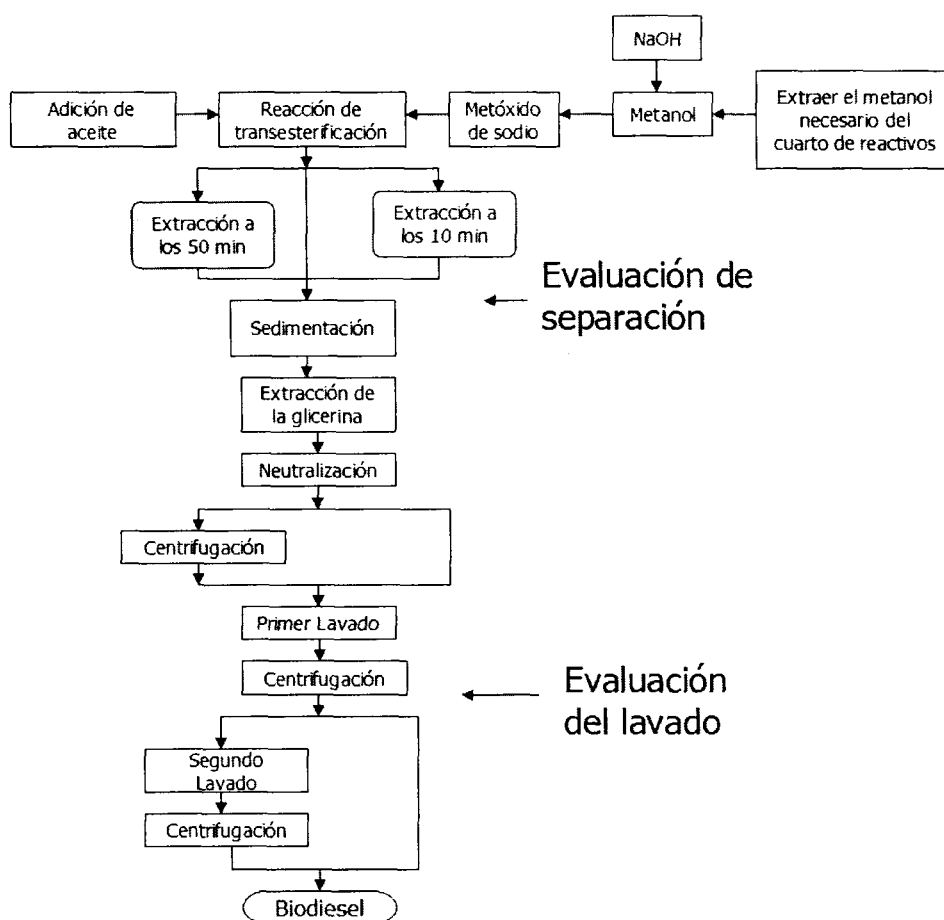


Figura 3.1. Diagrama esquemático de experimentos realizados.

El objetivo de usar distintos métodos para separar las fases después de la reacción fue evaluar la efectividad de la separación y su influencia en el grado de conversión del proceso. Con la extracción temprana se busca impulsar el equilibrio de la reacción hacia el lado de los productos aumentando su eficiencia.

También se busca evaluar la influencia del número de lavados en la calidad del producto final, pues es deseable reducir la cantidad de agua utilizada en el proceso. Con la centrífuga se busca tener una separación más completa de la glicerina libre tras la reacción, así como liberarse de la mayor cantidad de agua posible después del lavado.

La planta pre-piloto fue construida por Javier Aranda, Michele Vurro y Nadhiely Martínez, en sus respectivas tesis se encuentra información al respecto. [8], [15]

3.1. Resultados

Una vez elaborados los lotes fue necesario contar con un análisis de la calidad del biodiesel producido, para poder comparar los lotes producidos mediante los diferentes caminos.

Los resultados de contenido de glicerina de las corridas de biodiesel realizadas por la M.C. Nadhiely Martínez [8] se muestran en la siguiente tabla 3.1, el marcado fue el que estuvo más próximo más se acercó a cumplir la norma.

Experimento:				Fecha de elaboración:	Gtotal	Glibre	Glibre antes del lavado
1	Sólo sedimentación glic	Extracción glicerina desp. 50 min	Lavado-cent. 1 vez	22/04/2003	0.61	0.05	0.11
2	Sólo sedimentación glic	Extracción glicerina desp. 50 min	Lavado-cent. 2 veces	22/04/2003	0.60	0.04	0.11
3	Sólo sedimentación glic	Sin extracción	Lavado-cent. 1 vez	24/04/2003	0.60	0.04	0.18
4	Sólo sedimentación glic	Sin extracción	Lavado-cent. 2 veces	24/04/2003	0.46	0.02	0.18
5	Combinación sediment+centrif	Extracción glicerina desp. 50 min	Lavado-cent. 1 vez	03/04/2003	0.66	0.02	0.19
6	Combinación sediment+centrif	Extracción glicerina desp. 50 min	Lavado-cent. 2 veces	03/04/2003	0.62	0.00	0.19
7	Combinación sediment+centrif	Sin extracción	Lavado-cent. 1 vez	10/04/2003	0.71	0.08	0.19
8	Combinación sediment+centrif	Sin extracción	Lavado-cent. 2 veces	10/04/2003	0.69	0.00	0.19
9	Combinación sediment+centrif	Extracción glicerina desp. 10 min	Lavado-cent. 1 vez	10/05/2003	0.52	0.08	0.18
10	Combinación sediment+centrif	Extracción glicerina desp. 10 min	Lavado-cent. 2 veces	10/05/2003	0.50	0.06	0.19

Tabla 3.1. Resultados del análisis vía húmeda del contenido de glicerina.

Como se puede apreciar en la misma tabla 3.1, la extracción temprana favoreció una reducción en la glicerina total además de que el lavado mejora notablemente la calidad del biodiesel al reducir dramáticamente la glicerina ligada, la centrifugación tras la sedimentación no parece ser de utilidad y por el contrario agitación provoca una emulsificación indeseable del biodiesel que acaba con un aspecto turbio.

3.2. Conclusiones

En base a la experiencia con las corridas de biodiesel se cuenta ya con conocimientos para configurar la planta piloto en la que se puedan evitar los inconvenientes enfrentados en la planta pre-piloto. Se presentan las principales observaciones a continuación:

- Se presentó emulsificación debido al uso de una bomba de transferencia al pasar el biodiesel al tanque de lavado, se recomienda que la transferencia sea por gravedad.
- La centrifugación después de la sedimentación provoca también emulsificación del biodiesel, que adquiere un aspecto lechoso por lo que en lo personal no lo recomiendo.
- Usar la centrífuga para separar después del lavado parece ser una buena opción, puesto que ya se ha neutralizado, retirado la glicerina libre, catalizador y exceso de metanol no se presenta la emulsificación.
- La extracción temprana aparentemente lleva a una conversión mayor al mover el equilibrio de la reacción hacia el lado de los productos.
- Lavado incompleto por no tener un atomizador o "regadera", por esto la planta piloto deberá tener un rocío adecuado, se puede notar en los resultados que este proceso mejora notablemente la calidad del producto. Otra opción sería experimentar cambiar los papeles y que el biodiesel debidamente atomizado pase ascendiendo a través de un lecho de agua.

- Material de seguridad insuficiente, se deberá contar con los equipos adecuados para el manejo de los materiales peligrosos y el equipo personal de seguridad adecuado. (Gafas selladas, mascarar, guantes, etc.)

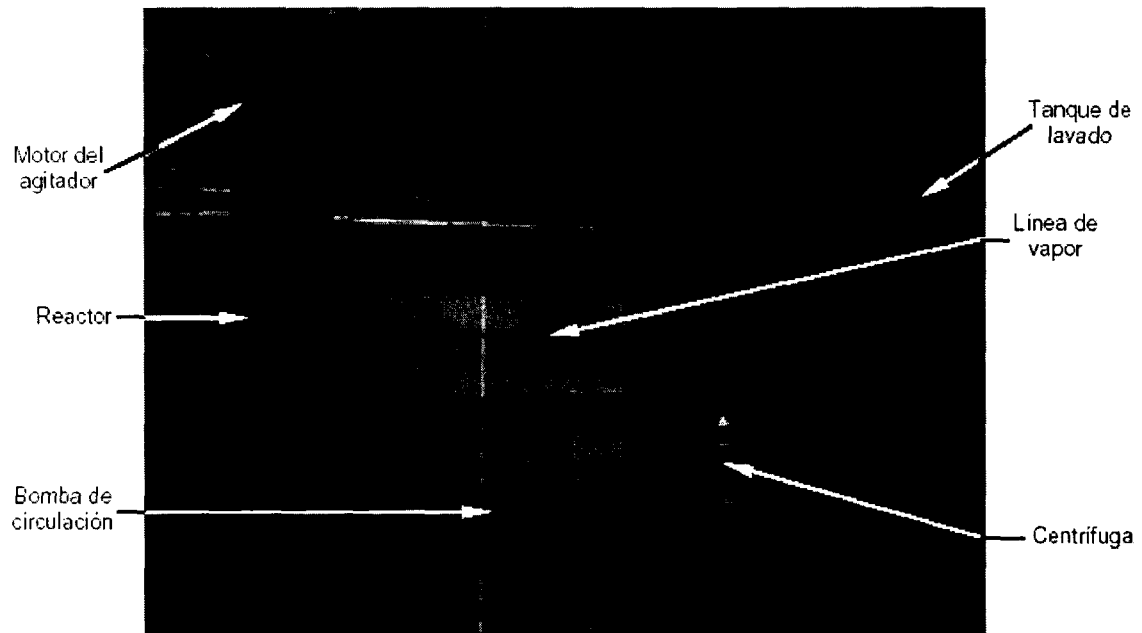


Figura 3.2. Planta pre-piloto

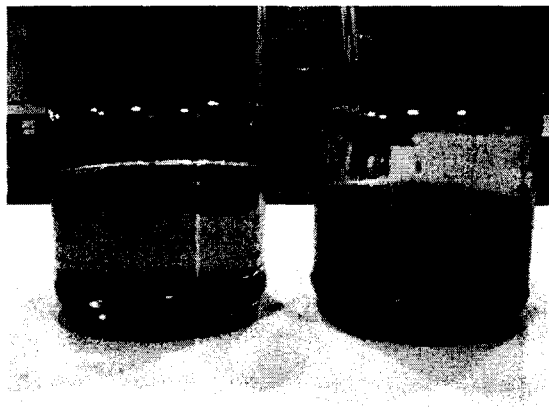


Figura 3.3. Muestras de biodiesel producido

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE LA PLANTA Y PROCESOS

4.1. Inventario de espacios y materiales

Antes de comenzar el diseño de la planta piloto fue necesario realizar un inventario de los espacios, materiales y servicios con los que se cuenta.

La identificación de las rutas de accesos de materiales también fue un factor importante a considerar.

Se cuenta con:

- Un área de 13 m² repartidos en 3 niveles en el laboratorio de Ing. Química.
- Un reactor con capacidad de 250 litros.
- Resistencias para el calentamiento del reactor.
- Dos tanques de acero inoxidable con fondo cónico con capacidad de 250 litros.
- Dos tanques de plástico con capacidad de 1100 litros.
- Un tanque de 200 l para la glicerina extraída.
- Una centrífuga, con flujo máximo de 300 l/h.
- Un reactor con capacidad de 45 litros ("arturito").
- Un agitador.
- Acceso a la red de vapor, aire comprimido, vacío, gas, agua, drenaje y electricidad.

Lo anterior ha sido proporcionado amablemente por el Depto. De Ing. química, a excepción de la centrífuga, el agitador y las resistencias que fueron adquiridos gracias al patrocinio de Grupo Energéticos.

4.2. Filosofía básica del diseño

El objetivo principal del diseño de la planta piloto es asegurar que los procesos requeridos para la producción de biodiesel, (los cuales se estudiaron en la fase de la planta pre-piloto) se lleven a cabo satisfactoriamente dentro de los espacios y con los materiales disponibles. Asimismo, se busca optimizar el tiempo de producción de cada lote para acercarnos en lo posible a la dinámica de un proceso industrial.

La rigidez de estructura fue un factor determinante en la distribución de los componentes, pues el objetivo fue minimizar el peso que esta soportaría dado que no fue diseñada para cargas excesivas.

Así, en base a la experiencia adquirida y los materiales y espacios existentes se encontró que la configuración más adecuada de la planta piloto es la que se muestra a continuación en la figura 4.1.

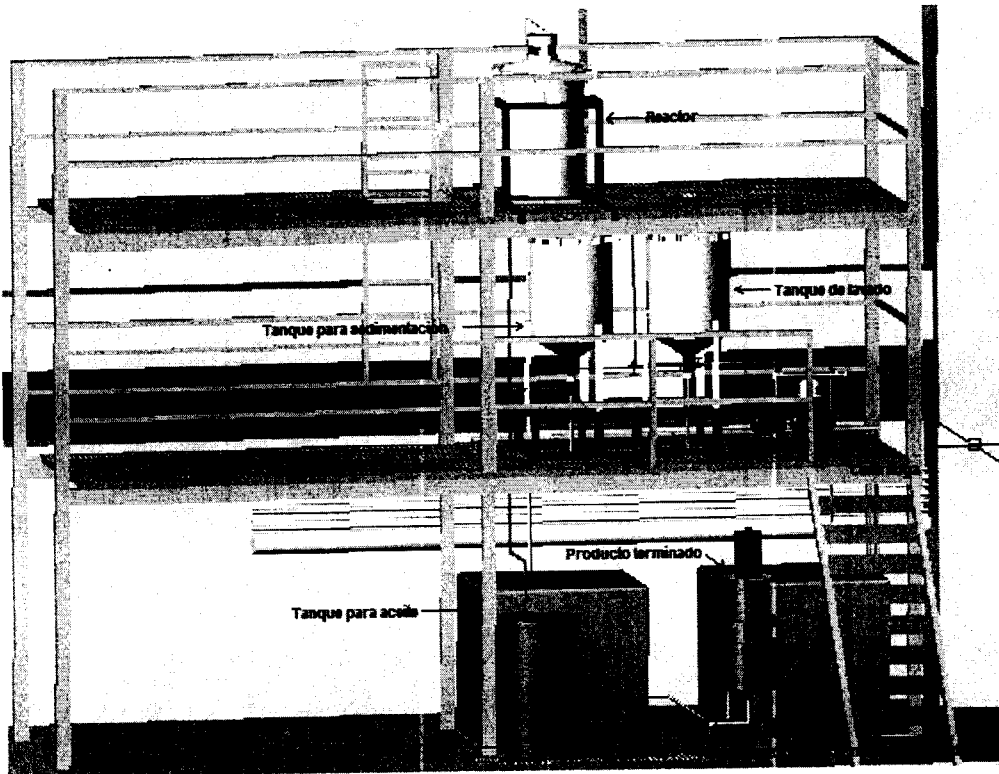


Figura 4.1. Configuración de la planta piloto.

Otro de los objetivos fue el manejo de más de una materia prima, por lo que se tiene un tanque de almacenamiento de aceite y otro con un serpentín de calentamiento para manejar materiales que son semisólidos a temperatura ambiente, como el sebo.

Así para producir biodiesel se pueden seguir los caminos que se muestran en el siguiente diagrama esquemático (figura 4.2) que permite tener una amplia gama de experimentación siguiendo los diversos caminos para encontrar el más adecuado para una determinada materia prima, probablemente no se sigan los mismos procesos para hacer biodiesel con aceite vegetal que con sebo de res.

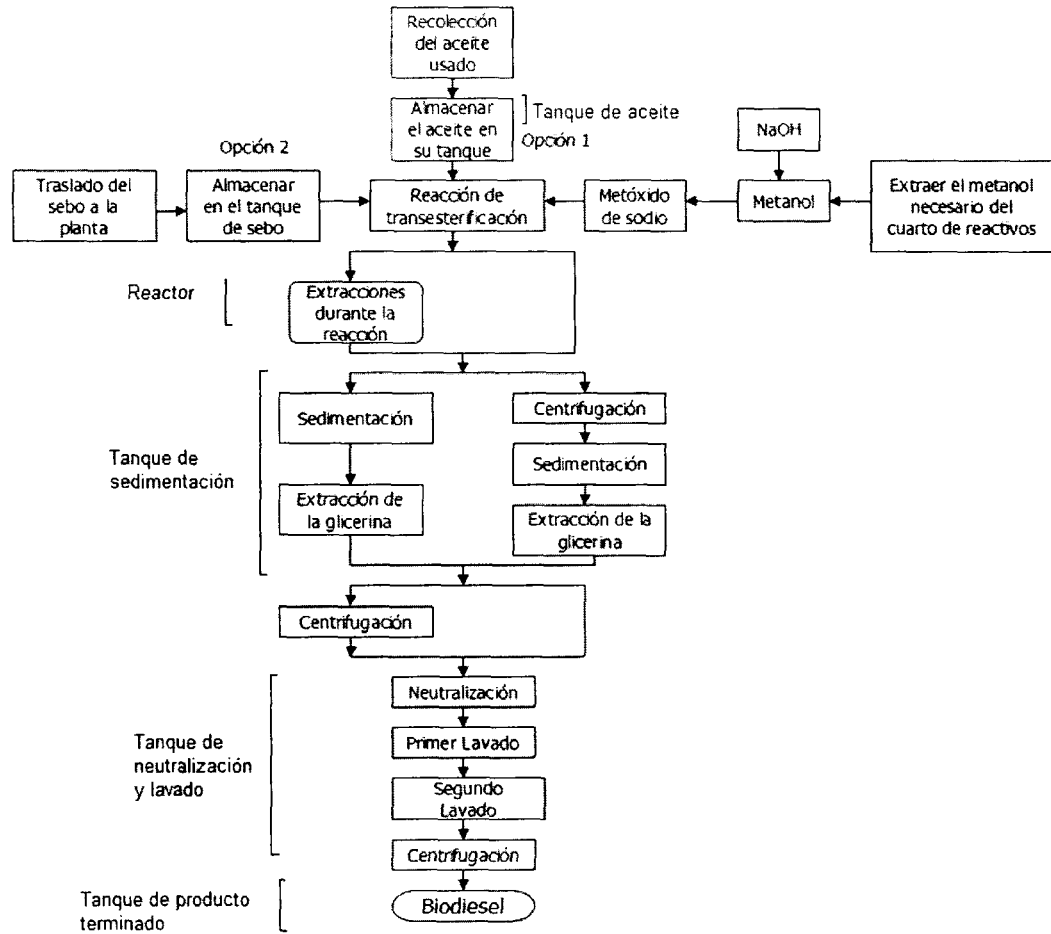


Figura 4.2. Diagrama de flujo de la producción de biodiesel en la planta piloto.

La planta piloto tiene la misma versatilidad que la planta pre-piloto para cambiar los procesos de separación y lavado con objeto de continuar la evaluación de los mismos. Además como se puede apreciar en el diagrama es posible cambiar la materia prima a utilizar.

4.3. Diseño del proceso de recepción y preparación de la materia prima

4.3.1. Recepción del aceite vegetal de reuso de las cafeterías del campus

Por el momento se va a trabajar con aceite usado de las cafeterías del tec, por lo que fue necesario planear la forma en que se lleva el aceite desde ellas hasta el tanque de almacenamiento de la planta piloto que está en el sótano de Aulas 7.

La solución fue adquirir un tanque de 250 l y construir una plataforma móvil para poder transportarlo de las cafeterías hasta la planta baja de aulas 7.

Debido a que no hay una rampa para bajar hacia el sótano, se instaló una tubería para que el aceite fluya desde la ventana hasta el tanque de almacenamiento y del tanque móvil a la ventana se utiliza una manguera.



Figura 4.3. Suministro del aceite a la planta

Servicios alimentarios ha decidido entregarnos el aceite reciclado los viernes en la cafetería centrales, así que basta llevar el tanque, recoger el aceite y volver a la planta para vaciarlo en el tanque de almacenamiento.

4.3.2. Recepción del sebo de res

En la planta hemos dispuesto un tanque con capacidad de 600 l que contará con un serpentín de calentamiento. De esta manera se podrá manejar materias primas semi-sólidas como el sebo de res, de cerdo, yellow grease, etc. En este momento no se cuenta con un protocolo para la recepción del sebo pues la infraestructura sería costosa. Así que para almacenarlo será necesario que el material sea llevado hasta la planta y vaciado directamente en el tanque.

4.3.3. Bombeo del aceite o grasa al reactor

Se deberá seleccionar la materia prima que se va a utilizar y abrir la válvula de succión que va al tanque deseado mientras que la del otro queda cerrada. El aceite o la grasa son bombeados hasta el reactor mediante una bomba de engranes. El reactor contará con un sensor de nivel que detendrá el bombeo cuando se alcance el volumen requerido, típicamente 200 l para esta planta, por el momento se tiene un tubo de nivel graduado para poder verificar visualmente el volumen de material en su interior.

Una vez que el aceite esté en el reactor se pueden encender el agitador y las resistencias para calentar el aceite hasta 60° antes de agregar el metóxido de sodio.

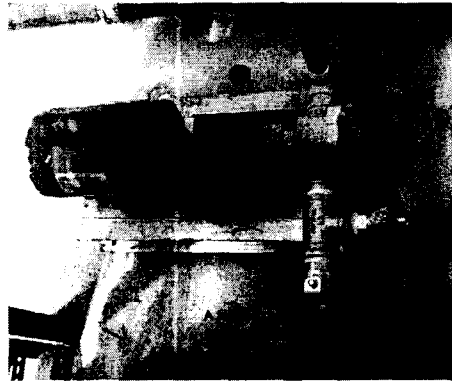


Figura 4.4. Bomba de transferencia de aceite o grasa.

4.3.4. Manejo del metanol y preparación del metóxido de sodio.

El manejo del metanol es una parte que requiere especial cuidado debido al riesgo para la salud que implica exponerse al contacto o a la inhalación de sus vapores.

El almacenamiento de metanol no se hace directamente en la planta piloto, sino en el cuarto de reactivos que se encuentra en la parte de afuera del mismo nivel.

Ahora, la tarea es transportar el metanol necesario para la corrida de biodiesel a un tanque donde se mezcla con el hidróxido de sodio con ayuda de un agitador y después subirlo hasta el reactor 6 metros arriba, sin que haya riesgos de contacto ni de vaporización del mismo.

Para la realización de esta parte del proceso se propusieron los siguientes pasos:

1. El metanol requerido se vacía del tanque proporcionado por el distribuidor almacenado en el cuarto de reactivos mediante una bomba manual para barricas a un recipiente de plástico con una capacidad aproximada de 50 l.

2. El recipiente se transporta en un portabultos hasta la parte inferior de la planta piloto. Ahí se le adiciona el hidróxido de sodio requerido y se enciende el agitador que el mismo recipiente tiene integrado.
3. Una vez que se ha disuelto el hidróxido de sodio, se apaga el agitador y se introduce el conducto de succión de la bomba de metanol, asegurando que quede hasta el fondo del recipiente para que sea posible bombear todo el metóxido.
4. El aceite debe bombearse al reactor y calentarse previamente a 60° , para que a continuación se encienda la bomba neumática que transfiere el metóxido de sodio requerido para la reacción.
5. Una vez terminada la transferencia, se apaga la bomba, se extrae el conducto de succión, se enjuaga con agua y se coloca en su lugar. El tanque ya vacío se cierra y se guarda en el espacio que le corresponde hasta que se vuelva a requerir.



Figura 4.5. Recipiente para metóxido.

4.4. Diseño del proceso de reacción y separación por sedimentación

4.4.1. Reacción

El tiempo típico estimado para la terminación de la reacción de la reacción ha sido de 100 minutos aunque esto puede variar si se desea experimentar con diferentes materias primas. Para poder repetir los experimentos de extracción durante la reacción realizados en la planta pre-piloto, el reactor cuenta con la opción de retirar glicerina en el momento que se desee.

Con objeto de optimizar los tiempos de producción una vez terminada la reacción se desocupará el reactor para dar paso a la siguiente reacción, transfiriendo el contenido

del reactor al tanque de abajo destinado para albergar el material durante el proceso de separación por sedimentación aún cuando se hayan efectuado extracciones del reactor durante la reacción con objeto de mover el equilibrio de la reacción al lado de los productos.

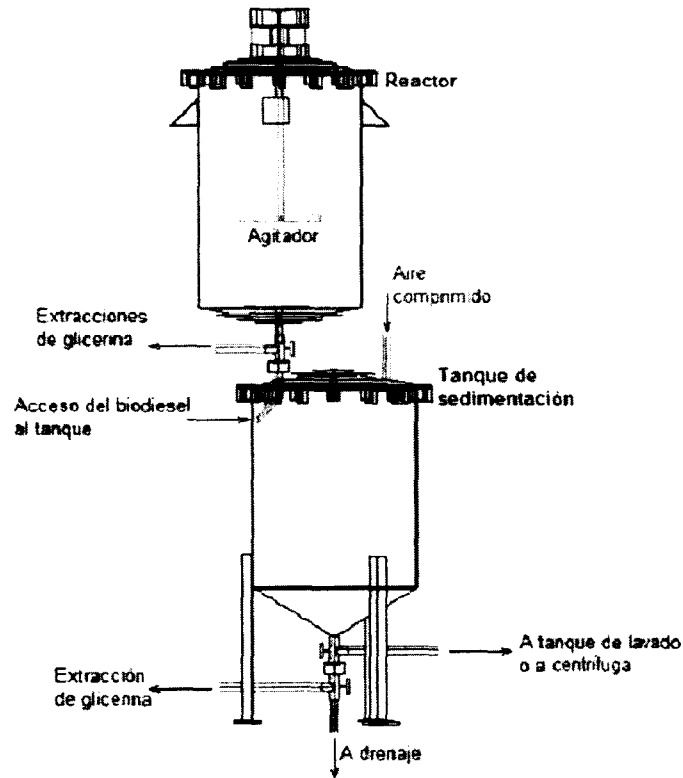


Figura 4.6. Proceso de transesterificación y separación

El tiempo que el biodiesel-glicerina permanezca el tanque de sedimentación deberá ser igual o menor que el tiempo de la siguiente reacción que se está llevando a cabo en el reactor, para optimizar los tiempos de producción.

4.4.2. Extracción de glicerina

Para las extracciones se cuenta con un conducto transparente a la salida de los tanques para poder verificar que solo se extraiga glicerina y no biodiesel. Esto es sencillo dado que la diferencia de tonalidad entre los dos fluidos es fácilmente identificada y al observar que empieza a fluir un líquido más claro, en ese momento se detiene la extracción.

Al salir del tanque de sedimentación el biodiesel se puede enviar al tanque de lavado o bien dirigirse directamente a la centrífuga para intentar separar la glicerina restante mediante un proceso que no involucre el uso de agua, lo cual es deseable para hacer

más ecológico el proceso al evitar la contaminación del vital líquido, aunque se han tenido algunos problemas de emulsificación con este método.

4.4.3. Transferencia del biodiesel del tanque de sedimentación al tanque de lavado

Para llegar al tanque de lavado que se encuentra al mismo nivel requerimos un método de bombeo que no involucre ningún tipo de agitación para el fluido, es decir, emulando la gravedad. Se tuvo que hacer esto porque no se contaba con un nivel más en la estructura, y la parte de abajo se debió destinar a la materia prima y producto terminado debido al peso excesivo de los mismos.

La solución a este problema consiste en crear una presión positiva dentro del tanque de sedimentación mediante la inyección de aire comprimido de la línea el cual desplaza al biodiesel forzándolo a subir por la tubería para pasar al siguiente tanque donde se efectuará la neutralización si se desea y después el lavado.

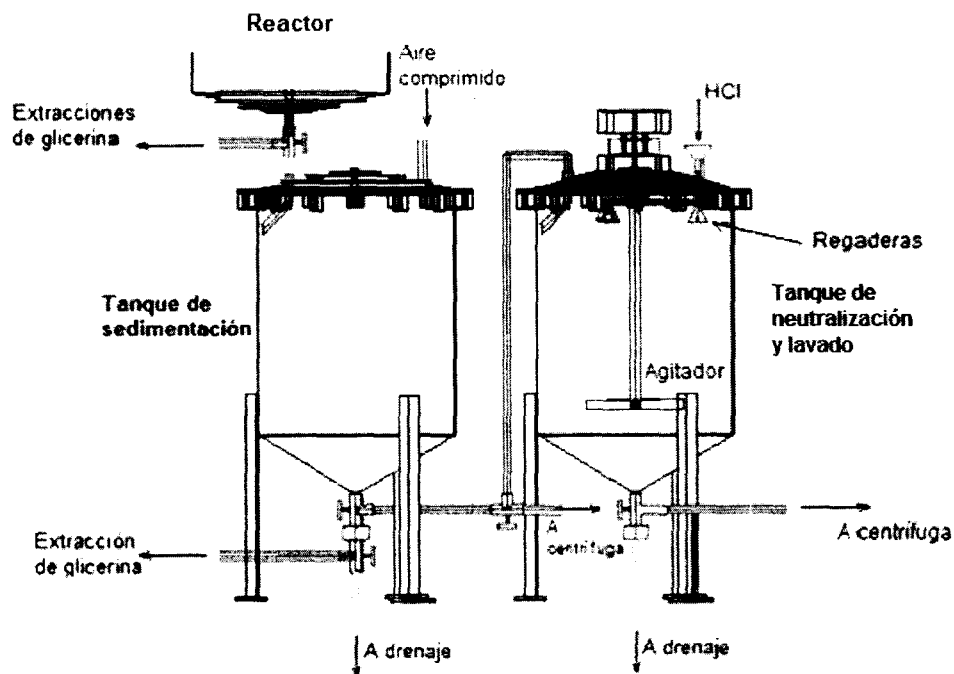


Figura 4.7. Tanques de sedimentación y lavado

4.5. Diseño del proceso de neutralización

Para obtener mejores resultados, decidimos realizar una neutralización del catalizador previa al lavado, con el fin de disminuir la posibilidad de la formación de jabones y al mismo tiempo usar menos agua para lograr un producto con pH neutro. Regularmente se retira el glicerol neutralizando solamente los ésteres, utilizando HCl concentrado (esto con el fin de usar un volumen pequeño de ácido). El procedimiento para calcular la cantidad de ácido requerida puede consultarse en el Apéndice IV de la tesis de la MC Nadhiely Martínez [8].

Esta operación se lleva a cabo en el tanque de lavado aprovechando el agitador, antes de iniciar el proceso de lavado y se añade el ácido por la entrada destinada para este fin en la parte superior del tanque.

4.6. Diseño del proceso de lavado

El lavado es una operación importante dentro del proceso, porque la forma en que se realiza así como las veces que se efectúa afecta en la calidad del biodiesel obtenido. [8]

El fin principal del lavado es eliminar las impurezas tales como el catalizador, el metanol excedente de la reacción (si no se hubiera recuperado en alguna operación previa), algunos jabones que se hayan formado y glicerina que no se haya separado en algún proceso anterior. [8]

Entre las desventajas que presenta es que un lavado realizado de manera incorrecta lleva a la emulsificación del biodiesel, disminuyendo en cantidades considerables la cantidad de producto obtenido; además, si no se separa de manera completa el agua que se utiliza para esta operación se presentarán problemas al momento de usar al biodiesel como combustible en un motor, por lo que debe eliminarse completamente. [8]

El número de lavados puede variar dependiendo de la cantidad de impurezas que se retiren en cada uno de ellos, pudiéndose tomar como referencia para finalizar el punto donde se tenga un agua con un pH neutro. Se reporta que después de cuatro lavados ya no se tiene un beneficio adicional y generalmente se lava con una cantidad equivalente al producto a tratar, aunque esto puede ser un inconveniente cuando se tienen cantidades muy grandes de metil-ésteres por el gasto de agua que se requiere.[8]

Las variables que deben considerarse para realizar un buen lavado son:

- a) Calidad del agua de lavado.
- b) Temperatura del agua de lavado.
- c) Mezclado del agua y el biodiesel.

a) Calidad del agua de lavado. En este punto se hace referencia a agua preferentemente destilada o agua blanda, es decir, que haya recibido algún tipo de tratamiento previo donde se haya retirado materia que pudiera estar disuelta en el líquido y que obstruya la purificación del producto sin embargo se pueden producir buenos resultados con agua común.

b) Temperatura del agua de lavado. En lo que respecta a esta variable, se observó que si se lava con agua caliente (aprox. 60°C) esta operación se facilita y se obtiene un mejor producto, evitándose la formación de pequeñas micelas que quedan suspendidas y que pueden tardar mucho tiempo en sedimentarse y que dan al biodiesel una apariencia turbia.

c) Mezclado del agua y el biodiesel. Esta acción es sumamente importante, puesto que si se realiza de manera violenta se produce la emulsificación mencionada ya, la cual dificulta la separación del agua y el biodiesel, quedando éste atrapado en pequeñas burbujas de aire así como rodeado de jabones que pudieron igualmente haberse formado al reaccionar los triglicéridos que aun puedan encontrarse presentes con el catalizador, lo cual produce un fluido de aspecto lechoso. Por ello se propone iniciarse el proceso rociando el agua en forma de gotas de pequeño tamaño de modo que el contacto entre el líquido de lavado y el líquido a lavar sea uniforme y breve y una vez que se haya añadido el agua debe procurarse que el agitador produzca poca turbulencia. [8]

Una opción interesante para realizar el lavado es la sugerida por el Dr. Joaquín Acevedo, que consiste en cambiar los papeles y en lugar de que el agua pase a través del biodiesel, el biodiesel será el que pase a través de un lecho de agua. (Fig. 4.7)

Aunque el implementar este proceso está fuera del alcance de esta tesis, me parece que adaptar este sistema a la infraestructura existente con fines de experimentación será sencillo dada la versatilidad de las conexiones de la planta.

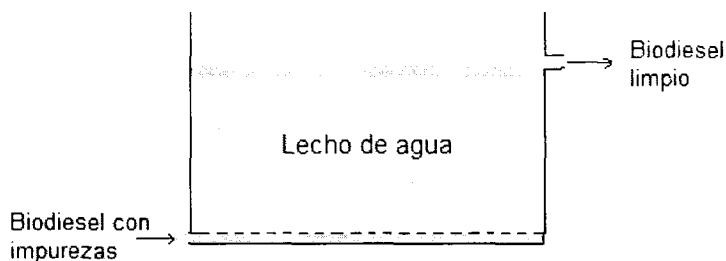


Figura 4.8. Proceso de lavado con un lecho de agua

4.7. Diseño del proceso de separación por centrifugación

Se ha utilizado una centrífuga para separar la glicerina que queda después de la sedimentación y para la separación de agua-biodiesel después de los lavados.

En el primer caso no se han visto resultados favorables pues la agitación producida por el equipo provoca que el biodiesel se emulsione y adquiera una apariencia lechosa, sin embargo se ha dejado la opción de pasar directamente del tanque de sedimentación a la centrífuga a petición de mi asesor, para realizar más pruebas al respecto.

En el caso de su utilización de la centrífuga para separar el agua después del lavado del biodiesel se han encontrado resultados más satisfactorios. Dado que el biodiesel ya está neutralizado y se ha retirado la glicerina libre, catalizador y exceso de metanol ya no se presenta la emulsión que se observó al centrifugar tras la sedimentación.

4.8. Entrega de producto terminado y subproductos

El biodiesel producido es almacenado en un tanque de plástico con capacidad de 1100 l, una vez que este se llena es posible bombear el biodiesel hasta el portón de la calle Luis Elizondo para su entrega.

Esto se hace mediante una bomba de engranes, la salida de la descarga se encuentra en una de las ventanas, ahí solo se acopla una manguera para transferirlo y así se evita tener permanente una tubería cruzando el pasillo de aulas 7, solo se conecta cuando se vaya a entregar producto.

La glicerina tendrá que ser retirada de la planta en tambos sobre un portabultos para comercializarla con alguna empresa que la pueda refinar pues está contaminada con metanol y catalizador. Por el momento no se cuenta con la infraestructura para purificarla en nuestra planta.

CAPÍTULO V**ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA PILOTO.****5.1. Análisis de requerimientos energéticos**

Esta sección se refiere a la producción y consumo de energía mecánica, eléctrica y calor dentro de los procesos.

Las siguientes tablas nos muestran los puntos importantes en la planta:

Tipo de energía	Fuente	Sección	Operación
Calor	Reacciones de transesterificación	Reactor principal	La reacción produce una pequeña cantidad de calor que incrementa ligeramente la temperatura.
Calor	Reacción de Neutralización	Tanque de lavado y neutralización	Debido a la escasa cantidad de NaOH reaccionando para neutralizarse esta cantidad de calor es despreciable.
Calor	Vapor proporcionado por la caldera.	Servicios	Se usa para proveer energía a los intercambiadores de calor.
Neumática	Aire comprimido suministrado por la línea.	Servicios	Para los procesos que requieren aire comprimido en la planta.
Electricidad	Red eléctrica	Alimentación principal	Para los equipos.

Tabla 5.1. Fuentes de energía para la planta.

Tipo de energía	Consumidor	Sección	Operación
Electricidad	Resistencias eléctricas	Reactor principal	Se tienen 3 resistencias eléctricas de 3 KW c/u para elevar y mantener la temperatura de los reactantes en 60°C.
Electricidad	Motores de bombas y agitadores, controladores e iluminación.	Toda la planta	Se requiere para los procesos de transferencia y en las reacciones que conllevan agitación.
Calor	Intercambiadores de calor	Agua para lavado.	Se tiene un intercambiador de doble tubo.
Calor	Serpentines de calentamiento	Tanque de almacenamiento de sebo y separador de metanol-glicerina	Se debe mantener el sebo en estado líquido y evaporar el metanol de la glicerina.
Neumática	Tanque de sedimentación y bomba de metóxido	Bombeo de metóxido y de biodiesel a tanque de lavado	Para crear presión positiva dentro del tanque de sedimentación y para accionar la bomba neumática de metóxido
Mecánica	Bomba del tambo de metanol	Cuarto de reactivos	Se trata de una bomba manual de barricas para extraer el metanol requerido.

Tabla 5.2. Consumidores de energía en la planta.

5.2. Componentes

A continuación se especifican los componentes de la planta piloto, las claves de ubicación se refieren a la planta en que se encuentra cada uno (Ej. 1P: primer piso). Se indica también una descripción, su función, material de construcción y equipos auxiliares, así como una breve justificación de la selección.

Reactor principal

Ubicación:	3P
Descripción de la unidad:	Tanque de acero inoxidable con capacidad de 250 l con bandas de calentamiento
Función:	Albergar la reacción de transesterificación
Equipo auxiliar:	Agitador con motor operado con un variador de frecuencia, 3 resistencias eléctricas en forma de banda para calentamiento y sensores de temperatura y nivel.
Material:	Acero inoxidable
Justificación:	Resistente al calor y la corrosión (proveniente de los ácidos grasos libres y herrumbre), es un material clásico en este tipo de procesos y el costo es razonable (se obtuvo de forma gratuita).

Tanque de sedimentación

Ubicación:	2P
Descripción de la unidad:	Tanque de acero inoxidable con capacidad de 250 l con fondo cónico y cerrado herméticamente
Función:	Almacenar los productos de la reacción durante el tiempo de sedimentación y separación de fases, está cerrado herméticamente pues después de la sedimentación y extracción se le inyecta aire a presión para transferir el biodiesel al tanque de lavado.
Equipo auxiliar:	No aplica
Material:	Acero inoxidable
Justificación:	Resistente al calor y la corrosión (proveniente de los ácidos grasos libres y herrumbre), es un material clásico en este tipo de procesos y se obtuvo gratuitamente.

Tanque de neutralización y lavado del biodiesel

Ubicación:	2P
Descripción de la unidad:	Tanque de acero inoxidable con capacidad de 250 l con fondo cónico.
Función:	Albergar los procesos de neutralización y lavado del biodiesel
Equipo auxiliar:	Regaderas y agitador con motor operado con un variador de frecuencia.
Material:	Acero inoxidable
Justificación:	Resistente al calor y la corrosión, es un material clásico en este tipo de procesos y se obtuvo gratuitamente.

Tanque de almacenamiento del aceite

Ubicación:	1P
Descripción de la unidad:	Tanque cúbico con capacidad de 1100l.
Función:	Almacenar el aceite utilizado para producir biodiesel
Equipo auxiliar:	Bomba de transferencia para subir el aceite hasta el reactor.
Material:	Plástico, envuelto por una protección metálica.
Justificación:	Resistente a la corrosión, económico, en este caso también se obtuvo de forma gratuita.

Tanque de almacenamiento del producto terminado

Ubicación:	1P
Descripción de la unidad:	Tanque cúbico con capacidad de 1100l.
Función:	Almacenar biodiesel producido
Equipo auxiliar:	Bomba de transferencia para sacar el producto terminado hasta el portón de Luis Elizondo donde puede ser cargado a un vehículo de carga.
Material:	Plástico, envuelto por una protección metálica.
Justificación:	Resistente a la corrosión, económico, en este caso también se obtuvo de forma gratuita.

Centrífuga para separación

Ubicación:	2P
Descripción de la unidad:	Centrífuga TA 1-01-525 (westfalia separador) Velocidad máx. 9700 rpm. Volumen: 0.6 l Espacio para sedimentos: 0.3 l Peso del equipo con motor: 115 kg
Función:	Se ha utilizado experimentalmente para separar glicerina libre después de la sedimentación y para separar el agua y el biodiesel después del lavado.
Equipo auxiliar:	Motor trifásico de corriente alterna 0.55 KW y 1750 rpm @ 60 Hz
Material:	Acero vaciado y acero inoxidable
Justificación:	Con este equipo se busca reducir los tiempos de producción del biodiesel al separar mediante este equipo en vez de hacerlo mediante gravedad.

Tanque para metóxido de sodio

Ubicación:	Móvil sobre un diablito.
Descripción de la unidad:	Tanque de 50 l de capacidad.
Función:	Contener el metanol y funcionar como reactor para mezclarlo con el catalizador
Equipo auxiliar:	Un agitador con un pequeño motor monofásico de 110V. Un diablito para su transporte del cuarto de reactivos a la planta.
Material:	Plástico.
Justificación:	Resistente a la corrosión, económico y versátil, evita el contacto con el metanol directamente.

Tanque para glicerina extraída de las corridas

Ubicación:	1P
Descripción de la unidad:	Tanque cilíndrico con capacidad de 200 l
Función:	Recibir la glicerina contaminada con el exceso de metanol.
Equipo auxiliar:	No aplica
Material:	Plástico
Justificación:	Resistente a la corrosión (proveniente de los ácidos grasos libres y herrumbre), muy económico.

Tanque para almacenar sebo de res

Ubicación:	1P
Descripción de la unidad:	Tanque plástico con capacidad para 600 l
Función:	Almacenar el sebo de res u otra materia prima que sea sólida o semisólida a temperatura ambiente.
Equipo auxiliar:	Serpentín de cobre con flujo de vapor para calentamiento del contenido del tanque para bombearlo fácilmente
Material:	Plástico
Justificación:	Resistente a la corrosión y de precio accesible.

Bomba para transferir el aceite o el sebo al reactor

Ubicación:	1P
Descripción de la unidad:	Bomba de engranes marca sentinel mod. SE-6
Función:	Transferir el aceite o sebo hasta el reactor.
Equipo auxiliar:	Motor monofásico de 1 HP
Material:	Acero vaciado
Justificación:	

Bomba para sacar el producto terminado

Ubicación:	1P
Descripción de la unidad:	Bomba de engranes marca sentinel mod. SE-6
Función:	Sacar el producto terminado al portón de Luis Elizondo para su despacho
Equipo auxiliar:	Motor monofásico 1HP
Material:	Acero vaciado
Justificación:	

Bomba para metóxido

Ubicación:	1P
Descripción de la unidad:	Bomba de doble diafragma operada por aire marca Wilden modelo P.025/PPPP/WF/TF/KTV
Función:	Transferir el metóxido de sodio al reactor
Equipo auxiliar:	No aplica
Material:	Plástico
Justificación:	Debido a la inflamabilidad del metanol y su bajo punto de vaporización se usa una bomba que no implique motores eléctricos ni agitación excesiva del fluido como ocurriría con una bomba centrífuga.

5.3. Hoja de seguridad de la planta Piloto

La siguiente tabla resume los principales riesgos que se pueden encontrar en la planta piloto así como medidas para reducirlos.

Riesgos		Medidas de reducción de riesgos
1. Riesgos por materiales	Materiales de riesgo	
Fuego y explosión	Biodiesel y metanol, riesgo debido a las cantidades manejadas.	Almacenamiento adecuado, ventilación adecuada para evitar acumulación de vapores. Evitar fuentes de chispa
Liberación de sustancias tóxicas o venenosas	Ácido sulfúrico y clorhídrico, KOH o NaOH en altas concentraciones. El riesgo es moderado pues las cantidades son pequeñas.	Almacenamiento adecuado de los materiales. Manejar los materiales con el equipo de seguridad apropiado (guantes, bata, gafas y máscara).
Altas temperaturas	El vapor y las superficies de las tuberías y los equipos que lo manejan, así como la superficie del reactor.	Aislante apropiado y letreros de precaución.
2. Riesgos para el operario	Causa del riesgo	
Quemaduras debido al contacto con equipo u tuberías calientes	Algunos equipos están a temperaturas y tuberías están a altas temperaturas. Riesgo moderado	Ropa y equipo de protección, aislamientos, regaderas de emergencia, rutas pre-establecidas para la atención médica.
Espacios reducidos (durante el mantenimiento)	El mantenimiento de la planta implica trabajar en espacios estrechos. Riesgo moderado.	Evitar trabajar una sola persona pues en caso de accidente no habría quien le prestara ayuda.
Exposición a gases o líquidos tóxicos (derrames o manejo normal)	Los operadores deben manejar el catalizador y el ácido. El riesgo es bajo si se usa el equipo de protección adecuado.	Ropa, guantes, gafas y mascarilla de protección deben ser usados durante el manejo de estos materiales.
Alturas (caídas) durante la operación o el mantenimiento	A veces hay que trabajar en los pisos superiores de la estructura. Riesgo moderado.	La plataforma tiene barandales en todos los niveles.
Ruido	El proceso incluye agitadores y bombas que generan ruido. Riesgo mínimo de daño al oído	Evitar estar cerca de los equipos cuando están operando.
Electricidad	El reactor es calentado mediante resistencias eléctricas y toda la estructura metálica esta en contacto con él	Un aterrizaje correcto de la estructura y de las bombas es primordial, así como una revisión periódica del estado de las resistencias de calentamiento.
3. Riesgos de operación y equipo	Equipo involucrado	
Recipientes bajo presión	Tanque de sedimentación e intercambiador. El riesgo es mínimo pues se manejan bajas presiones	Verificar periódicamente que esté correctamente asegurada la tapa del tanque para evitar que la presión la expulse.
Temperaturas extremadamente altas	El reactor debe tener funcionando adecuadamente su termostato.	Se cuenta con sensores de vapores, que indicaran cualquier evaporación de metanol por temperatura excesiva.
Motores quemados	Las bombas de engranes se pueden quemar si se encienden con la succión cerrada	Letreros de advertencia en el panel de control, se sugiere que se instale una válvula de seguridad en las succiones.
4. Riesgos ambientales	Evento	
Derrames o fugas	Derrames de metanol biodiesel, etc. son riesgos potenciales.	Mantener limpio el piso para poder identificar cualquier derrame y limpiar de inmediato.

Tabla 5.3. Riesgos y medidas de seguridad.

CAPÍTULO VI

CÁLCULOS TÉCNICOS

6.1. Intercambiador de calor para agua de lavado

Un intercambiador de calor de doble tubo consiste en un tubo que puede o no estar longitudinalmente aletado, colocado concéntricamente dentro de un tubo más grande.

Este tipo de cambiadores generalmente manejan flujos a contracorriente y deben ser considerados como alternativa a los cambiadores de carcasa y tubos cuando se tienen flujos pequeños, una diferencia de temperatura grande entre los fluidos y el flujo de calor es menor a 500 KW. Bajo esas condiciones, los cambiadores de carcasa y tubos no son económicamente viables.

Los tubos aletados se justifican cuando uno de los coeficientes de transferencia de calor de uno de los fluidos es la mitad o menos que el del otro, esto es común cuando por un lado se maneja un líquido de alta viscosidad o gas, y por el otro vapor o agua.

Como la dimensión de estos dispositivos tiende a ser pequeña, son adecuados para servicio a alta presión, las presiones que pueden manejar son mayores que las de los cambiadores convencionales de carcasa.

Debido a que en la planta piloto requerimos calentar agua para lavado y se cuenta con la línea de vapor se optó por diseñar un pequeño cambiador de doble tubo sin aletas para este fin. A continuación se presenta el cálculo del mismo:

La primera tarea fue conocer que condiciones de vapor tenemos en la línea y que condiciones esperamos del agua a calentar.

Condiciones del vapor

Se tiene vapor saturado a 6 kg/cm² absolutos lo que da una temperatura de 158°C (431K), y la caldera tiene una capacidad de 50 caballos caldera.

Condiciones del agua

Se desea obtener agua a 60°C (333K) y se estima un flujo deseado de 30 l/min (0.030 m³/min). Este flujo es solo un valor pensando en un tiempo razonable para llenar el tanque de 250 l, digamos 8-10 minutos.

Consideramos que el agua entra al intercambiador a 20°C.

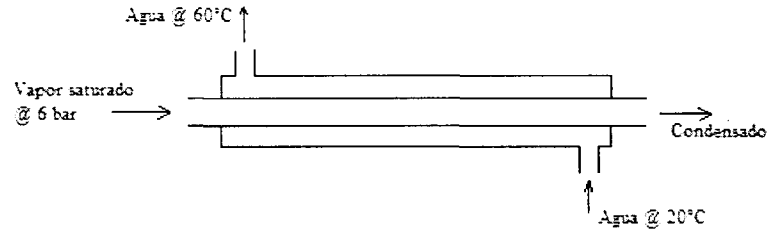


Figura 6.1. Condiciones del intercambiador de calor.

La tasa de calor esta dada por:

$$\dot{Q} = m_v * h_{fg} = m_a (h_{ao} - h_{ai}) \quad \text{Ec. 6.1.1}$$

Donde:

Q es el calor que se requiere transferir al agua.

m_v es el flujo másico de vapor requerido.

h_{fg} es la entalpía del vapor saturado que entra al cambiador

m_a es el flujo másico de agua

h_{ao} es la entalpía del agua al salir del cambiador (60°C)

h_{ai} es la entalpía del agua antes de entrar al cambiador (20°C)

Con la segunda parte de la ecuación obtenemos la tasa de calor

$$\dot{Q} = 0.030 \frac{m^3}{\text{min}} * \frac{1 \text{min}}{60s} * \left(250.529 \frac{KJ}{Kg} - 83.325 \frac{KJ}{Kg} \right) * \frac{1000Kg}{m^3} \quad \text{Ec. 6.1.2}$$

$$\dot{Q} = 85.102KW \Rightarrow 85KW$$

Ahora para calcular la masa de vapor despejamos de la ecuación de calor:

$$m_v = \frac{\dot{Q}}{h_{fg}} = \frac{85 \frac{KJ}{s}}{2085 \frac{KJ}{Kg}} = 0.04081 \frac{Kg}{s} * \frac{60s}{\text{min}} = 2.449Kg / \text{min} \quad \text{Ec. 6.1.3}$$

Para calcular el tamaño del intercambiador utilizamos la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * \Delta T_m \quad \text{Ec. 6.1.4}$$

Donde Q y A son el calor a transferir y el área de transferencia respectivamente.

ΔT_m es la media logarítmica de temperatura y U el coeficiente global de transferencia de calor que se calculan a continuación:

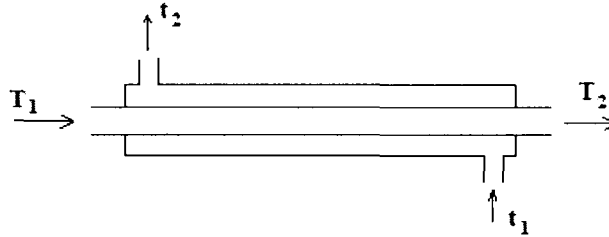


Figura 6.2. Esquema de temperaturas para calcular la media logarítmica.

Cálculo de la media logarítmica de temperatura

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad \Delta T_1 = T_1 - t_2 \quad \Delta T_2 = T_2 - t_1 \quad \text{Ec. 6.1.5}$$

$$\Delta T_1 = 431 - 333 = 98 \quad \Delta T_2 = 431 - 293 = 138$$

$$\Delta T_m = \frac{98 - 138}{\ln \frac{98}{138}} = 116.86$$

Y el coeficiente global de transferencia de calor se puede obtener mediante la siguiente fórmula, nótese que para simplificar omitimos los coeficientes de incrustación:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_v} + \frac{x}{k_t} + \frac{1}{h_a}} \quad \text{Ec. 6.1.6}$$

Donde:

h_v y h_a son los coeficientes convectivos de transferencia de calor del lado del agua y del vapor respectivamente que tomaremos como 1500 BTU/hr-ft²-°F (8517.39 W/m²-K) según se sugiere en el libro Procesos de transferencia de calor de Donald Q. Kern. [9]

k_t es la conductividad térmica de la tubería que para fierro galvanizado es 51.76 W/m*°C

x es el espesor de la tubería. Para la tubería de fierro de 3" de diámetro nominal que conseguimos el radio exterior es de 3.5" y espesor es (0.003 m)

Así sustituyendo en la ecuación 6.1.6 tenemos:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{8517.39 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{0.003m}{51.76 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{1}{8517.39 \frac{W}{m^2 \cdot K}}} = 3,415.6 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

El área de transferencia requerida será:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_m} = \frac{85,000W}{3415.6 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 116.86K} = 0.21295m^2 \quad \text{Ec. 6.1.7}$$

Y usando una tubería de 3.5" (0.0889 m) la longitud requerida es:

$$L = \frac{A}{\pi \cdot D} = \frac{0.21295m^2}{\pi \cdot 0.0889m} = 0.7624m \quad \text{Ec. 6.1.8}$$

Y considerando una eficiencia aproximada de 0.8 tenemos [11]:

$$L = \frac{0.7624m}{0.8} = 0.953m \quad \text{Ec. 6.1.9}$$

Y el tubo exterior lo dejamos en 5". [11]

Este intercambiador fue fabricado con fierro reciclado, se utilizó un tramo de 90 cm que se tenía al alcance y se utilizó una trampa de vapor que se tenía disponible en la planta pre-piloto y que se encontraba a la salida del reactor pequeño ("arturito").



Figura 6.3. Intercambiador de calor

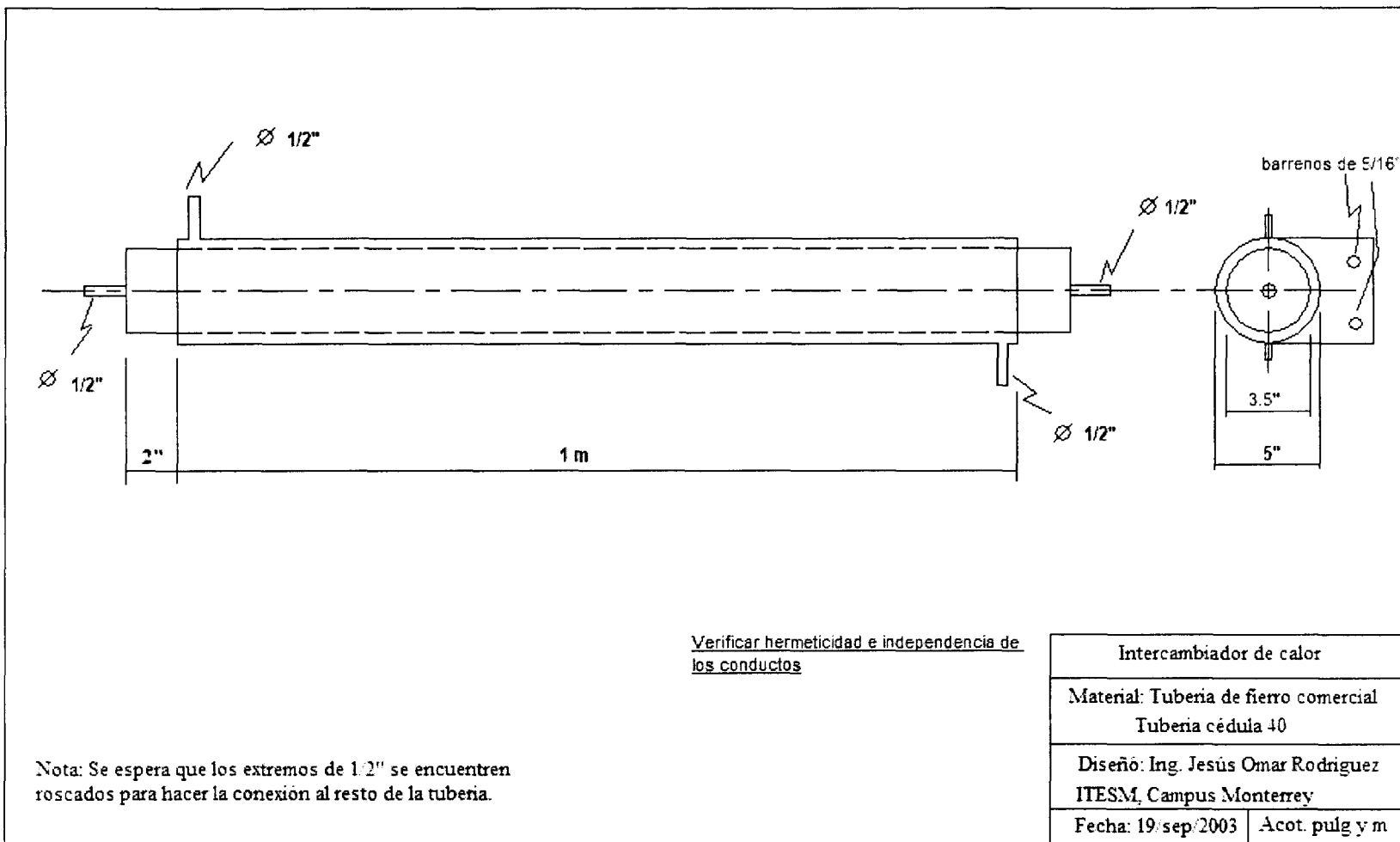


Figura 6.4. Dibujo técnico del intercambiador de calor

6.2. Bomba de transferencia para el reactor.

Para transferir el aceite que se utilizará en las reacciones de transesterificación al reactor que se encuentra en el tercer piso de la estructura es necesario un equipo de bombeo.

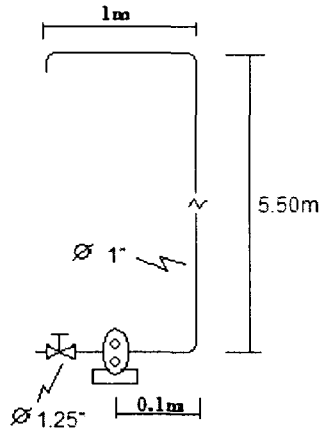


Figura 6.5. Diagrama de la tubería.

Líquido a bombear: Aceite de cocina a temperatura ambiente o sebo a 40°C

Gravedad específica (sg)= 0.9

Viscosidad dinámica (μ)= 0.120 Pa*s

Nota: Se hizo una prueba de laboratorio con un viscosímetro y encontramos que a 40°C la densidad y viscosidad del sebo es similar a la del aceite de cocina a temperatura ambiente.

Altura: 5.50m

Gasto: 25-80 l/min (un gasto supuesto para llenar el reactor en un tiempo razonable <10 min)

Consultando al distribuidor nos recomendaron la bomba de engranes marca Sentinel Mod. SE-6, pues era la que más se ajustaba a nuestras condiciones. La curva de este equipo se presenta en el anexo 3, y a continuación se muestran los cálculos que se efectuaron para verificar que estuviera adecuadamente dimensionada.

Con un motor 1 hp esperamos obtener un flujo de aprox. 80 l/min pues la bomba está construida para proporcionar un flujo de 60 l/min un 1300 rpm, mientras que el motor

que se le acoplará es de 1750 rpm. Puesto que el gasto varía linealmente con las revoluciones mediante una sencilla regla de 3 encontramos ese valor.

La ecuación de la energía se reduce eliminando los términos intrascendentes:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + w = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \sum F \quad \text{Ec. 6.2.1}$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + w = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \sum F \quad \text{Ec. 6.2.2}$$

Donde $\sum F$ se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\sum F = \frac{f \cdot L_e \cdot V^2}{D \cdot 2g} \quad \text{Ec. 6.2.3}$$

El gasto en m³/s será:

$$Q = 80 \frac{l}{\text{min}} * \frac{1m^3}{1000l} * \frac{1\text{min}}{60s} = 133.333 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \quad \text{Ec. 6.2.4}$$

Para tubería de 1¼" de acero comercial el diámetro interior es de 1.38" (0.035052m) y el área es 1.495 pulg² (9.64514 x 10⁻⁴ m²) [10] y calculamos la velocidad:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{133.333 \times 10^{-5} m^3}{9.64514 \times 10^{-4} m^2} = 1.3823 \frac{m}{s} \quad \text{Ec. 6.2.5}$$

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{1.3823 \frac{m}{s} \cdot 0.035052m \cdot 900 \frac{kg}{m^3}}{0.120 Pa \cdot s} = 363.416 \quad \text{Ec. 6.2.6}$$

Dado que el flujo es laminar aplicamos la siguiente fórmula:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{363.416} = 0.1761 \quad \text{Ec. 6.2.7}$$

Para tubería de 1" de acero comercial el diámetro interior es de 1.049" (0.0266446m) y el área interior es 0.864 pulg² (5.57418 x 10⁻⁴ m²) [10] y calculamos la velocidad:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{133.333 \times 10^{-5} m^3}{5.57418 \times 10^{-4} m^2} = 2.3919 \frac{m}{s} \quad \text{Ec. 6.2.8}$$

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{2.3919 \frac{m}{s} \cdot 0.0266446 m \cdot 900 \frac{kg}{m^3}}{0.120 Pa \cdot s} = 477.99 \quad \text{Ec. 6.2.9}$$

Dado que el flujo es laminar aplicamos la siguiente fórmula:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{477.99} = 0.13389 \quad \text{Ec. 6.2.10}$$

Cálculo de pérdidas por accesorios

A continuación se calcula la pérdida en tubería por accesorios, los valores para longitud equivalente se obtuvieron de [10].

Accesorio	D	ft	k	Le (m)	No. de accesorios	Le (m)
Tuerca unión	1¼"	0.022	0.176	0.3	1	0.3
Niple RC	1¼"	0.022	0.176	0.3	4	1.2
Codo 45°	1¼"	0.022	0.352	0.65	1	0.65
Válvula de esfera	1¼"	0.022	0.066	0.12	1	0.12
"T" a 90°	1¼"	0.022	1.32	2	1	2
Reducción 1¼- 1"		0.022	0.78	0.65	1	0.65
Entrada a tubería	1¼"	0.022	0.78	1.4	1	1.4
					Succión	6.32
Niple RC	1"	0.023	0.178	0.22	1	0.22
Codo 90°	1"	0.023	0.69	0.8	3	2.4
Salida de tubería	1"	0.023	1	1.1	1	1.1
Tuerca unión	1"	0.023	0.178	0.22	1	0.22
					Descarga	3.94

Tabla 6.1. Pérdidas por accesorios en bombeo de aceite.

Y ahora si podemos calcular las pérdidas por fricción en la succión y descarga, la longitud es la suma de la longitud equivalente por accesorios más la longitud real de la tubería (aprox. 1m en la succión):

Así en la succión tenemos:

$$\sum F_{\text{succión}} = \frac{0.1761 * (6.32 + 1)m * \left(1.3823 \frac{m}{s}\right)^2}{0.035052m * 2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 3.5814m \quad \text{Ec. 6.2.11}$$

Y en la descarga:

$$\sum F_{\text{Descarga}} = \frac{0.13389 * (3.94 + 6.6)m * \left(2.3919 \frac{m}{s}\right)^2}{0.0266446m * 2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 15.444m \quad \text{Ec. 6.2.12}$$

Y así tenemos:

$$w = \frac{(2.3919m)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} + 5.5m + 3.5814 + 15.444m = 24.816m \quad \text{Ec. 6.2.13}$$

Esta altura de columna de aceite puede ser transformada a kg/cm^2 para que en la curva de la bomba podamos ver la potencia adecuada.

Sabiendo que $1 \text{ kg/cm}^2 = 10\text{m}$ de agua, multiplicamos la altura que obtuvimos por la densidad del aceite ($0.9 * 24.816\text{m} = 22.33\text{m}$).

Fácilmente vemos que eso es igual a 2.233 kg/cm^2

De hecho haciendo el cálculo riguroso (con una eficiencia de 0.8) observaremos que esta es la potencia requerida:

$$Pot = \frac{80 \frac{l}{\text{min}} * 24.816m * 900 \frac{kg}{m^3}}{6116 * 10^3 (0.8)} = 0.3651kW \Rightarrow 0.48971hp \quad \text{Ec. 6.2.14}$$

Pero de acuerdo a la curva de la bomba se optó por dejar un motor de 1 hp

6.3. Bomba de descarga de biodiesel

Se decidió utilizar una bomba similar a la anterior, así que puesto que ya tenemos el gasto y las velocidades solo nos resta calcular las pérdidas

La viscosidad del biodiesel es de aprox. $3.5 - 5 \text{ mm}^2/\text{s}$, tomando la máxima de $5 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) hacemos el cálculo.

Cálculo de pérdidas por accesorios

A continuación se calcula la pérdida en tubería por accesorios, los valores para longitud equivalente se obtuvieron de [10].

Accesorio	D	ft	k	Le (m)	No. de accesorios	Le (m)
Niple RC	1¼"	0.022	0.176	0.3	4	1.2
Reducción 1¼- 1"		0.022	0.78	0.65	1	0.65
Entrada a tubería	1¼"	0.022	0.78	1.4	1	1.4
					Succión	3.25
Niple RC	1"	0.023	0.178	0.22	1	0.22
Codo 90°	1"	0.023	0.69	0.8	4	2.4
Salida de tubería	1"	0.023	1	1.1	1	1.1
Expansión ½-1"		0.023	0.78	1.3	1	1.3
					Descarga	5.02

Tabla 6.2. Pérdidas por accesorios en descarga de biodiesel.

Y ahora si podemos calcular las pérdidas por fricción en la succión y descarga, la longitud es la suma de la longitud equivalente por accesorios más la longitud real de la tubería (aprox. 0.50m en la succión y 6.8m en la descarga):

Así en la succión tenemos:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{1.3823 \frac{m}{s} \cdot 0.035052m}{5 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 9,690.47 \quad \text{Ec. 6.3.1}$$

Dado que el flujo es turbulento, recurrimos al diagrama de moody [10] y se obtiene el factor $f = 0.033$

$$\Sigma F_{\text{succión}} = \frac{0.033 * (3.25 + 0.5)m * \left(1.3823 \frac{m}{s}\right)^2}{0.035052m * 2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.3438m \quad \text{Ec. 6.3.2}$$

Y en la descarga:

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{2.3919 \frac{m}{s} \cdot 0.0266446m}{5 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 12,746.24 \quad \text{Ec. 6.3.3}$$

Dado que el flujo es turbulento, recurrimos al diagrama de moody [10] y se obtiene el factor $f=0.031$

$$\Sigma F_{\text{Descarga}} = \frac{0.031 * (5.02 + 6.8)m * \left(2.3919 \frac{m}{s}\right)^2}{0.0266446m * 2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 4.01m \quad \text{Ec. 6.3.4}$$

Además debe haber alguna pérdida en la manguera que tendrá aprox. 15 m con un diámetro de una pulgada.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{133.333 \times 10^{-5} m^3}{\frac{\pi(0.0254m)^2}{4}} = 2.6313 \frac{m}{s} \quad \text{Ec. 6.3.5}$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{2.6313 \frac{m}{s} \cdot 0.0254m}{5 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 13,367.31 \quad \text{Ec. 6.3.6}$$

Dado que el flujo es turbulento, recurrimos al diagrama de moody con tubo liso [10] y se tiene que el factor $f=0.0275$

$$\Sigma F_{\text{Manguera}} = \frac{0.0275 * 15m * \left(2.6313 \frac{m}{s}\right)^2}{0.0254m * 2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 5.73m \quad \text{Ec. 6.3.7}$$

Y así tenemos:

$$w = \frac{(2.3919m)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} + 7m + 0.3438 + 4.01m + 5.73 = 17.375m \quad \text{Ec. 6.3.8}$$

Esta altura de columna de aceite puede ser transformada a Kg/cm² para que en la curva de la bomba podamos ver la potencia adecuada.

Sabiendo que 1 kg/cm² = 10m de agua, multiplicamos la altura que obtuvimos por la densidad del biodiesel (0.9 * 17.375m = 15.6375m).

Fácilmente vemos que eso es igual a 1.563 kg/cm²

De hecho haciendo el cálculo riguroso (con una eficiencia de 0.8) observaremos que esta es la potencia requerida:

$$Pot = \frac{80 \frac{l}{min} * 17.375m * 900 \frac{kg}{m^3}}{6116 * 10^3 (0.8)} = 0.2556W \Rightarrow 0.34287hp \quad \text{Ec. 6.3.9}$$

Pero de acuerdo a la curva de la bomba se optó por dejar un motor de 1 hp

6.4. Bomba de metóxido

Para bombear el metóxido se seleccionó una bomba neumática para evitar tener un motor que pudiese generar alguna chispa.

Se trata de una bomba de doble diafragma operada por aire marca Wilden modelo P.025/PPPP/WF/TF/KTV cuya curva se muestra en los anexos.

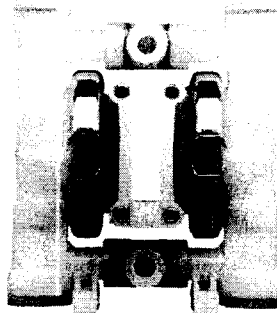


Figura 6.6. Bomba neumática para metóxido.

6.5. Soportes para reactor y tanques de lavado.

Debido a que la estructura no estaba planeada para soportar las cargas que se le impusieron con el reactor y los tanques de lavado, fue necesario construir soportes para que la carga pasara a las travesas y se corriera el riesgo de doblar las rejillas del piso debido la fuerza ejercida por el peso del reactor.

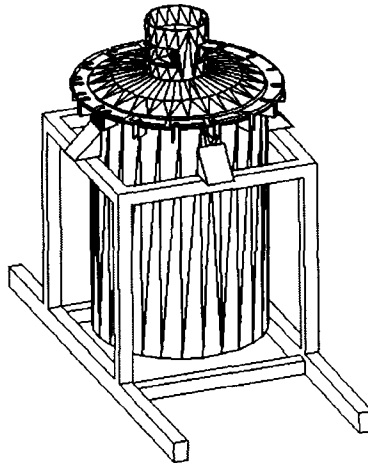


Figura 6.7. Soporte para el reactor.

De igual manera se fabricó una base especial para los tanques de sedimentación y lavado para el segundo nivel de la estructura.

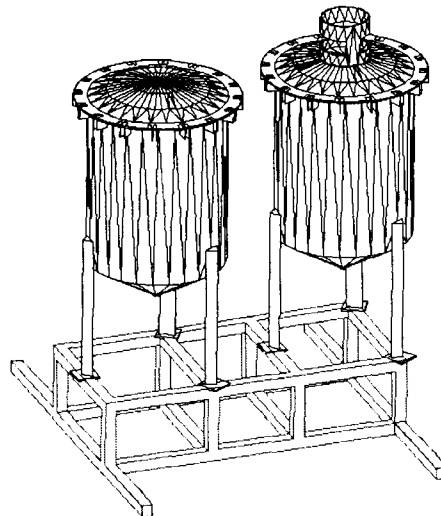


Figura 6.8. Soporte para tanques de sedimentación y lavado.

6.6. Construcción de carrito para recolección de aceite.

Lo primera idea fue conseguir una plataforma con ruedas que se comercializara comúnmente, pero las que se encontraron eran costosas.

Gracias a la buena relación que tenemos con el área de soldadura de planta física ellos amablemente accedieron a fabricarnos el carrito solicitando solo que se les entregara el material requerido.

El diseño fue sencillo, ellos propusieron utilizar perfil de 1½" para su construcción así como tubo de 1" de diámetro para las agarraderas, ambos calibre 30.

El carrito transporta un tanque con capacidad de 250 l.

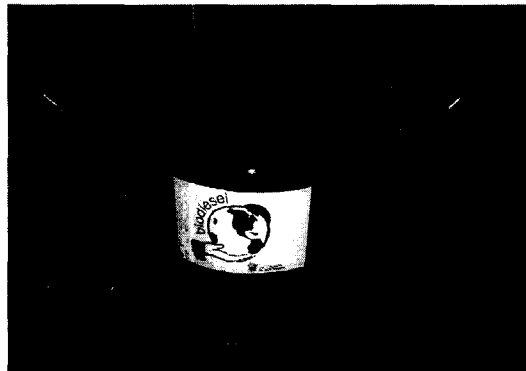
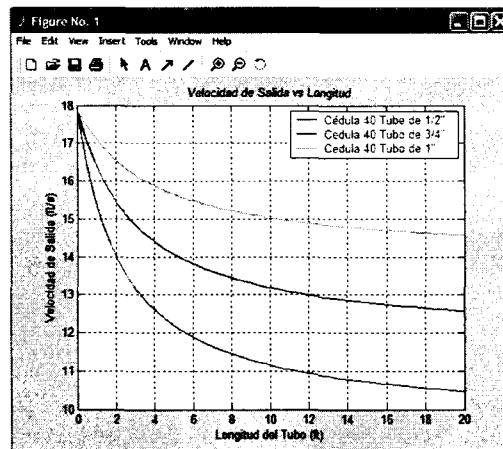


Figura 6.9. Carrito para la recolección de aceite en el campus.

6.7 Selección de tubería

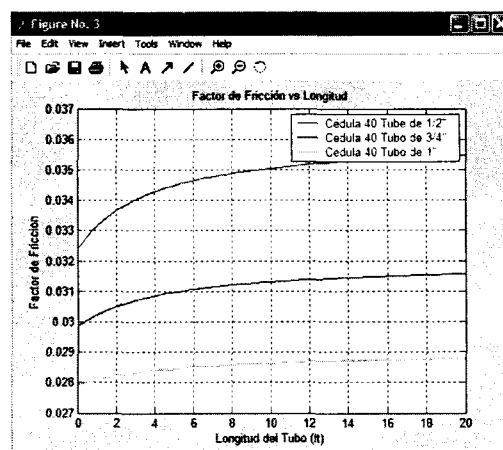
Se seleccionó tubería de hierro galvanizado por ser un material resistente, de fácil manejo para mantenimiento y económico. Para la selección del diámetro de la tubería se corrió un programa que nos permite ver la reducción de velocidad y el coeficiente de fricción a través de las tuberías seleccionadas (Gráficas 6.1 y 6.2).

Como se puede preciar la reducción de velocidad en la tubería de $\frac{1}{2}$ " es mucho más drástica que en la de $\frac{3}{4}$ " y 1".



Gráfica 6.1. Comportamiento de la pérdida de velocidad en la tubería

De la misma manera, el coeficiente de fricción es mayor para el menor diámetro, así que se decidió adquirir tubería de $\frac{3}{4}$ " pues la de 1" tiene el doble de costo. Solo para las bombas de engranes se instaló tubería de 1"



Gráfica 6.2. Comportamiento del factor de fricción en las tuberías

6.8. Cálculos térmicos del reactor

El aceite se calienta mediante unas resistencias de banda que se encuentran en la superficie exterior del reactor y que proporcionan 9 kW. (Fig. 6.10) Estas bandas ya estaban instaladas con anterioridad, y el objetivo de este cálculo es evaluar si proporcionarán el calor suficiente para calentar el aceite en un tiempo razonable.

A continuación se presenta el cálculo del tiempo requerido para el calentamiento del aceite.

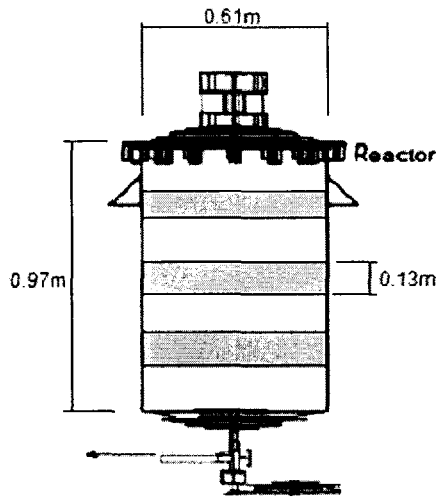


Figura 6.10. Reactor

Se consideró como área de transferencia de calor el área ocupada por las resistencias sobre la superficie del tanque, tanto para la transferencia hacia el tanque interior como para la disipación al ambiente:

$$A = \pi \cdot D \cdot ancho \cdot No_{resistencias} = \pi \cdot 0.61m \cdot 0.13m \cdot 3_{resist} = 0.747384m^2 \quad Ec. 6.8.1$$

El calor que generan las resistencias eléctricas es transferido al interior del recipiente y al medio exterior ambiente por lo que será:

$$\dot{Q}_{res} = U_{int} \cdot A \cdot (T_{res} - T_{flu}) + U_{ext} \cdot A \cdot (T_{res} - T_{amb}) = kW \quad Ec. 6.8.2$$

Donde:

Q_{res} = calor generado por las resistencias

U_{int} = Coeficiente global de transferencia de calor hacia el fluido dentro del tanque

U_{ext} = Coeficiente global de transferencia de calor hacia el medio ambiente

T_{res} = Es la temperatura en la superficie del elemento resistivo

T_{flu} = Es la temperatura del fluido en el interior del tanque

T_{amb} = Es la temperatura del medio exterior.

A continuación se calculan los coeficientes globales de transferencia de calor, tanto hacia el interior como hacia el exterior:

Cálculo de U_{int} .

$$U_{int} = \frac{1}{\frac{x}{k_{tanque}} + \frac{1}{h_{conv}}} = \frac{1}{\frac{7.9375 \times 10^{-3} m}{13 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{1}{5000 \frac{W}{m^2 \cdot K}}} = 1233.68 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad Ec. 6.8.3$$

Donde:

x = Es el espesor del tanque de acero

K_{tanque} = Es la conductividad térmica del acero inoxidable [9]

h_{conv} = Es el coeficiente convectivo de transferencia de calor hacia el aceite [9]

Cálculo de U_{ext}

Para este parámetro se presentan dos cálculos, uno con el tanque sin aislamiento y otro considerando un aislante térmico, así se evalúa la conveniencia de aislar este tanque.

Sin aislamiento

Sin aislamiento el coeficiente global de transferencia de calor se reduce al coeficiente convectivo de transferencia de calor hacia el aire ambiente obtenido de [9]:

$$U_{ext} = h_{conv} = 49 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Con un aislamiento de lana mineral de 1" de espesor

La conductividad de la lana mineral es K_{aisl} y el coeficiente convectivo de transferencia de calor hacia el aire es el mismo que en el anterior:

$$U_{ext} = \frac{1}{\frac{1}{h_{conv}} + \frac{y}{k_{aisl}}} = \frac{1}{\frac{1}{49 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{0.0254 m}{0.03461 \frac{W}{m \cdot K}}} = 1.3257 \frac{W}{m \cdot K} \quad Ec. 6.8.4$$

Ahora, retomando la ecuación 6.8.1 y despejando T_{res} se tiene:

$$T_{res} = \frac{\dot{Q}_{res}}{A \cdot U_{int}} - (T_{res} - T_{amb}) \frac{U_{ext}}{U_{int}} + T_{flu} = ^\circ C \quad Ec. 6.8.5$$

En la ecuación 6.8.2, el primer término es el calor que llega al fluido y el segundo el que se disipa a la atmósfera. Entonces el calor que llega al fluido en un instante dado será:

$$\dot{Q}_{flu} = \dot{Q}_{res} - A \cdot U_{ext} \cdot (T_{res} - T_{amb}) = kW \quad Ec. 6.8.6$$

Y el calor que se disipa a la atmósfera en un instante dado se puede obtener mediante la fórmula:

$$\dot{Q}_{amb} = \dot{Q}_{res} - \dot{Q}_{flu} = kW \quad Ec. 6.8.7$$

El calor requerido para elevar la temperatura un incremento ΔT de una masa m del fluido será:

$$Q = m \cdot Cp \cdot (\Delta T) = kJ \quad Ec. 6.8.8$$

Donde **Cp** es el calor específico del fluido y el incremento ΔT es el incremento de la temperatura del fluido que se presenta por la adición de la cantidad de calor Q que no es más que Q_{flu} durante un periodo de tiempo p que entre más pequeño sea, dará más precisión al resultado.

Así:

$$\Delta T = T_{flu}^{t+1} - T_{flu}^t \quad Ec. 6.8.9$$

$$Q = \frac{Q_{flu}}{p} \quad Ec. 6.8.10$$

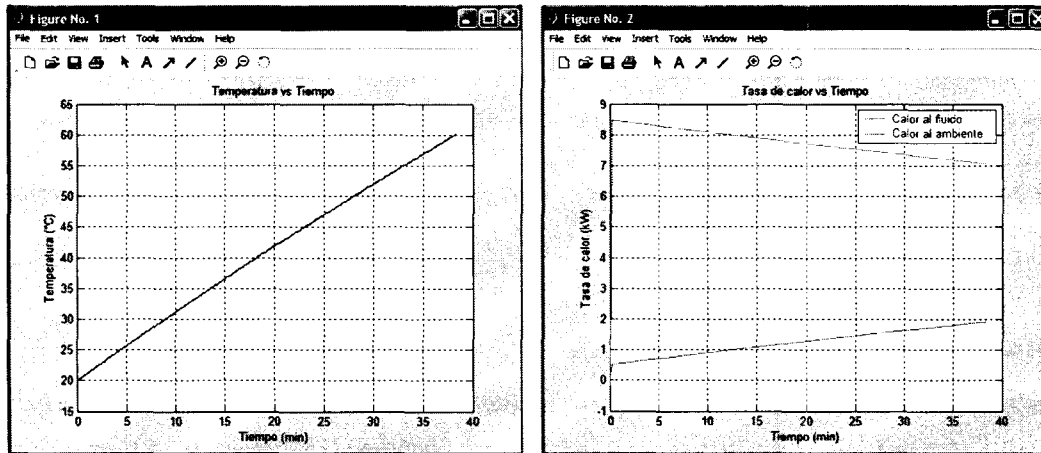
De la ecuación 6.8.8 y 6.8.9 se despeja la temperatura del fluido en el tiempo $t+1$:

$$T_{flu}^{t+1} = \frac{Q}{m \cdot Cp} + T_{flu}^t \quad Ec. 6.8.11$$

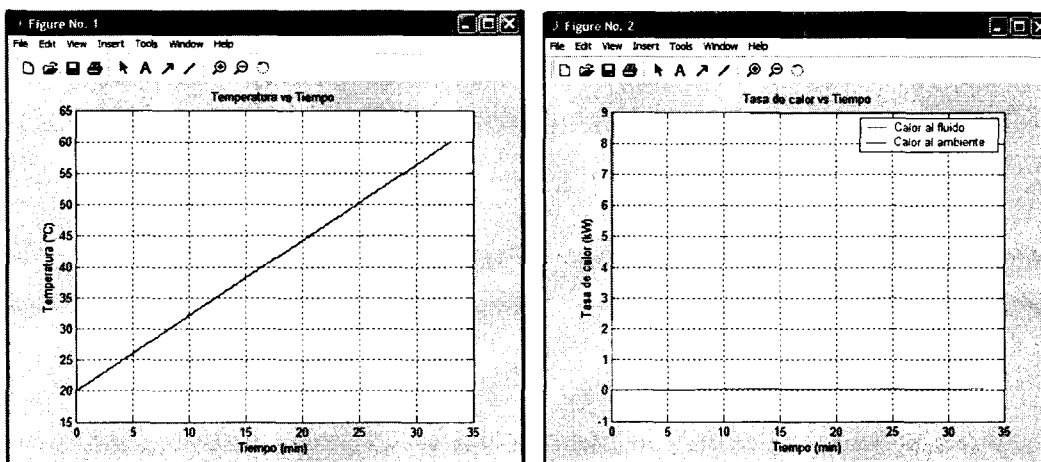
Con estas ecuaciones se creó un algoritmo computacional para resolver el problema y simular el comportamiento del sistema a través del tiempo.

Para nuestro caso, en el reactor se calentará aceite con un Cp de 2.47 kJ/kg-°C, de 20 a 40 °C, la temperatura que manejamos en esta simulación para el ambiente fue de 15°C y un volumen de 200 l de aceite que dada su sg=0.9 equivale a 180 kg.

Las resistencias proporcionan 9 kW y los coeficientes globales, fueron calculados anteriormente, así que con estos datos a continuación se presentan los resultados de la simulación.



Gráficas 6.3 y 6.4 Comportamiento térmico del reactor sin aislamiento.



Gráfica 6.5 y 6.6 Comportamiento térmico del reactor con aislante térmico.

Conclusiones

Como se puede apreciar el tiempo requerido para el calentamiento es muy grande aún con el aislante, así que en base a estos resultados se sugiere incluir en el reactor un serpentín de calentamiento con vapor que eleve la temperatura hasta 60°C. Una vez a esa temperatura se cierra el paso de vapor y las resistencias se encargan de mantenerlo a 60°C durante el tiempo que dure la reacción.

A continuación se calcula un serpentín para calentamiento y se estudia el comportamiento de la temperatura en el tiempo mediante otro pequeño programa en Matlab.

Se calcula la tasa de calor que se requiere para calentar el aceite de 20 a 60°C en un tiempo razonable, digamos 10 min (600 s).

$$\dot{Q} = \frac{m_{\text{aceite}} * C_{p_{\text{aceite}}} (T_{\text{final.act}} - T_{\text{inicial.act}})}{t} = \frac{180\text{kg} \cdot 2.47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (60 - 20^\circ\text{C})}{600\text{s}} \approx 30\text{kW} \quad \text{Ec. 6.8.12}$$

Y ahora se obtiene el área de transferencia de calor requerida y la longitud que tendrá el serpentín si usamos tubo de cobre de 3/8", la temperatura del vapor es 158°C la inicial del aceite 20°C.

El área se encuentra al despejarla de la siguiente formula:

$$\dot{Q} = U * A * \Delta T \quad \text{Ec. 6.8.13}$$

Así que primero se calcula el coeficiente de transferencia de calor:

$$U_{\text{serpentín}} = \frac{1}{\frac{1}{8517.39 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} + \frac{0.0012446\text{m}}{402.14 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{1}{5000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}}} = 3,120.05 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{Ec. 6.8.14}$$

Y el área requerida será:

$$A_{\text{serp}} = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T} = \frac{30,000\text{W}}{3120.05 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} * (158 - 20)} = 0.06967\text{m}^2 \quad \text{Ec. 6.8.15}$$

La longitud del serpentín usando tubo de 3/8"

$$L = \frac{A}{\pi \cdot D} = \frac{0.06967\text{m}^2}{\pi \cdot 0.0127\text{m}} = 1.74\text{m} \quad \text{Ec. 6.8.16}$$

El área exterior del recipiente es:

$$A_{\text{ext}} = \pi D H + \frac{\pi D^2}{4} = \pi \cdot 0.61\text{m} \cdot 0.97\text{m} + \frac{\pi (0.61)^2}{4} = 2.15\text{m}^2 \quad \text{Ec. 6.8.17}$$

Primero se estima calor recibido en el periodo de tiempo p :

$$Q = U_{serp} * A_{serp} * (T_{vapor} - T_{act}) \cdot p \quad \text{Ec. 6.8.18}$$

El calor es la suma del calor absorbido por el aceite más el calor perdido por convección al ambiente en el tiempo p :

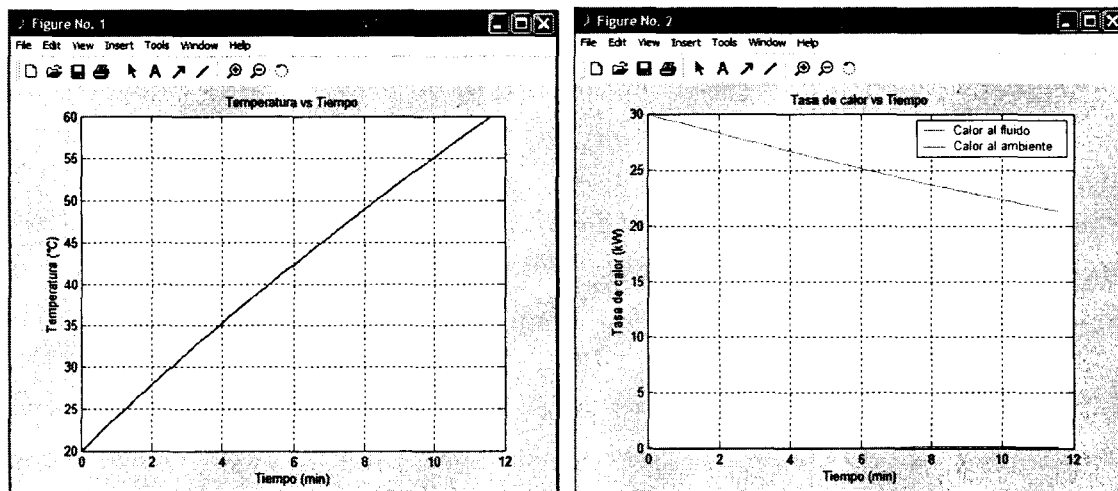
$$Q = m_{aceite} * Cp_{aceite} (T_{final.act} - T_{inicial.act}) + A_{exterior} * U_{ext} (T_{inicial.act} - T_{amb}) \cdot p = kJ \quad \text{Ec. 6.8.19}$$

y de la ecuación anterior se despeja $T_{final.aceite}$

$$T_{final.act} = \frac{Q - A_{exterior} * U_{ext} (T_{inicial.act} - T_{amb}) \cdot p}{m \cdot Cp} + T_{inicial.act} \quad \text{Ec. 6.8.20}$$

El coeficiente U_{ext} , es el mismo que se calculó anteriormente para el caso en que se consideró aislado el tanque, pues deberá estarlo para minimizar las pérdidas.

Así al correr el programa veremos que en realidad tardará 12 minutos en calentarlo a 60°C.



Gráficas 6.7 y 6.8 Comportamiento térmico del reactor con un serpentín de vapor para calentamiento.

Comentario.

Como se puede apreciar la tasa de transferencia al fluido decrece conforme la temperatura del mismo aumenta pues el gradiente, fuerza motriz de la transferencia de calor disminuye, esto sumado a las pérdidas al ambiente hacen que se requiera más tiempo del esperado para alcanzar la temperatura deseada.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de integrar los elementos de esta tesis que a su vez tienen su origen en los trabajos anteriores realizados sobre el tema, se ha construido la infraestructura requerida para la producción de lotes de biodiesel a escala piloto, solo resta que se empiece a operar rutinariamente y se espera que los detalles que puedan surgir en la operación de la planta sean cuestión de ajustes mínimos.

Sugiero que en breve se instale un sistema para recuperación de metanol pues esta materia prima se está desperdiciando y es relativamente fácil de recuperar mediante un evaporador flash. Otra oportunidad de recuperación económica es el implementar un sistema para purificar la glicerina que se obtiene en el proceso.

Espero que el presente trabajo sea de utilidad para la investigación que se desarrolla en el ITESM sobre energía renovable.

Recomiendo que no se descuide el equipo de la planta piloto y que se siga trabajando para encontrar los métodos más eficientes de conversión que permitan situar al biodiesel en una posición competitiva dentro del mercado energético.

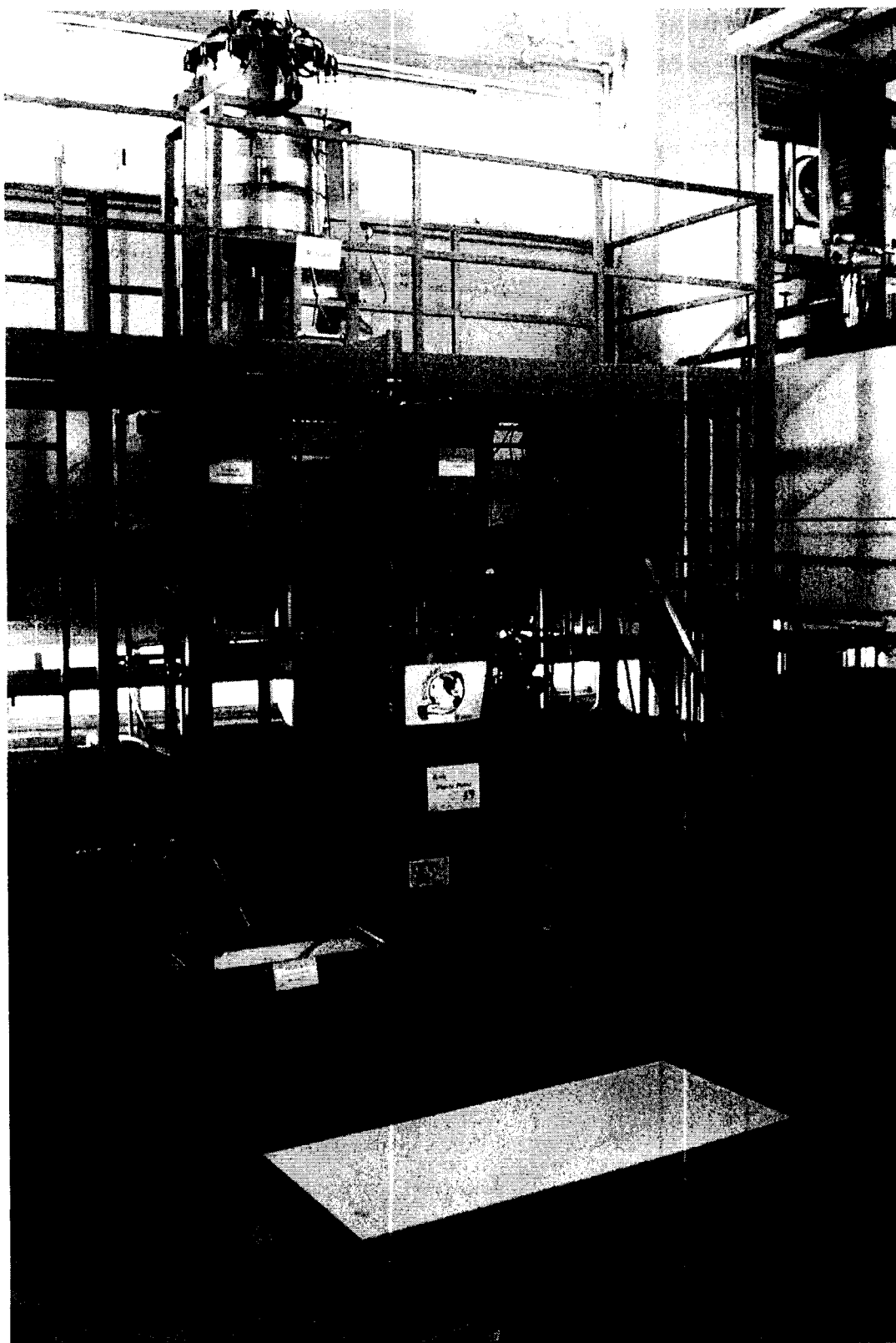


Figura 7.1. Planta piloto

REFERENCIAS

[1] Plant oils as fuels: present state of science and future developments: proceedings of the symposium held in Potsdam, Germany, February 16-18, 1997 / [edited by] N. Martini, J. Schell Berlin; New York: Springer, c1998

[2] Leon G. Schumacher, Jon Van Gerpen
Research needs resulting from experiences of fueling of diesel engines with biodiesel.
<http://web.missouri.edu/pavt0689/ASAEJVG1.htm>

[3] Leon G. Schumacher, J. Alan Weber, and Mark D. Russell
An alternative fuel for urban buses – biodiesel blends
<http://web.missouri.edu/pavt0689/NRELMR.htm>

[4] Oliver Probst, "El biodiesel como alternativa limpia y renovable para el transporte", Transferencia, No. 56, Tec de Monterrey, Campus Monterrey, Octubre de 2001

[5] Knothe, G., and R.O. Dunn, Biofuels Derived from Vegetable Oils and Fats, in Oleochemical Manufacture and Applications, edited by F.D. Gunstone and R.J. Hamilton, Sheffield Academic Press (Continum International Publishing Group), London, England, 2001, pp. 106–163.

[6] Dr. Oliver Probst, Director, Departamento de Física e Investigador, Centro de Estudios de Energía, ITESM Campus Monterrey
Producción y caracterización de metil-esteres para su uso en motores diesel a partir de mezclas de aceites con un contenido variable de aceite de coco.
Ing. José Luis Sánchez, Departamento de Ingeniería Agrícola, ITESM Campus Monterrey

[7] Juan Jerónimo Coronado Escalante.
Comparación y caracterización de las emisiones a la atmósfera producidas por la combustión del diesel, metil-ester de soya y de reuso (biodiesel).

[8] Nadhiely del Pilar Martínez Bello
Análisis cuantitativo de los procesos de conversión y separación para la obtención de metil-esteres (biodiesel) Monterrey, N.L. : 2003

[9] Kern, Donald Q. Procesos de transferencia de calor
México: CECSA, 1980

[10] División de ingeniería de CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías; traducción VALFISA México: McGraw-Hill, 1999

[11] W. M. Kays, A. L. London
Compact Heat Exchangers, third edition.
Mc Graw Hill Book Company

[12] -H B Solutions- Volume 1 Project Extended Executive Summary
Commercial Biodiesel Production

[13] Biodiesel recipe from Mike Pelly www.journeyforever.org

[14] http://www.uidaho.edu/bae/biodiesel/research/past_research.html#Biodiesel

[15] Aranda Alarcón, Javier
Estudio cinético de la reacción de transesterificación de aceite de soya
Monterrey, N.L. : 2003

[16]<http://www.hannover2000.net/expo2000hannover/es/tecnologia/proyectos/biodiesel/largo.htm>

[17] Alcantra, 2000

[18] Ma & Hanna, 1999

[19] Srivastava & Prasad, 2000

[20] Kusdiana & Saka, 2001

[21] United Nations Environment Programme World Meteorological Organization

[22] Mc Cabe, L. Warren; Smith, Julian C.; Harriott, Peter
Operaciones Básicas de Ingeniería Química Cuarta edición
Mc Graw Hill

AUXILIARES

- Programa QPro²-Unit conversion tool
- Matlab

ANEXOS

Anexo 1

Procedimiento para la elaboración de biodiesel en la planta pre-piloto.

Transesterificación.

1. Preparar la cantidad de metóxido de sodio requerida de acuerdo a los litros de aceite a usar. En caso de tratarse de aceite ya usado, verificar el valor ácido de éste para que al preparar el metóxido se incluyan los gramos de NaOH necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres.
2. Medir la cantidad de aceite que va a ser utilizada en la reacción.
3. Verificar que haya vapor en la línea. En caso de que la válvula principal esté cerrada, abrirla.
4. Purgar la chaqueta de vapor del reactor, abriendo las válvulas de descarga de condensado del mismo para eliminar el agua que pueda estar presente dentro.
5. Si es posible, realizar un lavado del reactor con biodiesel para asegurarse que no queden residuos de agua.
6. Añadir el aceite y encender el agitador del reactor.
7. Dejar pasar vapor al reactor abriendo la válvula por unos segundos, cuando se encuentre a una temperatura constante de 64°C, agregar el metóxido de sodio.
8. Mantener la reacción con agitación y verificando continuamente la temperatura (60°C) durante 100 minutos.
9. Apagar el agitador y cerrar las válvulas de vapor. Dejar sedimentar al menos media hora.
10. Descargar por el fondo del reactor la glicerina formada.
11. Neutralizar los productos de la reacción, con agitación por al menos 5 minutos.
12. Verificar que la centrífuga se encuentre perfectamente ensamblada.
13. Bombear el biodiesel al tanque de lavado.
14. En caso de que no se vaya a centrifugar el biodiesel antes de lavar pasar al punto 21.
15. Encender la centrífuga y abrir la válvula de descarga del tanque.
16. Colocar los recipientes colectores de las corrientes de descarga de biodiesel y glicerina.
17. Regular el flujo de salida del producto de modo que no se derrame líquido por la parte de atrás del equipo de separación; ajustar las contrapresiones de la centrífuga hasta que se observe por las mirillas que la fase ligera sale por el conducto derecho y la pesada por el conducto izquierdo.
18. Después de lograr la separación, apagar la centrífuga, cerrar las válvulas de descarga.
19. Cuantificar la cantidad de biodiesel y glicerina obtenidos.
20. Enviar el biodiesel de nuevo al tanque de lavado.
21. Agregar una cantidad equivalente en volumen de agua para su lavado.
22. Mantener en agitación por 10 minutos.
23. Transcurrido el tiempo señalado en el punto anterior, encender nuevamente la centrífuga y abrir la válvula de descarga del tanque.
24. Colocar los recipientes colectores de las corrientes de descarga de biodiesel y agua.
25. Regular el flujo de salida del producto de modo que no se derrame líquido por la parte de atrás del equipo de separación; ajustar las contrapresiones de la centrífuga hasta que se observe por las mirillas que la fase ligera sale por el conducto derecho y la pesada por el conducto izquierdo.
26. Después de lograr la separación, apagar la centrífuga, cerrar la válvula de descarga.
27. Cuantificar la cantidad de biodiesel obtenido.
28. Eliminar el agua residual.
29. Tomar una muestra de biodiesel para su análisis.
30. En caso de ser necesario, repetir el lavado.
31. Una vez finalizada la centrifugación puede hacerse pasar agua desde el reactor y a través de todo el sistema para liberarlo del producto de la reacción, el cual puede ser corrosivo para varios de los componentes de la planta.
32. Abrir la centrífuga para retirar los excedentes de glicerina que hayan quedado y limpiar los discos para evitar acumulaciones.
33. Ensamblar nuevamente la centrífuga.
34. Limpiar la centrífuga y el área de trabajo.

Anexo 2 Programas en Matlab

```
%Este programa permite observar el comportamiento de la temperatura y la ganancia de calor del fluido
%que es calentado dentro de un recipiente de acero inoxidable.
%Datos
% A= Area de transferencia de calor, en este caso es el área de las resistencias de banda
% Uint=Coficiente de transferencia de calor al interior del reactor
% Uext=Coficiente de transferencia de calor al exterior (ambiente)
% Tres=Temperatura en la superficie de las resistencias, este dato se utiliza internamente para los
%cálculos.
%Tact=Temperatura del aceite, se le da el dato de la temperatura inicial
%Qres=Calor proporcionado por las resistencias
%p=incrementos de tiempo
A= 0.747384
% Entrada de los coeficientes de transferencia.
Uint=input('Teclee el valor inicial de Uint kW/(m2-°C) == > ');
Uext=input('Teclee el valor inicial de Uext kW/(m2-°C) == > ');
% Entrada de los valores iniciales.
m=input('Teclee el valor de la masa a calentar kg == > ');
Cp=input('Teclee el valor del calor especifico del aceite KJ/(kg-°C) == > ');
Tact=input('Teclee el valor de la temperatura inicial del fluido °C == > ');
Ttext=input('Teclee el valor de la temperatura ambiente °C == > ');
Tmax=input('Teclee el valor la temperatura final del fluido °C == > ');
Qres=input('Teclee el valor del calor proporcionado por las resistencias kW == > ');
p=input('Teclee el valor de los incrementos en minutos == > ');
t=0;
i=1;
Qrs=0;
F=0;
Tres=1000;
while Tact<=Tmax;
k=1;
while (k^2>=0.01);
Trs= Qrs/(A*Uint) - (Tres-Text)*Uext/Uint + Tact;
k=Tres-Trs;
Tres=Trs;
end

Qact(i)= Qrs - A*Uext*(Tres-Text); %kW
G(i)=Qact(i)*p*60; %kJ
Qext(i)=Qrs - Qact(i); %kW
Qrs=Qres;
T(i)= G(i)/(m*Cp) + Tact;
Tact=T(i);
D(i)=G(i) + F;
F=D(i);
tg(i)=t;
t=t+p;
i=i+1;
end

t=t
figure(1)
plot(tg,T, 'b-','LineWidth',2)
title('Temperatura vs Tiempo')
xlabel('Tiempo (min)'),ylabel('Temperatura (°C)'),grid

figure(2)
plot(tg,Qact,'r-', tg,Qext, 'b-')
title('Tasa de calor vs Tiempo')
xlabel('Tiempo (min)'),ylabel('Tasa de calor (kW)'),grid
legend('Calor al fluido ','Calor al ambiente ')

figure(3)
plot(tg,D, 'b-','LineWidth',2)
title('Calor acumulado en el fluido vs Tiempo')
xlabel('Tiempo (min)'),ylabel('Calor al fluido (kJ)'),grid
end
```

%Este programa permite observar el comportamiento de la temperatura y la ganancia de calor del fluido que es calentado dentro de un recipiente de acero inoxidable con un serpentín de vapor

```
%Datos
% Aserp= Area de transferencia de calor del serpentín de calentamiento
% Aext= Area de transferencia de calor del recipiente hacia el ambiente
% Userp=Coefficiente de transferencia de calor del vapor al aceite
% Uext=Coefficiente de transferencia de calor al exterior (ambiente)
%Tact=Temperatura del aceite, se le da el dato de la temperatura inicial
%p=incrementos de tiempo
Aext= 2.15
Aserp=0.06967
Tvap=158
% Entrada de los coeficientes de transferencia.
Userp=input('Teclee el valor inicial de Userp kW/(m2-°C) == > ');
Uext=input('Teclee el valor inicial de Uext kW/(m2-°C) == > ');
% Entrada de los valores iniciales.
m=input('Teclee el valor de la masa a calentar kg == > ');
Cp=input('Teclee el valor del calor específico del aceite KJ/(kg-°C) == > ');
Tact=input('Teclee el valor de la temperatura inicial del fluido °C == > ');
Text=input('Teclee el valor de la temperatura ambiente °C == > ');
Tmax=input('Teclee el valor la temperatura final del fluido °C == > ');
p=input('Teclee el valor de los incrementos en minutos == > ');
t=0;
i=1;
Qrs=0;
F=0;

while Tact<=Tmax;
T(i)=Tact;
Q=Userp*Aserp*(Tvap - Tact);
Qs=Q*p*60;
Qex(i)=Aext*Uext*(Tact-Text);
Tact= (Qs - Aext*Uext*(Tact-Text)*p)/(m*Cp) + Tact;
Qac(i)=Q;
D(i)=Qac(i) + F;
F=D(i);
tg(i)=t;
t=t+p;
i=i+1;

end
t=t
figure(1)
plot(tg,T, 'b-', 'LineWidth', 2)
title('Temperatura vs Tiempo')
xlabel('Tiempo (min)'), ylabel('Temperatura (°C)'), grid

figure(2)
plot(tg,Qac,'r-', tg,Qex, 'b-')
title('Tasa de calor vs Tiempo')
xlabel('Tiempo (min)'), ylabel('Tasa de calor (kW)'), grid
legend('Calor al fluido ', 'Calor al ambiente ')

end
```



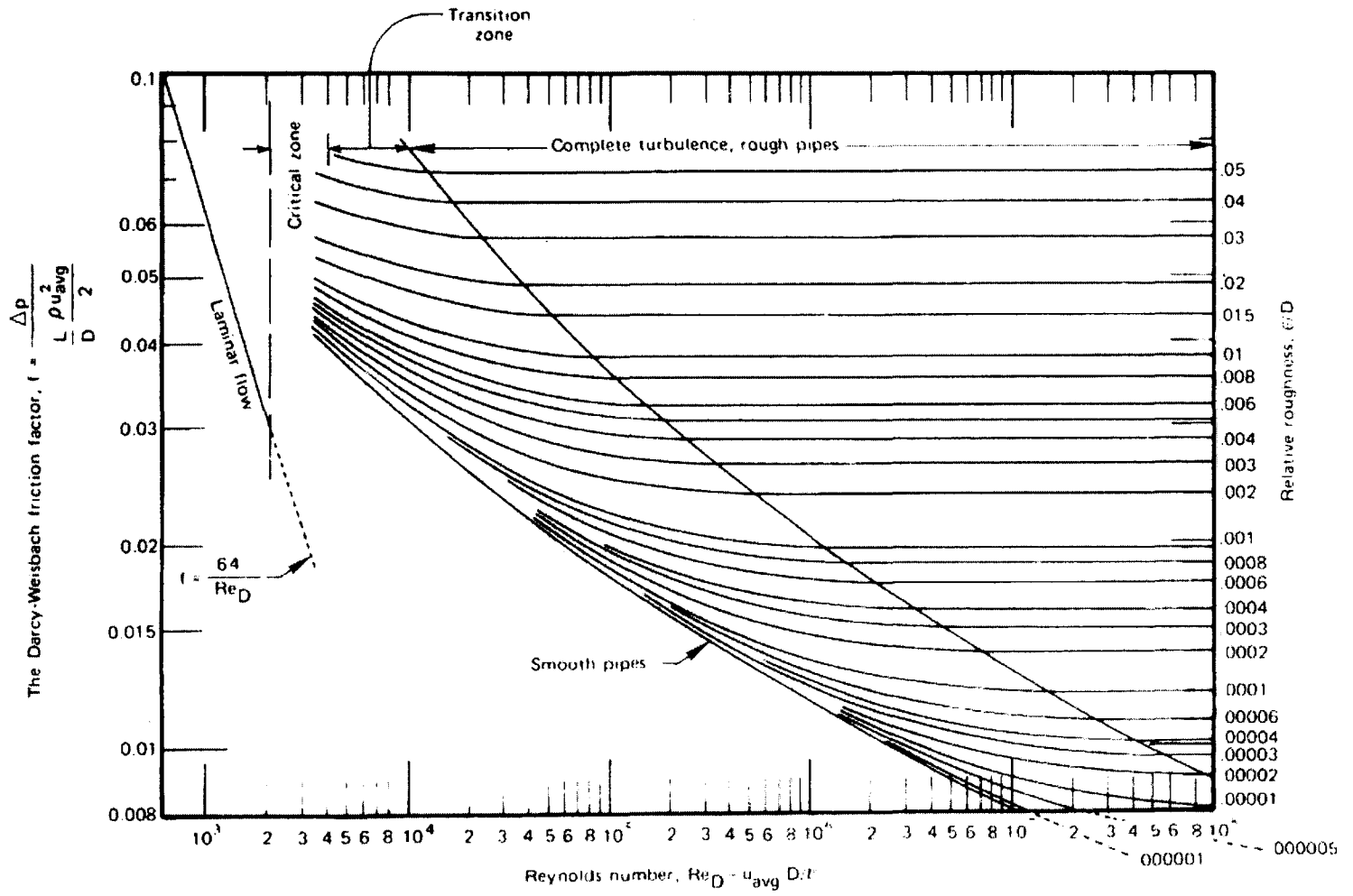
```

% El objetivo de éste problema es el de calcular y graficar
% la velocidad de salida de una tubería en un sistema de un tanque elevado
% El Problema es altamente no lineal por la dependencia del factor de fricción
% con la velocidad del flujo.
% La ecuación de interés es
%  $V^2=2g(h+L)/(1+fL/D)$ 
% Donde f es el factor de fricción y se utiliza la correlación de Swamee-Jain
% En éste problema se utilizan tres diferentes tipos de tuberías y se varía la
% longitud para determinar la velocidad VS la longitud del tubo.
% Inicio del programa.
clear all, close all, nfig=0;
global DD h LL g visc rough
% Datos iniciales del problema.
D={0.0518, 0.0687, 0.0874}; % Diferentes diámetros de tuberías (ft).
h=5; % Altura del tanque (ft).
g=32.2; % Aceleración de la gravedad (ft/s^2).
visc=5.38e-5; % Viscosidad cinemática del agua a 60°F (ft^2/s).
rough=1.5e-4; % Rugosidad de tubería de acero (ft).
NL=50; L=linspace(1/12,20,NL); % Variables dependientes (Longitud del tubo).
%
% Ciclo para hacer el cálculo con cada una de las tuberías.
ND=length(D);
V=zeros(NL,ND);
for n=1:ND
    DD=D(n);
    % Se utiliza la función fzero para resolver V para cada valor de longitud y diámetro.
    Vo=sqrt(2*g*h)
    L=L(1); V(1,n)=fzero('pipe_friction_1a',Vo);
    for i=2:NL
        LL=L(i); V(i,n)=fzero('pipe_friction_1a',V(i-1,n));
    end
end
%
% Se grafica el resultado de Velocidad
nfig=nfig+1; figure(nfig)
plot(L,V(:,1), 'r-',L,V(:,2), 'b-',L,V(:,3), 'g-', 'LineWidth', 2)
title('Velocidad de Salida vs Longitud')
xlabel('Longitud del Tubo (ft)'), ylabel('Velocidad de Salida (ft/s)'), grid
legend('Cédula 40 Tube de 1/2\"', 'Cédula 40 Tubo de 3/4\"', 'Cédula 40 Tubo de 1\"')
Re = zeros(NL,ND); f = zeros(NL,ND);
for n=1:ND
    Re(:,n) = V(:,n)*D(n)/visc; % Número de Reynolds
    RR = rough/D(n) % Rugosidad relativa
    f(:,n) = 0.25./(log10(RR/3.7 + 5.74./Re(:,n).^0.9)).^2; % Factor de fricción
end
% Se grafica el resultado de Número de Reynolds
nfig=nfig+1; figure(nfig)
plot(L,Re(:,1), 'r-',L,Re(:,2), 'b-',L,Re(:,3), 'g-', 'LineWidth', 2)
title('Número de Reynolds vs Longitud')
xlabel('Longitud del Tubo (ft)'), ylabel('Número de Reynolds'), grid
legend('Cédula 40 Tube de 1/2\"', 'Cédula 40 Tubo de 3/4\"', 'Cédula 40 Tubo de 1\"')
% Se grafica el resultado de Número de Factor de Fricción
nfig=nfig+1; figure(nfig)
plot(L,f(:,1), 'r-',L,f(:,2), 'b-',L,f(:,3), 'g-', 'LineWidth', 2)
title('Factor de Fricción vs Longitud')
xlabel('Longitud del Tubo (ft)'), ylabel('Factor de Fricción'), grid
legend('Cédula 40 Tube de 1/2\"', 'Cédula 40 Tubo de 3/4\"', 'Cédula 40 Tubo de 1\"')

% Función que se usa en el programa de factor de fricción
% Esta función evalúa  $F = V^2 - 2g*(h+LL)/(1 + f*LL/DD)$ 
% donde f es el factor de fricción utilizando la correlación
% de Swamee-Jain
function F = eqnfile(V)
global DD h LL g visc rough
Re = V*DD/visc;
RR = rough/DD;
f = 0.25/(log10(RR/3.7 + 5.74/Re.^0.9)).^2;
F = V^2 - 2*g*(h+LL)/(1 + f*LL/DD);

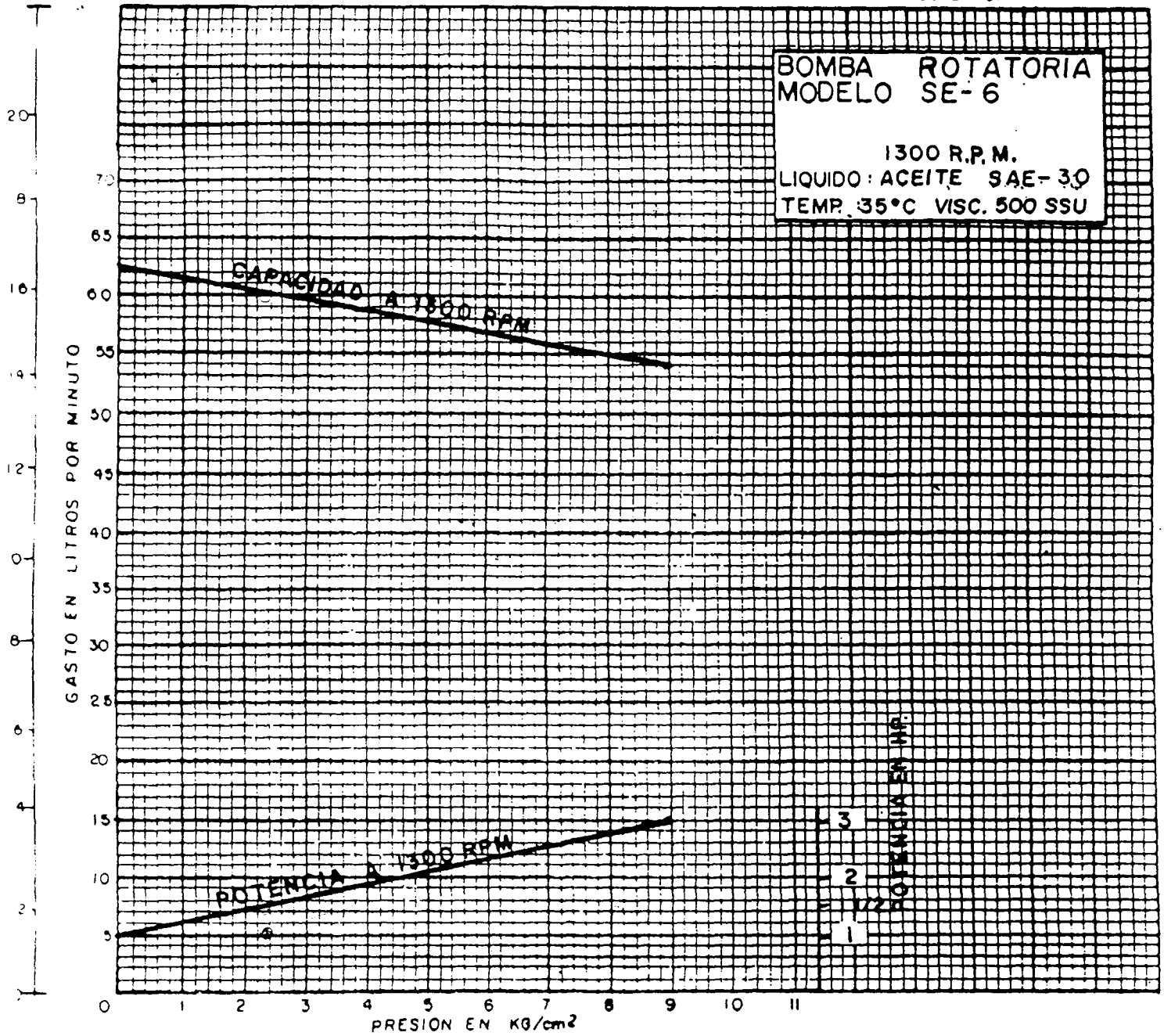
```

Anexo 3 Diagrama de Moody

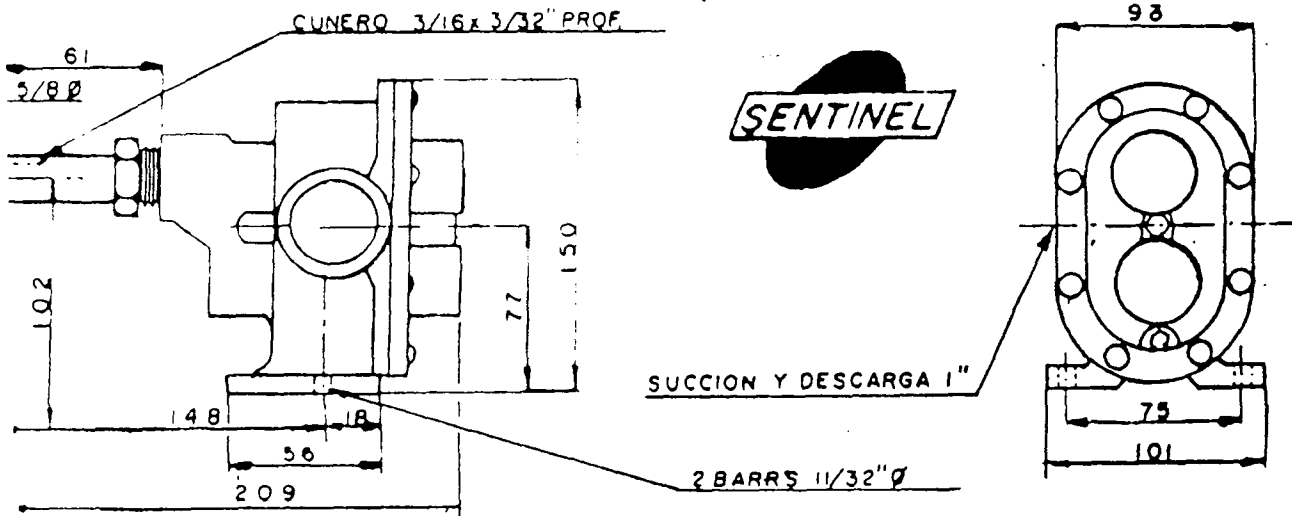


**BOMBA ROTATORIA
MODELO SE-6**

1300 R.P.M.
LIQUIDO: ACEITE SAE-30
TEMP. 35°C VISC. 500 SSU



10 20 40 60 80 100 120 140 160
PRESION EN LB/INCH²



P.025 Plastic Pump

FLOW RATE TO 4.8 GPM (18.2 LPM)
MAXIMUM OPERATING PRESSURE = 125 PSI (8.6 BAR)

SPECIFICATIONS

WETTED HOUSINGS (Water Chambers and Manifolds)

MATERIAL	SHIP WT.
Polypropylene	3.0 lbs. (1.4 kg.)
PVDF	3.0 lbs. (1.4 kg.)
Carbon-filled Acetal	3.0 lbs. (1.4 kg.)

NON-WETTED HOUSINGS

DESCRIPTION	MATERIAL
Center Section	Polypropylene or Acetal

Air Valve Polypropylene or Acetal

MAXIMUM SUCTION LIFT CAPABILITY

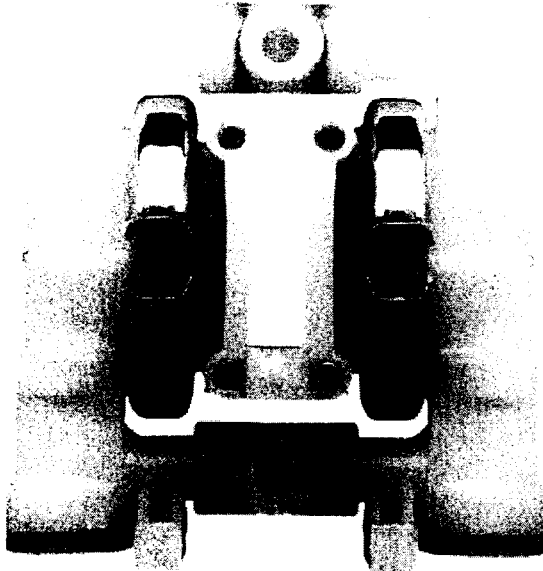
DRY LIFT
10' (3 m)
The above figure represents the TPE-fitted pump capability.

MAXIMUM DIAMETER SOLIDS

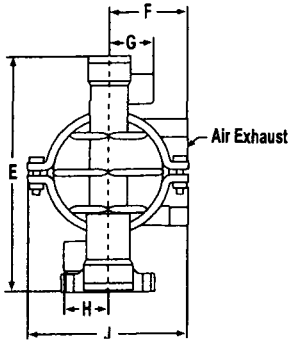
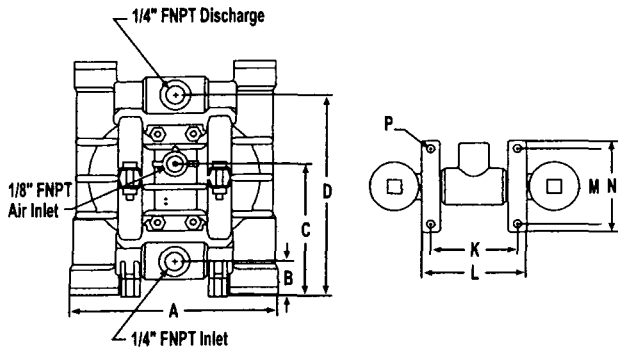
1/64" (.4 mm) Diameter

ELASTOMER OPTIONS

MATERIAL	TEMPERATURE LIMITS
Buna-N [®]	+10 (- 12.2) to +180 (82.2) F° (C°)
Teflon [®] PTFE	+40 (4.4) to +220 (104.4) F° (C°)
Wil-Flex [®]	- 40 (- 40.0) to +225 (107.2) F° (C°)
Viton [®]	- 40 (- 40.0) to +350 (176.7) F° (C°)



PRO-FLO[™]
PROGRESSIVE PUMP TECHNOLOGY

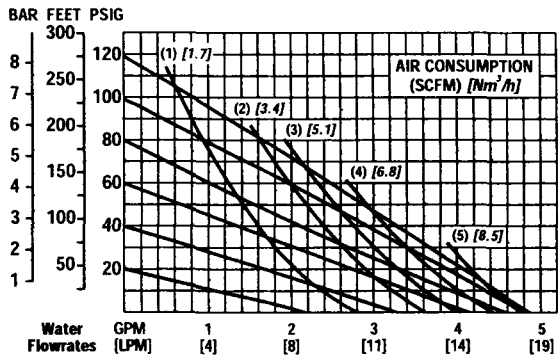


DIMENSIONS - P.025 Pro-Flo[™]

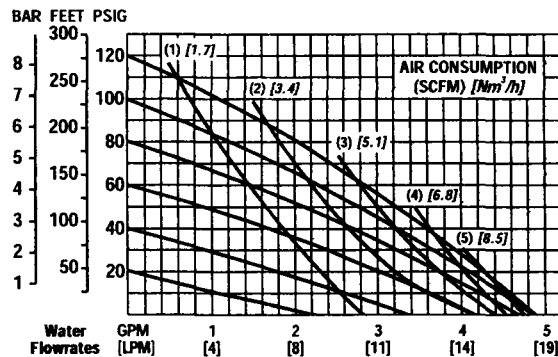
ITEM	STANDARD (inch)	METRIC (mm)
A	5 11/16	144.5
B	1	25.0
C	3 21/32	92.9
D	5 17/32	140.5
E	6 7/16	163.1
F	2 15/64	56.7
G	1 3/16	30.2
H	1 3/16	30.2
J	4 17/32	115.1
K	2 13/32	61.1
L	2 15/16	74.6
M	2 3/32	52.8
N	2 17/32	64.3
P	Ø7/32	Ø5.6

Refer to the EOM manual for TPE performance curve.

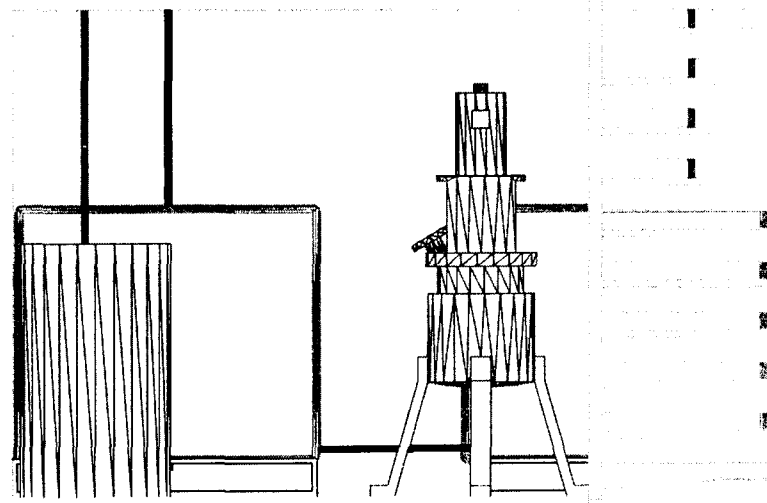
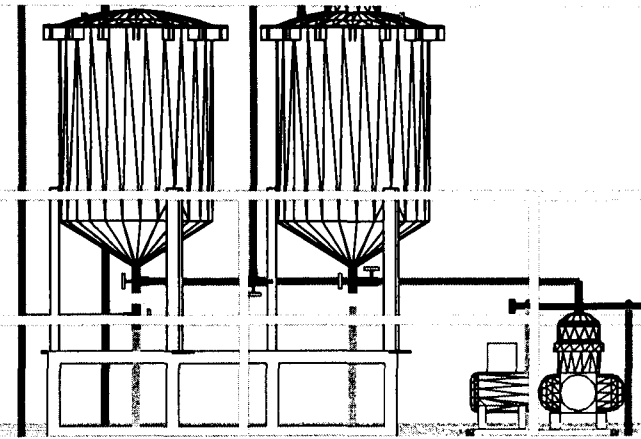
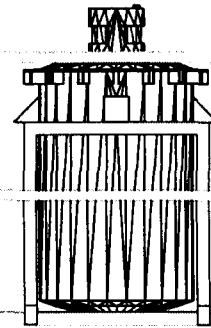
RUBBER-FITTED P.025 PLASTIC PUMP



TEFLON[®]-FITTED P.025 PLASTIC PUMP

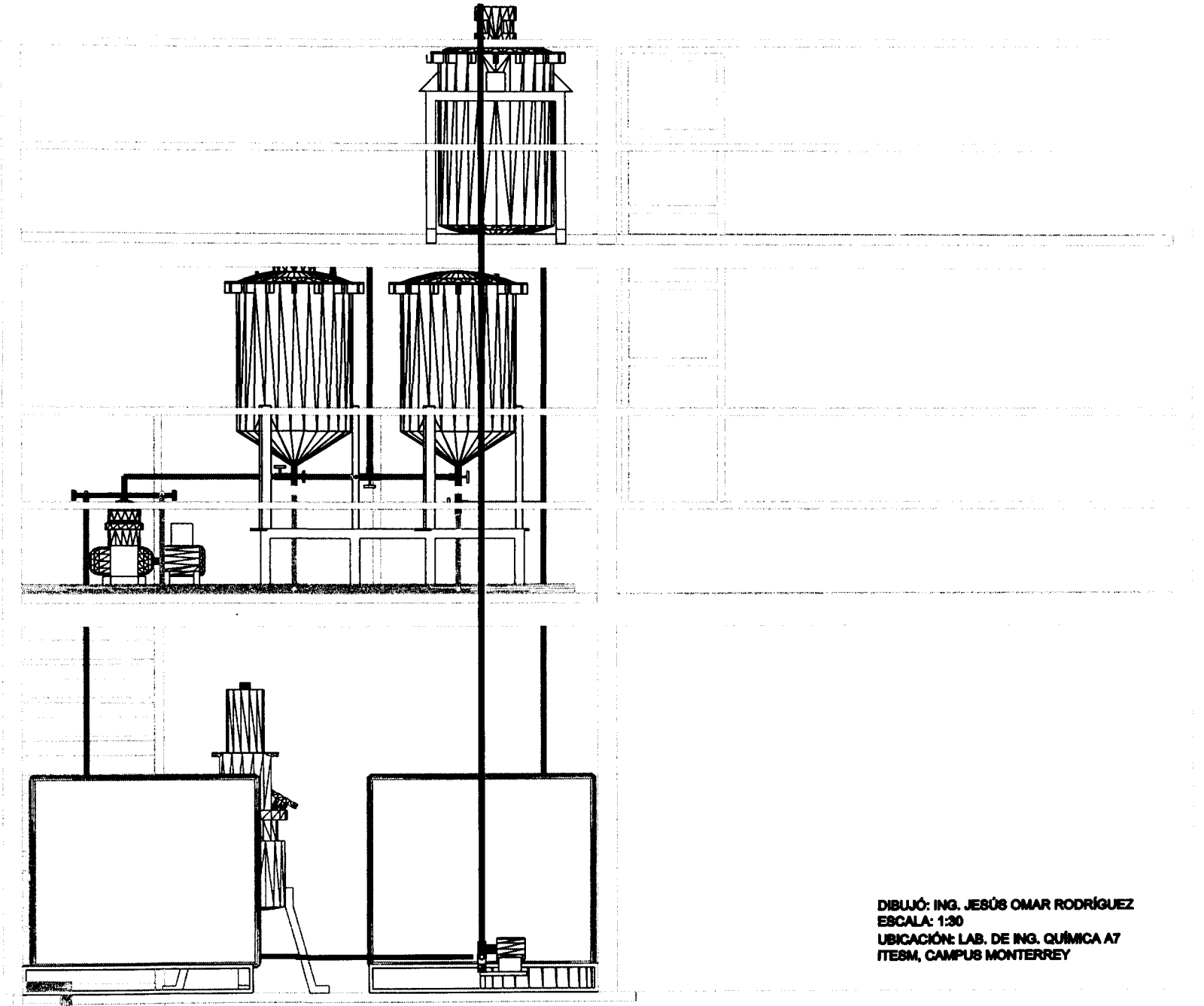


VISTA FRONTAL DE LA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

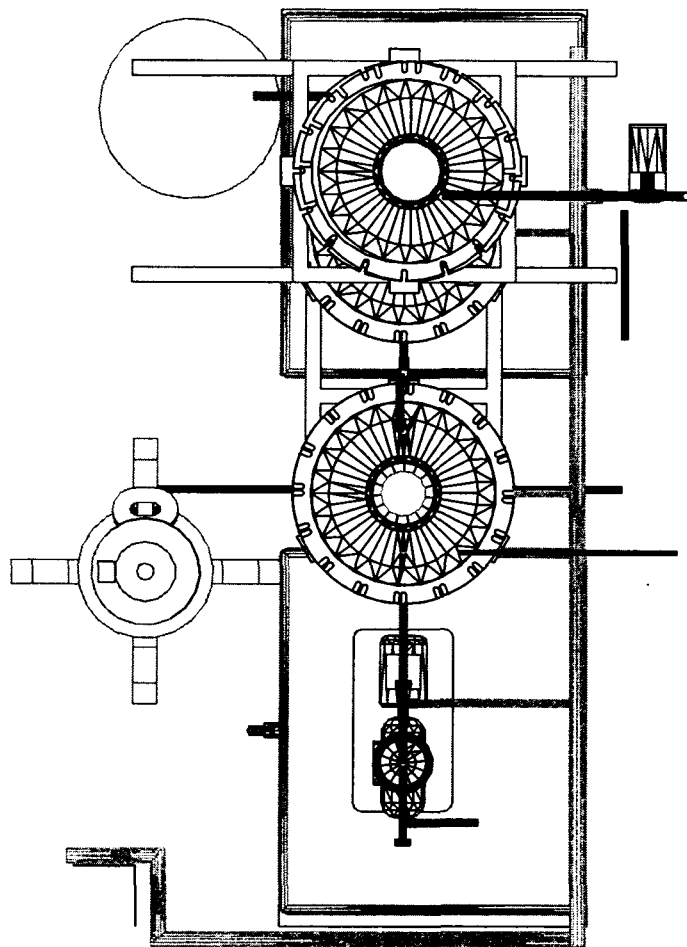


DIBUJÓ: ING. JESÚS OMAR RODRÍGUEZ
ESCALA: 1:30
UBICACIÓN: LAB. DE ING. QUÍMICA A7
ITESM, CAMPUS MONTERREY

VISTA POSTERIOR DE LA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL



VISTA SUPERIOR DE LA PLANTA PILOTO



DIBUJÓ: ING. JESÚS OMAR RODRÍGUEZ
ESCALA: 1:25
UBICACIÓN: LAB. DE ING. QUÍMICA A7
ITESM, CAMPUS MONTERREY

