

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Rediseño de la Planta de Producción de Biodiesel de la Universidad del Valle de Guatemala para aumentar su capacidad de producción

Trabajo de graduación presentado por José León Castillo Dávila para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2013

**Rediseño de la Planta de Producción de Biodiesel de la Universidad del Valle de
Guatemala para aumentar su capacidad de producción**

UNIVERSIDAD DEL VALLE
DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



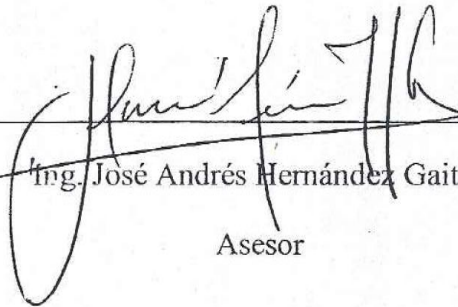
Rediseño de la Planta de Producción de Biodiesel de la Universidad del Valle de Guatemala para aumentar su capacidad de producción

Trabajo de graduación presentado por
José León Castillo Dávila
para optar al grado académico de Licenciado en
Ingeniería Química

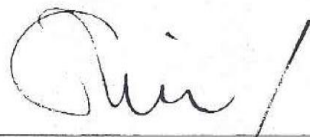
Guatemala

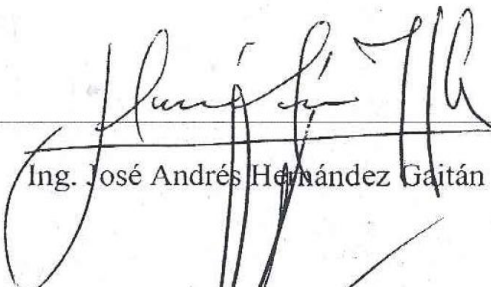
2013

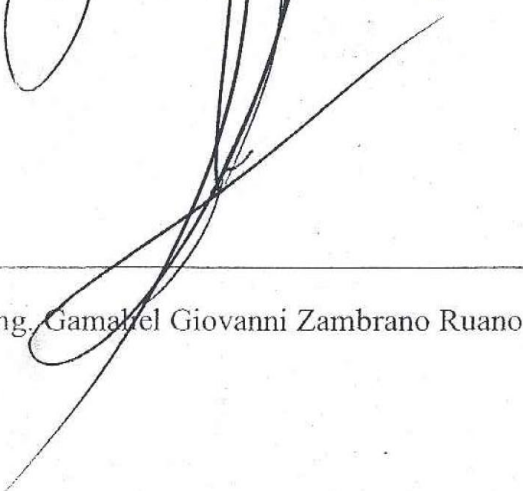
Vo. Bo. :

(f) 
Ing. José Andrés Hernández Gaitán
Asesor

Tribunal:

(f) 
Ing. Cristián Rossi Sosa

(f) 
Ing. José Andrés Hernández Gaitán

(f) 
Ing. Gamahel Giovanni Zambrano Ruano

Fecha de aprobación: Guatemala, 23 de enero de 2013

PREFACIO

El siguiente trabajo se realizó partiendo de la experiencia obtenida en el diseño y montaje de la planta piloto de biodiesel construida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias en el año 2011 como parte de un Megaproyecto en donde contribuyeron estudiantes de las carreras de Ingeniería Química, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Industrial. En este proyecto se montó la planta con tanques y equipo relativamente pequeño pero con muchas herramientas electrónicas para ayudar al control y a la automatización del proceso. La capacidad de esta planta era de 0.06 m^3 (60 litros) por lote de producción y se aumentó a la capacidad de 0.2 m^3 (200 litros) por lote.

La nueva planta cuenta con los mismos accesorios electrónicos de la planta anterior, colocados estratégicamente para poder utilizar el programa de cómputo diseñado anteriormente sin la necesidad de realizar modificaciones en él.

El propósito del informe es que el lector evalúe los puntos de posible mejora utilizando como ayuda el conocimiento acumulado durante el diseño de la planta anterior y la planta actual, para que al momento de realizar el diseño de una planta de mayor tamaño, se pueda contar con las recomendaciones y observaciones realizadas en este trabajo.

Quiero expresar que toda la vida estaré agradecido con mis padres y mi hermana por todo el apoyo que me han brindado desde que inicié mis estudios en la infancia hasta el momento de la finalización de la carrera de Ingeniería Química. Su gran esfuerzo y dedicación han forjado la persona que soy ahora y por eso les dedico este trabajo a ellos.

A mis abuelos les agradezco por darme ánimos para terminar mis estudios cada vez que las cosas se ponían difíciles. A mi gran cadena de tíos quiero agradecerles por el apoyo e interés mostrado a lo largo de mis años de estudio.

ÍNDICE

PREFACIO	iv
RESUMEN	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
A. Biodiesel.....	4
1. Ventajas.....	5
2. Propiedades y características del biodiesel	5
B. Insumos	6
1. Aceites	6
2. Alcohol.....	7
3. Catalizador	8
4. Agua	8
5. Energía	8
6. Insumos opcionales	8
C. Reacción.....	8
D. Equipo	10
1. Componentes básicos de planta por lotes.....	10
2. Instrumentos.....	10
3. Materiales	11
4. Mantenimiento de tuberías.....	12
E. Proceso industrial.....	12
F. Cálculos básicos de diseño en Ingeniería Química.....	14
1. Balance de masa y energía	14
2. Transferencia de calor.....	15
3. Eficiencia de caldera	17
4. Cálculo de bomba.....	17
5. Dimensiones estándar para agitadores de turbina.....	21
III. ANTECEDENTES	22

IV.	JUSTIFICACIÓN	26
V.	OBJETIVOS	27
VI.	PROBLEMA A RESOLVER	28
VII.	METODOLOGÍA	29
VIII.	RESULTADOS	32
IX.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
X.	CONCLUSIONES	49
XI.	RECOMENDACIONES	50
XII.	BIBLIOGRAFÍA	51
XIII.	APÉNDICE	53
A.	Cálculos de muestra	53
1.	Cantidades utilizadas de materia prima.....	53
2.	Balance de masa.....	54
3.	Balance de energía	55
4.	Cálculo de tamaño de agitador.....	59
5.	Cálculo de bomba.....	60
6.	Dimensionamiento de tanques	64
7.	Costo de recuperación del metanol remanente en la glicerina	70
B.	Prueba de aceite en escala laboratorio.....	71
1.	Densidad del biodiesel. Con ayuda del picnómetro se obtiene la densidad:	71
2.	Viscosidad	71
C.	Datos calculados.....	72
D.	Detalle de accesorios utilizados en cada tubería	78
E.	Costos de materiales utilizados para la construcción de la planta.	81
F.	Costo de recuperación de metanol.	84
G.	Diagramas de la planta de biodiesel.....	85

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1. Materiales de tuberías y tanques.	11
Tabla No. 2. Coeficientes de pérdida por fricción.	19
Tabla No. 3. Diámetro interno en pulgadas y metros.	19
Tabla No. 4. Listado de equipo de la Figura No. 7.	24
Tabla No. 5. Detalle de líneas de proceso.	24
Tabla No. 6. Costos de planta piloto de capacidad de 60 L.	25
Tabla No. 7. Capacidad y volumen utilizable de los tanques utilizados en la planta.	35
Tabla No. 8. Tamaño de agitadores según capacidad de los tanques.	36
Tabla No. 9. Potencia mínima requerida de bombas.	36
Tabla No. 10. Materiales utilizados en las tuberías y tanques de la planta de biodiesel.	37
Tabla No. 11. Accesorios de control de vapor.	37
Tabla No. 12. Tabla de accesorios utilizados en el montaje de tuberías.	38
Tabla No. 13. Cotizaciones realizadas para los tanques.	39
Tabla No. 14. Costos del equipo y materiales.	39
Tabla No. 15. Costo de evaporar el metanol.	39
Tabla No. 16. Numeración utilizada en el diagrama de flujo con base de 144.72 kg.	73
Tabla No. 17. Balance de masa con un lote de 130 L de aceite como base.	74
Tabla No. 18. Calor requerido durante el proceso de producción.	75
Tabla No. 19. Energía utilizada para un lote de producción de biodiesel.	75
Tabla No. 20. Flujo de succión de la bomba de aceite.	75
Tabla No. 21. Velocidad lineal de succión de la bomba de aceite.	76
Tabla No. 22. Datos calculados para obtener la potencia mínima requerida de bombas.	76
Tabla No. 23. Dimensiones de agitadores de turbina estándar para el tanque reactor.	76
Tabla No. 24. Dimensiones de los tanques en la planta de biodiesel.	77
Tabla No. 25. Resultados de prueba de laboratorio de aceite.	77
Tabla No. 26. Inventario de accesorios en la tubería de aceite al reactor.	78
Tabla No. 27. Inventario de accesorios en la tubería de aire.	78
Tabla No. 28. Inventario de accesorios en la tubería de agua.	79
Tabla No. 29. Inventario de accesorios en la tubería de biodiesel.	79

Tabla No. 30. Inventario de accesorios en la tubería de glicerina y biodiesel.....	80
Tabla No. 31. Inventario de accesorios en la tubería de vapor.	80
Tabla No. 32. Materia prima para la elaboración de la estructura de la planta.	81
Tabla No. 33. Costos de tanques enchaquetados y condensador.	81
Tabla No. 34. Detalle de precios de accesorios de tuberías en diferentes tamaños.	82
Tabla No. 35. Costos totales de montaje de planta.	84
Tabla No. 36. Costo de recuperación de metanol	84
Tabla No. 37. Listado de instrumentación utilizada y localización.	84

LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1 Estructuras del glicerol y de un triglicérido común.....	6
Figura No. 2. Reacción catalítica de triglicéridos con alcohol y base.....	8
Figura No. 3. Conversión de triglicéridos en alquil ésteres.....	9
Figura No. 4. Diagrama de flujo de producción de biodiesel utilizando catálisis básica.	12
Figura No. 5. Carta de factores de fricción de Fanning.....	20
Figura No. 6. Medidas de un agitador de turbina.....	21
Figura No. 7. Planta piloto con capacidad total de 60 L por lote de producción.....	22
Figura No. 8. Diagrama general de planta piloto de 60 litros de capacidad.....	23
Figura No. 9. Vista isométrica derecha del modelo de la planta piloto.....	25
Figura No. 10. Balance de masa global de la corrida realizada de 130 L de aceite.....	32
Figura No. 11. Balance de energía basado en un lote de 144.72 kg.....	33
Figura No. 12. Esquema de diseño de escalamiento y distribución de la planta.....	34
Figura No. 13. Esquema de diseño de distribución.....	35
Figura No. 14. Tanque de metóxido.....	64
Figura No. 15. Marmita.....	65
Figura No. 16. Reactor.....	66
Figura No. 17. Tanque de glicerina.....	67
Figura No. 18. Tanque de lavado de biodiesel.....	68
Figura No. 19. Tanque de estabilización de biodiesel.....	69
Figura No. 20. Diagrama de flujo.....	72
Figura No. 21. Diagrama de flujo de la planta de biodiesel con accesorios.....	85
Figura No. 22. Esquema de la planta mostrando tubería de aceite, biodiesel y glicerina.	86
Figura No. 23. Esquema de la planta mostrando tubería de vapor.....	87
Figura No. 24. Esquema de la planta mostrando tubería de metóxido de sodio.....	88
Figura No. 25. Esquema de la planta mostrando tubería de vapor de metanol.....	89
Figura No. 26. Esquema de la planta mostrando tubería de aire.....	90
Figura No. 27. Esquema de la planta mostrando tubería de agua.....	91
Figura No. 28. Imagen de la planta terminada.....	92
Figura No. 29. Cotización de Tanques enchaquetados.....	93

Figura No. 30. Cotización de condensador de acero inoxidable con espirales de cobre. .	94
Figura No. 31. Cotización de metanol por tonel de 55	95

RESUMEN

Este trabajo de graduación tiene como propósito mostrar cómo se llevó a cabo el diseño de la planta piloto de biodiesel instalada anteriormente con una capacidad de 0.06 m³ (60 L) por lote en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para aumentar la capacidad de producción. Durante el montaje de la nueva planta se dimensionó y determinó los materiales necesarios a utilizar, tales como acero inoxidable 304, acero al carbón y hierro galvanizado y el equipo necesarios a utilizar. Además se realizaron cotizaciones del nuevo equipo a utilizar. Se implementó un nuevo sistema de recuperación de metanol y se hizo el análisis de factibilidad del proceso, dando un resultado positivo al comparar el precio de Q.14.43/L de metanol nuevo de 99.8% de pureza contra Q.4.83/L de metanol recuperado con 98.35% de pureza. Como resultados se determinó que el proceso general de producción de biodiesel se lleva a cabo con un 75% de eficiencia. Se logró aumentar la capacidad de la planta en un 330%, siendo posible llegar a trabajar con 0.2 m³ (200 litros) por lote de producción. La redistribución de los componentes de la planta se llevó a cabo tomando en cuenta dejar suficiente espacio para acceder a los equipos, además de facilitar la manipulación de materiales y la operación manual de la planta. Se tomó en cuenta la seguridad personal, aislando las tuberías que pudieran representar un peligro por alta temperatura, y dejando todas las tuberías aéreas para evitar obstrucciones en cualquier paso. Se colocaron las válvulas manuales de indispensable operación en alturas adecuadas, dejando el resto de válvulas de menor manipulación sobre la estructura. Se reemplazó las tuberías y accesorios por piezas con mejores características dependiendo de su función. Se determinó que la mejora de la planta y su montaje tuvo un costo de Q. 74,052.74 que incluye los tanques enchaquetados de 150 L y 200 L, el condensador, los accesorios de tuberías y los materiales de construcción.

I. INTRODUCCIÓN

El biodiesel es un combustible renovable compuesto por una mezcla de monoalquilésteres de ácidos grasos obtenidos a partir de aceites vegetales y grasas de origen animal. Un problema de los aceites vegetales es su alta viscosidad y baja volatilidad, que traen muchos inconvenientes técnicos que limitan la utilización directamente en motores de combustión interna.

Es por eso que se utilizan diversos métodos químicos para la producción de biodiesel a partir de aceites. Algunos métodos son: pirólisis, microemulsificación, cavitación ultrasónica y transesterificación. El más común es la transesterificación, el cual involucra una base fuerte, un alcohol y un triglicérido para que se lleve a cabo la reacción. En la Universidad del Valle de Guatemala, este biocombustible proviene de aceite vegetal utilizado por restaurantes y otros establecimientos para freír diversos tipos de alimentos. Cuando este aceite ya no tiene ningún uso alimenticio, se acumula y se envía a la Universidad.

El uso de biodiesel incluye muchas ventajas, ante las cuales predomina el hecho de ser un combustible reciclado biodegradable, seguido por la reducción de gases contaminantes producidos en la combustión y porque cuenta con características fisicoquímicas similares al petrodiesel, que permite hacer mezclas con diesel parcial o totalmente.

Los materiales que se utilizan actualmente en el laboratorio de Operaciones Unitarias son: metanol, hidróxido de sodio y aceite vegetal reciclado. El propósito de este trabajo es escalar la planta de producción de biodiesel con la que cuenta actualmente el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Esto se llevó a cabo con un reordenamiento del equipo utilizado con pequeñas modificaciones que reduzcan la intervención de la manipulación humana.

Debido a que se ha tenido buenos resultados con la producción de biodiesel y que el automóvil de prueba ha utilizado este combustible exitosamente en mezclas hasta del 50%, aumentar su escala de producción reducirá los costos en el Departamento de Ingeniería Química que conlleva este proceso. Otra de las finalidades de aumentar la capacidad de producción es para poder realizar producciones piloto para instituciones o empresas que deseen implementar un sistema propio de producción de biodiesel. Es importante destacar que la materia prima que se desea utilizar para que el proceso sea rentable es un material previamente utilizado en la industria alimenticia que ya no tenga un valor ni uso como alimento.

Este trabajo de graduación se delimitó al campo de Ingeniería Química, excluyendo en el montaje un nuevo diseño de programa controlador del equipo de automatización de la planta de biodiesel. Por ende, se trabajó de manera que el programa anterior tuviera funcionalidad sobre la nueva planta.

Para realizar la mejora de la planta piloto, fue necesario comprender su funcionamiento y posteriormente proceder a su desmontaje, el cual reveló muchas oportunidades de mejora.

El trabajo incluyó la redistribución del equipo, mejorando la configuración de tanques, dividiendo las áreas de trabajo para tener un orden lógico de la secuencia del proceso y a la vez aumentar el espacio para desplazarse y realizar las revisiones del equipo, facilitar la instalación de tuberías y la manipulación de materiales. Durante el montaje de la nueva planta se hicieron instalaciones de bombas que ayudan a reducir la manipulación de reactivos por parte del personal transportándolos hacia el reactor, como el aceite y el metóxido de sodio.

El trabajo incluye la investigación bibliográfica del tema de producción de biodiesel, seguido del análisis de la planta piloto anterior que dio como resultado las oportunidades de mejora de la planta. También se incluye la implementación del sistema de recuperación de metanol por medio de condensación a partir de la fase de glicerina formada durante la producción. Otro paso fundamental en el presente trabajo es el diseño de la redistribución de los componentes de la planta para facilitar la operación de la

misma. También se incluye el aspecto de seguridad personal y operacional de la planta. Como parte final del proyecto se incluyen los costos de la mejora de la planta piloto de biodiesel.

Como resultados principales se obtuvo que se logró aumentar la capacidad de producción de la planta de biodiesel tres veces a la capacidad anterior, pudiéndose trabajar con lotes hasta de 0.2 m³ (200 litros). Se determinó que el costo total de la nueva planta incluyendo los materiales y equipo necesario fue de Q.74, 052.74. Se implementó un sistema de recuperación de metanol que logra recuperar metanol a un costo Q.4.83 por litro con una pureza de 98.35%.

II. MARCO TEÓRICO

A. Biodiesel

Es un combustible compuesto por ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales, empleado en motores de ignición de compresión hasta en calderas de calefacción. Siendo de origen orgánico, puede ser utilizado tanto como sustituto o aditivo del diesel convencional. El término bio hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diesel tradicional derivado del petróleo. (Acosta, 2008)

Según Knothe *et al.* 2010, los triacilglicéridos de aceite vegetal o animal para la obtención de biodiesel, tienen que pasar por el proceso químico de transesterificación. En esta reacción el aceite vegetal ó animal reacciona en la presencia de un catalizador, usualmente una base, con un alcohol, usualmente metanol para dar los correspondientes alquil ésteres, que en este caso serían los metil ésteres, de los ácidos grasos mixtos que se encuentran en los aceites. Para que la transesterificación se lleve a cabo se necesita una relación molar de 3:1 de alcohol a aceite, en la práctica se requiere una relación de 6:1. (Knothe *et al.*, 2010)

El Biodiesel puede ser producido a partir de una gran variedad de aceites, tales como aceite de soya, algodón, palma, manía, canola, girasol, coco, etc. Este combustible es miscible con el diesel derivado del petróleo, lo cual ha provocado utilizar mezclas de ambos combustibles. (Knothe *et al.*, 2010)

También se sabe que el etanol o isopropanol, pueden ofrecer un biodiesel con mejores características, pero su uso, depende del costo. Es importante mencionar otras características benéficas del biodiesel, por ejemplo, debido a que proviene de una fuente renovable local, puede reducir la dependencia del petróleo, reduce la mayoría de emisión de gases, a excepción del NOx , tiene punto de inflamación más alto que lo vuelve más seguro para su manipulación y almacenamiento, excelente lubricidad, estabilidad oxidativa, bajo punto de congelación y que su costo de fabricación puede disminuir utilizando aceites residuales. (Knothe *et al.*, 2010)

1. Ventajas. El biodiesel tiene dos efectos principales, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente CO₂ y la reducción de la mayoría de emisiones tóxicas o contaminantes. El diesel y el biodiesel, a lo largo de todo su ciclo de vida, producen cantidades similares de CO₂. La gran diferencia es que la mayor parte del CO₂ producido por el biodiesel ha sido fijado previamente por las plantas oleaginosas utilizadas para su producción, que a lo largo de su vida, han consumido mayor cantidad de CO₂ que la que emitirán una vez convertidas en biodiesel. (Acosta, 2008)

Incluso diversos estudios señalan que el biodiesel emite menos CO₂ que el proceso de fotosíntesis por estas mismas plantas oleaginosas. Por esto, es posible afirmar que sustituyendo o complementando el diesel con el biodiesel se puede combatir el gran problema del cambio climático. (Acosta, 2008)

El biodiesel, al ser un combustible oxigenado y no contener azufre, tiene una combustión más completa que el derivado del petróleo y por eso una composición notablemente mejor en sus emisiones. Alternativamente, mezclando tan solo 10% de biodiesel con 90% de diesel, se reducen las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), compuestos aldehídicos como el formaldehído y el acetaldehído, y prácticamente elimina las emisiones de benceno, que es un compuesto cancerígeno. Es por esto que el uso del biodiesel, además de ayudar a conservar el ambiente, disminuye los riesgos a la salud pública. (Acosta, 2008).

2. Propiedades y características del biodiesel

a. Propiedades autoinflamables. Ésta es una de las propiedades más importantes que debe considerarse en el diesel. Esto se mide con el número de cetanos. Esta prueba compara la autoignición del combustible con una mezcla de dos combustibles de referencia, hexadecano, y heptametilnonano. La mayoría de biodiesel tiene mayor número de cetanos que el diésel ordinario. El punto de autoinflamación comúnmente denominado como flashpoint significa que es la temperatura a la cual el combustible entrega suficiente vapor para producir una mezcla inflamable. El diesel común tiene un flashpoint entre 52°C-66°C, mientras que el biodiesel tiene un flashpoint de 150°C. (Knothe *et al.*, 2010)

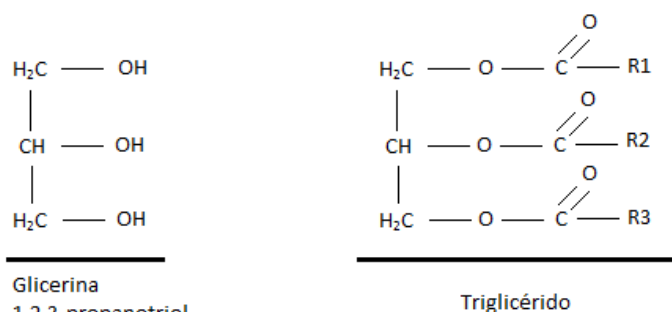
b. Viscosidad. Esta característica, según ASTM D975, tiene un rango bajo aceptabilidad, entre 1.9 y 4.1 cSt. La especificación para el biodiesel en ASTM D6751 requiere que el biodiesel 100% tenga una viscosidad entre 1.9 y 6.0 cSt. Si el biodiesel tiene una viscosidad muy elevada, los inyectores en el motor sufrirán desgaste y se producirá humo color negro. (Knothe *et al.*, 2010)

c. Corrosión. Los motores diesel de sistema de inyección están hechos de acero, el cual está condenado a la corrosión cuando entra en contacto con el agua. Por lo cual esto tendrá como resultado una falla en el sistema de inyección. En este punto radica la importancia de la máxima remoción de agua que pueda haber en el biodiesel, debido que se han hecho estudios en donde el petrodiesel contiene en promedio 50 ppm de agua disuelta, mientras que el biodiesel alrededor de 1500 ppm (Van Gerpen *et al.*, 1997). Sin embargo, las pruebas de oxidación se realizan sumergiendo tiras de cobre para verificar su capacidad de oxidación y el biodiesel supera esta prueba con facilidad (ASTM D 130).

B. Insumos

1. **Aceites.** Los aceites vegetales están constituidos principalmente entre un 95 y 99% en peso por triacilglicéridos, comúnmente denominados como triglicéridos, las cuales son moléculas que se dan en la esterificación de la glicerina o glicerol con tres moléculas de ácidos grasos. Los grupos constituyentes R1, R2 y R3, que se muestran en la figura 1, están ligados al grupo funcional éster (-COO-). Los triglicéridos pueden ser simples o mixtos, dependiendo si los grupos sustituyentes unidos a la glicerina son iguales o diferentes. Por lo general los aceites son mezclas de estos dos tipos. (Benjumea, 2009)

Figura No. 1 Estructuras del glicerol y de un triglicérido común.



(Knothe *et al.*, 2010)

Los países pioneros en la industria del biodiesel, obtienen dicho combustible a partir de aceites vegetales con amplia disponibilidad local, por ejemplo, en Europa, se utilizan semillas oleaginosas como la colza y girasol, mientras que en Estados Unidos de América y Argentina el aceite de soya, y países con clima tropical, como Malasia, Indonesia, Ecuador, Colombia la opción ha sido el fruto de la palma. Estos son los aceites más producidos a nivel mundial, y su precio siempre supera el precio por tonelada de petróleo crudo. (Benjumea, 2009)

Una alternativa es utilizar aceites de fritura, esto permite utilizar materia prima de menor costo que los aceites refinados. También se facilita el descarte de un residuo con un alto potencial contaminante. En los países que cuentan con legislaciones adecuadas sobre la disposición de residuos y donde las empresas cuentan con un sistema de recolección, se ha logrado desarrollar industrialmente la producción de biodiesel. (Benjumea, 2009)

Es importante tomar en cuenta que un aceite de fritura puede sufrir ciertas modificaciones tales como: hidrólisis (formación inicial de hidroperóxidos y posterior de aldehídos, cetonas, hidrocarburos, alcoholes, entre otros) y polimerización (formación de dímeros o polímeros a partir de radicales libres provenientes de los enlaces dobles de los ácidos grasos). La mayoría de los compuestos formados por las reacciones mencionadas son de naturaleza polar y se pueden retirar del aceite frito mediante adsorción con sólidos porosos naturales o sintéticos (Soriano *et. al.*, 2000)

El biodiesel es mejor que el petrodiesel en términos de contenido de azufre, flash point, contenido aromático y biodegradabilidad. (Bala, 2005)

2. Alcohol. Se puede utilizar una variedad de alcoholes pero por su costo se recomienda utilizar metanol al 95% de pureza. La cantidad requerida para elaborar biodiesel es aproximadamente 15% o 20% del volumen de aceite a procesar. Esta sustancia es tóxica por ingestión, inhalación o por contacto con la piel, además de ser inflamable con llama incolora. Su manipulación requiere todas las medidas necesarias. (Acosta, 2008)

3. Catalizador. Como catalizador de la reacción se puede utilizar hidróxido de sodio (NaOH), o hidróxido de potasio (KOH), de grado industrial, en escamas o perlas. Se prefiere el hidróxido de potasio por la facilidad que ofrece al disolverlo en el alcohol, favoreciendo así una transformación más completa del aceite en biodiesel. (Acosta, 2008)

4. Agua. El agua se utiliza para lavar el biodiesel. El efluente resultante es alcalino y tiene un contenido significativo de jabones, grasas y trazas de metanol. (Acosta, 2008)

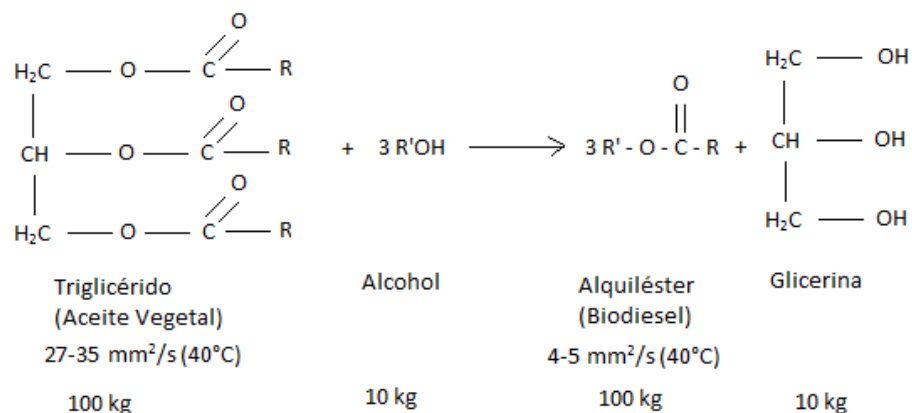
5. Energía. También es necesario utilizar energía eléctrica para los motores, bombas y otros equipos utilizados en el proceso de producción.

6. Insumos opcionales. Como insumos opcionales se pueden encontrar el sulfato de magnesio como floculante antes de descartar el efluente, ácido fosfórico para neutralizar y purificar la glicerina. (Acosta, 2008)

C. Reacción

Existen cuatro métodos utilizados para disminuir la viscosidad del aceite vegetal para poderlo utilizar en motores tipo diesel sin tener problemas. Los métodos son los siguientes: mezclado con petrodiesel, pirolisis, microemulsificación y transesterificación. (Schwab *et al.*, 1987). La transesterificación es la más utilizada y con una amplia diferencia comparado con las demás formas.

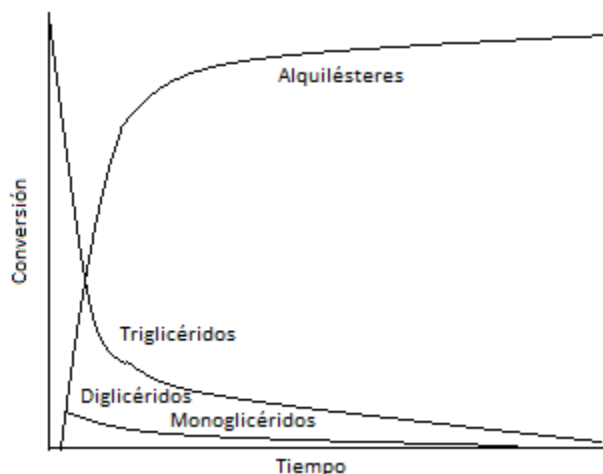
Figura No. 2. Reacción catalítica de triglicéridos con alcohol y base. R denota una mezcla de varios ácidos grasos y R' un CH₃.



(Knothe, *et al.*, 2010)

Como ya se explicó anteriormente, los aceites utilizados para freír también son útiles para la producción de biodiesel, sin embargo, es necesario hacer algunos cambios en el proceso debido a la presencia de agua. Para comprender el concepto de transesterificación se va a demostrar la reacción únicamente con aceites libres de agua. En la etapa inicial de la formación de alquil ésteres, se forman di y mono acilglicéridos como intermediarios de la transesterificación, como se puede observar en la Figura 3. (Knothe, *et al*, 2010)

Figura No. 3. Conversión de triglicéridos en alquil ésteres.



(Knothe, *et al*, 2010)

La transesterificación se puede dar por una catálisis ácida o básica, sin embargo en la catálisis alcalina se obtiene un proceso mucho más rápido que la catálisis ácida. (Freedman & Pryde, 1982; Freedman *et al.*, 1984; Canaki & Van Gerpen, 1999). Para obtener una transesterificación óptima, se debe tomar en cuenta la humedad y la cantidad de ácidos grasos libres, conocidos como FFA (free fatty acids). Por lo cual se recomienda tener un alcohol libre de humedad y un aceite con menos de 0.5% de FFA. (Freedman *et al.*, 1984)

Esto es muy importante debido que según la ecuación 1 se puede dar hidrolisis del alquil formado dando FFA como resultado. (Knothe, *et al*, 2010)



(Knothe, *et al*, 2010)

También se han realizado pruebas con KOH a temperatura y presión ambiente, obteniendo resultados entre 80% y 90% de conversión al cabo de 5 minutos, a pesar de haber utilizado cantidades estequiométricas de metanol. (Ahn *et al.*, 1995). Se ha concluido que aceites que contengan un 3% de FFA y 300ppm de fósforo, no afectan el proceso. (Knothe, *et al.*, 2010)

D. Equipo

1. Componentes básicos de planta por lotes. El tanque de almacenamiento de aceite puede ser un cilindro de metal vertical abierto con tapadera sobrepuesta, además se necesita un tanque en donde se va a almacenar el metanol, cuidando que no esté expuesto a ninguna fuente de calor o ignición. Para el reactor es necesario adaptar un reservorio de menor capacidad, ya que aquí es donde se guarda el metóxido que se utiliza como catalizador, y el reactor debe estar cerrado con agitador, que soporte presión y pueda calentarse para que se dé la transesterificación. Si el sistema está automatizado, se puede adaptar paneles para controlar la agitación y la temperatura del reactor y mostrarlo en una pantalla, así como los switches de encendido y apagado. Para recibir el biodiesel se necesita un tanque decantador seguido por uno de lavado. (Acosta, 2008)

2. Instrumentos. En una planta de biodiesel se recomienda utilizar bombas centrífugas debido a que su viscosidad opera correctamente en este tipo de bombas. Por tratarse en la mayoría de los pasos con soluciones que pueden contener un cierto grado de humedad se recomienda utilizar bombas de acero inoxidable, al igual que el resto de las tuberías. (Acosta, 2008)

Otros instrumentos de seguridad importantes de tomar en cuenta son las válvulas de seguridad, termómetros de contacto, manómetros entre otros mecanismos de seguridad. (Acosta, 2008)

3. Materiales

Tabla No. 1. Materiales de tuberías y tanques compatibles con reactivos utilizados en la producción de Biodiesel.

Material	KOH	NaOH	Etanol	Metanol	Glicerina	Ácidos grasos	Aceite de soya	Ácido fosfórico	Ácido sulfúrico	Diésel 2
Acero inoxidable 316	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Efecto severo	Efecto severo	Excelente
Acero inoxidable 304	Buena	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Efecto severo	Regular	Excelente
Acero al carbono	Efecto severo	Efecto severo	Buena	Excelente	Excelente	Regular	Buena	Efecto severo	Efecto severo	Excelente
Hierro forjado	Buena	Efecto severo	Buena	Excelente	Excelente	Regular	Excelente	Efecto severo	Efecto severo	Excelente
Latón	Efecto severo	Efecto severo	Excelente	Excelente	Buena	Regular	N/A	Efecto severo	N/A	Excelente
Aluminio	Efecto severo	Efecto severo	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Regular	Efecto severo	Excelente
Bronce	Efecto severo	Efecto severo	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Buena	Excelente
Cobre	Buena	Buena	Excelente	Buena	Excelente	Efecto severo	N/A	Efecto severo	Efecto severo	Excelente
Titanio	Efecto severo	Buena	Excelente	Buena	Excelente	Buena	Excelente	Regular	Efecto severo	Buena
Grafito	Regular	N/A	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Regular	Excelente
Magneto cerámico	Excelente	N/A	N/A	Excelente	N/A	N/A	N/A	Regular	Excelente	N/A
PVC	Buena	Excelente	Regular	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Efecto severo	Excelente
CPVC	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Regular	Excelente
Polipropileno	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Regular	Excelente
Poliétileno de baja densidad	Excelente	Efecto severo	Buena	Excelente	Excelente	Efecto severo	Excelente	Buena	Buena	Regular
Policarbonato	Efecto severo	Efecto severo	Buena	Buena	Excelente	Buena	N/A	Excelente	Efecto severo	Excelente
Poliuretano	Efecto severo	Buena	Efecto severo	Efecto severo	Efecto severo	Buena	Buena	Efecto severo	Efecto severo	Regular
Caucho natural	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Regular	Efecto severo	Buena	Efecto severo	Efecto severo
Nitrilo (Buna N)	Buena	Excelente	Regular	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Efecto severo	Regular	Excelente
Teflón®	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Neopreno	Buena	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Regular	Regular	Buena	Efecto severo	Buena
Silicona	Regular	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Regular	Excelente	Efecto severo	Efecto severo	Efecto severo
PVDF (Kynar®)	Excelente	Efecto severo	N/A	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Excelente
Epoxy	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Regular	Excelente
Nylon	Regular	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Efecto severo	Excelente
Viton®	Buena	Buena	Excelente	Regular	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

(Acosta, 2008)

4. **Mantenimiento de tuberías.** Para el mantenimiento de tuberías se debe realizar un diagnóstico de averías, el cual involucra sustitución de válvulas, compuertas, sellos de roscas, y tramos defectuosos. Para llevar a cabo esta determinación se deben hacer pruebas de ruido, caudal, pérdidas de presión (fugas), pruebas de estanqueidad, equilibrio de cargas de distribución. (Escobar, 1996)

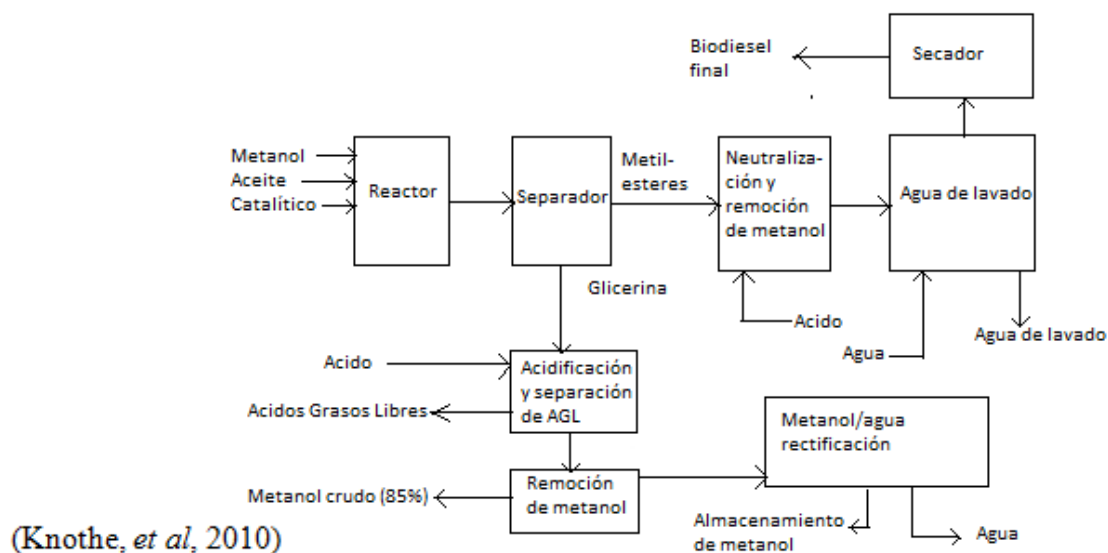
En las roscas de las tuberías se debe utilizar un material que ayude a sellar las aperturas que quedan entre las roscas. Uno de los materiales que se utiliza ampliamente en los conductos de diversos tipos de fluidos para evitar fugas o pérdidas de presión es el Teflón.

En la práctica se ha recomendado utilizar un sellante llamado “Permatex” que resiste el biodiesel. Debido a la corrosividad del biodiesel se recomienda utilizar Permatex y no Teflón. Independientemente de cual se use se debe hacer el diagnóstico de la integridad de las tuberías y evaluar si necesita darle mantenimiento y reemplazar el Teflón o Permatex en las roscas.

E. Proceso Industrial

Para las reacciones catalizadas con una base, se opta por utilizar un esquema como el de la Figura 4, siempre y cuando la materia prima contenga niveles bajos de ácidos grasos libres.

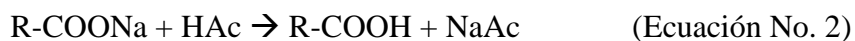
Figura No. 4. Diagrama de flujo de producción de biodiesel utilizando catálisis básica.



Aquí, los componentes principales: alcohol, el catalizador y el aceite se mezclan en un reactor el cual agita la mezcla durante una hora a 60°C. Las plantas que producen más de 4 millones de litros al año utilizan flujos continuos de producción (Assman *et al.*, 1996). En algunas ocasiones la reacción se lleva a cabo en dos etapas, en donde el 80% del alcohol y el catalizador son agregados al aceite en el reactor agitado. Luego este producto pasa a un removedor de glicerina antes de entrar al segundo reactor agitado. El otro 20% del metanol y catalizador se agrega en este segundo reactor. Utilizando esta configuración de componentes ayuda a tener una reacción muy completa con el propósito de usar menor cantidad de alcohol que en procesos de una sola etapa. (Knothe, *et al.*, 2010)

Después de la segunda etapa, la glicerina es removida del metil éster. Debido a la inmiscibilidad de la glicerina y el biodiesel, la glicerina se puede extraer por centrifugación o por decantación. Es importante tomar en cuenta que el exceso de metanol actúa como un solubilizante y puede hacer que la separación tarde más tiempo. El metanol no se recomienda ser extraído antes de la separación de glicerina y biodiesel debido que se podría revertir la transesterificación. Se puede agregar agua a la mezcla para aumentar la separación de glicerina. (Stidham *et al.*, 2000; Wimmer, 1995).

Cuando el biodiesel se ha separado, continua por un paso de neutralización y luego pasa a un tanque donde se recupera el metanol, antes del lavado con agua. Se agrega ácido al biodiesel para neutralizar cualquier residuo de catalizador y para separar cualquier jabón que se haya podido formar durante la reacción. Los jabones reaccionan con el ácido para formar ácidos grasos y sales, por ejemplo:



(Knothe, *et al.*, 2010)

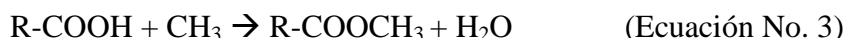
Las sales que se obtengan en este paso se retirarán con el siguiente paso que incluye lavado con agua y los ácidos grasos permanecerán en el biodiesel. El lavado de agua posterior es tan importante porque es aquí en donde se asegura remover cualquier cantidad de hidróxido de sodio, jabón, sales, metanol o glicerina que haya permanecido

en el biodiesel. También cabe destacar que la neutralización previa reduce la cantidad de agua a utilizar en este paso. El agua que pueda quedar en el biodiesel se retira evaporándolo, puede utilizarse vacío. (Knothe, *et al*, 2010)

La glicerina residual contendrá 50% de otros componentes como metanol, una gran cantidad de base y jabón. Debido al contenido de metanol, este residuo debe ser tratado como peligroso y no se puede vender ni desechar, por lo cual es necesario neutralizarlo para separarlo en jabones y ácidos grasos y sales. Los ácidos grasos subirán a la superficie en donde ellos puedan ser removidos y reciclados. (Knothe, *et al*, 2010)

Una opción para aprovechar la glicerina es agregarle hidróxido de potasio como catalizador y ácido fosfórico para neutralizar y así obtener sales de fosfato de potasio que pueden ser utilizadas como fertilizantes. (Knothe, *et al*, 2010)

Cuando se utilizan aceites reciclados, es común que tengan mayor de 5% de ácidos grasos libres. El problema radica en que será necesario utilizar más catalítico para compensar la pérdida en jabón que será removido durante el lavado de glicerina con el agua. Otro problema es que si se tienen más de 5% de FFA, los jabones formados inhibirán la separación de glicerina del biodiesel y se puede formar una emulsión durante el lavado con agua. Para estos casos se puede utilizar un catalítico ácido para esterificar los ácidos grasos libres hacia metil ésteres, como se muestra en la siguiente reacción:



(Knothe, *et al*, 2010)

Luego de este paso, el aceite pre tratado puede ser transesterificado con un catalítico básico para convertir los triglicéridos a metil ésteres (Keim, 1945).

F. Cálculos básicos de diseño en Ingeniería Química

1. Balance de masa y energía. Un cálculo muy importante en un proceso donde no existe acumulación de materiales es la siguiente ecuación:

$$\text{entradas} = \text{salidas}$$

(Ecuación No. 4)

(Himmelblau, 1997)

Esto es muy importante ya que permite conocer la separación de materiales y finalmente su eficiencia o la composición de las sustancias por sus fracciones molares o fracciones masa.

Debido que algunas reacciones químicas necesitan recibir energía en forma de calor o dar energía en forma de calor al ambiente, existen diferentes formas de calcular estos cambios.

Una ecuación general es:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta P + \Delta K = Q + W$$

(Ecuación No. 5)

(Himmelblau, 1997)

Donde los términos U, P y K se refieren a la energía interna, potencial y cinética, así como Q y W se refieren a calor y trabajo.

Una generalidad del balance de energía es la siguiente:

Acumulación de energía dentro del sistema

= transferencia de energía al sistema

– transferencia de energía afuera del sistema

+ generación de energía – consumo de energía del sistema.

(Ecuación No. 6)

(Himmelblau, 1997)

2. Transferencia de calor. Para fines de diseño se utilizan comúnmente las ecuaciones de transferencia de calor que involucran conducción, convección y radiación de un cuerpo gris.

Para conocer la cantidad de energía que se necesita transferir por unidad de tiempo a una cierta cantidad de materia, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$q = m_i C p_i \Delta T$$

(Ecuación No. 7)

(McCabe, 2007)

Para medir la velocidad de transferencia de calor a través de una pared se puede utilizar la ecuación general:

$$\frac{q}{A} = \frac{\Delta T}{R}$$

(Ecuación No. 8)

(McCabe, 2007)

Donde $R = x/k$, donde k es la conductividad térmica del material y x el grosor del material.

En cuanto a los cálculos de calor en donde existe transferencia de calor por convección, se tiene que:

$$q_{convección} = h_i A \Delta T$$

(Ecuación No. 9)

(McCabe, 2007)

Donde h se denomina coeficiente de convección. Este puede encontrarse en la literatura o calcularse de la siguiente forma según la ASHRAE:

$$h = 2.39 \frac{\Delta T}{L}^{1/4}$$

(Ecuación No. 10)

(ASHRAE, 2002)

Otra forma de transferencia de calor es la radiación, la cual juega una menor proporción en cuanto a la transferencia de calor de un cuerpo a otro pero no dejando de ser significativa:

$$q_{radiación} = \sigma A \varepsilon (T_1^4 - T_2^4)$$

(Ecuación No. 11)

(McCabe, 2007)

Donde σ es la constante de Boltzmann $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{s}$ y ε es una constante para diferentes materiales. La literatura muestra 0.08 para metales pulidos.

Cuando existe un intercambio de fase que involucra cambio de estado, se sabe que el calor demandado para que esto ocurra está dado por:

$$q_{vap} = m\lambda = m H_v - H_l$$

(Ecuación No. 12)

(McCabe, 2007)

3. Eficiencia de caldera. Existen dos métodos para la medición de eficiencia de una caldera de vapor. Uno es el método directo, el cual consiste en un balance energético de la cantidad de vapor producido con respecto a la cantidad de combustible consumido. El otro método conocido como indirecto, involucra un análisis de los gases de combustión así como las pérdidas de calor a lo largo de la tubería. Para fines rápidos el método directo permite tener una buena estimación de datos:

$$\eta = \frac{Q(H - h)}{q * GCV}$$

(Ecuación No. 13)

(McCabe, 2007)

En donde Q representa la cantidad de vapor producido, H la entalpía del vapor, h la entalpía del agua que ingresa a la caldera, q la cantidad de combustible consumido y GCV como calor de combustión del combustible.

4. Cálculo de bomba. Cuando es necesario dimensionar una bomba se puede utilizar directamente la ecuación de Bernoulli con trabajo de bomba y pérdidas por fricción:

$$\frac{p_a}{\rho} + gZ_a + \alpha V_a^2 + \eta W_p = \frac{p_b}{\rho} + gZ_b + \alpha V_b^2 + h_f$$

(Ecuación No. 14)

(McCabe, 2007)

El término h_f representa las pérdidas por fricción en la tubería, para la cual existen diferentes formas de determinarlo:

Pérdidas por expansión:

$$h_{fe} = ke \frac{V_a^2}{2}$$

(Ecuación No. 15)

Donde

$$ke = 1 - \frac{Da}{Db}$$

(Ecuación No. 16)

Pérdidas por contracción:

$$h_{fc} = kc \frac{V_b^2}{2}$$

(Ecuación No. 17)

Donde

$$kc = 0.4 \left(1 - \frac{Db}{Da} \right)$$

(Ecuación No. 18)

(McCabe, 2007)

Para las pérdidas por fricción en tuberías ocasionadas por los accesorios se cuenta con la siguiente ecuación:

$$h_{ff} = k_f \frac{V_a^2}{2}$$

(Ecuación No. 19)

(McCabe, 2007)

Donde k_f representa el coeficiente de pérdida por fricción para distintos accesorios. De la literatura se obtienen los siguientes datos:

Tabla No. 2. Coeficientes de pérdida por fricción en accesorios de tubería con cuerda estándar.

Accesorios	Kf
Te	1
Válvula de bola abierta	0.05
Unión universal	0.04
Codo	0.4
Filtro (rejilla)	5
Cheque de resorte	10
Reducidor	Según diámetros

(McCabe, 2007)

Un dato muy importante a utilizar al realizar estas mediciones de pérdidas por fricción son los diámetros internos de las tuberías de acero:

Tabla No. 3. Diámetro interno en pulgadas y metros.

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro interno (pulg)	Diámetro interno (m)
1/2"	0.622	0.015799
3/4"	0.824	0.02093
1"	1.049	0.026645

(McCabe, 2007)

Por último se cuenta con las pérdidas por fricción que provoca la tubería recta, en donde es necesario calcular el número de Reynolds con:

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu}$$

(Ecuación No. 20)

(McCabe, 2007)

Teniendo el diámetro interno de la tubería y el material que se utiliza, se obtiene el número adimensional: (Flujo turbulento)

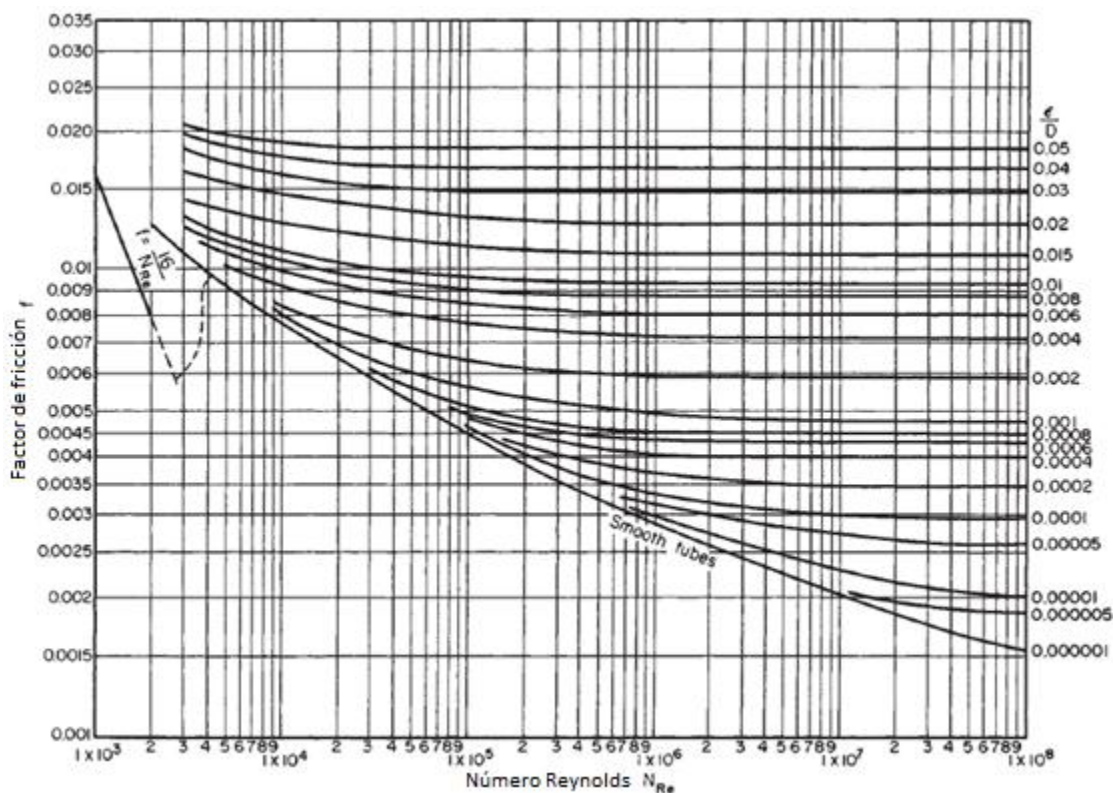
$$\frac{k}{D} \text{ (en pies)}$$

(Ecuación No. 21)

(McCabe, 2007)

Con este número en, se puede estimar el factor de fricción de Fanning con la siguiente Carta:

Figura No. 5. Carta de factores de fricción de Fanning.



(McCabe, 2007)

Y para flujos laminares:

$$f = \frac{16}{N_{re}}$$

(Ecuación No. 22)

(McCabe, 2007)

Con estos datos se determina la pérdida por fricción de la tubería con:

$$h_{fs} = 4f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2}$$

(Ecuación No. 23)

(McCabe, 2007)

Para determinar la potencia de la bomba se necesita el flujo másico que va a transportar la tubería de manera que:

$$P = W_p * m$$

(Ecuación No. 24)

(McCabe, 2007)

5. Dimensiones estándar para agitadores de turbina.

$$\frac{Da}{Dt} = \frac{1}{3}, \frac{H}{Dt} = 1, \frac{E}{Dt} = \frac{1}{3}, \frac{W}{Da} = \frac{1}{5}, \frac{L}{Da} = \frac{1}{4}$$

(Ecuación No. 25)

(McCabe, 2007)

Figura No. 6. Medidas de un agitador de turbina.

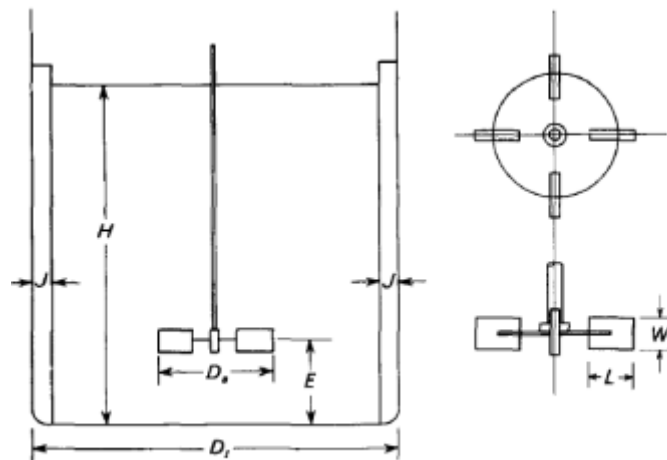


Figura 9.9. Medidas de un agitador de turbina. (Según Rushton et al.³².)

III. ANTECEDENTES

La evaluación inicial de operación de la planta piloto mostró que se hacían procesos de forma manual, algunos ejemplos son: el traslado del aceite desde el lugar de almacenamiento hacia el reactor, el ingreso de metóxido al reactor, y el pesaje del aceite.

Durante las tres producciones de biodiesel realizadas con la planta anterior, se observaron otras complicaciones de operación en la planta. Uno de los mayores problemas era el espacio disponible entre cada tanque para acceder a ingresar la materia prima, aumentando el riesgo de accidentes. Además se vio que el acceso a la línea de agua se encontraba en la parte posterior de la planta, haciendo complicada su conexión y regulación al hacer uso del agua para lavar el biodiesel en forma manual.

Cuando se generaba presión dentro del reactor era porque el metanol se evaporaba, por lo cual se abría una válvula de alivio que hacía pasar el vapor por un condensador de tubos concéntricos que no tenía la superficie de contacto suficiente para hacer condensar al vapor de metanol.

Las razones por las cuales se decidió modificar el espacio de la planta involucran aspectos de seguridad laboral, orden operacional y la reducción de desperdicios como lo son las materias primas, el tiempo de trabajo y el reproceso.

Figura No. 7. Planta piloto con capacidad total de 60 L por lote de producción.

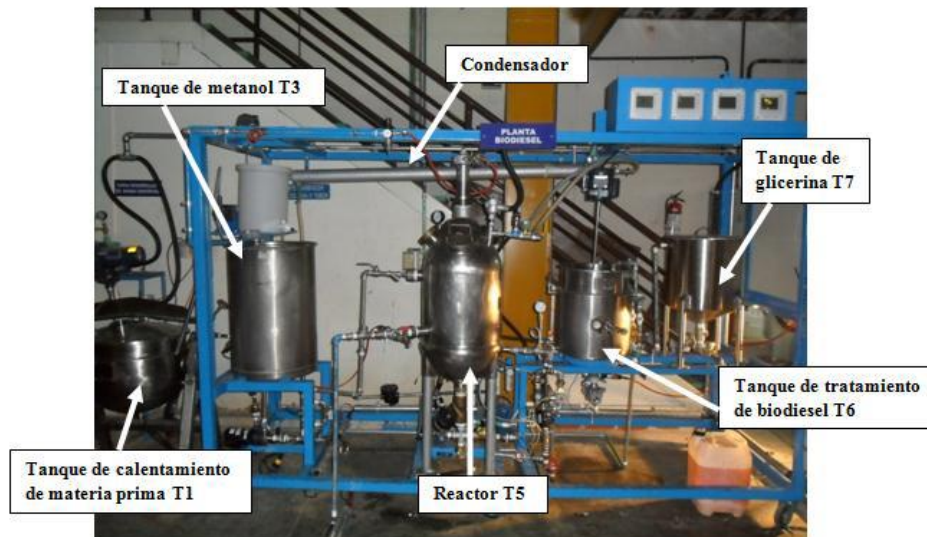
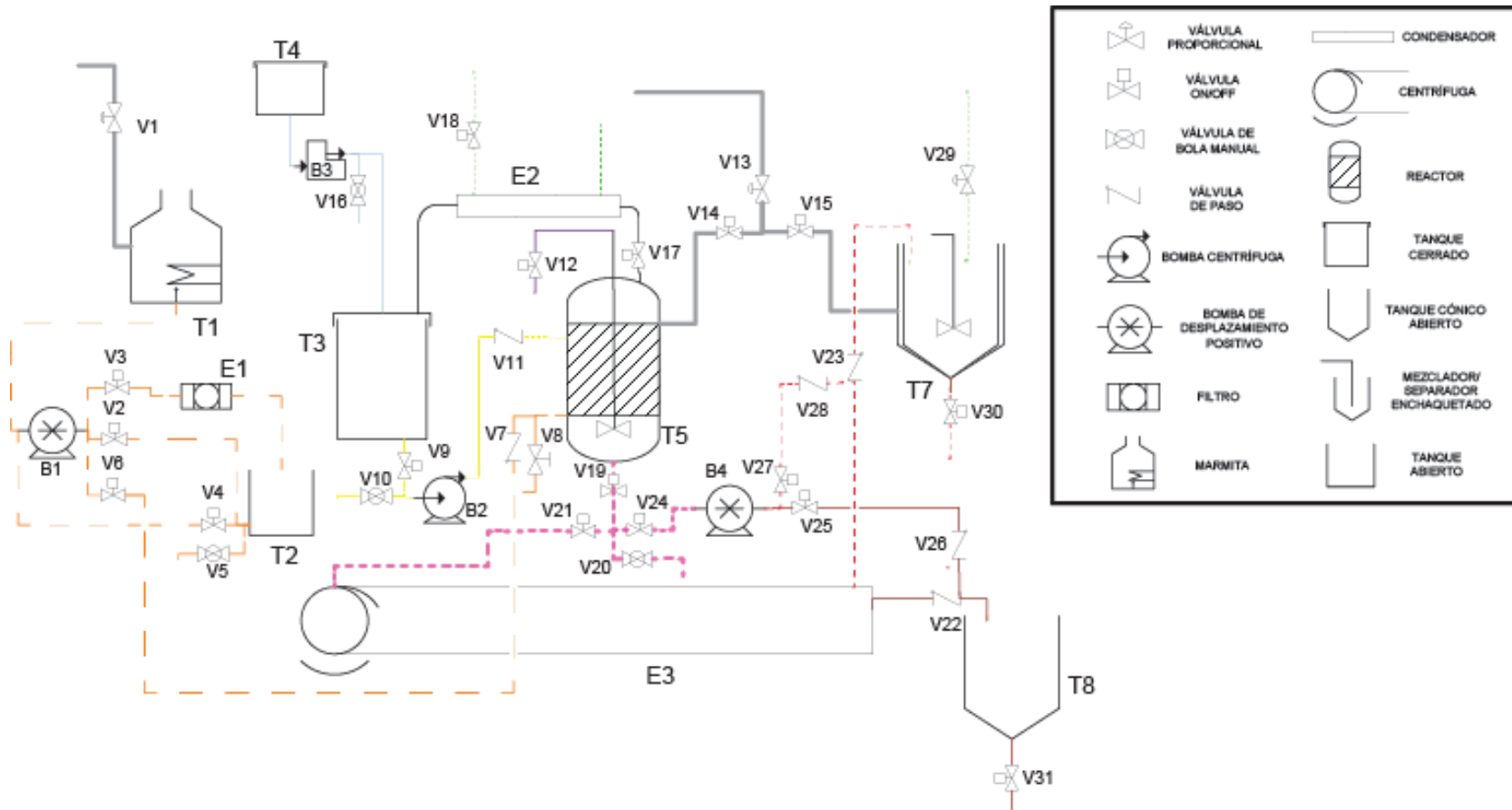


Figura No. 8. Diagrama general de planta piloto de 60 litros de capacidad.



(Kummerfeldt, 2011)

Tabla No. 4. Listado de equipo de la Figura No. 7.

Texto mostrado	Equipo
T1	Tanque para calentamiento de la materia prima
T2	Tanque para aceite filtrado
T3	Tanque para metanol
T4	Tanque para metóxido
T5	Reactor
T6	Tanque para tratamiento de biodiesel
T7	Tanque para glicerina
E1	Filtro prensa
E2	Condensador
E3	Centrífuga

(Kummerfeldt, 2011)

Tabla No. 5. Detalle de líneas de proceso usando el código de colores del Laboratorio de Operaciones Unitarias y COGUANOR, utilizados en la Figura No. 7.

Color	Especie
Anaranjado	Materia prima (aceites o grasas)
Azul	Catalizador básico
Amarillo	Metanol
Gris	Vapor
Morado	Aire comprimido
Magenta	Mezcla biodiesel/glicerina
Rojo	Biodiesel
Verde	Agua
Morado	Glicerina

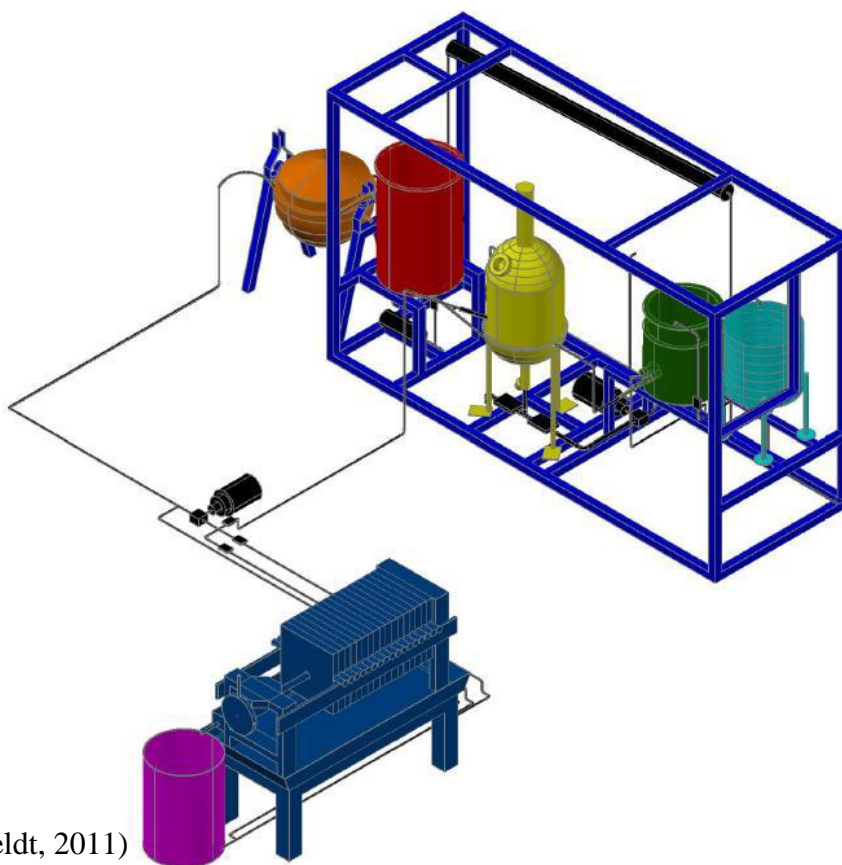
(Kummerfeldt, 2011)

Tabla No. 6. Costos de planta piloto de capacidad de 60 L.

PLANTA DE BIODIESEL	
Descripción	Total
Sensores	\$ 13,855.00
Equipo de cómputo	\$ 894.27
Estructura	\$ 3,201.59
Tubería y accesorios	\$ 3,164.59
Válvulas y bombas	\$ 9,223.83
Cables y accesorios	\$ 478.36
Gabinete y accesorios	\$ 1,247.42
Subtotal	\$ 32,065.06

(Kummerfeldt, 2011)

Figura No. 9. Vista isométrica derecha del modelo de la planta piloto.



(Kummerfeldt, 2011)

IV. JUSTIFICACIÓN

El tema de la producción de combustibles renovables es necesario conocerlo para la preparación ante la posible situación de la escasez de combustibles fósiles y la inevitable alza de precios de éstos dependiendo de su demanda. Por lo cual tener los conocimientos de cómo se lleva a cabo la producción de biodiesel a una escala industrial es una alternativa si no se quiere caer en la dependencia total del petróleo. La producción de biodiesel ayudaría a disminuir la cantidad de petrodiesel utilizada haciendo mezclas como ya se hace en otros países.

En el caso de la Universidad del Valle, se lleva cierta ventaja sobre este tema ya que se cuenta con una planta piloto que ha demostrado dar resultados satisfactorios con una serie de pasos relativamente sencillos. Sin embargo, la planta piloto pudo ser mejorada en el aspecto de realizar cambios en la estructura de la línea de producción así como el diseño que fue requerido para maximizar su capacidad sin la necesidad de hacer una fuerte inversión, como lo fue Q. 74,052.74, comparado con Q.250,107.47 de la inversión de la planta anterior, representando la modificación un 30% de los costos iniciales.

Anteriormente el traslado de aceite se realizaba de forma manual para colocarlo en el reactor, la solución catalítica de hidróxido de sodio con metanol no se almacenaba en un recipiente adecuado y su dosificación era compleja. Por este motivo era necesario hacer un proceso más seguro disminuyendo la manipulación de reactivos y materiales por parte del personal. El biodiesel se recibía en un tanque cuya capacidad de 0.06 m³ (60 L) limitaba el volumen de cada lote producido. Por lo tanto era necesario buscar el equipo que cumpliera con las necesidades de la planta, el cual pudiera triplicar el volumen de producción. Realizar estas mejoras es un paso necesario para acercarse más a un proceso industrial en correcto funcionamiento.

V. OBJETIVOS

A. Generales

1. Aumentar la capacidad de producción de la planta de biodiesel con la visión de acercarse a una planta de tamaño industrial.

B. Específicos

1. Escalar la capacidad de producción de biodiesel desde la capacidad de 0.06 m^3 a 0.2 m^3 por lote reemplazando los tanques para producir más cantidad de biodiesel por cada lote realizado.
2. Dimensionar los tanques, equipo de agitación y bombeo para escalar la planta tomando mediciones del área y los volúmenes que se operarán para poder delimitar el área de operación e instalación del equipo.
3. Determinar los materiales y accesorios necesarios a utilizar para la construcción e instalación de la planta investigando los materiales más adecuados para evitar problemas de corrosión.
4. Cotizar los componentes necesarios para la planta, con los proveedores para tener una referencia de los costos del escalamiento de la planta.
5. Remodelar la planta piloto instalando los nuevos tanques y bombas requeridas y se construirán los bastidores y sistemas de tuberías para que la planta pueda operar de forma correcta.
6. Calcular el costo del nuevo diseño de la planta usando los valores proporcionados por los proveedores para hacer el estudio económico.
7. Calcular el balance de masa y energía de la nueva planta sobre la base de las corridas realizadas en la planta piloto anterior para tener una referencia de la eficiencia de la nueva planta piloto.

VI. PROBLEMA A RESOLVER

Aumentar la capacidad de la planta piloto de biodiesel del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala sin la necesidad de aumentar el espacio que ocupa actualmente igualando las condiciones de operación de la reacción incluyendo el uso del mismo equipo electrónico utilizado en la planta anterior. Se debe lograr aumentar la capacidad para trabajar con lotes hasta de 0.2 m^3 (200 litros), conservando la calidad del biodiesel y reducir el costo de producción de biodiesel por cada lote producido.

VII. METODOLOGÍA

A. Familiarización de proceso

1. Investigación bibliográfica del proceso de biodiesel.
2. Análisis de operación de planta piloto actual de biodiesel.

En esta etapa se buscó en fuentes bibliográficas información sobre el proceso de producción y se consultará información vía internet. También se analizó la función de las válvulas utilizadas y su método de operación.

B. Balance de masa y energía

1. Se llevaron a cabo pruebas experimentales del procedimiento de la planta piloto anterior con fines de tener datos de referencia para el escalamiento.
2. Cuantificación de materias primas y reactivos utilizados.
3. Realización del balance de masa y energía de los equipos utilizados.

Se hicieron tres pruebas en la planta con el fin de obtener datos de la capacidad con que se contaba anteriormente, así como la cantidad de reactivos que se utilizaban para poder realizar el balance de masa y energía. Además se realizaron tres pruebas en escala laboratorio y dos pruebas en la planta final (lotes de 130 L de aceite).

C. Dimensionamiento y diseño

1. Determinación de la nueva capacidad de producción. Fue necesario tomar medidas para ver el espacio con el que se contaba para el tamaño máximo de los tanques a utilizar.
2. Se determinó el volumen de los tanques y se dimensionó el equipo necesario.

D. Diagramas

1. Se realizó el diagrama de flujo del proceso y sus esquemas de elevación y planta.

Cambio de configuración de tanques.

En esta etapa se previó que por el tamaño de los tanques la distribución debía cambiar para poder colocarse de manera que cada equipo tuviera acceso para su manipulación.

E. Cotizaciones

1. Realizar las cotizaciones de los equipos y accesorios adecuados para el nuevo diseño de la planta.

F. Proceso de montaje.

1. Se desinstaló la planta piloto de capacidad de 60 L.
2. Se establecieron las siguientes tres áreas de proceso: preparación de materia prima, producción y recuperación de metanol y purificación de producto final.
3. Se fundieron bases de concreto para la estructura de metal y bastidores.
4. Se construyeron la estructura y los bastidores.
5. Se montaron los tanques.
6. Se montaron las bombas.
7. Se construyeron las tuberías en el siguiente orden: vapor, aire, agua y aceites, incluyendo válvulas automáticas y manuales en sus respectivas ubicaciones.

G. Pruebas de calidad

1. Se realizó una producción de biodiesel con 200 g de aceite en escala laboratorio.
2. Al biodiesel obtenido se le hicieron las siguientes pruebas:
 - a. Prueba 3-27: Ayuda a determinar si la conversión del aceite se llevó completamente a cabo.
 - b. Densidad: Característica fisicoquímica específica del biodiesel.
 - c. Viscosidad: Característica fisicoquímica del biodiesel.
 - d. Número ácido: Prueba para indicar la cantidad de ácidos grasos libres en el aceite.
 - e. pH: Prueba de acidez del biodiesel.

f. Agua y sedimentos: Verifica la presencia de agua y sólidos después del lavado del biodiesel.

Las pruebas de calidad se hacen como protocolo de control de calidad en el laboratorio de Operaciones Unitarias. En éstas, se verifica que los resultados estén entre los parámetros de la norma ASTM para biodiesel. En estas pruebas se verifica la conversión de aceite a biodiesel, aspectos fisicoquímicos como densidad, viscosidad, número ácido y el pH. Por último se verifica la presencia de agua o sólidos en el biodiesel por medio de centrifugación. Se siguen los lineamientos según ASTM D 2709, D445, D664 y D6751-06.

H. Producción de biodiesel en la planta

1. Se utilizó la bomba de aceite para trasladar 130 L hacia el tanque reactor.
2. Se preparó la mezcla de metóxido manualmente.
3. Se calentó con vapor hasta detectar temperatura interna de 60°C.
4. Se agitó por dos horas.
5. Se extrajo la glicerina y se trasladó hacia el tanque de glicerina.
6. Se lavó el biodiesel con agitación y se separó el agua
7. Se llevó a ebullición el biodiesel para retirar toda la humedad.
8. La fase de glicerina se llevó al punto de ebullición del metanol para recuperar metanol.

I. Acciones a tomar en caso de falla en la un lote de producción

1. Extraer mezcla preparada y almacenar en cubetas de 40 L con respectivas tapaderas para reducir pérdida de metanol al ambiente.
2. Esperar que el equipo regrese a temperatura ambiente.
3. Realizar reparaciones necesarias.
4. Realizar pruebas con agua.
5. Trasladar materia prima de cubetas al tanque reactor.
6. Realizar la corrida como de costumbre.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la realización de la mejora de la planta de biodiesel.

Figura No. 10. Balance de masa global de la corrida realizada de 130 L de aceite con un volumen total, incluyendo reactivos, de 158.64 L y una base de 144.72 kg.

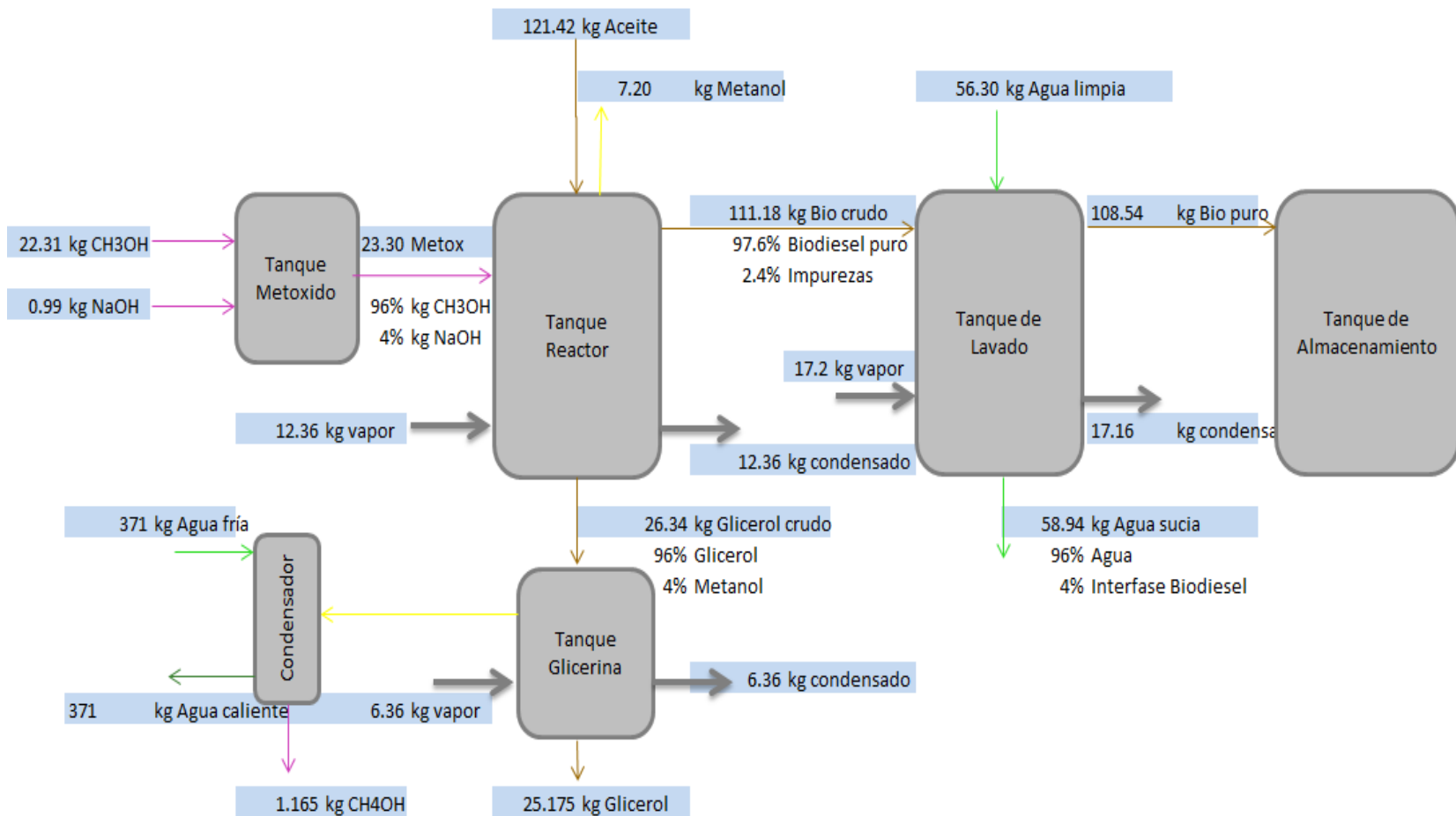


Figura No. 11. Balance de energía basado en un lote de 144.72 kg. (Ver Balance de energía en sección de Cálculos de Muestra.)

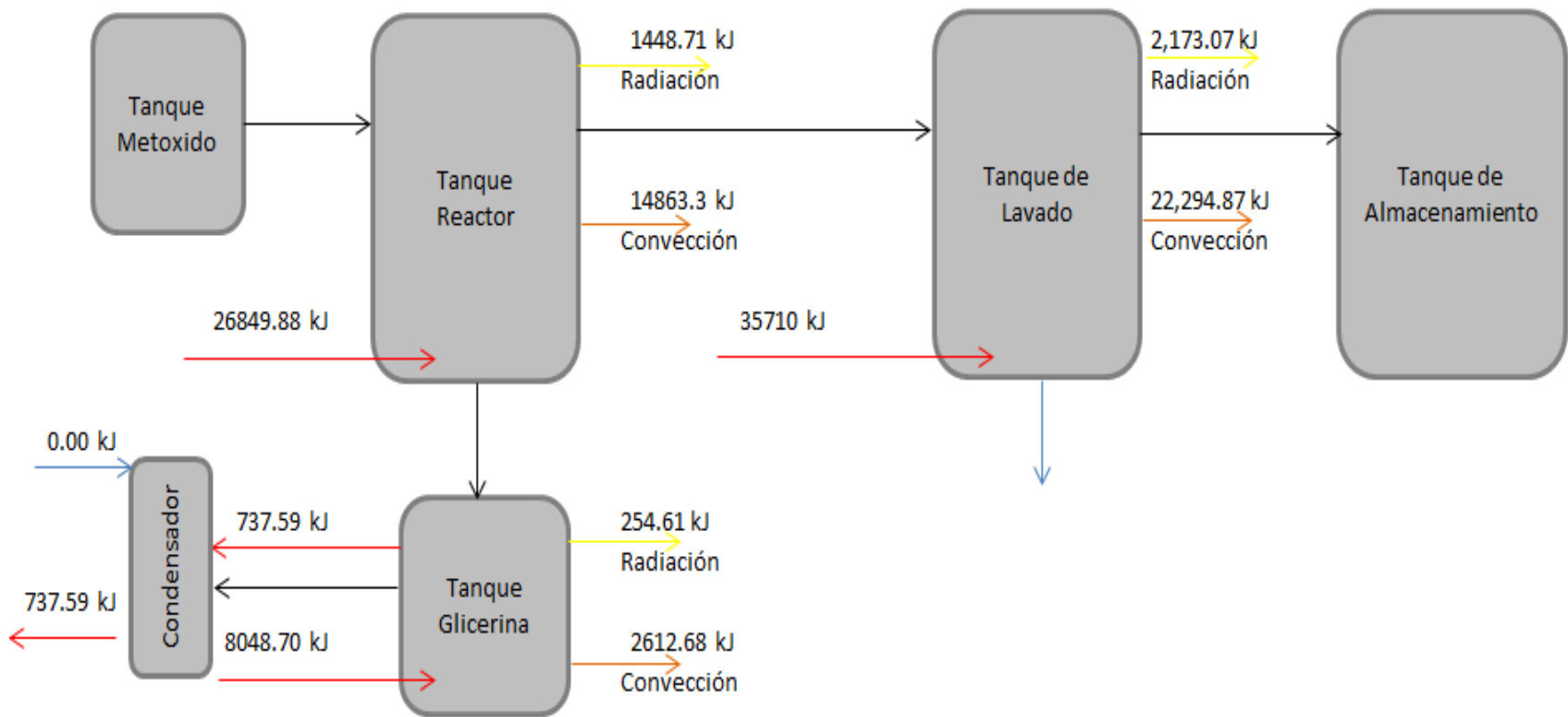
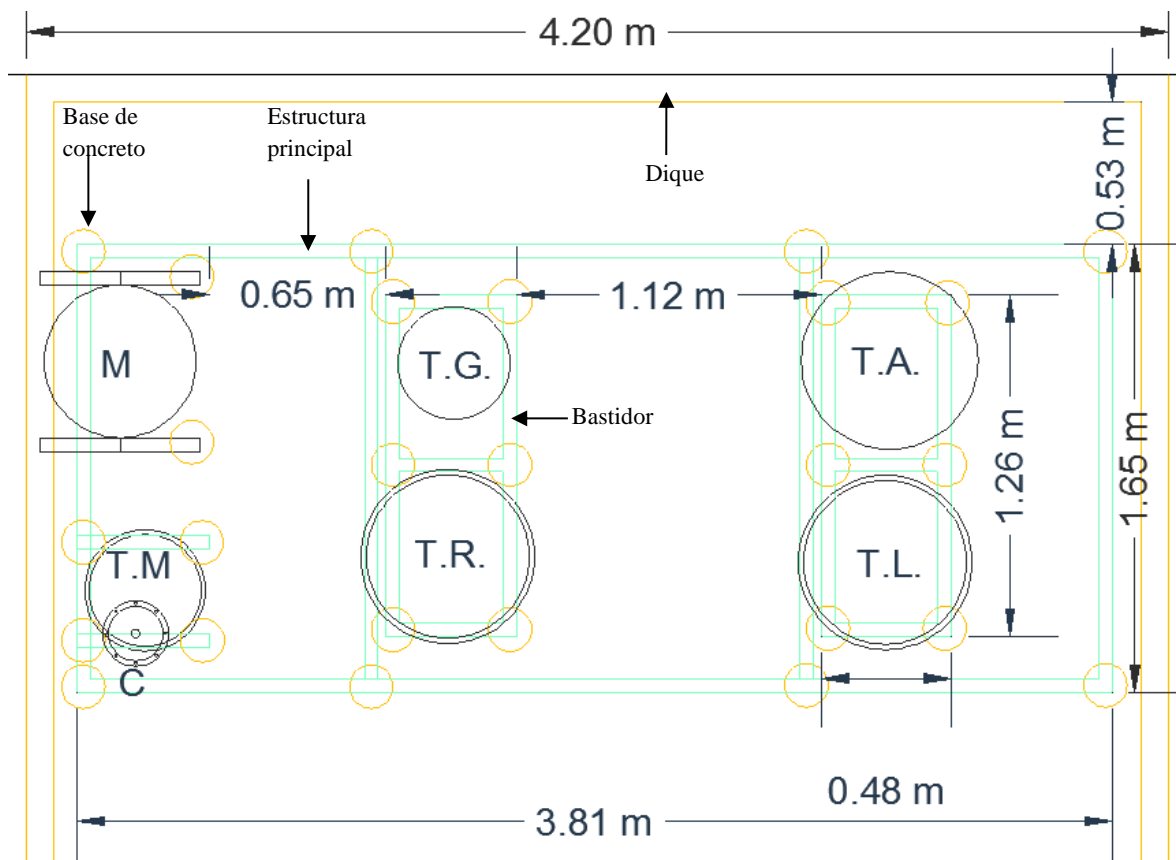


Figura No. 12. Esquema de diseño de escalamiento y distribución de la planta (Vista Planta)



M: Marmita; T.M: Tanque Metóxido; C: Condensador; T.G: Tanque Glicerina; T.R: Tanque Reactor; T.A: Tanque Almacenamiento; T.L: Tanque Lavado.

Figura No. 13. Esquema de diseño de distribución. (Vista elevación)

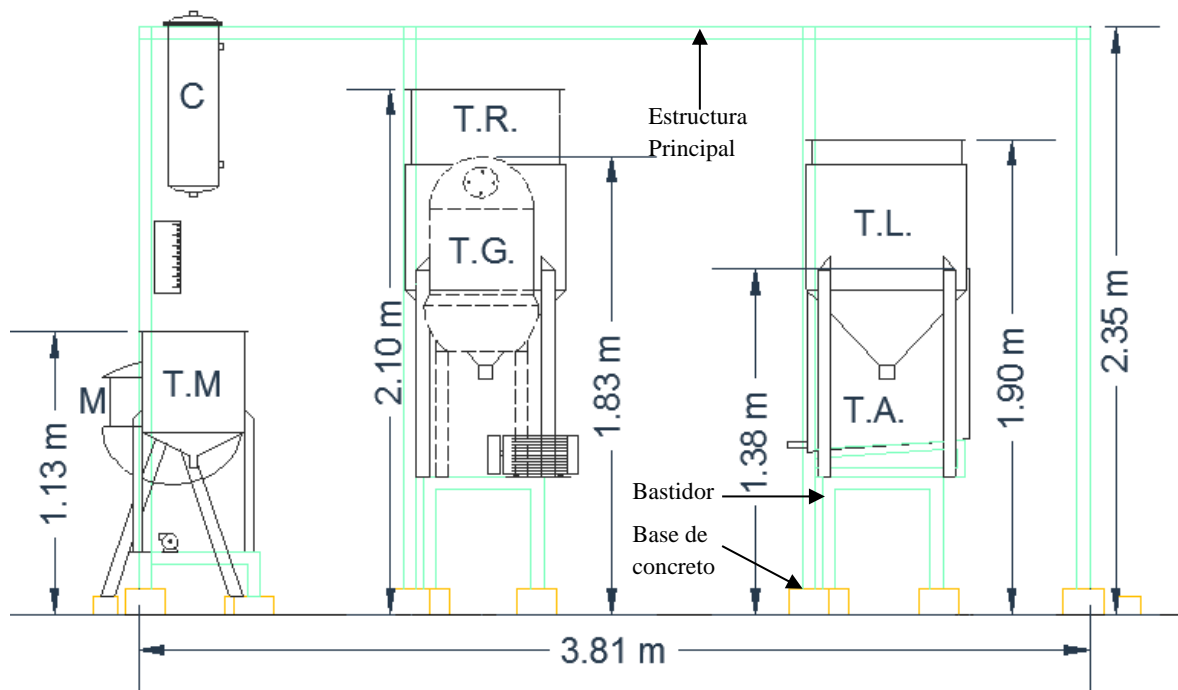


Tabla No. 7. Capacidad y volumen utilizable de los tanques utilizados en la planta.

	Capacidad total (m ³)	Capacidad utilizable (m ³)
Tanque metóxido	0.0572	0.04291
Marmita	0.0631	0.04732
Tanque lavado	0.1979	0.1484
Tanque reactor	0.2542	0.1908
Tanque glicerina	0.0592	0.0446
Tanque almacenamiento	0.2339	0.1755

Tabla No. 8. Tamaño de agitadores según capacidad de los tanques.

	T. Reactor	T. Lavado	T. Glicerina	T. Metóxido
Diámetro agitador (m)	0.20	0.20	0.13	0.13
Largo de Eje (m)	0.60	0.60	0.4	0.4
Distancia del fondo al eje (m)	0.20	0.20	0.13	0.13
Ancho de Palas (m)	0.04	0.04	0.026	0.026
Largo de palas (m)	0.05	0.05	0.0325	0.0325

Tabla No. 9. Potencia mínima requerida de bombas bajo las características de velocidad lineal y fluido.

	Bomba para aceite	Bomba para metóxido	Bomba para biodiesel/glicerina
Q (m ³ /s)	2.98x10 ⁻⁴	1.96x10 ⁻⁴	1.96x10 ⁻⁴
P (kW)	3.45x10 ⁻² (0.05 hp)	8.89x10 ⁻³ (0.01 hp)	9.77x10 ⁻³ (0.01 hp)

Tabla No. 10. Materiales utilizados en las tuberías y tanques de la planta de biodiesel.

Sección	Material	Fluido interior
Tubería para aceite	A.I. 304	Aceite reciclado
Tubería para metóxido	A.I. 304	Metanol, Hidróxido de Sodio
Tubería para biodiesel	A.I. 304	Biodiesel
Tubería para glicerina	A.I. 304	Glicerina
Tubería para agua	H.G.	Agua
Tubería para aire	H.G.	Aire
Tubería para vapor	A.C.	Vapor de agua
Tanque para aceite	Polipropileno	Aceite
Tanque para metóxido	A.I. 304	Metóxido de sodio
Condensador	A.I. 304 + Cobre	Vapor de metanol
Tanque reactor	A.I. 304	Metóxido de sodio, Aceite
Tanque glicerina	A.I. 304	Glicerina, Metanol, Hidróxido de sodio
Tanque lavado	A.I. 304	Biodiesel, Hidróxido de sodio, Metanol
Tanque almacenamiento	A.I. 304	Biodiesel

Tabla No. 11. Accesorios de control de vapor.

Accesorios	Unidades
Regulador de presión	1
Manómetro	3
Trampa de vapor	4

Tabla No. 12. Tabla de accesorios utilizados en el montaje de tuberías.

Tamaño nominal (Pulg)	Accesorio	H.G (uni)	Bronce (uni)	A.I. 304 (uni)	A.C. (uni)	Total (uni)
1/2"	codo	14		15	33	62
	válvula		11	2		2
	uu	9		8	10	27
	T	4		6	9	19
	nc	24		18	37	79
	cheque		1	1		1
	red a 1/4"	1				1
	tubo (m)	9		4.5	10	-
1"	nc			7	2	9
	codo			3	2	5
	uu			1		1
	T			2		2
	bushing a 1/2"	1		2	2	5
	bushing a 3/4"			3		3
	valv			4		4
	tubo (m)			0.5		-
3/4"	nc			5		5
	uu			2		2
	válvula			2		2
	tubo (m)			6		6
	bushing a 1/2"				2	2
	T			1		1
	codo			2		2
2"	T			1		1
	bushing a 1"			1		1
	red a 1/2"			1		1
	red a 1"				1	1
	nc			1		1
TOTAL						245

Tabla No. 13. Cotizaciones realizadas para los tanques necesarios de mayor capacidad de volumen y el condensador de serpentín triple interno.

Componentes	Precio
Tanque reactor 200 L	Q 22,000.00
Tanque lavado 150 L	Q 22,000.00
Condensador	Q 15,600.00
Total	Q 59,600.00

Tabla No. 14. Costos del equipo y materiales utilizados para la construcción de la nueva planta.

Costo de accesorios de tuberías	Q. 12,502.45
Costo de tanques enchaquetados y condensador	Q. 59,600.00
Costo de materiales de construcción	Q. 1,950.29
Total	Q. 74,052.74

Tabla No. 15. Costo de evaporar el metanol de la fase de glicerina producida durante la transesterificación. (Ver Costo de recuperación del metanol remanente en la glicerina)

Costo/L CH₃OH (99.8%) nuevo	Q.14.43
Costo/L CH₃OH (98.3%) recuperado	Q. 4.83
Relación de metanol recuperado con metanol inicial	5.22%

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal de este trabajo de graduación fue el re diseño de la planta de producción de biodiesel para aumentar su capacidad de producción.

Para iniciar con la mejora de la planta piloto de biodiesel del Laboratorio de Operaciones Unitarias fue necesario familiarizarse con el método de operación usado. Esto incluyó conocer el flujo de las materias primas y todos los accesorios que intervienen en su paso, siendo estos accesorios: válvulas de compuerta, de bola, válvulas automáticas proporcionales (análogas) y digitales (abierto/cerrado).

Algunos problemas encontrados durante la operación de la planta piloto de 60 L, fueron: el traslado de aceite desde el cubitanque para pesarlo y luego bombearlo de forma manual hacia el reactor; el ingreso del metóxido hacia el reactor. Además al desmontar la planta se vio que no había un espacio adecuado para acceder a la planta para hacer revisiones, o incluso para ingresar los materiales. Se vio que el acceso a las válvulas de salidas de los tanques era limitada haciendo difícil su manejo. Finalmente se realizó el desmontaje de los cables de todo el equipo electrónico y se vio que el cableado se había realizado de una forma poco ordenada.

Además fue necesario comprender su balance de masa. Una vez comprendido, se procedió al desmontaje de la planta para poder ver en qué partes se podía realizar una mejora, como el diseño de tuberías aéreas, la separación de cada área de proceso, y a la vez, recolectar las piezas con un posible uso en la planta de mayor capacidad. Analizando la configuración de tuberías, se observó que muchas partes podían ser reemplazadas con materiales nuevos y los más adecuados según el fluido interno, debido que en algunas ocasiones, como la tubería de vapor, aceite, biodiesel y glicerina, se encontró que se utilizaron hasta tres distintos tipos de tubería para un solo fluido.

En esta parte, el análisis del área fue muy importante ya que al aumentar la capacidad de producción, el área de acceso se reduciría y complicaría el manejo de la planta,

además de obstaculizar el traslado de recipientes auxiliares como lo son las cubetas de 20 Y 40 L.

Cuando se hizo el análisis del espacio con el que contaba la planta piloto se determinó que tenía dimensiones de 2.96 m de longitud, 1.05 m de ancho y 1.76 m de altura, dando un área superficial de 3.1 m², mientras que el espacio disponible era de 12.2 m² (4.00 m x 3.05 m).

Se tomó en cuenta que se podía hacer nuevamente una configuración en línea, en este caso los tanques de la planta habrían quedado muy pegados uno al otro complicando la construcción de tuberías. También se tomó en cuenta la configuración en forma de U pero el acceso por la parte posterior tendría un espacio muy reducido. Finalmente se consideró colocar los tanques por secciones, ya que los componentes más grandes son seis: Marmita, Tanque de Metóxido, Tanque Reactor, Tanque Glicerina, Tanque de Lavado y Tanque de Almacenamiento, se hicieron las siguientes divisiones: área de recepción de materia prima, para la marmita y el tanque de metóxido, área de Proceso, y área de purificación de producto final y almacenamiento. Aquí no se tomó en cuenta el condensador debido que su tamaño es menor y su colocación en la planta tenía más flexibilidad.

Se decidió tomar la configuración de esta manera y eliminar la movilidad de la planta ya que las cantidades con las que se desea trabajar son muy grandes para ser trasladadas de un lugar a otro, haciendo más difícil su traslado. El incluir una estructura movable para la planta piloto, incluye muchos aspectos técnicos a tomar en cuenta, como los servicios auxiliares de vapor, aire, agua y energía eléctrica, los cuales limitan a hacer un traslado solamente dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Para iniciar con esta configuración, se consideró en dejar un espacio suficiente para manipular materiales y sus componentes. (Ver Figura No. 7.) Otro aspecto importante a mencionar es que se procedió a construir bastidores para colocar los tanques sobre estos, siempre y cuando en la parte inferior del bastidor cupieran recipientes de 40 L por cualquier eventualidad en la que se necesitara operación manual. Los bastidores se colocaron con el propósito de elevar la altura de la salida inferior del tanque, ya que

debido a las válvulas utilizadas en las salidas, la altura original del tanque no era suficiente.

Para poder soportar los tanques, se consideró que era necesario hacer bases de concreto fundidas al suelo para dar mayor estabilidad a los bastidores. Cada una de estas bases tiene cuatro pernos que tienen 10 cm de profundidad y sobresalen de la base 5 cm, teniendo un largo total de 25 cm cada uno. La base de concreto se le asignó una altura de 10 cm.

Además de los bastidores, se diseñó una estructura con el propósito de delimitar el área de la planta de biodiesel. Esta estructura también sirvió para brindar apoyo a las tuberías de agua, aire, vapor y aceite. Los bastidores se hicieron con el propósito de delimitar las áreas de tratamiento de materia prima, el área de producción de biodiesel y el área de purificación de biodiesel. Se decidió hacerlo así porque se establece un orden lógico del proceso de producción y al delimitar las áreas se tiene mayor cuidado con los componentes así como con la manipulación de la materia prima.

El panel del equipo electrónico se sujetó en la parte derecha de la estructura y se colocó al lado del tanque de almacenamiento debido que este tanque no tiene encaquetado y así protegerlo de las altas temperaturas. Al lado izquierdo del panel se colocó en forma vertical los controladores indicadores de los sensores de conductividad.

Una vez establecido el orden de los tanques, fue necesario comprender la función individual de las válvulas automáticas, para poder colocarlas nuevamente y ser totalmente útiles con el mismo programa diseñado anteriormente.

Por ejemplo, la tubería de vapor es la tubería que más válvulas automáticas utiliza. En cada punto en donde se colocó una válvula automática se hizo una división (bypass) para colocar una válvula manual y poder operar la tubería tanto de forma manual como automática. En esta sección de vapor, se utilizó un bypass para el paso de vapor hacia la marmita, otro hacia el tanque reactor y tanque de glicerina simultáneamente, y otro para el paso de vapor hacia el tanque de lavado. En el caso del vapor que se dirige simultáneamente hacia el tanque reactor y el tanque de glicerina, se colocó una válvula

manual en la entrada de cada uno de los mismos para evitar la entrada de vapor en la chaqueta del equipo que no se esté utilizando.

Aquí es importante mencionar que las válvulas automáticas deben estar cerradas al hacer pruebas ya que en la corrida manual que se realizó, se observó que una válvula manual permitía flujo de vapor, causando calentamiento innecesario en uno de los tanques. Esto es dañino para el equipo ya que la expansión de los metales puede provocar que se doblen las paredes.

Equipo importante utilizado en la tubería de vapor es el regulador de presión, trampas de vapor y manómetros. Ya que el regulador de presión no permite que pase mayor presión de la debida que pudiera dañar los tanques y tuberías. Las trampas de vapor colocadas en la salida de cada chaqueta de los tanques, ayuda a extraer solamente el vapor condensado. Tabla No. 11. Accesorios de control de vapor.

Se utilizaron dos bypass en la tubería del agua, uno para el flujo de agua que va al condensador de metanol y el otro que va al tanque de lavado del biodiesel.

En la tubería de glicerina y biodiesel se utilizaron dos “bypass”, uno dirigido al tanque de glicerina y el otro hacia el tanque de lavado. Estos se colocaron lo más cercanos posible con el objetivo de tener la función de una T para desviar los flujos y que no quedara acumulado o estancado el fluido dentro de la tubería. De lo contrario, se podría acumular glicerina en la tubería que va hacia el tanque de biodiesel.

Cuando se instalaron los tanques sobre los bastidores, fue posible iniciar la construcción de las tuberías. En este punto fue importante la decisión de la colocación de las bombas. La primera bomba en colocarse fue la que lleva la glicerina y el biodiesel a sus respectivos tanques. Debido que el espacio era reducido fue necesario hacer una estructura con rieles para permitir movimiento de la bomba y hacer su acople con las uniones universales de manera más fácil.

Se implementó una nueva bomba a la planta de biodiesel para ayudar a trasladar de manera mecánica el aceite hacia el tanque reactor y que a la vez pudiera succionar la materia prima para almacenarla en un cubitanque.

Se utilizó una bomba de desplazamiento positivo porque el aceite es un líquido viscoso y no se utilizó una bomba centrífuga porque en éstas se reduce el rendimiento si el fluido es viscoso. Esta bomba permite alimentarse de dos lugares: la salida del cubitanque y por medio de una manguera. El propósito de la manguera es succionar el aceite que se lleva en canecas y trasladarlo al cubitanque sin tener que subir hasta la parte superior del mismo y agregarlo manualmente. En la parte de la succión de la bomba se agregó un filtro en forma de Y que tiene un malla cilíndrica en su interior para retener partículas que pudieran haber en el aceite.

En la parte de la descarga de la bomba, se colocó una T y dos válvulas de bola para dirigir el flujo hacia el cubitanque o hacia el reactor. Para medir la velocidad de succión se realizaron cinco corridas y se obtuvo la velocidad de succión. (Ver Tabla No. 20).

Para colocar la bomba de metóxido se encontró el problema de su instalación ya que la parte del motor no quedaba dentro del bastidor. Para vencer este reto, fue necesario hacer una estructura de carriles voladiza y se colocó en posición para que la descarga de la bomba estuviera en la parte posterior del tanque de metóxido y a la vez que la tubería pudiera ser soportada por la estructura antes de llegar a la entrada del tanque reactor. Esta bomba es de acero inoxidable debido que va a trabajar con sustancias corrosivas como lo son las bases fuertes de hidróxido de sodio o potasio. Es muy importante tomar precauciones cuando se trabaja con un alcohol como el metanol debido que es tóxico, se puede ingerir por la piel, por las vías respiratorias y puede causar heridas graves a los ojos por salpicaduras. Para su manipulación es indispensable trabajar con lentes de protección, guantes y mascarilla con filtros especiales para vapores de metanol.

La colocación de la bomba en la salida del tanque de metóxido es un punto muy importante en cuanto a la seguridad operacional, debido que se trabaja con sustancias tóxicas, corrosivas e inflamables. A pesar de servir como una herramienta de ayuda, es indispensable tomar en cuenta los aspectos técnicos que evitan que se cause un accidente como por ejemplo, que sea a prueba de explosiones (explosion proof), o que el equipo esté conectado a tierra para evitar que se almacene energía estática.

Para poder medir el nivel de aceite en el interior del tanque reactor se colocó en la salida una pieza T con una manguera y una válvula de bola para permitir que se ajustara el nivel del aceite en su interior. Es importante tomar en cuenta que en el momento de la operación se debe cerrar esta válvula para no tener derrames por el extremo superior de la manguera debido a la presión que se pueda generar en el reactor. También se evitaría la formación de glicerina entre la manguera.

Cuando se realizó la corrida de 130 L de aceite, se obtuvo 26.34 kg de Glicerina cruda, la cual fue trasladada al tanque de glicerina para evaporar el metanol y condensarlo para su posterior uso. De esta prueba se obtuvo 1.165 kg de metanol. La cantidad obtenida fue baja comparada con la cantidad inicial de glicerina, sin embargo, esta evaporación puede deducirse que es baja debido que el tanque de Glicerina no cuenta con un agitador para homogenizar la temperatura del fluido.

Para la ubicación del condensador se analizaron dos posibles ubicaciones, la primera era a un costado del tanque de glicerina y el otro en la parte superior del tanque de metóxido. Se optó por colocarlo en la esquina inferior izquierda en la vista de elevación (Ver Figura No. 12), sobre el tanque de metóxido. Las razones que se evaluaron de esta posición fueron: que el condensado pudiera bajar y caer directamente al tanque de metóxido, reduciendo la intervención humana. Además, en esta posición no obstaculiza el paso.

Al realizar el balance de masa con una corrida de 130 L, se obtuvo una eficiencia de conversión de 75% respecto a todos los reactivos juntos, es decir, 144.72 kg. (Ver Tabla No. 17). Se puede observar que hay una pérdida de 7.2 kg de metanol. Se sabe que al menos un tercio del metanol ingresado es consumido para que se dé la transesterificación. Sin embargo, la recuperación de metanol fue muy por debajo de la esperada con 1.165 kg de metanol. Sin embargo, esta pérdida se puede explicar por distintos factores ya que se produjo una fuga al pie del reactor y fue necesario detener la corrida trasladando el contenido a cubetas de 40 L. Esta materia prima ya estaba al menos a 60°C, cercano al punto de ebullición del metanol. Aunque las cubetas se taparon, pasaron un día sin ser movidas, tiempo en el cual se pudo ocasionar gran pérdida del metanol. Otro problema observado durante la corrida, media vez solucionado el

problema, fue que el reactor no hizo un cierre hermético y se produjeron fugas durante el tiempo de reacción. Sin embargo, la reacción se llevó a cabo produciendo un biodiesel satisfactorio.

Al realizar el balance de energía se tomaron en cuenta las pérdidas por radiación y convección que hay hacia el ambiente. (Ver Balance de energía en Datos Calculados). Se obtuvo que 70,608.58 kJ ingresan al sistema en forma de vapor, los cuales representan un costo de Q. 43.55, de los cuales 3876.32 kJ son disipados al ambiente en forma de radiación y 39,770.85 kJ son por convección, mientras que el restante es utilizado para que se lleve a cabo la reacción y posteriormente es disipado al ambiente. Las pérdidas por radiación y convección representan un costo de Q. 26.92. (Ver Cálculo de muestra No. 8)

Esto muestra que es importante tomar en cuenta las pérdidas y para hacer un uso eficiente de la energía se puede colocar aislantes térmicos que ayuden a reducir la pérdida por radiación y convección.

El escalamiento de la planta se realizó utilizando un factor de tres veces la capacidad anterior. Esto se determinó al conocer el diámetro y la altura de los tanques que ofrecían los proveedores para las capacidades de 150 L y 200 L. No sería posible aumentar de gran manera el tamaño de la planta ya que el reactor de 200 L tiene una altura de 2.10 m, sin incluir la altura del agitador. La altura entre el reactor y el techo es de 1.20 m.

Al realizar el cálculo del volumen utilizable de los tanques se tomó un factor de seguridad de $\frac{3}{4}$ la capacidad total del mismo con el propósito de evitar derrames ocasionados por la formación del vórtice en el momento de producirse la agitación.

Al realizar los cálculos de la potencia de bomba requerida para cada una de las tres bombas, se obtuvo que la bomba para transportar aceite desde la altura del suelo hasta la parte superior del reactor es de 0.05 hp, mientras que las bombas de metóxido y de biodiesel necesitan una capacidad de 0.01 hp. Estos resultados son sumamente bajos incluyendo todos los factores de fricción que pueda haber por accesorios y por tuberías. Sin embargo, se puede interpretar que esa es la potencia mínima requerida para trasladar los fluidos de aceite, metóxido y biodiesel a una velocidad de 1 m/s a una altura de 2.35

m. En el montaje de la planta se instalaron bombas con motores de 1.5 hp para el transporte de aceite y biodiesel. La bomba para metóxido se desconoce la capacidad ya que los datos de placa son ilegibles, pero por el tamaño se estima que tiene una capacidad menor. (Ver Tabla No. 9)

Cuando se realizó el lote de 130 L, se pudo observar en la parte superior del tanque, que el agitador utilizado tiene aspas de un tamaño muy pequeño, y que el largo del vástago es menor que el deseado. Por lo cual se realizó los cálculos para dimensionar el tamaño adecuado para los agitadores de los tanques que necesitan agitación. (Ver Tabla No. 8).

Aquí es importante mencionar que se necesita agregar un agitador al tanque de glicerina y al tanque de metóxido para que realice de mejor manera la evaporación de metanol y en el caso del metóxido para que se disuelva el hidróxido de sodio.

En el montaje se reemplazó los materiales inadecuados por los materiales más adecuados. (Ver Tabla No. 10). Resumiendo la lista de materiales, se utiliza acero inoxidable (A.I. 304) para todos los tanques, ya que resisten la Corrosividad del biodiesel y el hidróxido de sodio. Por ende, todo el transporte de aceite, biodiesel y glicerina se utilizó tuberías de A.I. 304. Para la construcción de tubería de vapor se utilizó acero al carbón (A.C.) debido que resiste de buena manera las condiciones del vapor y tiene un bajo costo. (Ver Tabla No. 34). Para los sistemas auxiliares de agua y aire, se utilizó tubería de hierro galvanizado, ya que tiene un bajo costo y resiste la corrosividad de los fluidos.

Los componentes necesarios adicionales para la construcción de la planta fueron, el tanque reactor de 200 L, el tanque de lavado de 150 L y el condensador. Se realizaron cotizaciones a diferentes proveedores, siendo Talleres Hernández la mejor oferta con Q.22,000.00 por cada tanque enchaquetado y Q.15,600 por el condensador.

En la Tabla No. 14 se puede observar que el precio total fue Q.74, 052.74, de los cuales Q.12,502.45 fueron de accesorios de tuberías y Q.1950.29 de materiales de construcción. (Detalle en Tabla No. 32 -Tabla No. 34)

El último resultado obtenido de mucha importancia es el costo que tiene recuperar cada litro de metanol que permanece en la glicerina después de la obtención del biodiesel. Aquí se obtuvo que de 26.34 kg de glicerina cruda se logró separar 1.165 kg de metanol. Con la cantidad de vapor condensado recolectado tras la evaporación del metanol, se procedió a realizar los cálculos del costo del vapor de la caldera asumiendo que la caldera tiene una eficiencia de 60%, y que el galón de diesel tiene un precio de Q.32.00. (Ver ecuación No. 13, Cálculos de muestra). Se obtuvo que cada litro de metanol nuevo tiene un precio de Q.14.13 con un 99.8% de pureza, mientras que recuperar un litro de metanol tiene un costo de Q.4.83 con 98.35% de pureza, haciendo notable la diferencia de costos y demostrando que sí es económicamente importante recuperar el metanol, además de proteger el medio ambiente de desperdiciar esta sustancia tóxica.

X. CONCLUSIONES

1. De un lote de 130 L de aceite se obtuvo 108.54 kg de biodiesel, dando una eficiencia de conversión de 75%.
2. Se determinó que los mejores materiales para la planta de biodiesel, buscando economía y buen funcionamiento son: acero inoxidable para cualquier fluido de aceite, biodiesel y glicerina; acero al carbón para tubería de vapor; y tubería de hierro galvanizado para aire y agua.
3. Se determinó que la mejora de la planta para aumentar su capacidad de producción tuvo un costo de Q.74, 052.74 lo que incluye los tanques encaquetados, accesorios de tubería y materiales de construcción.
4. Se recuperó 1.165 kg de metanol con 98.35% de pureza de 26.34 kg de la fase de glicerina producida durante la producción de biodiesel, siendo esta cantidad el 5.22% del metanol total utilizado al inicio del proceso.
5. El vapor generado por la caldera pirotubular del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle marca Cleaver Brooks con una potencia de 1, 855,000 BTU/h tiene un costo de Q.4.83 para recuperar 1 L de metanol, haciendo factible la recuperación de metanol a partir de la fase de glicerina obtenida en el proceso de producción de biodiesel.
6. Se determinó que no es posible utilizar el sello para roscas de tuberías “Permatex®” en las secciones en las que las temperaturas son mayores a 50°C porque como consecuencia se producen fugas.

XI. RECOMENDACIONES

1. Instalar un control de encendido manual para las bombas de aceite, biodiesel/glicerina y metóxido.
2. Instalar bomba y tubería desde el tanque de almacenamiento hacia el cubitanque seleccionado para almacenar biodiesel.
3. Poner aislante térmico en todos los tanques que tengan enchaquetado para reducir las pérdidas energéticas por convección y radiación.
4. Darle mantenimiento a las uniones de tuberías reemplazando el teflón una vez al año y haciendo la revisión de desgaste para ver si es necesario hacer cambios y prevenir accidentes.
5. Realizar un diagrama de instrumentación y control para la nueva planta.
6. Solicitar los agitadores sugeridos para el tanque reactor y el tanque de lavado para tener una mejor agitación durante la reacción y el proceso de lavado y secado.

XII. BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta, Fernando. 2008. *Manual de construcción y uso de reactor para producción de biodiesel a pequeña escala*. Editorial Soluciones Prácticas. ISBN: 9972471856
2. Ahn, E., M. Koncar, M. Mittelbach, R. Marr. *A low-waste process for the production of biodiesel*. Sep. Sei. Technol. 1995, 30, 20021-2033.
3. Benjumea, Pedro N. 2009. *Biodiesel: Producción, calidad y caracterización*. 1ª Edición. Universidad de Antioquía. ISBN: 9587143477
4. Demirbas, Ayhan. 2008. *Biodiesel: A realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. 1ª Edición. Springer. ISBN: 1846289947
5. Escogar, José; Sigüenza, Luis. 1996. *Mantenimiento y Montaje de instalaciones de Edificio y Proceso*. Editorial Ministerio de Educación de España.
6. Himmelblau, David. 1997. *Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química*. 1ª Edición. Prentice-Hall.
7. Keim, G.I. Treating Fats and Fatty Oils, U.S. Patent 2,383,601, 1945.
8. Knothe, G., Krahl, J., Gerpen, J.V. 2010. *The Biodiesel Handbook*. 2a edición. AOCS PRESS, Urbana, Illinois.
9. Kummerfeldt, Bernardo. Et. Al. 2011. *Megaproyecto “Tercera fase de la automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala”*.
10. McCabe, Warren. 2007. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 7ª Edición. McGraw-Hill.
11. Schwab, A. W., M. O. Bagby, B. Freedman. *Preparation and properties of diesel fuels from vegetable oils*. Fuel 1987, 66, 1372-1378.
12. Stidham, W. D., D. W. Seaman, M. F. Danzer. *Method for preparing a lower alkyl ester product from vegetable oil*. U.S. Patent 6,127,560 (2000).
13. Van Gerpen, J.H.: E.G. Hammond; L. Yu; A. Monyem. *Determining the Influence of Contaminants on Biodiesel Properties*, Society of Automotive Engineers Technical Paper Series No. 971685: Warrendale, PA, 1997.

14. Van Ness, H.C. 2007. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. 7ª Edición. McGraw-Hill.
Wimmer, T., *Process for the Production of Fatty Acid Esters of Lower Alcohols*. U.S. Patent 5,399,731, 1995.

XIII. APÉNDICE

A. Cálculos de Muestra

1. Cantidades utilizadas de materia prima

Realizando una corrida con 130 L de aceite:

$$m_{aceite} = V_{aceite} * \rho_{aceite} = 130 L \cdot 0.934 \frac{kg}{L} = 121.42 kg \text{ aceite}$$

$$\begin{aligned} m_{NaOH} &= m_{aceite} * cte_{NaOH} = 121.42 kg \text{ aceite} \cdot 0.008162 \frac{kg NaOH}{kg \text{ aceite}} \\ &= 0.9910 kg NaOH \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{CH_3OH} &= m_{aceite} * cte_{CH_3OH} = 121.42 kg \text{ aceite} \cdot 0.18376 \frac{kg NaOH}{kg \text{ aceite}} \\ &= 22.31 kg CH_3OH \end{aligned}$$

$$m_{mezcla} = 144.72 kg \text{ mezcla}$$

Del cual se obtuvo la masa de la glicerina cruda

$$m_{glicerina} = 26.34 kg$$

Tras la corrida, el producto biodiesel es:

$$m_{biodiesel} = 111.18 kg \text{ biodiesel crudo}$$

Por lo tanto se obtiene una masa de metanol evaporado de:

$$\begin{aligned} m_{vap \text{ metanol}} &= 144.27 kg \text{ mezcla} - 26.34 kg \text{ glicerina} \\ &\quad - 111.18 kg \text{ biodiesel crudo} = 7.2 kg CH_3OH \end{aligned}$$

Tras evaporación de metanol de la glicerina cruda se recupera:

$$m_{metanol} = 1.1658 kg$$

El agua a utilizar para enfriamiento en el condensador es:

$$m_{\text{agua enfriamiento}} = 0.10305 \text{ kg/s}$$

La condensación se realizó por 1 hora (3600 s)_

$$m_{\text{agua enfriamiento}} = 371 \text{ kg}$$

La cantidad de agua utilizada para lavar el biodiesel es:

$$m_{\text{agua lavado}} = 55.99 \text{ kg}$$

La masa del biodiesel lavado pero con contenido de humedad es:

$$m_{\text{agua lavado}} = 58.94 \text{ kg}$$

La masa del biodiesel seco es:

$$m_{\text{biodiesel seco}} = 108.54 \text{ kg}$$

2. Balance de masa

Base: 1 lote de 130 L de aceite

Tanque de metóxido

$$\text{entradas} = \text{salidas}$$

$$0.99 \text{ kg NaOH} + 22.31 \text{ kg CH}_3\text{OH} = 23.3 \text{ kg Metóxido}$$

Tanque reactor

$$\begin{aligned} 23.3 \text{ kg Metóxido} + 121.42 \text{ kg Aceite} \\ = 111.18 \text{ kg Biodiesel crudo} + 26.34 \text{ kg Glicerina cruda} \\ + 7.2 \text{ kg CH}_3\text{OH evaporado} \end{aligned}$$

Tanque glicerina

$$26.34 \text{ kg Glicerina} = 1.265 \text{ kg CH}_3\text{OH} + 25.17 \text{ kg Glicerina pura}$$

Tanque de lavado

$$111.18 \text{ kg Biodiesel crudo} + 56.30 \text{ kg agua} \\ = 108.54 \text{ kg Biodiesel} + 2.64 \text{ kg Interfase Biodiesel}$$

Condensador

$$1.165 \text{ kg } CH_3OH_{vap} = 1.165 \text{ kg } CH_3OH_{liq}$$

Balance de masa global

$$entradas = salidas$$

(Ecuación No. 4)

$$entradas = 22.31 \text{ kg } CH_3OH + 0.99 \text{ kg } NaOH + 121.42 \text{ kg Aceite} \\ = 144.72 \text{ kg Materia prima}$$

$$salidas = 7.2 \text{ kg } CH_3OH + 25.17 \text{ kg Glicerol puro} \\ + 1.165 \text{ kg } CH_3OH \text{ recuperado} + 108.54 \text{ Biodiesel puro} \\ + 2.64 \text{ kg Biodiesel interfase} = 144.72 \text{ kg Materia prima}$$

3. Balance de energía

Tanque reactor

La cantidad de energía requerida para llevar a cabo la reacción con los siguientes datos es:

$$C_p \text{ Aceite} = 2.0 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ NaOH} = 1.465 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ } CH_3OH = 2.546$$

$$q_{mezcla} + q_{radiacion} + q_{conveccion} = q_{vapor}$$

(Ecuación No. 6)

$$m_i C p_i \Delta T + \sigma A \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) + h_i A \Delta T = m_{vapor} H_{vapor}$$

Calor necesario para la mezcla:

$$m_{aceite} = \frac{121.42 \text{ kg}}{7200 \text{ s}} = 0.01686 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{NaOH} = \frac{0.9910 \text{ kg}}{7200 \text{ s}} = 0.0001276 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{CH_3OH} = \frac{22.31 \text{ kg}}{7200 \text{ s}} = 0.003099 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$q_{mezcla} = 60 - 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 0.01686 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 2.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} + 0.0001276 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1.465 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \\ + 0.003099 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 2.546 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} = 1.4629 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 1462.9 \text{ W}$$

Calor por pérdidas de radiación

$$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

$$\varepsilon = 0.08 \text{ (metales pulidos)}$$

(McCabe, 2007)

$$q_{radiacion} = 5.6697 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{s}} * 2\pi \cdot 0.32 \text{ m} \cdot 0.80 \text{ m} \cdot 0.08 \cdot (433^4 - 295^4) \text{ K} \\ = 201.21 \text{ W}$$

Calor por pérdidas de convección

$$h_{aire} = 2.39 \frac{\Delta T}{L}^{1/4} = 2.39 \frac{160 - 22}{0.8}^{1/4} = 9.30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$q_c = 2\pi \cdot 0.32 \text{ m} \cdot 0.8 \text{ m} * 9.30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} * 160 - 22 \text{ } ^\circ\text{C} = 2064.34 \text{ W}$$

Flujo másico de vapor

$$q_{vap} = m\lambda = m H_v - H_l$$

Por trabajar con vapor saturado a 90 psi:

$$H_v - H_l = 2757 - 676 \frac{kJ}{kg} = 2081 \frac{kJ}{kg}$$

Despejando el flujo másico de vapor requerido durante las 2 horas de reacción

$$m_{vap} = \frac{q_{mezcla} + q_{radiacion} + q_{conveccion}}{H_v - H_l}$$

$$m_{vap} = \frac{1462.9 J/s + 201.21 J/s + 2064.34 J/s}{2,081,000 J/kg} = 0.001792 kg/s$$

$$m_{vap} = 0.001792 \frac{kg}{s} * 2 * 3600 s = 12.90 kg vapor$$

$$E_{vap} = 12.90 kg * 2081 \frac{kJ}{kg} = 26,844.9 kJ$$

Tanque de lavado

Por tener una chaqueta del mismo tamaño que el tanque reactor, se toman los mismos valores para las pérdidas de calor por radiación y por convección, y teniendo la cantidad de vapor obtenido durante el secado (3 horas), se procede a determinar la cantidad de calor requerido para la evaporación de la humedad en el biodiesel:

$$q_{vap} = m_{vap}\lambda = \frac{17.16 kg}{3 h} * \frac{1h}{3600 s} * 2081 \frac{kJ}{kg} = 3.3065 \frac{kJ}{s}$$

$$q_l = q_{vap} - q_{radiacion} - q_{conveccion}$$

$$q_l = 3306.5 - 201.21 - 2064.34 \frac{J}{s} = 1040.93 \frac{J}{s}$$

$$E_{vap} = 17.16 kg * 2081 \frac{kJ}{kg} = 35,709.96 kJ$$

Tanque de glicerina

El tiempo de evaporación de metanol en el tanque de glicerina fue de 1.5 horas (5400 s):

$$m_{\text{glicerina}} = \frac{26.34 \text{ kg}}{5400 \text{ s}} = 4.877 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{1.1658 \text{ kg}}{5400 \text{ s}} = 2.158 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} q_l &= 75 - 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad 4.877 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 2.588 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} + 2.158 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 2.546 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \\ &= 658.55 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_c &= 2\pi \cdot 0.20 \text{ m} \cdot 0.30 \text{ m} * 9.30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} * 160 - 25 \text{ }^\circ\text{C} + 2\pi \cdot 0.20 \text{ m} \cdot 0.50 \text{ m} \\ &\quad * 9.30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} * 75 - 25 \text{ }^\circ\text{C} = 765.48 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_r &= 5.6697 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{s}} * 2\pi \cdot 0.20 \text{ m} \cdot 0.30 \text{ m} \cdot 0.08 \cdot 433^4 - 295^4 \text{ K} \\ &\quad + 5.6697 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{s}} * 2\pi \cdot 0.20 \text{ m} \cdot 0.50 \text{ m} \cdot 0.08 \cdot 348^4 - 298^4 \text{ K} \\ &= 66.47 \text{ W} \end{aligned}$$

$$q_{\text{total}} = 658.55 + 765.48 + 66.47 \text{ W} = 1490.5 \text{ W}$$

$$m_{\text{vap}} = \frac{1.4905 \text{ kJ/s}}{2081 \text{ kJ/kg}} * 5400 \text{ s} = 3.867 \text{ kg}$$

$$E_{\text{vap}} = 3.867 \text{ kg} * 2081 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 8,048.7 \text{ kJ}$$

Condensador

Cálculo de flujo másico necesario para condensar vapor de metanol

$$\lambda_{metanol} = 25.21 \frac{kJ}{mol} \frac{mol}{32.04186 g} \frac{1000 g}{kg} = 1098.875 \frac{kJ}{kg}$$

(Van Ness, 2007)

Tomando el mayor flujo de condensado de metanol se calcula cuanta energía es necesario retirar con el agua de enfriamiento:

$$q_{metanol} = 1098.875 \frac{kJ}{kg} * 0.0008475 \frac{L}{s} * 0.792 \frac{kg}{L} = 0.73759 \frac{kJ}{s} = 737.59 W$$

$$m_{agua} = \frac{q_{metanol}}{Cp_{agua} \Delta T} = \frac{737.59 \frac{J}{s}}{4184 \frac{J}{kg^{\circ}C} (5^{\circ}C)} = 0.03525 kg/s$$

4. Cálculo de tamaño de agitador. Utilizando las dimensiones estándar para agitador de turbina según McCabe (Ecuación No. 25).

Para los tanques enchaquetados de 200 L y 150 L:

$$Da = \frac{1}{3} 0.60 m = 0.20 m$$

$$H = 1 0.60 m = 0.60 m$$

$$E = \frac{1}{3} 0.60 m = 0.20 m$$

$$W = \frac{1}{5} 0.20 m = 0.04 m$$

$$L = \frac{1}{4} 0.20 m = 0.05 m$$

Para el tanque de Metóxido y el tanque de glicerina, por tener un diámetro similar se realizaron los mismos cálculos:

$$Da = \frac{1}{3} 0.40 \text{ m} = 0.13 \text{ m}$$

$$H = 1 0.40 \text{ m} = 0.40 \text{ m}$$

$$E = \frac{1}{3} 0.40 \text{ m} = 0.13 \text{ m}$$

$$W = \frac{1}{5} 0.13 \text{ m} = 0.026 \text{ m}$$

$$L = \frac{1}{4} 0.13 \text{ m} = 0.0325 \text{ m}$$

5. Cálculo de Bomba. Se muestra el cálculo para la bomba que tiene la trayectoria más larga de tubería tomando en cuenta los factores de fricción y diferencia de alturas. Utilizando la ecuación de Bernoulli con trabajo de bomba y factor de fricción:

$$\frac{p_a}{\rho} + gZ_a + \alpha V_a^2 + \eta W_p = \frac{p_b}{\rho} + gZ_b + \alpha V_b^2 + h_f$$

(Ecuación No. 14)

Despejando el trabajo de bomba se obtiene:

$$\eta W_p = g Z_b - Z_a + V_b^2 + h_f$$

Para calcular las pérdidas por fricción se utilizaron los factores de la Tabla No. 1. y las medidas de tuberías de acero inoxidable de la Tabla No. 2.

Cálculo de flujo de succión de bomba:

$$Q1 = \frac{20 \text{ L}}{65 \text{ s}} = 0.3077 \text{ L/s}$$

De la misma forma se calculó las siguientes 4 corridas, obteniendo un promedio de 0.29814 L/s.

Velocidad lineal dentro de la tubería de media pulgada:

$$Q = VA$$

$$V = \frac{0.29814 \frac{L}{s}}{\frac{\pi}{4} (0.015799 \text{ m})^2} = 1.5208 \frac{m}{s}$$

De la misma forma se calculó la velocidad lineal dentro de las tuberías de $\frac{3}{4}$ " y 1".

Para el cálculo de los coeficientes por expansión y contracción se necesitan los diámetros internos de las tuberías utilizadas, desde 1", $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ".

$$k_e = 1 - \frac{0.015799}{0.026645} = 0.4070$$

(Ecuación No. 16)

$$k_c = 0.4 \left(1 - \frac{0.02093}{0.026645} \right) = 0.08579$$

(Ecuación No. 18)

Entonces las pérdidas por fricción son:

$$h_{fe} = k_e \frac{V_a^2}{2} = 0.4070 * \frac{1.5208^2}{2} = 0.4706 \frac{m^2}{s^2}$$

(Ecuación No. 15)

$$h_{fc} = k_c \frac{V_b^2}{2} = 0.08579 * \frac{0.8666^2}{2} = 0.03221 \frac{m^2}{s^2}$$

(Ecuación No. 17)

$$\begin{aligned}
 h_{ff} &= k_f \frac{V_a^2}{2} \\
 &= 1 \frac{0.5347^2}{2} + 1 \frac{0.8666^2}{2} + 0.05 \frac{0.8666^2}{2} + 0.05 \frac{1.5208^2}{2} \\
 &\quad + 3 * 0.04 \frac{0.8666^2}{2} + 5 * 0.4 \frac{0.8666^2}{2} + 5 \frac{0.5347^2}{2} \\
 &\quad + 10 \frac{1.5208^2}{2} = 13.84 \frac{m^2}{s^2}
 \end{aligned}$$

(Ecuación No. 19)

Para determinar la pérdida por fricción en tubería recta se necesita obtener el número de Reynolds:

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu} = \frac{0.02093 \text{ m} * 0.8666 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 934 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.0891 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 190$$

(Ecuación No. 20)

Con esto se procede a obtener el factor de Fanning:

$$f = \frac{16}{Nre} = 0.0842$$

(Ecuación No. 22)

$$h_{fs} = 4f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2} = 4 * 0.0842 * \frac{6 \text{ m}}{0.02093 \text{ m}} * \frac{0.8666^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2} = 36.26 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

(Ecuación No. 23)

$$h_f = h_{fe} + h_{fc} + h_{ff} + h_{fs} = 50.6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\eta W_p = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 2.35 - 0 \text{ m} + (0.8666 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + 50.6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 74.40 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} * \frac{\text{kg}}{\text{kg}} = 74.4 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$W_p = \frac{74.4}{0.60} = 124 \frac{J}{kg}$$

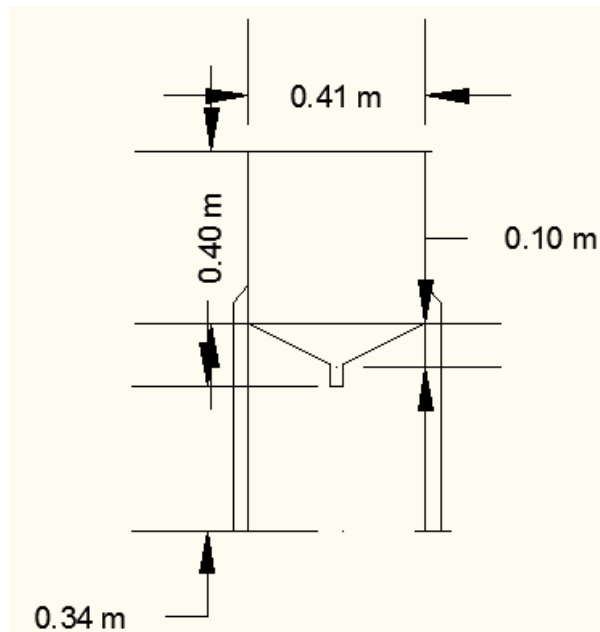
$$P = W_p * m = 124 \frac{J}{kg} * 934 \frac{kg}{m^3} * 0.8666 \frac{m}{s} * \frac{\pi}{4} 0.02093 m^2 = 34.53 \frac{J}{s} = 0.05 hp$$

(Ecuación No. 24)

De la misma forma se calculó la potencia necesaria para la bomba de metóxido y la bomba de biodiesel/glicerina.

6. Dimensionamiento de tanques

Figura No. 14. Tanque de metóxido.



$$V_{\text{tanque}} = V_{\text{cilindro}} + V_{\text{cono}}$$

$$V_{\text{cilindro}} = \frac{\pi}{4} d^2 h$$

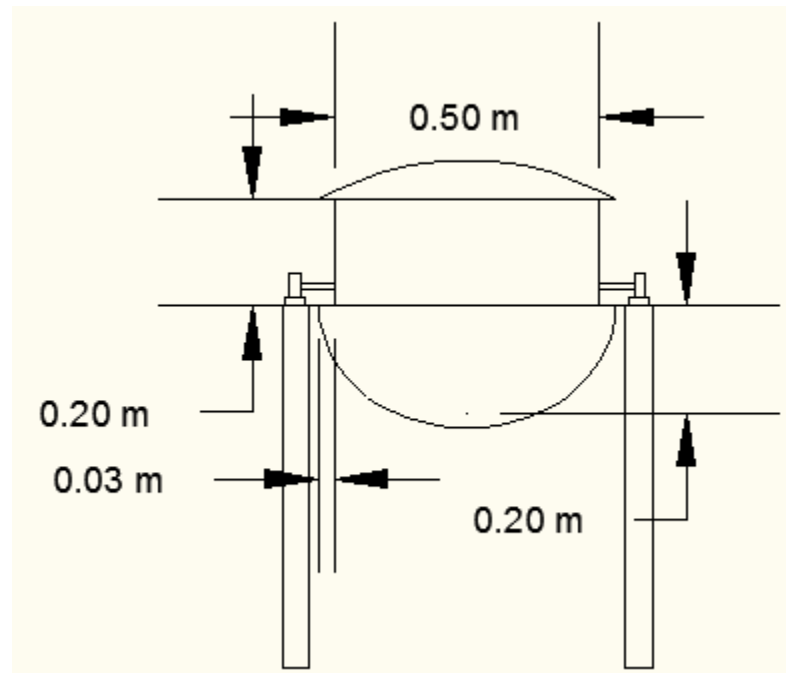
$$V_{\text{cono}} = \frac{\pi}{12} d^2 h$$

$$V_{\text{cilindro}} = \frac{\pi}{4} (0.41 \pm 0.0005 \text{ m})^2 (0.40 \pm 0.0005 \text{ m}) = 0.0528 \pm 0.0001 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{cono}} = \frac{\pi}{12} (0.41 \pm 0.0005 \text{ m})^2 (0.10 \pm 0.0005 \text{ m}) = 0.0044 \pm 0.00002 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{tanque}} = 0.0528 \pm 0.0001 \text{ m}^3 + 0.0044 \pm 0.00003 \text{ m}^3 = 0.0572 \pm 0.0001 \text{ m}^3$$

Figura No. 15. Marmita



$$V_{marmita} = V_{cilindro} + V_{seccion esfera}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} d^2 h$$

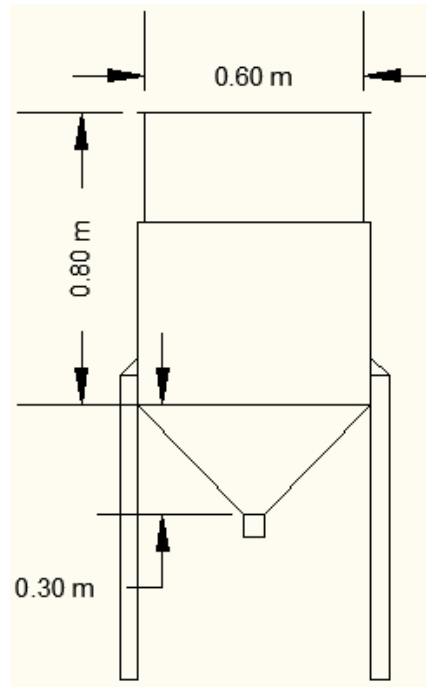
$$V_{seccion esfera} = \frac{\pi h}{6} (3\rho^2 - h^2)$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} (0.50 \pm 0.0005 \text{ m})^2 (0.20 \pm 0.0005 \text{ m}) = 0.0393 \pm 0.0001 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} V_{seccion esfera} &= \frac{\pi(0.20 \pm 0.0005 \text{ m})}{6} (3(0.25 \pm 0.0005 \text{ m})^2 - (0.20 \pm 0.0005 \text{ m})^2) \\ &= 0.0238 \pm 0.00008 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$V_{marmita} = 0.0393 \pm 0.0001 \text{ m}^3 + 0.0238 \pm 0.00008 \text{ m}^3 = 0.063 \pm 0.0001 \text{ m}^3$$

Figura No. 16. Reactor



$$V_{tanque} = V_{cilindro} + V_{cono}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} d^2 h$$

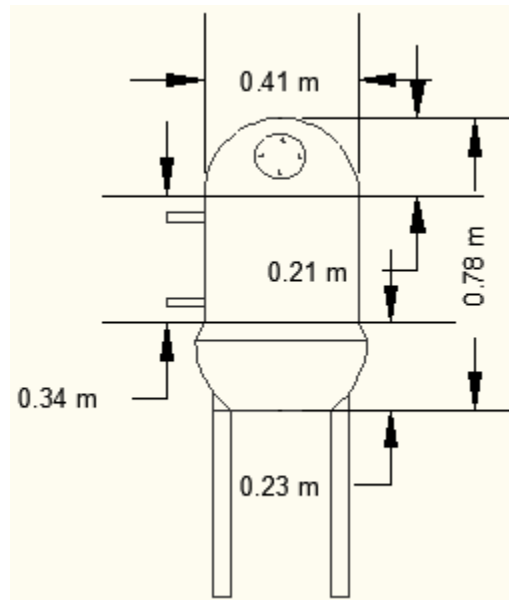
$$V_{cono} = \frac{\pi}{12} d^2 h$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} (0.60 \pm 0.0005 \text{ m})^2 (0.80 \pm 0.0005 \text{ m}) = 0.226 \pm 0.0003 \text{ m}^3$$

$$V_{cono} = \frac{\pi}{12} (0.60 \pm 0.0005 \text{ m})^2 (0.30 \pm 0.0005 \text{ m}) = 0.0282 \pm 0.00006 \text{ m}^3$$

$$V_{tanque} = 0.254 \pm 0.0003 \text{ m}^3 + 0.0282 \pm 0.00006 \text{ m}^3 = 0.254 \pm 0.0003 \text{ m}^3$$

Figura No. 17. Tanque de glicerina



$$V_{tanque} = V_{cilindro} + V_{media esfera}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} d^2 h$$

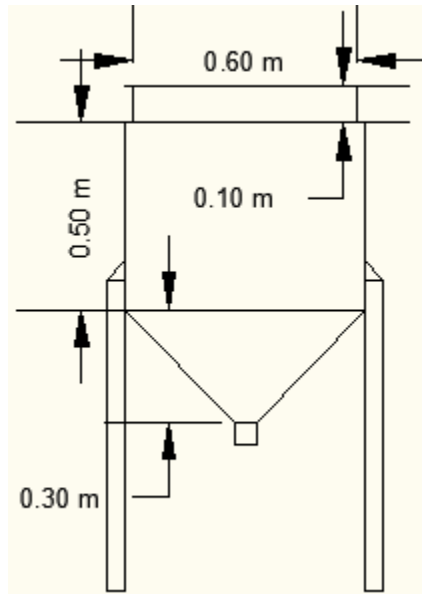
$$V_{media esfera} = \frac{4\pi}{24} d^3$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} (0.40 \pm 0.0005 \text{ m})^2 (0.34 \pm 0.0005 \text{ m}) = 0.0427 \pm 0.0001 \text{ m}^3$$

$$V_{media esfera} = \frac{4\pi(0.23 \pm 0.0005 \text{ m})}{24} (0.40 \pm 0.0005 \text{ m})^3 = 0.0167 \pm 0.00004 \text{ m}^3$$

$$V_{tanque} = 0.0427 \pm 0.0001 \text{ m}^3 + 0.0167 \pm 0.00004 \text{ m}^3 = 0.059481 \pm 0.0001 \text{ m}^3$$

Figura No. 18. Tanque de lavado de biodiesel.



$$V_{tanque} = V_{cilindro} + V_{cono}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} d^2 h$$

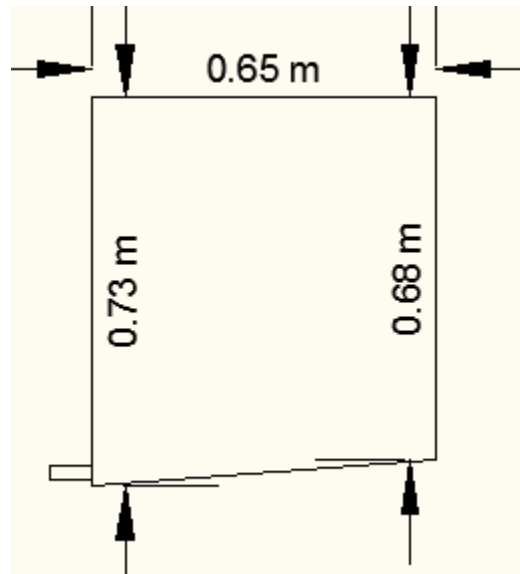
$$V_{cono} = \frac{\pi}{12} d^2 h$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} (0.60 \pm 0.0005 \text{ m})^2 (0.50 \pm 0.0005 \text{ m}) = 0.170 \pm 0.0002 \text{ m}^3$$

$$V_{cono} = \frac{\pi}{12} (0.60 \pm 0.0005 \text{ m})^2 (0.30 \pm 0.0005 \text{ m}) = 0.0282 \pm 0.00006 \text{ m}^3$$

$$V_{tanque} = 0.170 \pm 0.0002 \text{ m}^3 + 0.0282 \pm 0.00006 \text{ m}^3 = 0.198 \pm 0.00025 \text{ m}^3$$

Figura No. 19. Tanque de estabilización de biodiesel.



$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} d^2 h$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} 0.65 \pm 0.0005 \text{ m}^2 \cdot 0.705 \pm 0.0005 \text{ m} = 0.234 \pm 0.0003 \text{ m}^3$$

7. Costo de recuperación del metanol remanente en la glicerina. Considerando una eficiencia de caldera de 60%:

$$\eta = \frac{Q(H - h)}{q * GCV}$$

(Ecuación No. 13)

Despejando la masa de Diesel utilizado en la caldera según la cantidad de vapor utilizada en la evaporación de 1.472 L de metanol:

$$q = \frac{6.36 \text{ kg } 2757.6 - 104.84 \text{ kJ/kg}}{42761 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 0.60} = 0.6576 \text{ kg}$$

precio del metanol recuperado

$$= 0.6576 \text{ kg } \frac{\text{m}^3}{832 \text{ kg}} \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \frac{1 \text{ gal}}{3.28 \text{ L}} Q \cdot \frac{32.00}{\text{gal}} = Q.7.11$$

Costo de 1.472 L de metanol nuevo:

$$\text{costo metanol nuevo} = \frac{Q.3000}{55 \text{ gal}} * \frac{1 \text{ gal}}{3.78 \text{ L}} * 1.472 \text{ L} = Q.21.24$$

Pureza de metanol nuevo y metanol recuperado utilizando densímetro calibrado para etanol a 16°C con una densidad de 789 kg/m³.

$$\% \text{Pureza } CH_3OH \text{ nuevo} = 99.5\% \frac{791.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{789 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 99.8\%$$

$$\% \text{Pureza } CH_3OH \text{ recuperado} = 98\% \frac{791.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{789 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 98.35\%$$

8. Costo del vapor total utilizado en la producción de biodiesel con el lote de 144.72 kg (130 L de aceite). Considerando una eficiencia de caldera de 60%:

$$\eta = \frac{Q(H - h)}{q * GCV}$$

(Ecuación No. 13)

Despejando la masa de Diesel utilizado en la caldera según la cantidad de vapor total condensado en la corrida de 144.72 kg (130 L de aceite) con una masa total de 35.92.

$$q = \frac{35.92 \text{ kg} \cdot 2757.6 - 104.84 \text{ kJ/kg}}{42761 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 0.60} = 3.714 \text{ kg}$$

$$\text{precio del vapor} = 3.714 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}^3}{832 \text{ kg}} \cdot \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ gal}}{3.28 \text{ L}} \cdot Q \cdot \frac{32.00}{\text{gal}} = Q \cdot 43.55$$

B. Prueba de aceite en escala laboratorio

Para realizar una prueba con 200 g de aceite se realizaron los siguientes cálculos:

$$m_{\text{NaOH}} = 200 \text{ g} * 0.008162 = 1.6324 \text{ g NaOH}$$

$$m_{\text{CH}_3\text{OH}} = 200 \text{ g} * 0.008162 = 1.6324 \text{ g CH}_3\text{OH}$$

1. Densidad del biodiesel. Con ayuda del picnómetro se obtiene la densidad:

$$\rho = \frac{m_{\text{biodiesel}}}{V_{\text{agua}}} = \frac{21.327 \text{ g}}{24.187 \text{ mL}} = 0.8817 \text{ g/mL}$$

2. Viscosidad

$$\mu = \nu\rho = 4.4173 \text{ cSt} \cdot \frac{1 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{\text{cSt}} * 881.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.003895 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

C. Datos calculados

Figura No. 20. Diagrama de flujo.

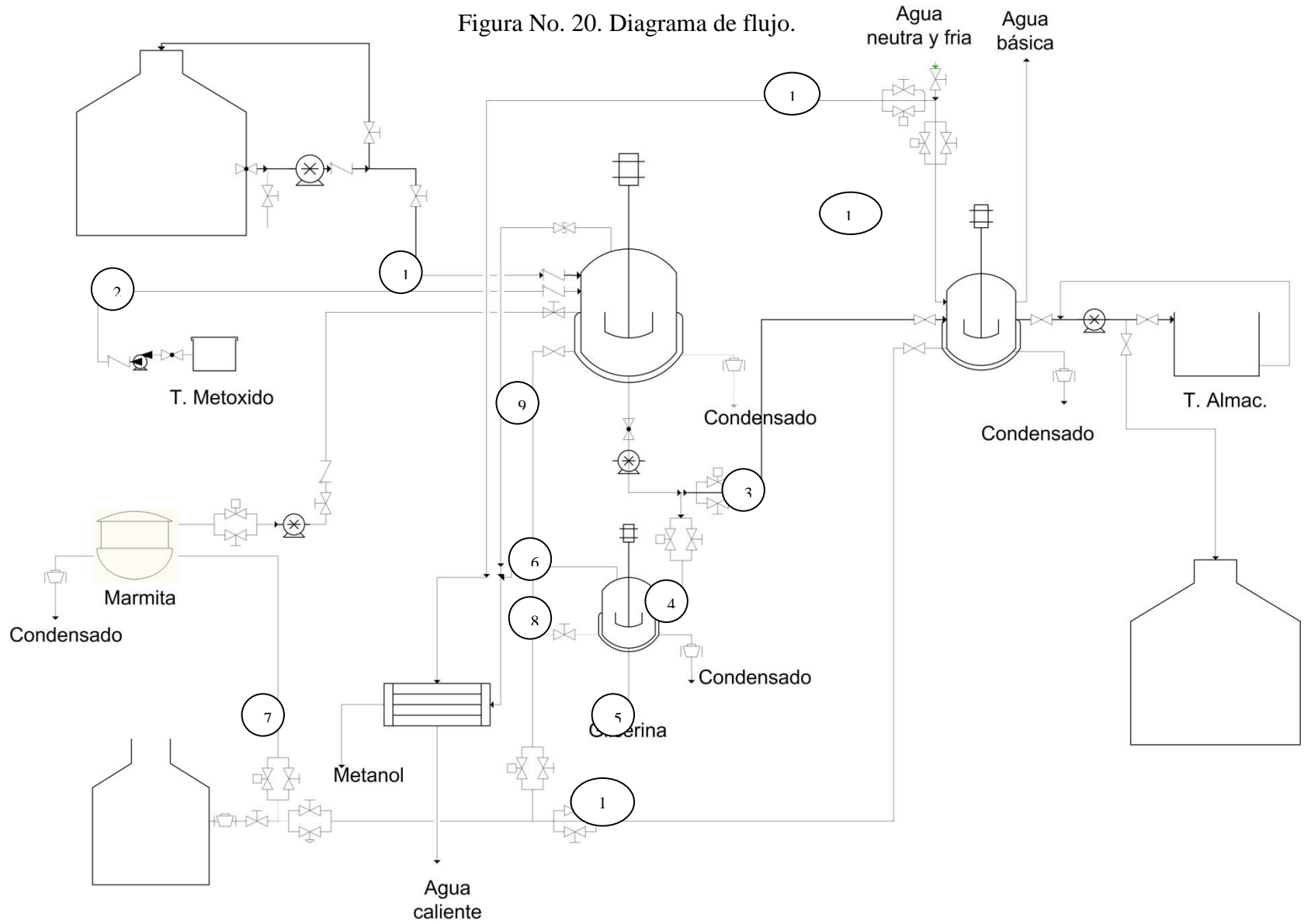


Tabla No. 16. Numeración utilizada en el diagrama de flujo con base de 144.72 kg.

Línea	Contenido	P (psi)	E (kJ)	Masa (kg)	Flujo másico (kg/s)
1	Aceite	-	-	121.42	
2	Metóxido	-	-	23.3	
3	Biodiesel	-	-	111.18	
4	Glicerina cruda	-	-	26.34	
5	Glicerina	-	-	25.17	
6	Metanol	-	-	1.165	
7	Vapor marmita	>80	-	-	
8	Vapor T. glicerina	>80	848.7	-	
9	Vapor reactor	>80	26,849.88	-	
10	Vapor T. lavado	>80	35,710.0	-	
11	Agua condensador	-	0	-	0.03525
12	Agua T. lavado	-	-	-	-

Tabla No. 17. Balance de masa con un lote de 130 L de aceite como base.

Balance	Entra (kg)	Sale (kg)	Fracción
Metóxido	22.31 kg CH ₃ OH 0.99 kg NaOH	23.3	4% NaOH 96% CH ₃ OH
Reactor	23.3 kg Metóxido 121.42 kg Aceite	111.18	97.6% Biodiesel crudo 2.7% Impurezas
		26.34	4% CH ₃ OH 96% Glicerol crudo
		7.2	CH ₃ OH
Glicerina	26.34 kg Glicerol crudo	25.17 1.165	Glicerol puro CH ₃ OH
Lavado	111.18 kg Biodiesel crudo 56.3 kg Agua limpia	108.54	Biodiesel puro
		58.94	95% Agua 5% Interfase Biodiesel
Condensador	1.1658 kg CH ₃ OH	1.1658	CH ₃ OH
Global	23.3 kg Metóxido 121.42 kg Aceite	7.2 2.64 108.54 25.17 1.1658	CH ₃ OH Interfase biodiesel Biodiesel puro Glicerol puro CH ₃ OH
Σ	144.72 kg Materia prima	144.72	kg Materia prima

Tabla No. 18. Calor requerido durante el proceso de producción de un lote de biodiesel de 130 L de aceite.

Componente	Calor entrante (J/s)	Pérdida por radiación (J/s)	Pérdida por convección (J/s)	Calor para proceso (J/s)
T. Reactor	3729.15	201.21	2064.34	1462.9
T. Lavado	3306.5	201.21	2064.34	1040.93
T. Glicerina	1192.0	47.15	483.83	661.05
Condensador	737.59	-	-	737.59

Tabla No. 19. Energía utilizada para un lote de producción de biodiesel de 130 L de aceite.

Componente	Energía necesaria (kJ)
T. Reactor	26,849.88
T. Lavado	35,709.96
T. Glicerina	8048.7
Total	70,608.58

Tabla No. 20. Flujo de succión de la bomba de aceite

Corrida	Flujo (L/s)
1	0.3077
2	0.2752
3	0.2727
4	0.3226
5	0.3125
Promedio	0.29814

Tabla No. 21. Velocidad lineal de succión de la bomba de aceite

Diámetro nominal (pulg)	Velocidad lineal (m/s)
½"	1.52
¾"	0.8665
1"	0.5347

Tabla No. 22. Datos calculados para obtener la potencia mínima requerida por las bombas en los procesos de aceite, metóxido y biodiesel/glicerina.

	Bomba de aceite	Bomba de metóxido	Bomba de biodiesel/glicerina
$h_f (m^2/s^2)$	50.6	9.4	9.86
ΔZ (m)	2.35	2.35	2.35
Nre	190	22013	3576
V (m/s)	0.8666	1	1
η_P	60%	60%	60%
W_P (J/kg)	124	55.75	56.52
P (W)	34.53	8.89	9.77
P (hp)	0.05	0.01	0.01

Tabla No. 23. Dimensiones de agitadores de turbina estándar para el tanque reactor, tanque de glicerina, tanque de lavado y tanque de metóxido.

	T. Reactor	T. Lavado	T. Glicerina	T. Metóxido
Da (m)	0.20	0.20	0.13	0.13
H (m)	0.60	0.60	0.4	0.4
E (m)	0.20	0.20	0.13	0.13
W (m)	0.04	0.04	0.026	0.026
L (m)	0.05	0.05	0.0325	0.0325

Tabla No. 24. Dimensiones de los tanques en la planta de biodiesel y su capacidad total y utilizable.

		Diámetro	Altura	Volumen (m3)	Volumen utilizable (L)
T. Metóxido	cilindro	0.41	0.4	0.0528	42.91
	cono	0.41	0.1	0.0044	
			Σ	0.0572	
Marmita	cilindro	0.5	0.2	0.0393	47.32
	calota	0.5	0.2	0.0238	
			Σ	0.0631	
T. Lavado	cilindro	0.6	0.6	0.1696	148.44
	cono	0.6	0.3	0.0283	
			Σ	0.1979	
T. Reactor	cilindro	0.6	0.8	0.2262	190.85
	cono	0.6	0.3	0.0283	
			Σ	0.2545	
T. Glicerina	cilindro	0.4	0.34	0.0427	44.61
	calota	0.4	0.23	0.0168	
			Σ	0.0595	
T. Almac.	cilindro	0.65	0.705	0.2339	175.46

Tabla No. 25. Resultados de prueba de laboratorio de aceite.

Prueba	Resultado
3-27	correcto
Viscosidad (kg/m.s)	0.003895
Densidad (kg/m ³)	881.7
No. Ácido	0.106
pH	7.83
Agua+sedimentos	correcto

D. Detalle de accesorios utilizados en cada tubería

Tabla No. 26. Inventario de accesorios en la tubería de aceite al reactor.

Tamaño	Accesorio	Cantidad	Material
2"	reducidor a 1"	1	A.C.
1"	niple corrido	6	A.I. 304
1"	Codo	2	A.I. 304
1"	Uu	1	A.I. 304
1"	T	1	A.I. 304
1"	bushing a 1/2"	1	H.G.
1/2"	válvula manual (bola)	1	Bronce
1/2"	niple corrido	1	H.G.
1"	filtro Y	1	Bronce
1"	reducidor a 3/4"	1	A.I. 304
3/4"	niple corrido	3	A.I. 304
3/4"	Uu	1	A.I. 304
3/4"	válvula manual (bola)	2	A.I. 304
1/2"	Cheque	1	A.I. 304
3/4"	Tubo (m)	6	A.I. 304

Tabla No. 27. Inventario de accesorios en la tubería de aire.

Tamaño	Accesorio	Cantidad	Material
1/2"	Codo	3	H.G.
1/2"	Válvula (compuerta)	1	Bronce
1/2"	Uu	1	H.G.
1/2"	T	1	H.G.
1/2"	Copla	1	H.G.
1/2"	reducidor a 1/4"	1	H.G.
1/2"	Tubo (m)	3	H.G.

Tabla No. 28. Inventario de accesorios en la tubería de agua.

Tamaño	Accesorio	Cantidad	Material
1/2"	Codo	11	H.G.
1/2"	válvula manual (compuerta)	3	Bronce
1/2"	Uu	8	H.G.
1/2"	T	3	H.G.
1/2"	niple corrido	20	H.G.
1/2"	Tubo (m)	6	H.G.

Tabla No. 29. Inventario de accesorios en la tubería de biodiesel.

Tamaño	Accesorio	Cantidad	Material
2"	T	1	A.I. 304
2"	bushing a 1"	1	A.I. 304
1"	Tubo (m)	0.5	A.I. 304
1"	válvula manual (bola)	1	A.I. 304
1"	codo 30°	1	A.I. 304
2"	Niple	1	A.I. 304
1"	T	1	A.I. 304
1"	bushing a 3/4"	2	A.I. 304
3/4"	niple corrido	2	A.I. 304
3/4"	Uu	1	A.I. 304
3/4"	Codo	2	A.I. 304
1"	niple corrido	1	A.I. 304

Tabla No. 30. Inventario de accesorios en la tubería de glicerina y biodiesel.

Tamaño	Accesorio	Cantidad	Material
1/2"	niple corrido	18	A.I. 304
1/2"	T	6	A.I. 304
1/2"	bushing a 1/2"	1	A.I. 304
1/2"	uu	8	A.I. 304
1/2"	niple corrido	4	H.G.
1/2"	Codo	15	A.I. 304
1/2"	Tubo (m)	4.5	A.I. 304
1/2"	Cheque	1	Bronce
2"	reducidor a 1/2"	1	A.I. 304
1"	válvula manual (Bola)	1	A.I. 304

Tabla No. 31. Inventario de accesorios en la tubería de vapor.

Tamaño	Accesorio	Cantidad	Material
1/2"	Tubo (m)	10	A.C.
1/2"	Codo	33	A.C.
1/2"	T	9	A.C.
1/2"	Uu	10	A.C.
1/2"	válvula manual	6	A.C.
1/2"	niple corrido	37	A.C.
3/4"	regulador de presión	1	A.C.
3/4"	bushing a 1/2"	2	A.C.
1"	reducidor a 1/2"	2	A.C.
1"	niple corrido 1"	1	A.C.
1"	codo 1"	1	A.C.

E. Costos de materiales utilizados para la construcción de la planta.

Tabla No. 32. Materia prima para la elaboración de la estructura de la planta de biodiesel.

Materiales	Unidades	Precio (Q)	Total (Q)
concreto preparado	2	64.8	129.6
electrodos (lb)	5	20.8	104
tubo cuadrado chapa 14	5	265.71	1,328.55
tubo cuadrado chapa 16	2	194.07	388.14
Total (Q)			1,950.29

Tabla No. 33. Costos de tanques enchaquetados y condensador para recuperación de metanol.

Componentes	Precio
Tanque reactor 200 L	Q 22,000.00
Tanque lavado 150 L	Q 22,000.00
Condensador	Q 15,600.00
Total	Q 59,600.00

Tabla No. 34. Detalle de precios de accesorios de tuberías en diferentes tamaños y materiales y precio total.

	H.G		Precio		Bronce		Precio		A.I.		Precio		A.C.		Precio		Total (Q)		
	(uni)				(uni)				(uni)				(uni)						
1/2"	codo	14	Q	3.86	v. bola	v. comp	15	Q	19.20	33	Q	4.20	Q	480.64					
	valv				11	Q	65.30	Q	326.40	2	Q	140.00		Q	3,655.70				
	uu	9	Q	20.71					8	Q	60.80	10	Q	25.15	Q	924.29			
	T	4	Q	5.43					6	Q	34.60	9	Q	7.60	Q	297.72			
	nc	24	Q	7.60					18	Q	29.00	37	Q	12.30	Q	1,159.50			
	cheque				1		Q	70.80	1	Q	170.50			Q	241.30				
	red a 1/4"	1	Q	5.26										Q	5.26				
tubo (m)	9	Q	128.65					4.5	Q	111.97	10	Q	26.67	Q	1,928.36				
1"	nc							7	Q	48.90	2	25	Q	392.30					
	codo							3	Q	55.41	2	12.29	Q	190.81					
	uu							1	Q	87.40			Q	87.40					
	T							2	Q	82.43			Q	164.86					
	bushing a 1/2"	1	Q	19.73				2	Q	23.40	2	7.71	Q	81.95					
	bushing a 3/4"							3	Q	26.70			Q	80.10					
	valv							4	Q	168.57			Q	674.28					
tubo (m)							0.5	Q	164.47			Q	82.24						

Tabla No. 34. Continuación

	H.G (uni) Precio	Bronce (uni) precio	A.I. (uni) Precio	A.C. (uni) Precio	Total (Q)
nc			5 Q 32.40		Q 162.00
uu			2 Q 69.20		Q 138.40
valv			2 Q 113.59		Q 227.18
3/4" tubo (m)			6 Q 141.77		Q 850.61
bushing a 1/2"				2 4.29	Q 8.58
T			1 Q 34.50		Q 34.50
codo			2 Q 31.50		Q 63.00
T			1 Q 185.29		Q 185.29
bushing a 1"			1 Q 57.74		Q 57.74
2" red a 1/2"			1 Q 172.00		Q 172.00
red a 1"				1 28.29	Q 28.29
nc			1 128.15		Q 128.15
Costo de tuberías y accesorios					Q 12,502.45

Tabla No. 35. Costos totales de montaje de planta.

Costo de accesorios de tuberías	Q. 12,502.45
Costo de tanques enchaquetados y condensador	Q. 59,600.00
Costo de materiales de construcción	Q. 1,950.29
Total	Q. 74,052.74

F. Costo de recuperación de metanol.

Tabla No. 36. Costo de recuperación de metanol

Masa vapor para evaporar 1.472 kg CH ₃ OH	6.36 kg
Volumen CH ₃ OH recuperado	1.472 L
Q./L CH ₃ OH nuevo (99.8% pureza)	Q.14.43
Costo de vapor para evaporar 1.472 kg CH ₃ OH	Q. 7.11
Costo de 1.472 L de CH ₃ OH	Q. 21.24
Q./L CH ₃ OH recuperado (98.35% pureza)	Q. 4.83

Tabla No. 37. Listado de instrumentación utilizada y localización.

	Código	Localización
Transmisores de presión	PT-100	vapor de marmita
	PT-101	presión en reactor
	PT-102	presión de vapor a reactor y t. lavado
Transmisores de nivel	LT-100	Marmita
	LT-101	tanque recepción de filtro prensa
	LT-102	tanque metóxido
Transmisores de temperatura	TT-100	Marmita
	TT-101	Reactor
	TT-102	T. lavado
Transmisores de humedad	HT-100	Marmita
	HT-101	T. lavado
Transmisores de conductividad	CT-100	Reactor
	CT-101	Salida T. lavado
	CT-102	T. Glicerina

G. Diagramas de la planta de biodiesel

Figura No. 21. Diagrama de flujo de la planta de biodiesel con accesorios.

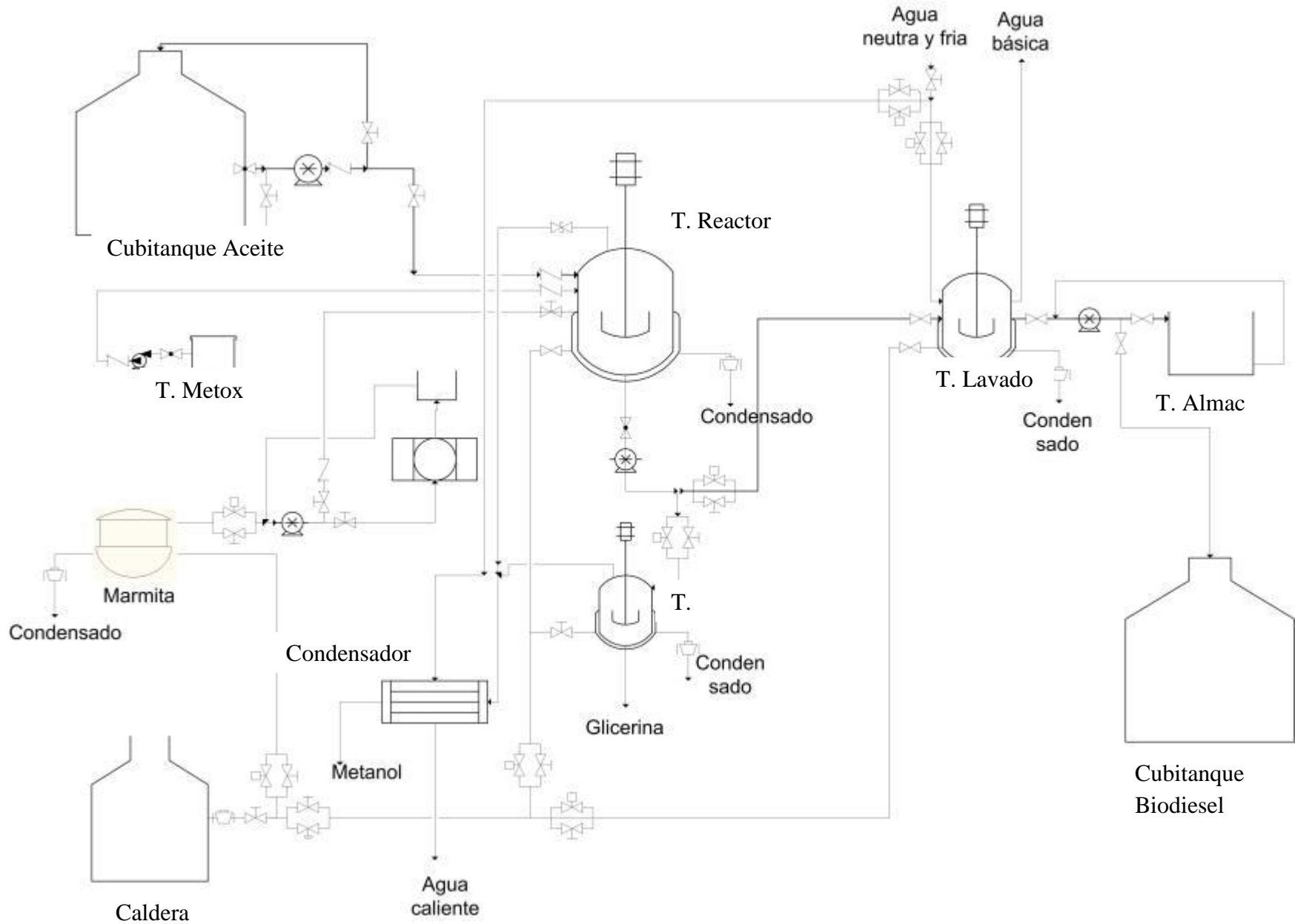


Figura No. 22. Esquema de la planta mostrando tubería de aceite, biodiesel y glicerina.

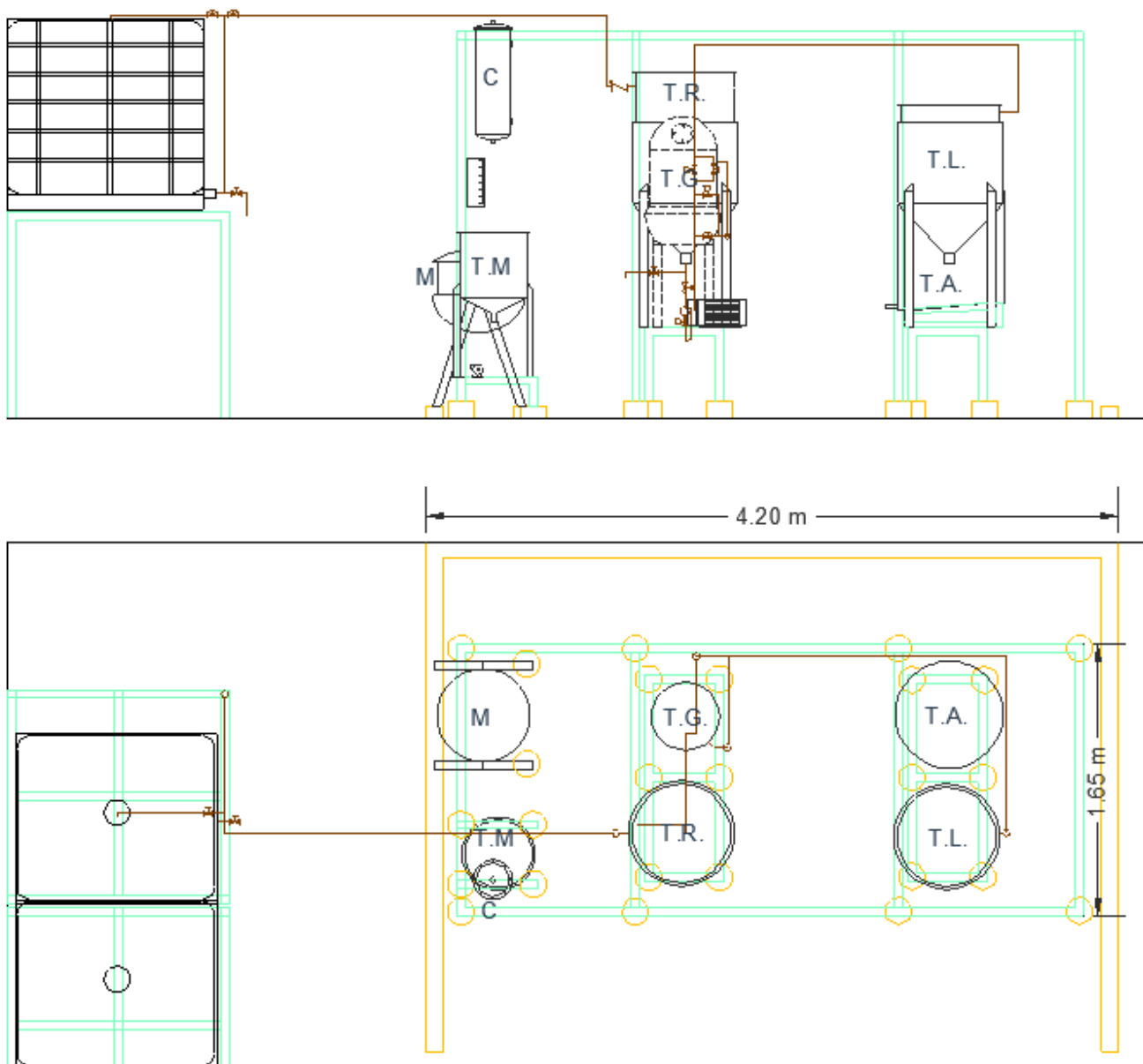


Figura No. 23. Esquema de la planta mostrando tubería de vapor.

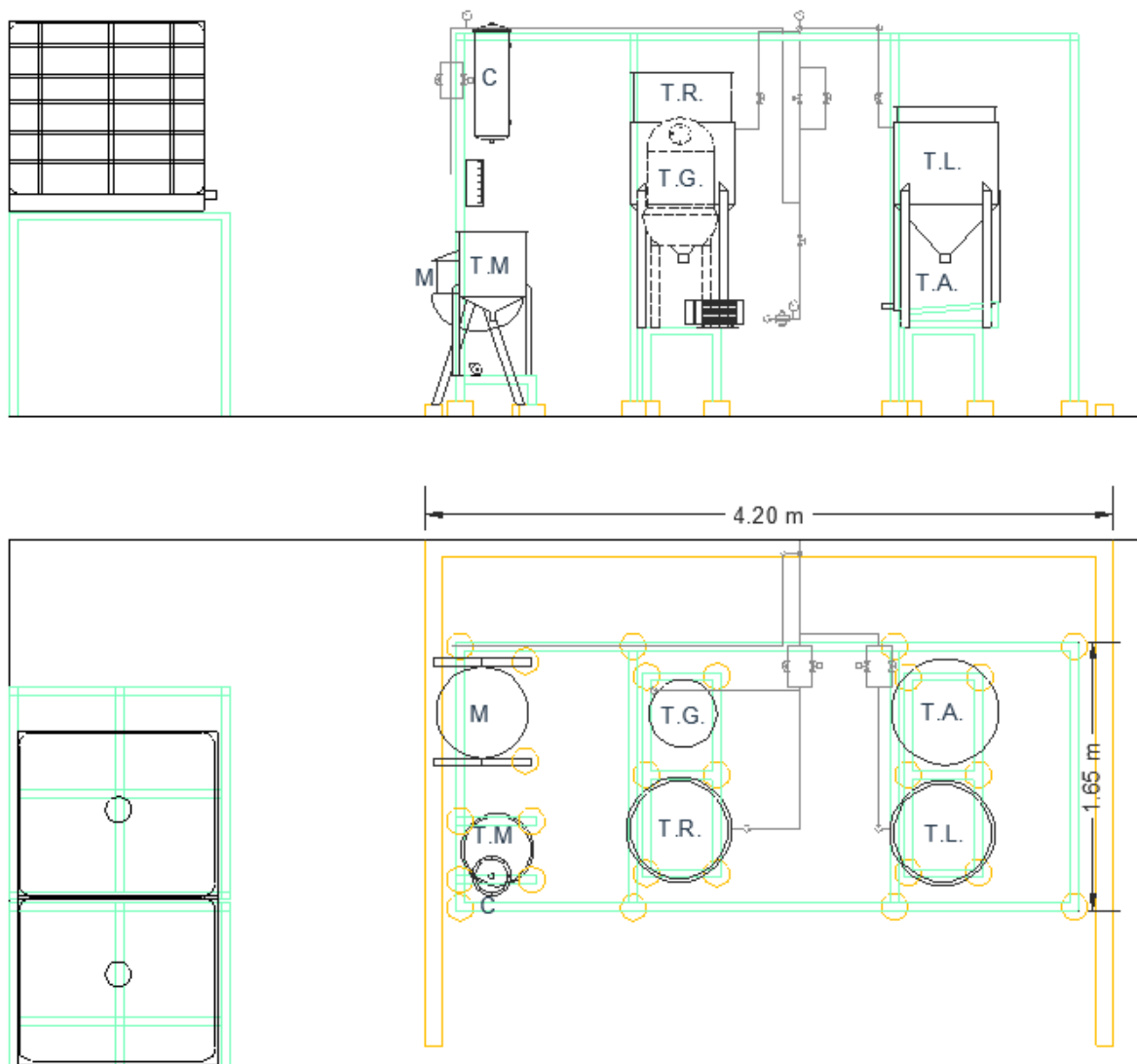


Figura No. 24. Esquema de la planta mostrando tubería de metóxido de sodio.

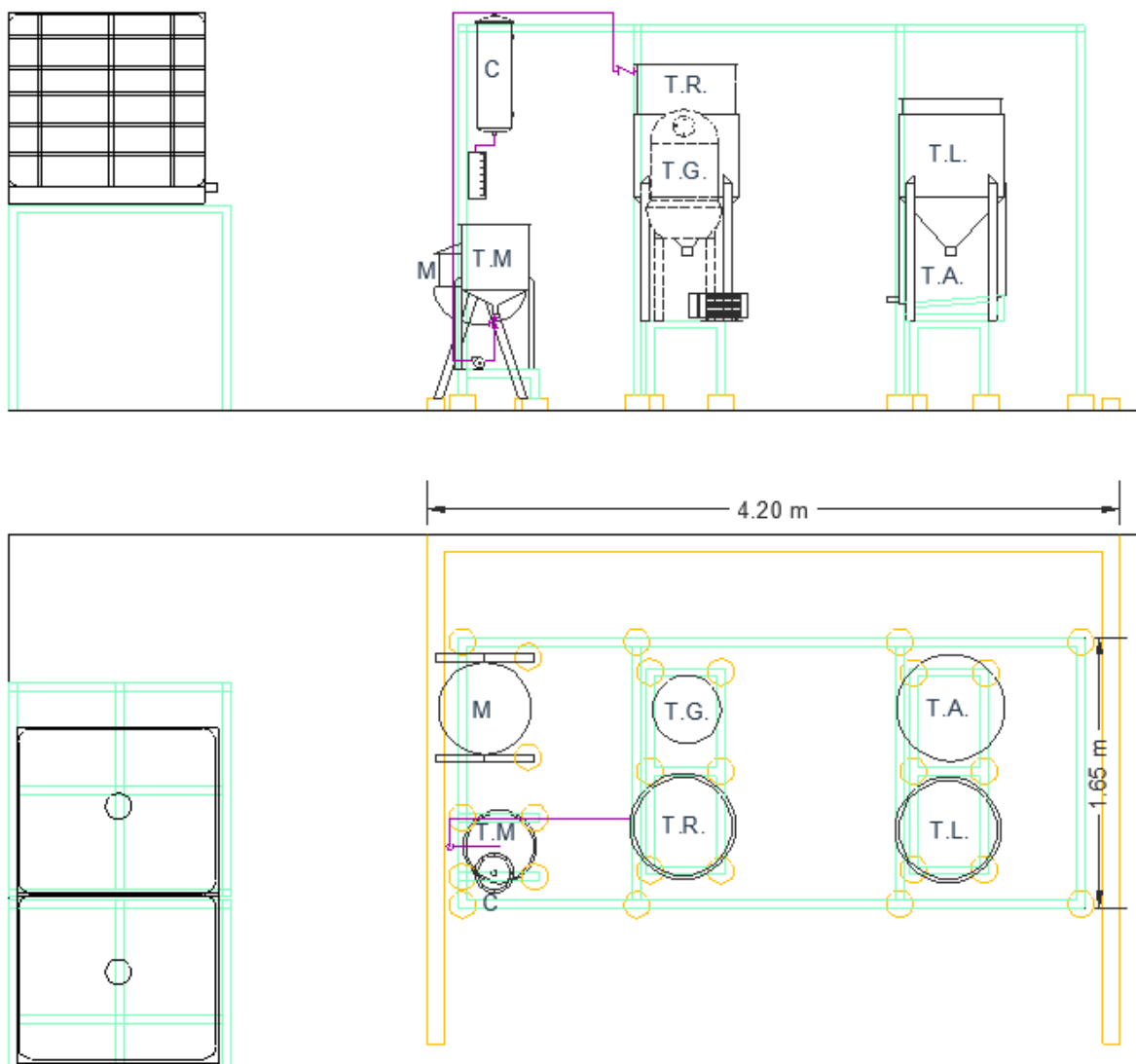


Figura No. 25. Esquema de la planta mostrando tubería de vapor de metanol.

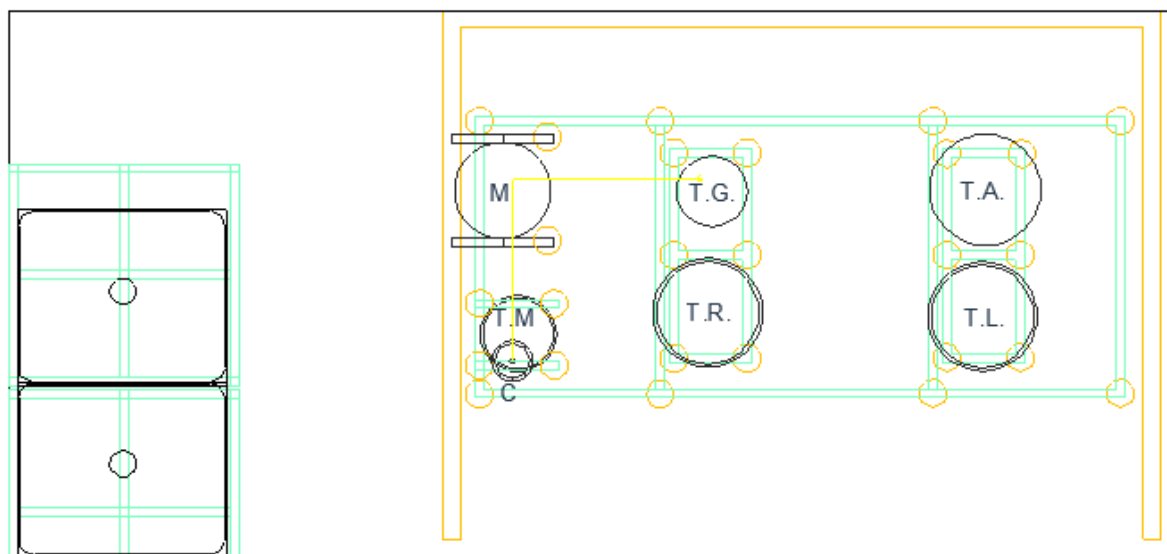
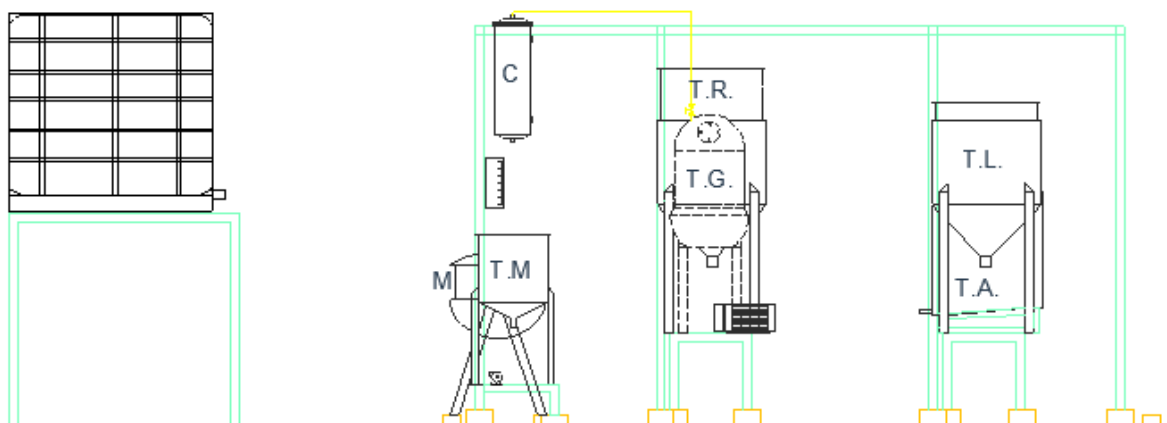


Figura No. 26. Esquema de la planta mostrando tubería de aire.

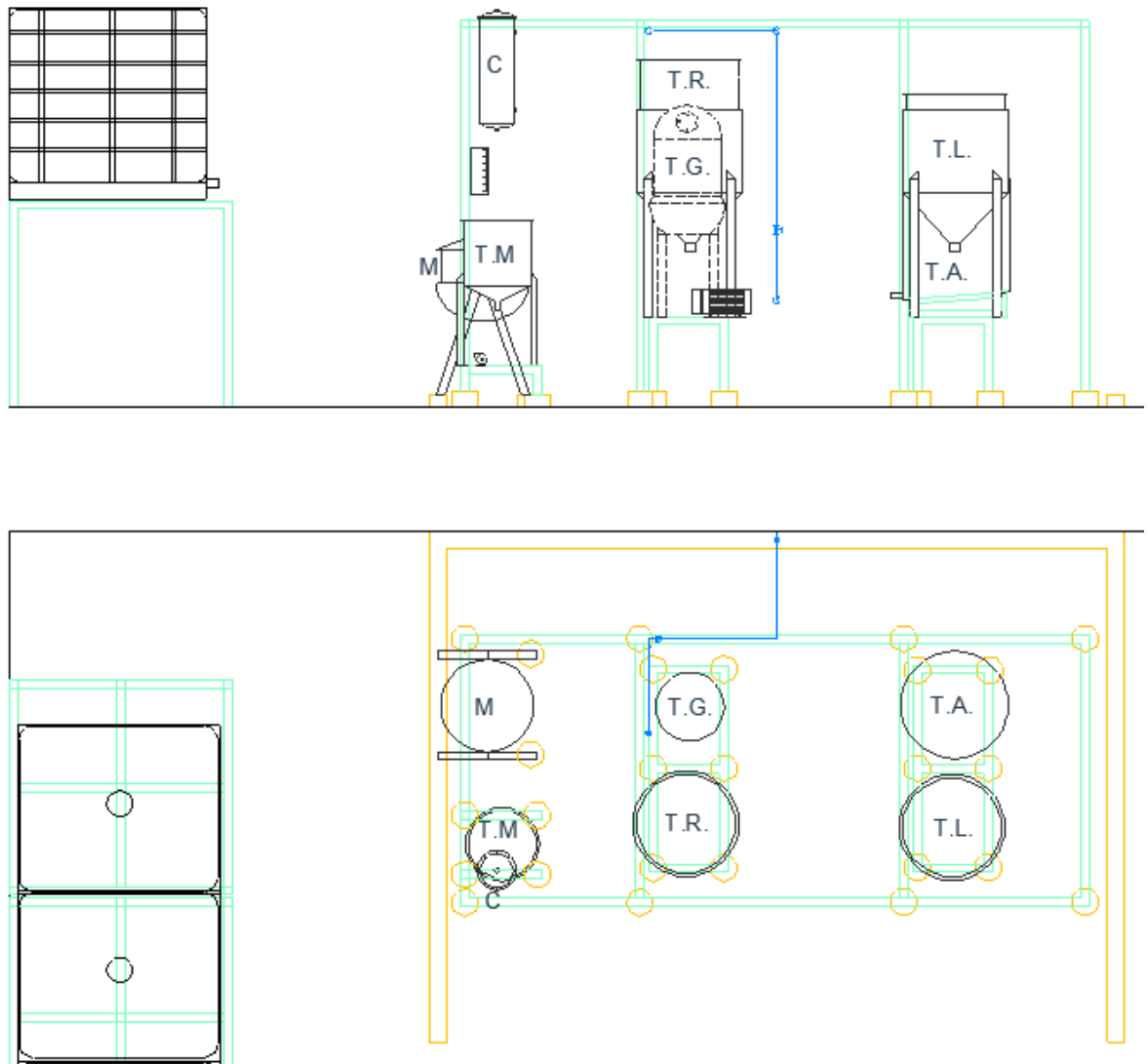


Figura No. 27. Esquema de la planta mostrando tubería de agua.

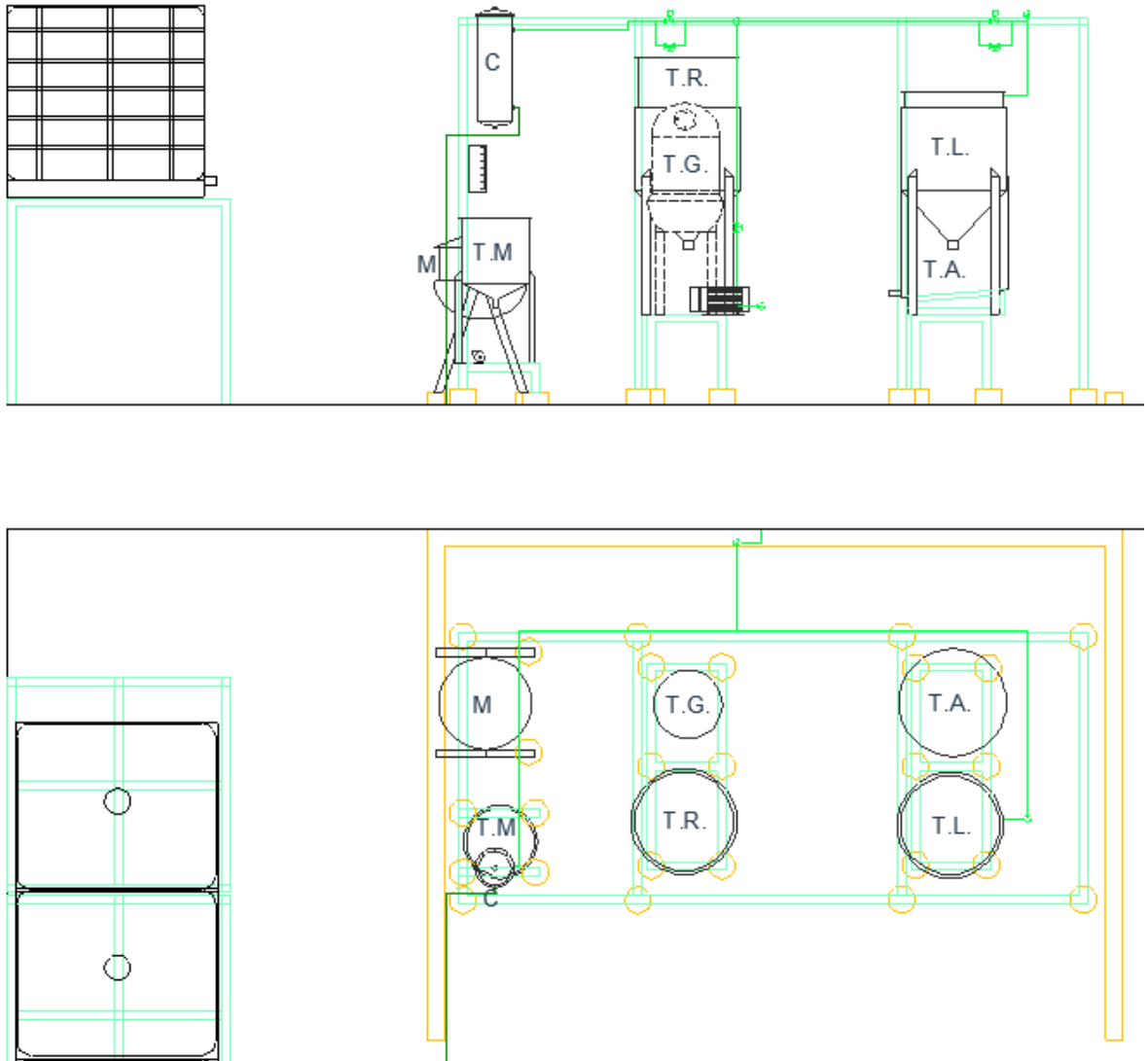


Figura No. 28. Imagen de la planta terminada.



Figura No. 29. Cotización de Tanques enchaquetados.

	13 Avenida 4-27, Zona 1 • Tel./Fax 502 • 2220-2635 Tels. 502 • 2251-5512 • 2230-3403 • 2230-3387 talleres.hernandez@yahoo.com talleres.hernandez.gt@gmail.com		COTIZACION 1250	
	Fabricación, reparación y mantenimiento de maquinaria industrial. Toda clase de trabajos para la industria farmacéutica y alimenticia. Especialidad en trabajos de acero inoxidable.		FECHA 09/05/2012	
CLIENTE				
Nombre del Cliente	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA			
Atención a	Ing. Gamaliel Zambrano	NIT.		
Dirección	zambrano@uvg.edu.gt	Tel.	23640336	Tel./Fax 23640336
Forma de pago	60% DE ANTICIPO Y 40% CONTRAENTREGA		Vigencia de esta cotización	15 días
CONCEPTO				
<p>■ Por la fabricación de tanque de 150 litros de capacidad con chaqueta para vapor y fondo cónico; y en la parte de abajo una salida de 1" al centro del cono y 2 entradas de 4" de la orilla del borde de 1/2". Tanque y chaqueta fabricadas de acero inoxidable tipo 304 con bordes y pulido sanitario, con válvula de seguridad y se le hará una prueba hidrostática a 25 P.S.I.</p> <p style="text-align: right;">Precio.....Q22,000.00</p>				
<p>Esperando que la presente satisfaga su necesidad de inversión y en espera de una respuesta favorable, quedo de usted.</p> <p>Atentamente,</p>				
OBSERVACIONES LOS PRECIOS YA INCLUYEN I.V.A DE SER APROBADA LA PRESENTE COTIZACION, FAVOR REMITIRLA FIRMADA, SELLADA CON FECHA DE APROBACION Y ORDEN DE COMPRA.			FECHA DE APROBADO	
COTIZACION AUTORIZADA POR Daniel Hernández R.			COTIZACION AUTORIZADA POR EL CLIENTE	
Nombre _____  FIRMA DE AUTORIZADO			Nombre _____ ACEPTADO - CLIENTE	

Figura No. 30. Cotización de condensador de acero inoxidable con espirales de cobre.




	13 Avenida 4-27 Zona 1 • Tel./Fax 2220-2835 Tels. 2251-5512 • 2230-3403 • 2230-3387 talleres.hernandez@yahoo.com talleres.hernandez.gt@gmail.com		COTIZACION N° 02383	
	Fabricación, reparación y mantenimiento de maquinaria industrial. Toda clase de trabajos para la industria farmacéutica y alimenticia. Especialidad en trabajos de acero inoxidable.		FECHA 28/09/2014	
CUENTE				
Nombre del Cliente	SECRETARIA NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA			
Atención a	INGENIERO GAMALIEL ZAMBRANO	NET		
Dirección		Tel.	Tel./fax	
Forma de pago	15 DIAS DE CRÉDITO	Vigencia de esta cotización	15 DIAS	
CONCEPTO				
POR FABRICACIÓN DE CONDENSADOR CON 3 SERPENTINES DE COBRE DE 1/2" DE GRESO, 3" DE DIÁMETRO POR 24" DE LARGO CON ENTRADA Y SALIDA DE AGUA, ENTRADA Y SALIDA DE METANOL GASEOSO A LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE, EL CUERPO SERÁ FABRICADO DE ACERO INOXIDABLE TIPO 304.				
PRECIO				C.15,600.00
ESPERANDO QUE LA PRESENTE SATISFAGA SU NECESIDAD DE INVERSIÓN Y EN ESPERA DE UNA RESPUESTA FAVORABLE, QUEDO DE USTED.				
OBSERVACIONES: LOS PRECIOS YA INCLUYEN I.V.A. DE SER APLICABLE. LA COTIZACIÓN FAVORABLE REQUIERE LA FIRMA, SELLADA CON FOLIO DE APROBACIÓN DEL CLIENTE.				FECHA DE APROBADO
COTIZACIÓN AUTORIZADA POR DANIEL HERNANDEZ R.		COTIZACIÓN AUTORIZADA POR EL CLIENTE		
Nombre			Nombre	
FIRMADO AUTORIZANDO		ACEPTADO CLIENTE		

Figura No. 31. Cotización de metanol por tonel de 55 galones.

 E-mail rghguatemala@gmail.com 6 CALLE 7-25, ZONA 2 PBX: 2323-1212 FAX: 2288-1950		FECHA		SUJETO A PAGOS TRIMESTRALES			
		20120622.DC.0619					
EMPRESA: UNIVERSIDAD DE VALLE No. TEL/FAX 2360-9174 23640336 ext.524 6 8478 E-mail crossi@uvg.edu.gt Atención Ing. Cristián Rossi		REPRESENTANTE					
		DELMICARDONA					
COTIZACIÓN		CONDICIONES DE PAGO					
		30 DÍAS					
		MONEDA:					
		Tipo de Cambio					
CODIGO	DESCRIPCIÓN	U. VENTA	ENVASE	CANTIDAD	PRECIO/U.V.	TOTAL	Disponibilidad...
RGH	METANOL INDUSTRIAL AL 99% (TONEL 55 GALONES) SIN ENVASE	UN	TONEL	1	3,000.00	3,000.00	Inmediata
RGH	ETANOL INDUSTRIAL AL 95% P/P (TONEL 55 GALONES) SIN ENVASE	UN	TONEL	1	2,800.00	2,800.00	Inmediata
**** Oferta valida por 15 dias. Disponibilidad sujeta a Existencias ****						Total Q	5,800.00