



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL PROCESAMIENTO
DE ACEITE VEGETAL RECICLADO, EN LA GENERACIÓN DE
BODIÉSEL COMO UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE,
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN
MICRO REACTOR DE REFINACIÓN DE BODIÉSEL.**

AUTOR: VÍCTOR SANTIAGO PARRA ZAMBONINO

DIRECTOR: ING. JIMÉNEZ LEÓN, M

LATACUNGA

2016

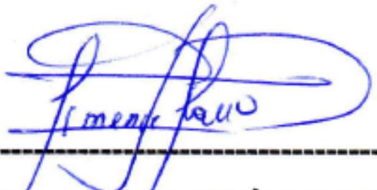


**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRONICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL PROCESAMIENTO DE ACEITE VEGETAL RECICLADO, EN LA GENERACIÓN DE BIODIÉSEL COMO UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE, MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN MICRO REACTOR DE REFINACIÓN DE BIODIÉSEL.**” realizado por el señor **VÍCTOR SANTIAGO PARRA ZAMBONINO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **VÍCTOR SANTIAGO PARRA ZAMBONINO** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 28 de abril del 2016



ING. MARIO JIMÉNEZ LEÓN
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRONICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **VÍCTOR SANTIAGO PARRA ZAMBONINO**, con cédula de identidad N° 050248215-1, declaro que este trabajo de titulación **“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL PROCESAMIENTO DE ACEITE VEGETAL RECICLADO, EN LA GENERACIÓN DE BIODIÉSEL COMO UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE, MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN MICRO REACTOR DE REFINACIÓN DE BIODIÉSEL.”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 28 de abril del 2016

VÍCTOR SANTIAGO PARRA ZAMBONINO

C.C.: 050248215-1



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRONICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

AUTORIZACIÓN

Yo, **VÍCTOR SANTIAGO PARRA ZAMBONINO**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL PROCESAMIENTO DE ACEITE VEGETAL RECICLADO, EN LA GENERACIÓN DE BIODIÉSEL COMO UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE, MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN MICRO REACTOR DE REFINACIÓN DE BIODIÉSEL.”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, 28 de abril del 2016

VÍCTOR SANTIAGO PARRA ZAMBONINO

C.C.: 050248215-1

DEDICATORIA

A:

Dios, por darme la oportunidad de vivir y estar a mi lado en cada paso que doy, por fortalecer mi espíritu e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía a lo largo de la carrera.

Al recuerdo de mi madre Martha Zambonino, por darme la vida, su amor, creer en mí y su apoyo incondicional. Mamá gracias por darme una carrera para mi futuro.

Mis hermanos, familiares y amigos por quererme y apoyarme siempre, esto también se lo debo a ustedes.

Santiago Parra

AGRADECIMIENTO

A través de estas líneas quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que con su soporte científico y humano han colaborado en la realización de este trabajo de investigación.

Muy especialmente a mi tutor y director ingeniero Mario Jiménez, por la acertada orientación, soporte y discusión crítica que me permitió un buen aprovechamiento en la investigación realizada, y que este trabajo llegara a buen término.

Especial mención merece mi familia y amigos por su comprensión, comunicación constante y apoyo incondicional. Esta tesis va dedicada a todos ustedes.

Santiago Parra

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA	I
CERTIFICACIÓN	II
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	III
AUTORIZACIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE ECUACIONES	XVIII
RESUMEN	XX
ABSTRACT	XXI

CAPÍTULO I

GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Descripción resumida del proyecto	3
1.4. Justificación e importancia	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo específico	4
1.5.2. Objetivos generales	4
1.6. Alcance	4

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1. El aceite vegetal procesado en biodiésel	5
2.1.1. Los aceites vegetales	5
2.1.2. Clasificación y usos	6
a. De acuerdo a su origen	6
b. Según su proceso de extracción y saturación	7
c. Acorde a su uso	8
2.1.3. Características físico - químicas de los aceites	9
2.1.4. Alteraciones en el aceite	13
a. Hidrólisis	13
b. Oxidación	14
c. Polimerización	14
2.2. Biocarburantes	15

2.2.1. Ventajas y limitaciones del biodiésel	15
2.3. Diésel de origen vegetal (Biodiésel)	16
2.3.1. Propiedades del biodiésel	17
2.3.2. Características físico – químicas.....	17
a. Especificaciones de biodiésel (B100).....	20
2.4. Discriminación técnica entre biodiésel y diésel	21
2.4.1. Viscosidad	22
2.4.2. Poder calorífico	22
2.4.3. Número de cetano	22
2.4.4. Índice de yodo	23
2.4.5. Contenido de agua	23
2.4.6. Reacción de síntesis	23
2.5. Transesterificación	24
2.5.1. Transesterificación con hidróxido de sodio.....	24
2.6. Reactores de procesamiento de biodiésel.....	25
2.6.1. Proceso discontinuo	26
2.7. Materias primas.....	27
2.7.1. Aceite vegetal usado (AVU)	27
a. Calidad del aceite vegetal usado.....	28
b. Tratamiento del aceite vegetal usado.....	28
c. Recolección del aceite reciclado	29
2.7.2. Catalizadores	30
a. Tipo de catalizador y concentración	30
b. Valoración del AVU con catalizador alcalino	32
c. Almacenamiento y manipulación del catalizador.....	32
2.7.3. Alcohol metílico	33
a. Relación molar de metanol contra aceite vegetal.....	34
b. Almacenamiento de metanol.....	35
c. Preparación de metóxido.....	36
2.8. Protocolo de elaboración de biodiésel.....	36
2.8.1. Tratamiento previo de aceites usados.....	36
2.8.2. Condiciones de la reacción	36
CAPÍTULO III	
ESTUDIO, DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES	39
3.1. Estudio del volumen de aceite reciclado en la localidad	39

3.1.1. Hipótesis.....	39
3.1.2. Identificación de variables en la hipótesis	39
3.1.3. Diseño metodológico	40
a. Métodos.....	41
b. Modalidad básica de la investigación	41
c. Tipo de investigación.....	41
d. La observación como técnica de investigación	42
e. Población.....	42
f. Muestra	43
g. Recolección de datos	44
h. Procesamiento de la información	44
i. Análisis e interpretación de resultados	44
3.1.4. Enfoque	44
3.1.5. Operación de variables.....	45
3.1.6. Encuesta	45
a. Recolección de información	46
b. Procesamiento de información	46
3.1.7. Análisis e interpretación de resultados	46
a. Análisis general de la encuesta.....	52
3.2. Parámetros de diseño y selección.....	53
3.3. Diseño mecánico.....	54
3.3.1. Material de construcción de los tanques	56
3.3.2. Tanque de metóxido.....	59
a. Cálculo de la presión de trabajo	64
b. Cálculo del espesor del recipiente.....	64
3.3.3. Tanque Reactor.....	65
a. Cálculo de presión de trabajo.....	69
b. Cálculo del espesor del recipiente.....	70
3.3.4. Tanque de decantación.....	71
a. Cálculo de las presiones de trabajo	75
b. Cálculo del espesor del recipiente.....	76
3.3.5. Tanque de producto en reposo	77
a. Calculo de la presión de trabajo	81
b. Calculo del espesor del recipiente.....	81
3.3.6. Mezclador del tanque de metóxido.....	82

a.	Potencia consumida por el agitador	86
b.	Diámetro del eje del agitador.....	90
c.	Análisis dinámico del eje de agitación.....	92
3.3.7.	Sistema de tuberías	96
a.	Diámetro óptimo de la tubería	97
b.	Cálculos previos la selección de la bomba.....	107
c.	Selección de la bomba de succión	110
3.3.8.	Bastidor del micro reactor de biodiésel	111
3.4.	Diseño térmico	132
3.4.1.	Cálculo del factor diseño del tanque reactor	132
3.4.2.	Calor requerido para calentar el fluido dentro del tanque reactor...	135
a.	Coeficiente de convección interno y externo del tanque reactor.	136
b.	Calor perdido por las paredes del reactor sin aislamiento térmico ..	139
c.	Calor perdido por las paredes del tanque con aislamiento térmico .	141
d.	Rendimiento térmico en el tanque reactor.....	145
3.4.3.	Cálculo del factor de diseño del tanque de decantación.	146
3.4.4.	Calor requerido para mantener la temperatura en el tanque de decantación.	148
a.	Coeficiente de convección interno y externo del tanque de decantación	149
b.	Calor perdido por las paredes del tanque de decantación sin aislamiento térmico	151
c.	Calor perdido del tanque aislado térmicamente	153
d.	Rendimiento térmico en el tanque de decantación.....	157
3.5.	Diseño eléctrico y electrónico del sistema de control	158
3.5.1.	Diseño electrónico del sistema de control	158
a.	Micro-controlador PIC 16F877A	158
b.	Software Microcode Studio.....	159
c.	Programador de PIC's	160
d.	Software Proteus	161
e.	Control electrónico de temperatura TC-72N.....	163
f.	Termocupla tipo "K"	164
3.5.2.	Diagrama de secuencia del control electrónico	165
3.5.3.	Diseño eléctrico de potencia	166
a.	Selección del calibre de los conductores	166
b.	Selección de las protecciones	170

CAPÍTULO IV	
CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....	171
4.1. Construcción e implementación de equipos mecánicos.....	171
4.1.1. Bastidor de soporte de los tanques del micro reactor	171
4.1.2. Instalación del sistema Eléctrico	174
a. Conexión de los actuadores con el panel de control	174
b. Conexión de la termocupla tipo “K” al control de temperatura.....	175
c. Implementación del tablero de control.....	176
4.2. Operación del Micro reactor de biodiésel	177
4.2.1. Pre tratamiento de aceite vegetal usado	177
4.2.2. Secado del aceite vegetal	178
4.2.3. Proceso de titulación	179
4.2.4. La transesterificación	179
4.2.5. Proceso de lavado.....	180
4.2.6. Embazado del biodiésel.	181
4.2.7. Eficiencia del proceso de producción.	183
4.3. Análisis económico de la obtención de biodiésel	184
4.4. Ensayos de combustión de biodiésel en un quemador	184
4.4.1. Resultados de la combustión de diésel, concentración “B0”	187
4.4.2. Resultados de la combustión de biodiésel, concentración “B5”	189
4.4.3. Resultados de la combustión de biodiésel, concentración “B10”	192
4.4.4. Resultados de la combustión de biodiésel, concentración “B15”	194
4.4.5. Análisis de los resultados obtenidos.	197
CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	198
5.1. Conclusiones.....	198
5.2. Recomendaciones.....	201
BIBLIOGRAFÍA.....	203
LINKOGRAFÍA.....	205
ANEXOS.....	208

Anexo A MANEJO DE ACEITES VEGETALES USADOS
 Anexo B HOJA DE SEGURIDAD DEL HIDRÓXIDO DE SODIO
 Anexo C HOJA DE SEGURIDAD DEL METANOL
 Anexo D MANUAL DE OPERACIÓN.

Anexo E ENCUESTA
Anexo F PLANOS DE CONSTRUCCIÓN
Anexo G PROGRAMA DE CONTROL DEL MICRO REACTOR
Anexo H TARJETA DE CONTROL
Anexo I DIAGRAMA DE CONEXIONES ELÉCTRICAS
Anexo J RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE PODER CALORÍFICO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características químicas de los aceites	10
Tabla 2 Características físicas de aceites y diésel.....	11
Tabla 3 Viscosidad dinámica o absoluta de líquidos a 20°C.....	11
Tabla 4 Densidades de ácidos grasos (g/cm ³).....	12
Tabla 5 Viscosidad cinemática de ácidos grasos (cSt).....	12
Tabla 6 Viscosidades dinámicas de ácidos grasos (cP).....	13
Tabla 7 Ventajas y limitaciones entre biodiésel y diésel	16
Tabla 8 Estándares y especificaciones de biodiésel.....	19
Tabla 9 Especificaciones del biodiésel acorde la norma ASTM.....	20
Tabla 10 Propiedades técnicas del diésel y biodiésel.....	21
Tabla 11 Poder calorífico inferior y número de cetano del biodiésel.....	22
Tabla 12 Características de la transesterificación Catalítica.....	25
Tabla 13 Demarcación de las variables dependiente e independiente.....	40
Tabla 14 Población abalada por los ministerios.....	43
Tabla 15 Valores de K y su nivel de confianza.....	43
Tabla 16 Operación de variables dependiente e independiente.....	45
Tabla 17 Preguntas básicas para la recolección de información.....	46
Tabla 18 Disposición de residuos.....	47
Tabla 19 Producción diaria de aceite vegetal usado.....	48
Tabla 20 Criterio sobre el almacenamiento de aceite.....	48
Tabla 21 Aceite vegetal usado como materia prima.....	49
Tabla 22 Cantidad de aceite vegetal residual.....	50
Tabla 23 Destino de los residuos de aceite vegetal.....	51
Tabla 24 Precios propuestos a los residuos de aceite vegetal	51
Tabla 25 Materiales y su compatibilidad con químicos.....	57
Tabla 26 Placas y accesorios del tanque de metóxido	63
Tabla 27 Placas y accesorios del tanque reactor.....	69
Tabla 28 Placas y accesorios del tanque de decantación	75
Tabla 29 Placas y accesorios del tanque de reposo.....	81
Tabla 30 Agitador de placas planas inclinadas 45°.....	83
Tabla 31 Dimensiones del sistema de agitación.....	83
Tabla 32 Placas y accesorios del agitador.....	86
Tabla 33 Propiedades mecánicas a la tensión de aceros.....	91
Tabla 34 Parámetros en el factor de la condición superficial.....	93
Tabla 35 Factor de temperatura en la resistencia a la tensión.....	94
Tabla 36 Factores de confiabilidad y resistencia a la fatiga.....	95
Tabla 37 Velocidades recomendadas de fluidos en tuberías.....	97
Tabla 38 Datos eléctricos 1x120 V, 60 Hz	111
Tabla 39 Cargas sobre cada componente del micro reactor.....	112
Tabla 40 Nomenclatura de las barras que forman el bastidor	112
Tabla 41 Resultados del rendimiento térmico en el reactor.....	146
Tabla 42 Resultado del rendimiento térmico en el decantador	157
Tabla 43 Conductores aislados para 0 a 2000V nominales.....	169
Tabla 44 Análisis de costos de producir un lote biodiésel.....	184
Tabla 45 Poder calorífico teórico del biodiésel, diésel y sus mezclas.....	185
Tabla 46 Poder calorífico calculado del biodiésel, diésel y sus mezclas ...	186
Tabla 47 Poder calorífico del biodiésel, diésel y sus mezclas	187
Tabla 48 Datos del ensayo en la camara de combustión con “B0”	188

Tabla 49 Información de la imagen termica con un "B0"	188
Tabla 50 Información del recuadro en la imagen con un "B0"	188
Tabla 51 Información del punto central con un "B0"	188
Tabla 52 Datos del ensayo en la camara con "B5"	190
Tabla 53 Información de la imagen termica con un "B5"	190
Tabla 54 Información del recuadro en la imagen con un "B5"	190
Tabla 55 Información del punto central con un "B5"	191
Tabla 56 Datos del ensayo en la camara con "B10"	192
Tabla 57 Información de la imagen termica con un "B10"	193
Tabla 58 Información del recuadro en la imagen con un "B10"	193
Tabla 59 Información del punto central con un "B10"	193
Tabla 60 Datos del ensayo en la camara con "B15"	195
Tabla 61 Información de la imagen termica con un "B15"	196
Tabla 62 Información del recuadro en la imagen con un "B15"	196
Tabla 63 Información del punto central con un "B15"	196
Tabla 64 Resumen de resultados de la combustión	197

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Aceite vegetal	5
Figura 2 Los aceites según su origen.	6
Figura 3 Prensa en frio de aceites vírgenes.	7
Figura 4 Muestra de biodiésel.....	17
Figura 5 Reacción de transesterificación	23
Figura 6 Reactor de biodiésel de ciclo continuo.....	26
Figura 7 Micro reactor de biodiésel.....	27
Figura 8 Aceite vegetal usado.....	27
Figura 9 (a) Hidróxido de potasio, (b) Hidróxido de sodio	31
Figura 10 Metanol, presentación comercial	34
Figura 11 Disposición de aceite vegetal usado.....	47
Figura 12 Producción diaria de aceite vegetal.	48
Figura 13 Almacenamiento de aceite vegetal usado.	49
Figura 14 Biodiésel a partir de aceite vegetal usado.	49
Figura 15 Proyección de la cantidad de aceite usado producido	50
Figura 16 Destino de los residuos de aceite vegetal.....	51
Figura 17 Costos a los residuos de aceite vegetal.....	52
Figura 18 Esquema de micro reactor tipo batch.....	55
Figura 19 Dimensiones del tanque de metóxido.	61
Figura 20 Placa de la base cónica del tanque de metóxido.	63
Figura 21 Dimensiones del tanque reactor	67
Figura 22 Placa de la base cónica del tanque reactor.	68
Figura 23 Dimensiones del tanque de decantación.	73
Figura 24 Placa de la base cónica del tanque de decantación	74
Figura 25 Dimensiones del tanque de reposo.	79
Figura 26 Placa de la base cónica del tanque reposo	80
Figura 27 Correlación de potencia	87
Figura 28 Moto reductor EM5R – 63-1.....	89
Figura 29 Sensibilidad de la muesca al someterse a torsión.	95
Figura 30 Longitudes equivalentes para algunos accesorios	98
Figura 31 Diagrama de Moody para el factor de fricción.	99
Figura 32 Rango de Actuación de las Bombas.....	110
Figura 33 Datos eléctricos de la bomba.....	111
Figura 34 Denominación de las vigas superiores del bastidor.....	113
Figura 35 Denominación de las vigas inferiores del bastidor.....	114
Figura 36 Distribución de las cargas sobre el bastidor	114
Figura 37 Sección lateral de las vigas superiores.....	115
Figura 38 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “L1 y L3”	115
Figura 39 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “L2 y L7”	116
Figura 40 Resultados de análisis de esfuerzos en “L1, L2, L3 y L7”.....	116
Figura 41 Análisis de las columnas “LP1, LP2, LP3 y LP4”	117
Figura 42 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “L5 y L6”	118
Figura 43 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “L4 y L8”	118
Figura 44 Resultados de análisis de esfuerzos en “L2, L4, L7 y L8”.....	119
Figura 45 Análisis de las columnas “LP5 y LP6”.....	120
Figura 46 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “L13”.....	121
Figura 47 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “L14”.....	121
Figura 48 Resultados de análisis de esfuerzos en “L13 y L14”	122

Figura 49	Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "L16"	123
Figura 50	Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "L17"	123
Figura 51	Resultados de análisis de esfuerzos en "L16 y L17"	124
Figura 52	Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "La1"	125
Figura 53	Resultados de análisis de esfuerzos sobre "La1"	125
Figura 54	Sección lateral de las vigas inferiores	126
Figura 55	Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "C1"	126
Figura 56	Resultados de análisis de esfuerzos en "C1"	127
Figura 57	Análisis de las columnas "CP1, CP2, CP3 y CP4"	128
Figura 58	Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "C2"	128
Figura 59	Resultados de análisis de esfuerzos en "C2"	129
Figura 60	Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "C3"	130
Figura 61	Resultados de análisis de esfuerzos en "C3"	130
Figura 62	Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "C4"	131
Figura 63	Resultados de análisis de esfuerzos en "C4"	131
Figura 64	Dimensiones internas del tanque reactor	133
Figura 65	Corte longitudinal del tanque reactor sin aislamiento	139
Figura 66	Trasferencia de calor radial sin aislante, analogía eléctrica	139
Figura 67	Corte longitudinal del tanque reactor aislado térmicamente	142
Figura 68	Trasferencia de calor radial con aislante, analogía eléctrica	142
Figura 69	Dimensiones del tanque de decantación	146
Figura 70	Corte lateral del tanque de decantación sin aislamiento	151
Figura 71	Trasferencia de calor radial sin aislante, analogía eléctrica	152
Figura 72	Corte lateral del tanque decantador aislado térmicamente	154
Figura 73	Trasferencia de calor radial, analogía eléctrica	154
Figura 74	Apariencia física y pines del PIC16F877A	158
Figura 75	Estructura de un programa editado en Microcode Studio	159
Figura 76	Entorno del software ICPROG	160
Figura 77	Programador serial JDM	161
Figura 78	Etapa de control de proceso	162
Figura 79	Etapa de potencia del proceso	163
Figura 80	Control de temperatura TC-72N	164
Figura 81	Termocupla tipo "K"	165
Figura 82	Diagrama de flujo del reactor de biodiésel	166
Figura 83	Estructura de la base metálica del Bastidor	171
Figura 84	Pernos de sujeción utilizados	172
Figura 85	Estructura metálica del bastidor	173
Figura 86	Tablero de control del micro reactor	174
Figura 87	Conexiones de los actuadores al tablero	175
Figura 88	Conexiones eléctricas de las termocuplas	175
Figura 89	Panel de control del micro reactor	176
Figura 90	Tarjeta de control de proceso	176
Figura 91	Recipiente de acopio, recepción	177
Figura 92	Filtrado del aceite reciclado	178
Figura 93	Reactor en el proceso de secado	178
Figura 94	Titulación ácido base	179
Figura 95	Glicerina extraída de la transesterificación	180
Figura 96	Agua residual del primer lavado	180
Figura 97	Agua residual del segundo lavado	181
Figura 98	Muestra de biodiésel a analizar	182

Figura 99 Primera etapa de la disolución de la emulsión.....	182
Figura 100 Segunda etapa de la disolución de la emulsión.....	183
Figura 101 Muestra de diésel puro "B0"	187
Figura 102 Imágenes térmicas al quemar "B0"	188
Figura 103 Muestra de biodiésel "B5"	189
Figura 104 Imágenes térmicas al quemar "B5"	190
Figura 105 Muestra de biodiésel "B10"	192
Figura 106 Imágenes térmicas al quemar "B10"	193
Figura 107 Muestra de biodiésel "B15"	195
Figura 108 Imágenes térmicas al quemar "B15"	195

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Reacción química de la transesterificación	24
Ecuación 2 Ecuación química de un triglicérido	34
Ecuación 3 Estructura molecular del metanol	35
Ecuación 4 Tamaño de la muestra	43
Ecuación 5 Tensión máxima admisible	56
Ecuación 6 Diferencial de volumen	59
Ecuación 7 Volumen total de reactivo	59
Ecuación 8 Volúmen del cilindro	60
Ecuación 9 Perímetro del cuerpo cilíndrico	60
Ecuación 10 Volumen de la base cónica	60
Ecuación 11 Volumen total contenido	61
Ecuación 12 Radio de la plancha circular	62
Ecuación 13 Diámetro de la plancha circular	62
Ecuación 14 Ángulo de corte en la plancha	62
Ecuación 15 Presión de diseño	64
Ecuación 16 Espesor del cilindro	64
Ecuación 17 Espesor del cuerpo cónico	64
Ecuación 18 Diámetro del agitador	83
Ecuación 19 Ancho de las paletas del agitador	84
Ecuación 20 Separación desde la base al deflector	84
Ecuación 21 Ancho del deflector	84
Ecuación 22 Espesor del deflector	85
Ecuación 23 Altura del deflector	85
Ecuación 24 Revoluciones del impulsor	86
Ecuación 25 Número de Reynolds	87
Ecuación 26 Potencia del agitador	88
Ecuación 27 Potencia corregida	89
Ecuación 28 Dimensionamiento de ejes	90
Ecuación 29 Diámetro del eje	90
Ecuación 30 Torque transmitido	91
Ecuación 31 Factor de seguridad	92
Ecuación 32 Límite de resistencia a la fatiga	92
Ecuación 33 Factor de superficie	93
Ecuación 34 Factor de tamaño	93
Ecuación 35 Factor de confiabilidad	94
Ecuación 36 Factor de efectos varios	95
Ecuación 37 Esfuerzo cortante	96
Ecuación 38 Pérdida de carga en tuberías	100
Ecuación 39 Altura total de aspiración	107
Ecuación 40 Carga neta positiva de aspiración	108
Ecuación 41 Altura total de impulsión	108
Ecuación 42 La carga de la bomba	109
Ecuación 43 Potencia teórica de la bomba	109
Ecuación 44 Área lateral del cilindro	133
Ecuación 45 Área de la tapa del tanque	133
Ecuación 46 Área de la base cónica	134
Ecuación 47 Área total del tanque cilíndrico	134
Ecuación 48 Factor de diseño para análisis térmico	134

Ecuación 49 Energía interior requerida.....	135
Ecuación 50 Calor desprendido desde el interior.....	135
Ecuación 51 Número de Prandtl	136
Ecuación 52 Número de Grashof.....	136
Ecuación 53 Número de Rayleigh.....	137
Ecuación 54 Relación de proporción, diametro altura.....	137
Ecuación 55 Número de Nusselt.....	138
Ecuación 56 Coeficiente de convección interno	138
Ecuación 57 Coeficiente de convección externo.....	139
Ecuación 58 Calor desprendido desde el interior, sin aislante.....	140
Ecuación 59 Calor total radiado	140
Ecuación 60 Temperatura en la pared interna	141
Ecuación 61 Temperatura en la pared exterior, sin aislante.....	141
Ecuación 62 Calor desprendido desde el interior, con aislante.....	142
Ecuación 63 Temperatura en medio del tanque	144
Ecuación 64 Temperatura en la pared exterior, tanque aislado.....	144
Ecuación 65 Calor suministrado al sistema	145
Ecuación 66 Rendimiento total calculado	145
Ecuación 67 Corriente electrica de un motor	167
Ecuación 68 Corriente electrica, resistencia	168
Ecuación 69 Corriente total.....	168
Ecuación 70 Poder calorífico calculado	185
Ecuación 71 Poder calorífico inferior.....	186
Ecuación 72 Masa del combustible inflamado	189

RESUMEN

Este documento presenta un estudio de factibilidad del procesamiento de Biodiésel a partir de aceite vegetal reciclado en la ciudad de Latacunga, con el objetivo de cuantificar el volumen mínimo de aceite vegetal que puede llegar a recolectarse. Poniendo en funcionamiento un prototipo de micro reactor tipo Batch para una transesterificación vía alcalina de veinte y cinco litros de capacidad, muy adecuado para procesar lotes de aceite con cualidades físico-químicas diversas, como en el caso de aceites aprovechados en la fritura de alimentos. El equipo se compone de un tanque de reactor, en el que se produce la transformación de aceite a biodiésel, un tanque de mezcla de insumos químicos, donde se combinan el metanol e hidróxido de sodio que actúa como catalizador, un tanque de reposo, en el cual se realiza la separación de fases de acuerdo con sus densidades en: biodiésel en la parte superior, emulsión y agua residual en el fondo. Todo el proceso es dirigido con un control semiautomático que permite la supervisión eficaz de cada etapa del proceso, empleando un microcontrolador PIC16F877A, encargado de controlar la apertura y cierre de electroválvulas, el motor de agitación y la bomba que requiere el proceso. Todo el sistema de control está configurado para funcionar a 120 Vac., enfocado a la fácil utilización del equipo. El biodiésel obtenido del micro reactor fue sometido a ensayos de poder calorífico superior, que reportaron un valor promedio de 39,37 MJ/kg muy cercano a los 40 MJ/kg que determina la norma; mientras que las mezclas biodiésel-diésel “B5”, “B10”, “B15” examinadas en un quemador marca “Beckett” alcanzaron un desempeño térmico muy cercano a los de “B0”, evidencias que corroboran: la viabilidad técnica de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal reciclado en la ciudad de Latacunga, el método de producción y la funcionalidad del equipo.

PALABRAS CLAVE:

- **BIODIÉSEL**
- **MICROREACTORES**
- **ACEITE VEGETAL**
- **MICROCONTROLADOR PIC**

ABSTRACT

This document presents a research about the feasibility of Biodiesel processing that it begins from the vegetable oil that was recycled in Latacunga city in order to quantify the minimum volume of vegetable oil can become recollected. About this objective we put to function a prototype of Batch type microreactor in order to obtain a transesterification through alkaline way with twenty five litres of capacity; it was very adequate to process some oil shares with different physical or chemical qualities such as when we use oils to fry several foods. Equipment has a reactor tank and inside it produces the transformation of oil towards biodiesel, a tank of chemical composites, such as methanol and sodium hydroxide that operates as a catalyzer; a rest tank makes the separation stages according to their densities such as: biodiesel at the top part, emulsion and residual water over depth. All this process is directed with a semiautomatic control that makes easy an effective supervision on each stage of the process using a microcontrol PIC 16f877a assigned to check the opening and the closing of the electro valves, the agitation of the motor and the bomb that requires the process. All control system is shaped to function with 120 Vac. to approach the easy utilization of the equipment. The biodiesel that microreactor gave was subjected to several trials of superior calorific power, that reported an average value of 39.37 MJ/kg and it is near to 40 MJ/kg that marks the rule; while the mixings of biodiesel-diesel "B5", "B10", "B15" that were examined on a "Beckett" burner managed a thermal performance near to "B0"; all these are proves that corroborate the technical viability of the production of biodiesel by means of vegetable oil that was recycled in Latacunga city, the production method and the performance of equipment

KEYWORDS:

- **BIODIÉSEL**
- **MICROREACTORS**
- **VEGETABLE OIL**
- **MICROCONTROLLER PIC**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

En respuesta a la iniciativa impulsada en el país en la búsqueda de energías renovables, este proyecto determinará la factibilidad del procesamiento del aceite vegetal de desecho, fuente de contaminación medioambiental, en biodiésel. Sin que esto signifique un perjuicio a la seguridad alimentaria del país.

“El transporte es una actividad económica imprescindible para el funcionamiento de la economía ecuatoriana. Donde la gasolina es el combustible utilizado por el 89,1 % de los vehículos motorizados matriculados en el Ecuador seguidos con un 10,8 % por los vehículos que funcionan a diésel” según el Anuario de Estadísticas de Transporte. Año 2008, INEC.

Muchos procesos industriales requieren combustibles fósiles como fuente de energía; es el caso de la generación eléctrica, la industria alimenticia y textil en la que se utilizan calderas como fuentes de vapor saturado; la agroindustria por su parte los utiliza en sistemas de calefacción y secado de gramíneas. Por nombrar algunas aplicaciones.

“Los generadores eléctricos a diésel representan aproximadamente el 72 % de la energía utilizada para ejecutar las diversas actividades en la industria”, dato compilado por el INEC en el 2010. Donde mucha de su maquinaria, funciona sobre la base de un generador eléctrico. El diésel al tener una menor tasa de volatilidad, se presenta como la opción más segura para su uso en la industria. “En el Ecuador el 84,8 % de los hogares no clasifica los desechos orgánicos”, según una encuesta realizada por el INEC en diciembre de 2010 a 21.678 hogares en nación en 579 centros poblados

urbanos y rurales. Indicando la urgente necesidad de crear mejores destinos a estos desechos, intención fundamental de este proyecto.

El incremento del precio del petróleo en el mundo es una de las motivaciones más importantes para la búsqueda de fuentes de energía renovables, sin olvidar motivaciones como: La disminución de la dependencia energética, el mejoramiento de la calidad de los combustibles en el país, la reducción de gases contaminantes producidos por las fuentes de energía convencionales por mencionar algunas.

Sin embargo, ciertas fuentes de energías renovables tienen implicaciones sobre la seguridad alimentaria de las comunidades, este proyecto pretende una efectiva utilización de los recursos y la producción existente actualmente en el país, sin afectar la calidad de vida de las personas.

1.2. Planteamiento del problema

La Ley de Biocombustibles y decretos reglamentarios impulsados en la Asamblea Nacional, con el propósito de contribuir con el uso de alternativas energéticas y reducir la dependencia de combustibles fósiles; se ha promoviendo de alguna manera, la utilización de fuentes de energía provenientes de cultivos tradicionales, como es el caso del maíz, caña de azúcar, sorgo y yuca, Implicando un alto impacto en el medioambiente al promover el monocultivo, así como el incremento del precio de los alimentos.

Sin embargo, biocombustibles de segunda generación, aquellos que provienen de desperdicios o residuos agrícolas, al no rivalizar con la producción de alimentos; reducen notablemente las emisiones de CO₂ y al ser medioambientalmente sostenibles se convierten en una mejor propuesta a favor del medioambiente. Es importante mencionar que este tipo tecnologías dependen de factores externos como: estabilidad geopolítica, el factor socio económico que llegan a encarecer sus costos de producción.

1.3. Descripción resumida del proyecto

El trabajo de investigación pretende levantar información que demuestre la viabilidad de la producción de biodiésel en la ciudad de Latacunga, a partir de la recolección de aceite vegetal usado en establecimientos dedicados a la preparación de comidas rápidas, el mismo que hasta el momento no tienen una disposición final adecuada.

Se diseñara e implantará un prototipo de un micro reactor que recicle este material de desecho. Con una capacidad de veinte litros, demostrando la viabilidad de las plantas de captación y procesamiento de aceite de vegetal en biodiésel. Finalmente, el biodiésel, será aplicado como combustible en un quemador de una cámara de secado de pintura. Presentando una solución ambientalmente eficiente al problema de la contaminación.

1.4. Justificación e importancia

La falta de programas de recolección de agentes contaminantes líquidos así como la carencia de una cultura proambiental, hacen que residuos como el aceite de cocina usado reciban una disposición final inadecuada. El cual puede ser utilizado para la producción de un combustible de origen vegetal. Presentando de este modo la viabilidad de la producción sustentable de biodiésel sin perjuicio de la seguridad alimentaria en el país.

Un estudio que permita estimar la cantidad de aceite de cocina que se desecha en la ciudad de Latacunga, permitirá organizar la recolección de estos residuos. Mientras que la implementación de este prototipo más que una prueba de concepto, o establecer la hoja de ruta en la producción de combustibles alternativos, pretende incentivar una conciencia ecológica en el campus universitario, así como el de estimular el estudio de la generación de alternativas energéticas sustentables, promover una cultura de reciclaje y la protección del medioambiente.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Realizar un estudio de factibilidad del procesamiento de aceite vegetal reciclado en la generación de biodiésel como una fuente de energía renovable, mediante la elaboración de un prototipo de micro reactor.

1.5.2. Objetivos específicos

- Ponderar la cantidad de aceite de cocina producido como desecho en los diferentes locales de venta de comidas en la ciudad de Latacunga.
- Diseñar e implantar un prototipo de reactor para el procesamiento de veinte litros de aceite vegetal reciclado demostrando la factibilidad de la producción de diésel de origen vegetal.
- Comparar los resultados de la producción de biodiésel en una cámara de combustión.

1.6. Alcance

En la primera parte de este proyecto se pretende levantar información sobre la cantidad de aceite de cocina producido como desecho en locales comerciales en la ciudad de Latacunga. Para lo cual se realizarán encuestas que permitan cuantificar los volúmenes de aceite generado como residuo del proceso de fritura. El diseño y puesta en funcionamiento del micro reactor para la generación de biodiésel, proyecta procesar 20 litros de aceite vegetal usado en un proceso semiautomático en el que se controlen manualmente las cantidades de químicos requeridos, mientras que se controla el desarrollo del procesamiento desde el panel de control. Es importante que el micro reactor posea un manual de operaciones que detalle el funcionamiento de proceso de elaboración de biodiésel a partir de aceite vegetal reciclado.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. El aceite vegetal procesado en biodiésel

Este capítulo tiene por objeto definir la estructura físico química de los aceites vegetales, su clasificación y el proceso por el que el aceite se transforma en combustible con ayuda de un catalizador.

2.1.1. Los aceites vegetales

“Los aceites son compuestos llamados triglicéridos, cuyas moléculas son efectivamente combinadas con diversos ácidos orgánicos con glicerol” (alcohol) (García G. G., 2008), como se aprecia en la Figura 1. Los aceites, usualmente llamados ésteres, se componen principalmente de ácidos orgánicos en combinación con alcoholes más ligeros. En el proceso de transesterificación, se añade metanol a los aceites vegetales con la ayuda de un catalizador. Convirtiendo los triglicéridos en ésteres de metanol y glicerol como sub-producto.



Figura 1 Aceite vegetal
Fuente: (UAM, 2009)

2.1.2. Clasificación y usos

Los aceites son lípidos de origen vegetal, que se obtiene de las semillas u otras partes de plantas en las que se acumula energía, como en el caso de frutos como: la aceituna, soja, palma, girasol, maíz, nuez de almendra, colza, entre otros (Barriga, 2007).

a. De acuerdo a su origen

Entre los aceites de origen animal más comunes se tienen: el aceite de ballena, de foca, hígado de bacalao. Mientras que los aceites de origen vegetal más comúnmente usados se tienen: el de maíz, de girasol, de palma. Generalmente los aceites vegetales aportan ácidos grasos insaturados y poseen un valor energético aproximado de 900 kcal., por cada 100 gr (Gutierrez, 2013). En la Figura 2, se presentan los distintos tipos de aceite acorde a su origen.



Figura 2 Los aceites según su origen.

Fuente: (Gutierrez, 2013)

b. Según su proceso de extracción y saturación

Los aceites extraídos mediante el “prensado en frío” aplicado a no más de 27 °C, mantienen el sabor de la fruta o semilla de la que se extraen. Los aceites obtenidos a partir de la “extracción en frío” la cual consiste en la centrifugación de los frutos a 3200 rpm., y su posterior filtración a una temperatura inferior a 27°C, todos los productos oleicos son conocidos como aceites vírgenes (Hangzhou, 1999). En la Figura 3, se presenta el ejemplo más compacto de una prensa en frío.



Figura 3 Prensa en frío de aceites vírgenes.

Fuente: (Hangzhou, 1999)

Los aceites refinados se someten a un proceso de filtrado y desodorizado que responden a criterios como: ser organoléptico, o de sabor neutro; visual, estar libre de impurezas y de color adecuado; alimentaria mente seguro, mejor conservación. Los aceites, de acuerdo a las grasas saturadas que contienen pueden clasificarse en cuatro grandes grupos que se describen a continuación (Hangzhou, 1999):

- Aceites saturados: Con una relación en gramos de yodo fijada en condiciones específicas de 100 gramos de grasa, de entre 10 y 50. Conocida como índice de yodo (Dobarganes & Márquez, 1995). Algunos ejemplos de aceites saturados son: palmito, pulpa seca de coco, conocidos como Lóricos. Los de palma, que toman el nombre de Plamíticos y los Esteátricos como los que se obtienen del árbol de mantequilla del oeste Africano conocido comúnmente como karité.
- Aceites monosaturados: Con un índice de yodo que va entre los 50 y 100 gramos de yodo por 100 gramos de grasa. Entre los que se destacan los aceites de aceituna, cacahuete, colza, sésamo.
- Aceites Biinsaturados: Con índices de yodo entre los 100 y 150 gramos de yodo por 100 gramos de grasa. Como los de girasol, algodón, maíz y soja todos ellos conocidos como aceites Linoleicos.
- Aceites Triinsaturados: En los que su índice de yodo es mayor a los 150 gramos por 100 gramos de grasa.

c. Acorde a su uso

Tomando en cuenta que los aceites vegetales no tienen usos exclusivos, su uso se lo puede clasificar en:

- Industriales: El principal aceite de uso industrial es el de lino. Su poder secante posee valor industrial por ser aptos para producir capas protectoras bien adheridas y resistentes. Empleado principalmente en la elaboración de pinturas, tintas de imprenta, impermeabilización de telas y fabricación de hule. El aceite de ricino deshidratado se usa para producir películas más blandas y elásticas. Que en el caso de los aceites de lino y tung, son destinados a la fabricación de lubricantes, por su bajo poder secante.

- Comestibles: contribuyen en la fijación del calcio, caroteno, tiamina, lactosa y con sus vitaminas A, D y K, proveyendo parcialmente las necesidades alimentarias de la humanidad. La calidad de los aceites comestibles se cuantifica según parámetros como: El grado de estabilidad, que define su capacidad de mantener su sabor en el tiempo. Su resistencia a los cambios ante variaciones de temperaturas. Las características organolépticas como sabor, olor y color, inciden en la calidad de los aceites, de manera subjetiva. Mientras que a nivel nutricional, por sus distintos ácidos grasos, influyen negativamente en la salud humana, al consumirlos en exceso.

2.1.3. Características físico - químicas de los aceites.

- Punto de fusión: el punto de fusión de un aceite se reduce en cuanto más ácidos grasos de cadena corta posea, aumentando su grado de insaturación y la tendencia de sus hidrógenos a reaccionar.
- Calor específico: varía en función de la insaturación de los ácidos grasos. Los aceites poseen el doble de calor específico que las grasas sólidas.
- Viscosidad: es directamente proporcional a la longitud de la cadena de ácidos grasos, e inversamente proporcional a la insaturación.
- Densidad: en promedio los aceites poseen una densidad entre 0,914 y 0,919 gr/cc, sin embargo en aceites reciclados su densidad no puede ser estandarizada de manera uniforme.
- Título: es la temperatura a la cual hay una cristalización después de saponificar (combinar un cuerpo graso con un álcali) y enfriar lentamente el aceite, si el grado supera los 40 puntos se considera como sebo.

- Índice de refracción: que es directamente proporcional con la longitud de la cadena de ácidos grasos y la insaturación del triglicérido, calculado como porcentaje relativo de cada ácido graso multiplicado por un factor diferente según el número de insaturaciones.
- Polimorfismo: asociado a la cristalización de algunos triglicéridos según la velocidad y temperatura de enfriamiento, influye en la elaboración de mantecas y margarinas, debido a que el tamaño del cristal define las propiedades físicas del aceite

Las características químicas más relevantes de los principales ácidos grasos producidos a escala industrial se destacan en la Tabla 1. En tanto que en la Tabla 2, se presentan las características físicas de los aceites y diésel, de manera que se puede hacer una breve diferenciación entre el oleico y el carburante mineral; Las viscosidades de algunos fluidos se representan en la Tabla 3, datos esenciales en la fase de diseño del micro reactor que permiten por ejemplo definir las dimensiones de los tanques, la transferencia de calor del fluido y diámetros de tubería entre otros parámetros.

Tabla 1
Características químicas de los aceites

Características	Éster metílico de Colza	Aceite de Colza	Éster metílico de Girasol	Aceite de girasol
Densidad a 20°C, (kg/l)	0,884	0,916	0,88	0,924
Viscosidad 20° (cSt)	7,5	31,8 (virgen)	---	65,8
Viscosidad 50° (cSt)	3,8	36,4 (semirrefinado)	4,22	34,9
POFF (°C)	-12,-15	+2,0		
PCI (kJ/kg)	37700	37400	35300	36500
PCI a 20°C (kJ/l)	33300	34300		
Azufre (% en peso)	0,002	0,0001	0,01	0,01
N° de Cetano	52-56 49-52,5	41-51	45-51	33

Fuente: (Michelena & Martín, 2008)

Tabla 2
Características físicas de aceites y diésel

	Densidad (g/cm ³ a 20 °C)	Viscosidad (sCt a 20 °C)	“Pour point” (°C)	“Cloud point” (°C)	“Flash point” (°C)	Poder calorífico (MJ/kg)
Combustible						
Diésel	0.836	6	-18	-9	93	43.8
Copra	0.915	30	23/26	28	230	37.1
Palma	0.945	60	23/40	31	280	36.9
Algodón	0.921	73	-2	-1	243	36.8
Tempate	0.920	77	-3	2	236	38.8
Cacahuete	0.914	85	-1	9	258	39.3
Colza	0.920	78	-2	-11	285	37.4
Soja	0.920	61	-4	-4	330	37.3
Girasol	0.925	58	-6	-5	316	37.8

Fuente: (Barriga, 2007)

* Pour point.- temperatura de descongelación

* Cloud point.- punto de turbidez

* Flash point.- punto de ignición/combustión

Tabla 3
Viscosidad dinámica o absoluta de líquidos a 20°C

Fluidos	Viscosidad η (mPa.s o cp)
Glicerina	1420
Agua	1,00
Etanol	1,1
Metanol	0,59
Aceite de oliva	84
Aceite de soya	69

Fuente: (Michelena & Martín, 2008)

La Tabla 4, muestra los valores que adquiere la densidad de un ácido graso en función a la temperatura a la que se encuentra, parámetro indispensable en los cálculos de las dimensiones de cada tanque que conforma el reactor de biodiésel.

Tabla 4
Densidades de ácidos grasos (g/cm³)

Temp (°C)	Palmitico	Esteárico	Oleico
20			0,8939
25			0,8904
30			0,8854
35			0,8835
40			0,8801
45			0,8766
50			0,8733
55			0,8698
60			0,8667
65	0,8577		0,8628
70	0,8538		0,8594
75	0,8506	0,8490	0,8560
80	0,8470	0,8457	0,8526
85	0,8437	0,8418	0,8495
90	0,8392	0,8381	0,8458

Fuente: (García P. L., 2009)

La Tabla 5, muestra los valores de la viscosidad cinemática (cSt), de ácidos grasos; por otro lado, la Tabla 6, presenta la viscosidad dinámica (cP). Posteriormente estas tablas son indispensables en los cálculos de diseño de los tanques que componen el micro reactor de procesamiento de biodiésel.

Tabla 5
Viscosidad cinemática de ácidos grasos (cSt).

Temp °C	Palmitico	Esteárico	Oleico
25			32,95
30			27,34
35			33,99
40			19,59
45			16,78
50			14,45
55			12,54
60			11,02
65	9,96		9,74
70	8,87	9,74	8,60
75	7,86	9,74	7,67
80	7,04	9,05	6,96
85	6,32	8,35	6,27
90	5,70	7,49	5,67
95	5,16	6,63	5,18
100	4,69	5,96	4,79

Fuente: (García P. L., 2009)

Tabla 6
Viscosidades dinámicas de ácidos grasos (cP).

Temp °C	Palmítico	Estearico	Oleico
25			29,31
30			24,23
35			20,29
40			17,22
45			14,69
50			12,61
55			10,89
60			9,53
65	8,55		8,39
70	7,59	10,16	7,38
75	6,70	8,30	6,55
80	5,97	7,68	5,92
85	5,34	7,05	5,31
90	4,80	6,30	4,78
95	4,32	5,55	4,35
100	3,92	4,98	4,01

Fuente: (García P. L., 2009)

2.1.4. Alteraciones en el aceite

“Al aumentar la temperatura se aceleran los procesos químicos y enzimáticos”... (Dobarganes & Márquez, 1995), degradándolo con rapidez, especialmente al existir residuos que catalicen la reacción, efecto común en triglicéridos usados en la fritura de alimentos en la que el calentamiento excesivo es una constante.

a. Hidrólisis

El agua o humedad, en presencia de calor producen la ruptura del enlace éster de los triglicéridos, descomponiéndolos en monoglicéridos y diglicéridos. Generando como consecuencia:

- Reducción del punto de humo (temperatura en la que aparece humo en la superficie del aceite)
- Producción de olores y sabores indeseables

- Incremento de la acidez del aceite calentado

b. Oxidación

La Termo oxidación es el producto de las elevadas temperaturas que favorecen la oxidación del triglicérido, generan olores y sabores no deseados, oscurecimiento y un aumento de la viscosidad y formación de espuma. En tanto que la auto oxidación es la alteración más frecuente al calentar un aceite; es producida por la acción del oxígeno sobre los ácidos grasos, en la que la luz actúa como catalizador. Sus fases son:

- Fase de iniciación o inducción, en la que se forman dos radicales libres a partir de un hidroperóxido o de un ácido graso con un hidrógeno lábil.
- Fase de propagación o continuación, los radicales libres reaccionan con el oxígeno u otras cadenas de ácidos grasos generando una reacción en cadena a medida que progresa la reacción.
- Fase de finalización o terminación, en la reacción de dos radicales libres entre sí, forman compuestos no radicales, como aldehídos y cetonas.

c. Polimerización

La formación de polímeros se produce cuando los radicales libres de un triglicérido se combinan entre sí o con otros ácidos grasos, por la formación de enlaces carbono-oxígeno-carbono (Barriga, 2007). Aumentando la viscosidad del aceite y permitiendo la formación de espuma, al hacer que las moléculas simples, iguales o diferentes, reaccionan entre sí por adición o condensación formando otras moléculas de peso doble o triple formando una capa viscosa en el fondo del recipiente que contiene el aceite. Además de formar una capa de consistencia plástica en la superficie del aceite.

2.2. Biocarburantes

Los biocarburantes son alcoholes, ésteres (con dos Oxígenos como grupo funcional Ej: $\text{CH}_3\text{C}=\text{OOCH}_3$, etanoato de metilo), éteres (con un Oxígeno como grupo funcional Ej: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OCH}_3$ = metiletiléter) y otros productos químicos que provienen de la transformación tanto de la biomasa residual húmeda (reciclado de aceites), biomasa residual seca rica en azúcares (trigo, maíz, etc.) o cultivos energéticos (colza, girasol, etc.) (Barriga, 2007).

El término biocombustible define a cualquier tipo de combustible líquido que se derive de la biomasa (plantas o sus derivados), de modo que se los puede dividir en dos grandes grupos: los bioalcoholes, obtenidos de la fermentación alcohólica de cultivos ricos en almidón y, los bioaceites, derivados de diversos tipos de especies oleaginosas, o de la transformación de aceites vegetales fritos.

El uso de biocarburantes produce una considerable reducción de dióxido de carbono enviado a la atmósfera debido a desde un principio, sus materias primas las van absorbiendo mientras que los contaminantes emitidos en su combustión son comparables a la de carburantes convencionales. Por lo que en diversos países han surgido normativas que rigen la combinación de biodiésel y diésel convencional en proporciones de entre el 5 al 10 % (Barriga, 2007).

2.2.1. Ventajas y limitaciones del biodiésel

En el uso del biodiésel como sustituto o aditivo del diésel N°1 se presentan ventajas y limitaciones que se pueden clasificar de acuerdo a sus efectos en aspectos como: técnica; socio economía; ambiente y ecología; seguridad, almacenamiento y transporte. Tabla 7, muestra las ventajas y limitaciones del uso del biodiésel en cada uno de los aspectos antes mencionados frente al diésel convencional. Se debe reconocer que en condiciones controladas el uso de biodiésel presenta mejores ventajas medioambientales que el diésel tradicional (Fernandez, 2009).

Tabla 7
Ventajas y limitaciones entre biodiésel y diésel

TÉCNICA	
VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor lubricidad (favorece el funcionamiento de los componentes del motor). • El motor diésel no requiere modificaciones extensas • No demanda modificaciones en la infraestructura de distribución y venta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de fluidez a bajas temperaturas (menores a 0°C). • Incompatibilidad con ciertos plásticos y derivados del caucho natural (mangueras, juntas, sellos, diafragmas, partes de filtros, entre otros). • Mínimas diferencias en potencia y consumo de los motores.
SOCIOECONOMÍA	
VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> • Posibilita el autoabastecimiento de combustible de producción agropecuaria • Reduce la dependencia de combustibles fósiles. • Incentiva la economía 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta dependencia del costo de materias primas. • Costos de fabricación elevados de acuerdo a la calidad de materia prima utilizada. • La generación de coproductos (glicerina) sólo es viable para grandes producciones.
AMBIENTE Y ECOLOGÍA	
VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> • Alta biodegradabilidad, comparable con la dextrosa • No contiene azufre • No contribuye al incremento de emisiones de carbono • Energía de fuente renovable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede promover la deforestación. • El monocultivo de materia prima puede afectar el equilibrio ecológico • Emisiones de óxidos de nitrógeno
SEGURIDAD, ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE	
<ul style="list-style-type: none"> • Transporte y almacenamiento más seguro debido a su punto de inflamación (150°C). • Reduce el peligro de explosiones por emanación de gases en el almacenamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Escasa estabilidad oxidativa, absorbe el agua del ambiente (periodo máximo de almacenamiento seis meses).

2.3. Diésel de origen vegetal (Biodiésel)

El Biodiésel llamado también biogaseleo o diester, (metil-éster de ácidos grasos), es el resultado de la reacción química entre los ácidos grasos, de los aceites vegetales con alcoholes como el metanol o el etanol, en presencia de un catalizador como el Hidróxido de Sodio. En un proceso químico llamado transesterificación (A.S.T.M., 2009). En La Figura 4, se presenta una muestra de biodiésel.



Figura 4 Muestra de biodiésel.

Fuente: (Board, 1996)

2.3.1. Propiedades del biodiésel

Debido a su producción renovable y su bajo impacto ambiental en su producción primaria e industrial, establece un balance de carbono menos contaminante que los combustibles tradicionales. El biodiésel debe cumplir los requisitos de Agencia de Protección Ambiental (EPA) por sus siglas en inglés (Environmental Protection Agency) (A.S.T.M., 2009).

2.3.2. Características físico – químicas.

Al comparar el biodiésel con el diésel se puede reconocer que el contenido calórico del primero es menor, sin embargo su estructura química le imprime algunas características particulares que lo posicionan como un combustible de alto desempeño, las mismas que varían según la materia prima con que se elabora (Agudelo, Peña, & Mejía, 2001). Entre las más reconocidas están:

- Alto número de cetano.- Que representa el periodo corto de tiempo entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión y de manera intrínseca representa la calidad del carburante. Indicando una combustión de calidad, con una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante.
- Presencia de oxígeno en la molécula.- Posibilita una combustión mucho más completa, reduciendo la emisión de partículas contaminantes, hidrocarburos no quemados y principalmente monóxido de carbono (Larosa, 2003)
- Alta capacidad lubricante.- Incrementa la vida de los motores, sin embargo al poseer cualidades solventes, es posible que ocasione el desprendimiento de sedimentos que obstruyan los filtros de combustible. Una limpieza del sistema de combustible se recomendable luego de la transición de diésel a biodiésel.
- Libre de azufre.- Eliminando las emisiones de óxidos de azufre en el ambiente o al menos su contenido de azufre es bajo como consecuencia de su proceso de elaboración, permitiendo ser usado como aditivo de diésel.
- Libre de compuestos aromáticos.- Disminuyendo el riesgo de enfermedades respiratorias y alergias, ocasionadas por los gases liberados de los carburantes tradicionales al encontrarse confinados en ambientes con una ventilación deficiente.

Al ser un carburante relativamente nuevo, los países que han optado en utilizar biodiésel, han determinado sus propios rangos de calidad en algunas de las características del biodiésel acorde a sus propias exigencias y necesidades. En la Tabla 8, se destacan las normas de algunos de estos países.

Tabla 8
Estándares y especificaciones de biodiésel.

	Austria	Alemania	Italia	Francia	Europea	USA	Argentina
Norma	ONORM C 1191	DIN V 51606	CUNA	Journal Officiel	EN 14214	ASTM D-6751 ⁽¹⁾	IRAM 6515
Fecha	Ene/96	Sep/97 ⁽⁷⁾	Abr/93	Sep 97 ⁽⁵⁾	2003	Dic/01	Oct/01
Densidad 15°C g/cm ³	0.85-0.89	0.875-0.9	0.86 - 0.90	-	0.86-0.90	-	0.86-0.9
40°C	3.5 - 5.0	3.5 - 5.0	3.5 - 5.0	-	3.5-5.0	1.9-6.0	3.5-5.0
Punto de ignición °C	≥100	≥100	≥100	-	≥120	≥100	
Invierno	≤ -15	≤ -20	≤ -15	-		-	
Azufre total %P	≤ 0.02	≤ 0.01	≤ 0.01	-	10 mg/kg	≤ 0.05	10 mg/kg
CC 100% %P	≤ 0.05	-	-	-		≤ 0.05	
10 % res. Destilado	-	≤ 0.3	≤ 0.5	-	≤ 0.3		≤ 0.3
Ceniza sulfat %P	≤ 0.02	≤ 0.03	-	-	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.02
Cenizas %P	-	≤ 0.01	-	-		-	
Agua mg/kg	-(2)	≤ 300	≤ 700	≤ 200	≤ 500	≤ 0.05 %	≤ 500
Impureza total mg/kg	(3)	≤ 20	-	-	≤ 24	-	≤ 24
Corrosión-Cu 3h/50°C	-	1	-	-	1	< N°3	1
Número Cetano	≥ 48	≥ 49	-	≥ 49	≥ 51	≥ 40	≥ 50
N° Neutralización	≤ 0.80	≤ 0.50	≤ 0.50	≤ 1	≤ 0.50	≤ 0.80	≤ 0.50
Estabilidad Oxidación 110°C h	-	-	-	-	6		6
Metanol %P	≤ 0.20	≤ 0.30	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.20	-	≤ 0.20
N° Saponificación mg KOH/g	-	-	≥ 170	-			
Contenido Esteres %P	-	-	≥ 98	≥ 96.5	96.5 ⁽⁸⁾	-	96.5 ⁽⁸⁾
Triglicérido %P	-	≤ 0.1	≤ 0.1	-	≤ 0.2	-	≤ 0.2
Diglicérido %P	-	≤ 0.1	≤ 0.2	-	≤ 0.2	-	≤ 0.2
Monoglicérido %P	-	≤ 0.8	≤ 0.8	≤ 0.8	≤ 0.8	-	≤ 0.8
Glicerina libre %P	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.05	-	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.02
Glicerina Total %P	≤ 0.24	≤ 0.25	-	≤ 0.25	≤ 0.25	≤ 0.24	≤ 0.25
Número lodo	≤ 120 ⁽⁴⁾	≤ 115	-	≤ 115	≤ 120	-	
Fósforo mg/kg	≤ 20	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	-	≤ 10
Metales alcalinos mg/kg	-	< 5	-	≤ 5	≤ 5 (Na+K)≤5(Ca+Mg)		≤ 5(Na+K)

Fuente: (A.S.T.M., 2009)

(1) basado en la norma provisional PS121-99, de julio de 1999

(2) libre de agua separada

(3) libre de sólidos

(4) contenido de ácido limpleico (C18:3) y otros de 3 o más insaturaciones ≤ 15 %P

(5) previamente normal de Dic. 93

(6) versión anterior de Nov. 94

(7) versión anterior junio 94

(8) ester de ácido linoleico ≤ 12 % P, ester de poliinsaturados (≥ 4 dobles ligaduras)

a. Especificaciones de biodiésel (B100)

La norma internacional ASTM para Biodiésel D 6751, especifica mezclas de combustible biodiésel (B100) de destilación media, que puede ser utilizada hasta en un 20 % del volumen. Además impone límites para las impurezas resultantes de la producción del biodiésel. Entre las más importantes se destacan: metanol, glicerina (como derivado), materia prima no convertida o parcialmente convertida, Sodio residual de la Sosa cáustica empleada como catalizador en la reacción de transesterificación. Por ello exige que el B100 cumpla con uno de dos requerimientos.

- Un punto de evaporación instantánea (flashpoint), superior a 130 °C.
- Un punto de evaporación instantánea por encima de 93 °C y un contenido de metanol por debajo de 0.2 %, garantizando que el biodiésel es apto para ser transportado.

Además de limitar la presencia de glicerina libre en el combustible a 0.020 en peso por ciento máximo. Debido a que la glicerina, subproducto de la reacción de transesterificación. Puede depositarse en el fondo de los tanques de almacenamiento y obstruir los filtros de combustible e inyectores. Otras especificaciones para el biodiésel al 100 % en los Estados Unidos descritas por la norma (ASTM, 2011), se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9
Especificaciones del biodiésel acorde la norma ASTM

PROPIEDAD	METODO ASTM	VALOR	UNIDAD
Punto de ignición	D93	100.0 mín.	C
Sedimento & Agua	D1796	0.050 máx.	Vol. %
Ceniza Sulfatada	D874	0.020 máx.	wt %
Viscosidad (40 °C)	D445	1.9 – 6.5	cSt
Sulfuro	D2622	0.05 máx.	wt %
Número Cetano	D613	40 mín.	--
Número Ácido. mg	D664	0.80 máx.	KOH/gm
Glicerina total G.C	--	#0.240 máx.	wt %
Hidrogeno	--	12	(% peso)

Fuente: (ASTM, 2011)

2.4. Discriminación técnica entre biodiésel y diésel

Con el fin de poder establecer diferencias entre estos combustibles, es importante conocer las propiedades físicas y químicas más importantes relacionadas con los ésteres y el diésel. El diésel como un derivado del petróleo compuesto principalmente por parafínicos, naftalénicos. Con un contenido del número de carbonos entre C10 y C22. Por otro lado el biodiésel, se deriva de aceites y grasas vegetales o animales que contienen triglicéridos, lo que determina finalmente las características del biodiésel. En la Tabla 10, se detallan las normas técnicas del diésel y biodiésel de acuerdo a normas aplicadas alrededor del mundo.

Tabla 10
Propiedades técnicas del diésel y biodiésel

Parámetro	Norma	Unidades	UNE EN 590* Diésel #2	Limite CEN/TC 19** Biodiésel
Densidad (15 °C)	EN ISO 12185	g/cm ³	0.820-0.845	0.860-0.900
Viscosidad Cinemática 40°C	EN ISO 3104	cSt	2.0-4.5	3.5-5.0
Punto Inflamación	EN 22719 ISO/CD 3679	°C	55 min.	101 min.
Azufre	EN ISO 14595	ppm	350 máx.	10 máx.
Residuo Carbonoso (10 %)	EN ISO 10370	%	0.30 máx.	0.30 máx.
Contaminación Total	EN 12662	ppm	24 máx.	24 máx.
Agua	EN ISO 12937	ppm	200 máx.	500 máx.
Corrosión al cobre	EN ISO 2160	-	Clase 1	Clase 1
Cenizas Sulfatadas	EN ISO 6245 ISO 3987	%	0.01 máx.	0.02 máx.
Estabilidad Oxidación	EN ISO 12205 EN 14112	mg/l	25 máx.	6 h mín.
Número de Cetano	EN ISO	-	51 mín.	51 mín.
Índice de Cetano	EN ISO	-	46 mín.	

Fuente: (ASTM, 2011)

* Limites Julio 2000

** Limites Mayo 2001

2.4.1. Viscosidad

Los valores en la norma ISO para aceites sin tratar es de 30,7 mm²/s a 40°C, muy superiores a la viscosidad del diésel con 3,1 mm²/s. Lo que incide negativamente en la inyección y la combustión. Con la esterificación, este valor se reduce hasta asemejarse a la viscosidad del diésel (Larosa, 2003).

2.4.2. Poder calorífico

Expresa la energía que puede liberar un combustible al reaccionar con un carburante. En el caso del diésel su poder calorífico es de 43000 kJ/kg, mientras que en el caso del biodiésel es de 42000 kJ/kg. Finalmente un aceite vegetal posee un poder calorífico de 36980 kJ/kg (ASTM, 2011).

2.4.3. Número de cetano

Es el parámetro que indica la facilidad de inflamación del combustible, comparado con un patrón establecido. En aceites vegetales puros es muy bajo (34), mejorando notablemente luego de la esterificación llegando a los valores del diésel (50).

El diésel, requiere tener un número de cetano de 40 o mayor; sin embargo se traduce también en costos mayores del combustible; normalmente se mantiene entre 40 y 45. La Tabla 11, muestra el poder calorífico inferior y los números de cetano del biodiésel, producido con diferentes materias primas.

Tabla 11
Poder calorífico inferior y número de cetano del biodiésel

Tipo de biodiésel	Calor de combustión (en MJ/kg)	No. de cetano
Éster metílico de soya	39.8	46.2
Éster etílico de soya	40.0	48.2
Ebutílico de soya	40.7	51.7
Éster metílico de girasol	39.8	47.0
Éster metílico de cacahuete	-	54.0
Éster metílico de colza	40.1	-
Éster etílico de colza	41.4	-

Fuente: (Garcia Camus & Garcia Laborda, 2005)

2.4.4. Índice de yodo

El mayor nivel de ácidos grasos no saturados en el carburante (ésteres metílicos de ácidos grasos o FAME), eleva el riesgo de polimerización, por lo que se recomienda no exceder un índice de yodo de 115 gramos de yodo por cada 100 gramos de carburante (ASTM, 2011).

2.4.5. Contenido de agua

El metiléster no puede superar los 500 mg/kg, parámetro determinado por la norma. Existen aditivos que reducen el contenido de agua, pero su eficacia se reduce con largos periodos de tiempo de almacenamiento del biocombustible (ASTM, 2011).

2.4.6. Reacción de síntesis

En el proceso de transesterificación se combina el aceite de origen orgánico con un alcohol ligero, que puede ser metanol, con la ayuda de un catalizador (Hidróxido de Sodio). Dejando como residuo propanotriol (glicerina). En la Figura 5, se presenta la reacción de transesterificación.

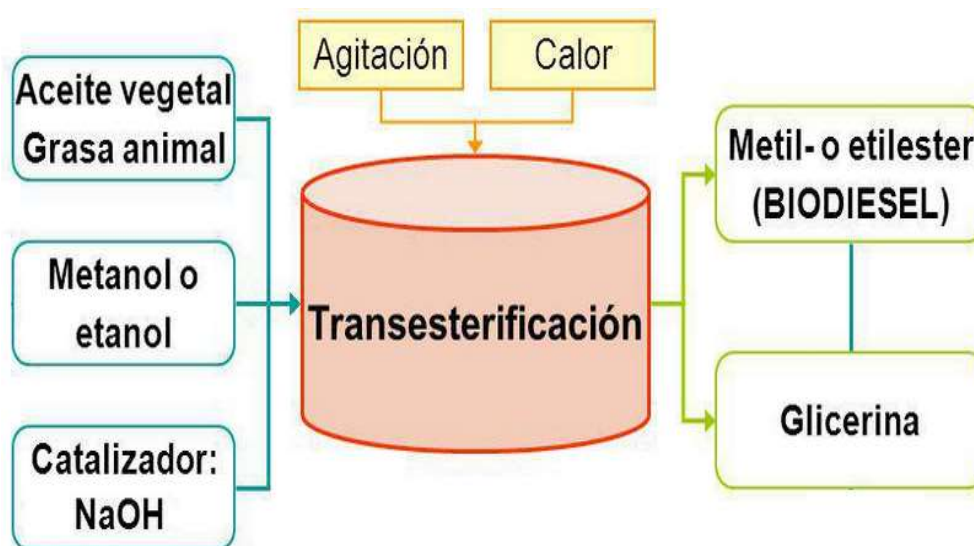
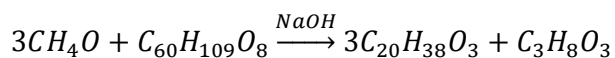


Figura 5 Reacción de transesterificación

Fuente: (Larosa, 2003)

2.5. Transesterificación

La transesterificación o alcoholólisis, consiste en la reacción de una grasa o aceite (triglicérido $C_{57}H_{98}O_6$), con un alcohol para formar ésteres y glicerol. Cuando reaccionan con un alcohol de bajo peso molecular (metanol, CH_4O), en presencia de un catalizador (Hidróxido de Sodio, $NaOH$). En cada reacción 1 mol de éster metílico es liberado. El proceso de Transesterificación se realiza dentro de un reactor que contiene las reacciones químicas, que se producen a presión atmosférica y a una temperatura promedio de $55^\circ C$, bajo una agitación constante. En una relación molar de alcohol a triglicérido virgen de 3 a 1. Los reactores constan generalmente con fases de: separación, purificación y estabilización (Michelena & Martín, 2008). La transesterificación de aceites vegetales usados se logra con un exceso de metanol y catalizador, la Ecuación 1 muestra la reacción química balanceada por estequiometría.



Ecuación 1 Reacción química de la transesterificación

Donde:

CH_4O : Metanol

$C_{60}H_{109}O_8$: Triglicérido

$C_{20}H_{38}O_3$: Ester metílico (Biodiésel)

$C_3H_8O_3$: Glicerol

$NaOH$: Hidróxido de sodio

2.5.1. Transesterificación con hidróxido de sodio

En la transesterificación con metanol, vía alcalina; el catalizador ($NaOH$) es disuelto en el alcohol en un pequeño reactor. El aceite es transferido a un reactor de biodiésel y luego mezclado con la solución catalizador/alcohol. Que se agita durante el tiempo que dura la reacción una temperatura constante de $55^\circ C$ (Roldan Vilorio & Toledano, 2013).

Una reacción de transesterificación exitosa produce dos fases líquidas: éster y glicerina cruda. La separación de la fase puede ser observada en 10 minutos y completarse en 2 horas aunque la sedimentación puede tomar hasta 20 horas. Después de que la sedimentación finaliza, la glicerina cruda debe ser recolectada en un contenedor (Fernandez, 2009). La Tabla 12 presenta las temperaturas en las que se produce una transesterificación catalítica, así como otras particularidades de este proceso.

Tabla 12
Características de la transesterificación Catalítica

Características	Catalizador Alcalino
Temperatura de reacción	50 – 70 °C
Ácidos grasos libres en materiales crudos	Productos saponificados
Agua en materiales crudos	Interfiere con la reacción
Producción de metil ésteres (Biodiésel)	Normal
Recuperación de glicerol (Glicerina)	Difícil
Purificación de metil ésteres	Repetir lavado
Costo de producción del catalizador	Barato Relativo

Fuente: (Blangino, 2004)

2.6. Reactores de procesamiento de biodiésel

Muchas tecnologías actuales, pueden combinarse variando las condiciones de procesamiento. Su selección depende de la capacidad de producción, alimentación, calidad y si se desea recupera o no el alcohol y el catalizador. En plantas procesadoras de menor capacidad y con diferente calidad de materia prima (debido a su capacidad de procesar aceites refinados y reutilizados), el proceso más idóneo es el discontinuo o Batch. Por otro lado en plantas de procesamiento de mayor capacidad y que buscan una mejor calidad de su producción se utilizan procesos continuos, justificando los costos de producción (Michelena & Martín, 2008).

La Figura 6 muestra una planta piloto, de la empresa Séneca Green Catalyst S.L., que posee un reactor capaz, de producir biocombustibles mediante catálisis continua. Al procesar 6.000 litros diarios de biodiésel, con unas dimensiones totales de 100 metros cuadrados (Posadillo, 2005).



Figura 6 Reactor de biodiésel de ciclo continuo

Fuente: (Posadillo, 2005)

2.6.1. Proceso discontinuo

Es el método más simple de producción de biodiésel en proporciones molares de 6:1 (alcohol y triglicérido). Las condiciones de operación generalmente son: Una temperatura 55°C, como catalizador hidróxido de sodio (NaOH). Se precisa la agitación mecánica para una correcta mezcla en el reactor. Hacia el final de la reacción la agitación debe ser menor, para permitir al glicerol separarse del éster. Obteniendo resultados de entre el 85 % y el 94 %. Algunas plantas utilizan reacciones en dos etapas, con la eliminación del glicerol entre ellas, aumentando el rendimiento al 95 %. El tiempo de reacción promedio suele ser entre 20 minutos y una hora (Barriga, 2007). La Figura 7 presenta un reactor Discontinuo de la empresa SoloStock. Que contiene un reactor capaz, de producir biocombustibles en proceso Discontinuo. Procesa 1.000 litros por ciclo (hasta 2 ciclos diarios) (SoloStocks, 2000).



Figura 7 Micro reactor de biodiésel

Fuente: (SoloStocks, 2000)

2.7. Materias primas

En la producción de biodiésel se requieren insumos como: aceite vegetal, catalizador (hidróxido de sodio) y alcohol metílico. Estos últimos, elementos principales para la transesterificación.

2.7.1. Aceite vegetal usado (AVU)

Luego del proceso de fritura, el aceite contiene residuos sólidos de comida tan gruesos que pueden ser filtrados; como finos, separables por decantación. Para cada lote de aceite, es importante un filtrado inicial, una verificación de su contenido de agua y la determinación de su nivel de acidez, procesos que determinen cuán degradado está y cuánto catalizador se utilizara en la transesterificación. La Figura 8 presenta aceite vegetal usado siendo recolectado.



Figura 8 Aceite vegetal usado.

Fuente: (Hughes & Hosting Systems , 2000)

a. Calidad del aceite vegetal usado

La degradación de aceites y grasas durante el freído profundo es un problema complejo. Por lo que no existen parámetros normalizados definidos para que los Aceites Vegetales Usados (AVU). La historia térmica y oxidativa del AVU pueden afectar significativamente la calidad de los Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME por sus siglas en ingles), más conocidos como Biodiésel. Debido a que no ofrecen suficiente contenido de esteres (menos del 96.5 %), elevada viscosidad, baja estabilidad oxidativa, pobres características de combustión, deficientes propiedades a bajas temperaturas. La situación empeora al considerar el proceso de recolección, presentando inicialmente tres problemas: alta acidez, contenido de agua y material sólido en suspensión (Rosado Nascimento, 2006).

b. Tratamiento del aceite vegetal usado

El tratamiento inicial es la filtración gruesa, decantación y eliminación del agua residual. Que deben realizarse de preferencia en tanques de fondo cónico que faciliten las purgas y con el suficiente tiempo de separación. Es importante analizar cada lote para determinar su contenido de ácidos grasos libres y determinar el pre-tratamiento que requiere el aceite. Este análisis consiste en un proceso de volumetría acido-base (titulación), que determina el grado de acidez expresándolo en miligramos de hidróxido de sodio necesarios para neutralizar 1 gramo de aceite o grasa (Fernandez, 2009).

- Acidez mayor al 5 % (gr NaOH/gr aceite): limita su uso para procesos de esterificación ácida. Requiere: Tamizado, decantación, mezclado con lotes de menor acidez, neutralización, lavado, decantación, secado y filtrado.
- Acidez del 2 al 5 % (gr NaOH/gr aceite): Requiere.- tamizado, decantado, neutralización, decantado, lavado, secado y filtrado.

- Acidez menor al 2 % (gr NaOH/gr aceite): uso directo. Proseguir con: Tamizado, decantado, lavado, secado y filtrado (Roldan Vilorio & Toledano, 2013).

La neutralización previa, o formación de glicerina en el aceite vegetal reciclado, consume igual cantidad de catalizador que el necesario para la transesterificación, disuelto en agua destilada (20 ml). La mezcla debe ser agregada lentamente y con agitación constante al aceite reciclado. Su posterior eliminación se realiza por lavado, centrifugado o filtrado. Sin que esto entorpezca la posterior transesterificación.

La eliminación del agua, es necesaria para evitar bajas conversiones en la transesterificación y formación de emulsiones difíciles de separar. Se realiza combinando una acción mecánica (decantación) y una térmica (evaporación). El secado del AVU, se realiza por decantación. Con el suficiente tiempo, el agua se deposita en el fondo arrastrando barros e impurezas. Sin embargo es necesario complementarla con la eliminación térmica del agua, con o sin vacío a la temperatura de ebullición del agua (60 o 70 °C) por un tiempo mínimo de 20 minutos. El agua que no se evapora se extrae desde el fondo del tanque. El valor máximo de humedad admitida para ser procesado en biodiésel debe ser inferior a 0.1 % de volumen del aceite. El filtrado del aceite vegetal usado con una malla máxima de 5 micrones, es el proceso final del tratamiento previo a realizar la transesterificación. Que garantizan la calidad del Biodiésel (Barriga, 2007).

c. Recolección del aceite reciclado

La producción de biodiésel proveniente de aceite usado presenta gran viabilidad debido a que restaurantes, frecuentemente tiene inconvenientes en la gestión de desperdicios. Por lo que venden sus residuos a precios mínimos y en general es un mercado no muy explotado. Generalmente la recolección de aceite se realiza en barriles o tanques pequeños fabricados en polietileno de alta densidad, luego de coordinar el manejo de estos desechos con las personas que los manipulan.

El proceso de transesterificación requiere la mejor calidad posible de materia prima, por lo que es importante establecer un manual de procedimientos de recolección, que mejoren las cualidades de los aceites recolectados. Enfocados en la reducción de desechos sólidos mediante la filtración de los aceites previo su almacenamiento. Disminución de su contenido de agua al mantener herméticamente cerrados los recipientes de recolección (Barriga, 2007). Y la depreciación de ácidos grasos libres mediante el cambio frecuente del aceite que emplean, otros procedimientos para el manejo del aceite vegetal usado en su etapa de acopio se establecen en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

2.7.2. Catalizadores

En la producción de biodiésel, derivado de aceites vegetales se realiza al añadirle a este, metanol y un catalizador alcalino. Sin embargo en ocasiones algunos aceites vegetales y/o grasas animales, poseen gran cantidad de ácidos grasos que no se pueden convertir en biodiésel sin hacer una transesterificación en dos etapas: inicialmente es necesario un pretratamiento para convertir los ácidos grasos libres (FFA, del inglés Free Fatty Acid) en ésteres metílicos y en un segundo proceso para completar la reacción (Harold, Jiménez, & Charita, 2007).

a. Tipo de catalizador y concentración

Los catalizadores empleados en la transesterificación se clasifican en alcalinos, ácidos, enzimáticos o catalizadores heterogéneos, siendo los básicos y los hidróxidos los más utilizados. En procesos de metanólisis alcalina, los principales catalizadores son: el hidróxido de potásico (KOH) y el hidróxido sódico (NaOH, sosa cáustica), en concentraciones de 0.4 a 2 % del volumen con relación al volumen de aceite. La Figura 9 (a) y (b) representan físicamente al hidróxido de Potasio e hidróxido de Sodio respectivamente.

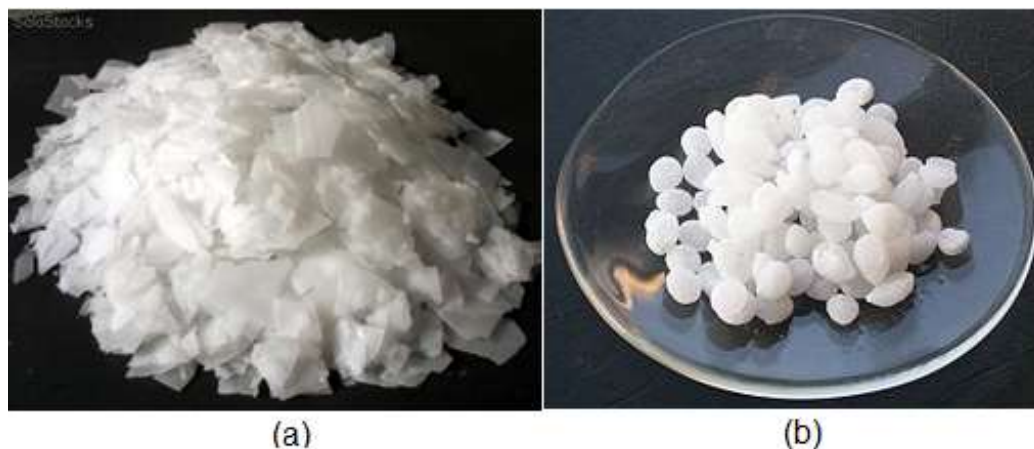


Figura 9 (a) Hidróxido de potasio, (b) Hidróxido de sodio

Fuente: (SoloStocks, 2000)

El aceite vegetal usado requiere mayor cantidad de catalizador (Hidróxido de sodio), no para catalizar la reacción sino para neutralizar los ácidos grasos libres formados al ser recalentado en su uso habitual. Cuanto más caliente y más tiempo se recaliente un aceite vegetal, más ácidos libres genera (Harold, Jiménez, & Charita, 2007).

Es importante valorar el aceite y determinar la cantidad de ácidos libres que contiene proceso que se realiza usando una titulación ácido base y a partir de este dato calcular el exceso de catalizador necesario. La valoración mide el nivel ácido-base (pH) del aceite (un valor de pH 7, es neutro, menos de siete es ácido y mayor a siete es alcalino).

Al exceder la cantidad de catalizador se forma un exceso de glicerina, provocando que el biodiésel quede muy alcalino, se dificulta su lavado y se pierde producción. Si la cantidad de catalizador es insuficiente una parte del aceite no llega a reaccionar.

Es importante mencionar que en la producción de biodiésel no se debe mezclar los distintos catalizadores en un mismo lote, ya que el hacerlo degrada la reacción y perjudica la producción de biodiésel.

b. Valoración del AVU con catalizador alcalino

En la valoración del aceite usado es posible usar un medidor de pH electrónico, o fenolftaleína siguiendo el procedimiento que recomienda (Agudelo, Peña, & Mejía, 2001):

- Disolver 5 gramos de hidróxido de sodio (NaOH) en 500 ml de agua destilada (solución madre), Agregar 5 ml de solución madre a 45 ml de agua destilada para conseguir una solución al 0.1 % masa/volumen (Agudelo, Peña, & Mejía, 2001).
- En un vaso de medición pequeño, disolver 4 ml de aceite usado seco en 40 ml de metanol.
- Agitar el contenido del vaso hasta que el aceite se disuelva en el alcohol y la mezcla se aclare. Añadir dos gotas de solución a la mezcla.
- Con el uso de una jeringa graduada añadir la solución de NaOH 0.1 % gota a gota en la solución de aceite-alcohol, agitando permanentemente hasta que su nivel de pH llegue a 8.5.
- Registrar el número de mililitros de solución al 0.1 % que se ha añadido a la mezcla y dividirlo entre cuatro. El resultado es el número de gramos de catalizador que hacen falta por litro de aceite a procesar.

c. Almacenamiento y manipulación del catalizador

El catalizador es higroscópico, por lo que es preciso mantenerlo herméticamente sellados, para evitar que absorba humedad del aire y su degradación. La manipulación de cantidades considerables de catalizador mejora al distribuirlo en porciones pequeñas y en embaces de polietileno de alta densidad (HDPE), de boca ancha, con tapa de cierre hermético.

El incorrecto almacenamiento produce la absorción de dióxido de carbono del aire, carbonatando el catalizador, provocando que su apariencia cambie de casi translúcida a blanca. Si la carbonatación no es excesiva el catalizador aún es útil sin embargo requiere un 25 % de exceso (Huegas, 2010). El uso de artículos de protección personal es indispensable para la manipulación de productos químicos tan corrosivos. El catalizador reacciona con el aluminio, el estaño y Zinc. Para la producción de metóxido es preciso emplear recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE), vidrio, acero inoxidable, o esmaltados. La fenolftaleína, necesaria para la titulación del aceite vegetal usado, dura un año. Es sensible a la luz, por lo que su almacenaje debe hacerse en un lugar oscuro y fresco, otros parámetros de seguridad que deben tomarse en cuenta en la manipulación de hidróxido de sodio se describen en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

2.7.3. Alcohol metílico

En la reacción de transesterificación, los mejores resultados lo genera el metanol con una pureza del 99 %. Durante la reacción se forma una emulsión que desaparece formando dos fases líquidas. Donde por cada litro de aceite puro a procesar es necesario 0,166 litros de metanol (Michelena & Martín, 2008). La Figura 10, muestra la presentación comercial del metanol.



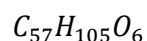
Figura 10 Metanol, presentación comercial

Fuente: (Tekniska, 2009)

a. Relación molar de metanol contra aceite vegetal

La relación molar del alcohol y los triglicéridos influye significativamente en el proceso de transesterificación. La relación estequiométrica requiere seis moles de alcohol y un mol de triglicérido para producir tres moles de ésteres y un mol de glicerol (García P. L., 2009).

El metanol no se disuelve con los triglicéridos a temperatura ambiente y la mezcla debe ser agitada mecánicamente para facilitar la transferencia de masa. Durante la reacción generalmente se forma una emulsión, que desciende rápidamente formándose una capa rica en glicerol (glicerina) quedando en la parte superior otra zona rica en éster metílico (biodiésel). La emulsión está causada en parte por la formación de monoglicéridos y diglicéridos intermedios, que contienen tanto glicerina como biodiésel. En el cálculo del peso molecular del aceite vegetal es posible asumir que los ácidos grasos que componen el triglicérido son: ácido esteárico, ácido palmítico y ácido oleico. Además de la molécula de glicerol esterificado. La Ecuación 2 presenta la estructura de un Triglicérido.

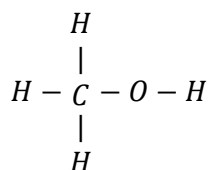


Ecuación 2 Ecuación química de un triglicérido

El análisis estequiométrico de este triglicérido que se realiza a continuación, concluye entonces que por cada mol de triglicérido existe 885,51 gramos de ese mismo triglicérido.

$$\begin{array}{r}
 \text{C: } 57 * 12,01 \text{ g/mol} = 684,57 \text{ g/mol} \\
 \text{O: } 6 * 15,99 \text{ g/mol} = 95,94 \text{ g/mol} \\
 \text{H: } 105 * 1,00 \text{ g/mol} = 105,00 \text{ g/mol} \\
 \hline
 885,51 \text{ g/mol}
 \end{array}$$

La Ecuación 3 representa la estructura molecular del Metanol, mientras que su análisis estequiométrico concluye que cada mol de metanol expresa 32 gramos de metanol.



Ecuación 3 Estructura molecular del metanol

$$\begin{array}{r}
 \text{C: } 1 * 12,01 \text{ g/mol} = 12,01 \text{ g/mol} \\
 \text{O: } 1 * 15,99 \text{ g/mol} = 15,99 \text{ g/mol} \\
 \text{H: } 4 * 1,00 \text{ g/mol} = 4,0 \text{ g/mol} \\
 \hline
 32 \text{ g/mol}
 \end{array}$$

Posteriormente y con la relación molar entre el metanol y triglicérido descrita al inicio de este apartado, se la describe a continuación en gramos y luego mililitros de metanol contra aceite respectivamente, por medio de una regla de tres simple. Para lo cual es preciso recordar la densidad del aceite vegetal con 0,9 gr/ml., y la densidad del metanol con 0,7915 gr/ml. Por lo tanto, 6 moles de metanol son a 1 mol de aceite; como 192 gr metanol son a 885,51 gr aceite; Y que a la vez 242,57 ml metanol reaccionan con 983,90 ml aceite. (García G. G., 2008).

b. Almacenamiento de metanol

El metanol debe ser almacenado en lugares apartados, secos y oscuros, con una adecuada contención de derrames y una conexión a tierra del recipiente de almacenamiento. Otros parámetros de seguridad en la manipulación de este alcohol se describen en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

c. Preparación de metóxido

Estimada la cantidad de metanol necesario para disolver el catalizador y efectuar la reacción de transesterificación. Esta debe transferirse ágilmente a un recipiente inoxidable, evitando que el metanol absorba humedad del aire. Al añadir el catalizador al metanol es preciso mantenerlo sellado y agitar su contenido formando remolinos. Esta acción permite disolver el catalizador en el metanol formando metóxido de sodio, en una reacción exotérmica muy agresiva (Michelena & Martín, 2008).

2.8. Protocolo de elaboración de biodiésel

Este apartado describe los equipos y procesos indispensables en una planta de producción de biodiésel, a partir de Aceite Vegetal Usado (AVU).

2.8.1. Tratamiento previo de aceites usados

Los aceites provenientes de la recolección locales de comida rápida deben ser tratados previamente a su procesamiento de manera que su calidad sea homogénea, de acuerdo a lo descrito en el apartado 2.7.1.b.

2.8.2. Condiciones de la reacción

- El reactor para la conversión de aceite a biodiésel (éster metílico de ácidos grasos) en un proceso discontinuo (batch) debe asegurar la estanqueidad y control de temperatura.
- Elaborado en materiales de hierro revestido, o acero inoxidable.

- Debe asegurarse la composición continua de los reactivos por medio de: agitadores, bombas de recirculación, agitadores estáticos o combinaciones entre ellos.
- Las temperaturas y tiempos de reacción serán determinados por pruebas de campo en los equipos e informados en el “Manual de operaciones” descrito como **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**
- La reacción deberá realizarse en dos etapas de esterificación, con el agregado de aproximadamente el 75 % de metóxido en la primera, seguida de la extracción de la fase de glicerina y completada en la segunda etapa con el 25 % restante.
- El exceso de metanol a utilizar (adicional al del teórico estequiométrico) no puede ser superior a aproximadamente el 80 %.
- El final de la reacción será verificada por la prueba cualitativa para determinar reacciones incompletas, basada en la solubilidad total del biodiésel y la insolubilidad de la glicerina en metanol.
- El funcionamiento del reactor y el proceso, se verifican con la eficiencia en la conversión, medida por la determinación volumétrica de glicerina libre y total.
- Los productos fuera de las especificaciones deben ser reprocesados.
- El lavado con agua en varias etapas, será posible solo si los líquidos de lavado son tratados posteriormente para su vertido en áreas o sistemas públicos.
- El agua de lavado no deberá contener sales que contaminen el producto y en un volumen aproximado de un tercio del volumen del aceite procesado.

CAPÍTULO III

ESTUDIO, DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

3.1. Estudio del volumen de aceite reciclado en la localidad

El siguiente capítulo se enfoca en la identificación y cuantificación de los volúmenes de aceite vegetal que son consumidos en locales de comida rápida y otros establecimientos de la ciudad de Latacunga; y su potencialidad de ser usados como materia prima en la producción de Biodiésel, por lo que se propone además el diseño de un micro reactor de biodiésel a partir de aceite vegetal usado.

3.1.1. Hipótesis

Hipótesis nula (H_0): A partir de los volúmenes de aceite vegetal de residuo (AVU), no se puede obtener biodiésel suficiente para emplearse en procesos industriales como cámaras de secado de pintura.

Hipótesis alternativa (H_1): A partir de los volúmenes de aceite vegetal obtenidos como residuo en procesos de cocción, se puede obtener biodiésel suficiente, para emplearlo en procesos industriales como cámaras de secado.

3.1.2. Identificación de variables en la hipótesis

La variable dependiente en esta investigación es la viabilidad de la producción de biodiésel en la ciudad de Latacunga a partir de los residuos de aceite vegetal de la cocción de comida rápida.

Por su parte la variable independiente es definida como el volumen de aceite vegetal residual en la cocción de comida rápida en la ciudad de Latacunga. Finalmente la unidad de observación que permite demostrar la hipótesis es la ejecución del proceso de transesterificación del aceite vegetal en biodiésel.

La Tabla 13 muestra la demarcación de las variables dependientes e independientes identificando su conceptualización, categorías, indicadores así como las técnicas e instrumentos empleados en la demostración de la hipótesis.

Tabla 13
Demarcación de las variables dependiente e independiente.

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORIAS	INDICADORES	TÉCNICAS INSTRUMENTOS
VARIABLE DEPENDIENTE			
Es la administración de este elemento, para informar y persuadir a los administradores de locales de comida rápida	Aceite Vegetal Usado	Volumen de AVU producido	TÉCNICA: Encuesta INSTRUMENTO: Cuestionario estructurado que se aplicará a gerentes comerciales.
	Calidad	Porcentaje de ácidos grasos	TÉCNICA: menor al 1 % INSTRUMENTO: Titulación ácido- base
VARIABLE INDEPENDIENTE			
Factores que influyen en la elaboración de biodiésel.	Materias Primas	Volumen de materia prima disponibles	TÉCNICA: Encuesta INSTRUMENTO: Cuestionario estructurado que se aplicará a gerentes comerciales.
	Insumos Químicos	Insumos químicos necesarios	TÉCNICA: Encuesta INSTRUMENTO: Cuestionario estructurado para los agentes de control de sustancias.
	Equipos	Disponibilidad de los equipos	TÉCNICA: Encuesta INSTRUMENTO: Cuestionario.

3.1.3. Diseño metodológico

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en el presente trabajo, se precisa una investigación cuantitativa aplicada, ya que se fundamenta en métodos y modelos ya establecidos, aplicados con el propósito de realizar un análisis de las cantidades de aceite vegetal usado disponibles en la ciudad de Latacunga para ser utilizados en el procesamiento de biodiésel, en la que la validación de resultados la determina una comparación de los datos recopilados por la investigación y datos reportados en la literatura del INEC. Esta investigación se desarrolló en el periodo comprendido entre el 2014 y 2015 en la ciudad de Latacunga.

a. Métodos

El análisis de la disposición real del aceite vegetal producido como residuo de los locales de comidas rápidas en la ciudad de Latacunga; se establece mediante métodos que afirman la investigación. Mientras que la síntesis permite unificar los parámetros establecidos en la etapa de análisis y establece sus características e interrelaciones.

b. Modalidad básica de la investigación

Su carácter cualitativo se establece en la recolección de datos sin medición numérica, para afinar las preguntas de la investigación en el proceso de resultados. Enfocado en la recopilación de información acerca de la disposición del aceite vegetal residual de locales de comidas rápidas en la ciudad de Latacunga; y establecer el interés de los gerentes comerciales sobre el cuidado del medio ambiente.

En su función cuantitativa, la recolección de datos para probar el supuesto que posteriormente es conocido como hipótesis, se establece con su medición numérica y análisis estadístico. Estableciendo patrones de comportamiento y planteamiento de teorías. En este trabajo de investigación se aplican en:

- Determinar los volúmenes de aceite vegetal residual en locales de comida rápida en la ciudad de Latacunga.
- Inventario de los aceites vegetales residuales recolectados.

c. Tipo de investigación

Bibliográfico.- debido al marco teórico elaborado, que constituye una recopilación de información a partir de textos publicados, proyectos como información de la producción de biodiésel.

Descriptivo.- clasifica los modelos de comportamiento de los resultados, por su grado de importancia en la encuesta, al analizar a profundidad las respuestas.

Método Dialéctico.- que permite, a través de la comunicación y dialogo, intercambiar ideas con los actores de quienes viven una realidad.

Inductivo – deductivo.- en la ejecución de las encuestas a aplicarse.

d. La observación como técnica de investigación

Permite obtener los volúmenes de aceite vegetal residual producidos en locales de comida rápida. Es así como la observación documental admite la exploración y análisis a través de material bibliográfico para extraer información y cimentar el marco teórico como sustento de la investigación.

Por su parte la observación de campo, realizada directamente en los locales comerciales de la ciudad de Latacunga, permite observar el objeto de estudio sin dificultar el trabajo del personal que realiza sus actividades comerciales, por medio de la entrevista.

La entrevista estructurada permite recopilar información válida sobre los volúmenes del aceite vegetal residual producido en los locales de frituras en la ciudad de Latacunga. Mientras que la entrevista no estructurada recaba datos sobre el destino final actual del aceite vegetal residual.

e. Población

Como población se toman los locales comerciales involucrados en el expendio de comidas rápidas en la ciudad de Latacunga. Donde las muestras de aceite se recolectarán de forma directa y aleatoria. En la Tabla 14 se establece la cantidad de restaurantes y locales de comida rápida abalados por el ministerio de turismo y de ambiente en la ciudad de Latacunga, sintetizando

Tabla 14
Población abalada por los ministerios

Población	Número	Porcentaje (%)
Restaurantes	79	43
Locales de Comida rápida	103	57
TOTAL	182	100

Fuente: (VISITAECUADOR, 2000)

f. Muestra

La definición del tamaño adecuado de la muestra tiene como principal objetivo, establecer la factibilidad de la producción de biodiésel a partir de los residuos de la elaboración de comidas rápidas. El tamaño de la muestra conocido regularmente como el número de individuos a encuestar es definido por la Ecuación 4. (Landívar, 2001)

$$n = \frac{PQ \times N}{(N - 1)\left(\frac{E}{K}\right)^2 + PQ}$$

Ecuación 4 Tamaño de la muestra

Donde:

N: Número total de posibles encuestados. (182)

E: error muestral deseado, en tanto por uno. (0,1 % al 10 %)

P: proporción de individuos interesados en producir biodiésel. P=Q=0.5.

Q: proporción de individuos sin iteres en producir biodiésel, es 1-P.

K: constante dependiente de nivel de confianza, Tabla 15. (1,96)

Tabla 15
Valores de K y su nivel de confianza.

Valor de k	1,15	1,28	1,44	1,65	1,96	2,24	2,58
Nivel de confianza	75 %	80 %	85 %	90 %	95 %	97,5 %	99 %

Fuente: (Landívar, 2001)

$$n = \frac{0,25 \times 182}{(182 - 1)\left(\frac{0,08}{1,96}\right)^2 + 0,25} = 82,5 \cong 83$$

g. Recolección de datos

Las entrevistas y las encuestas cuyas preguntas están diseñadas para establecer indicadores que permiten establecer la realidad del problema para posteriormente realizar un análisis cuantitativo.

h. Procesamiento de la información

Los datos recopilados se transforman mediante una revisión crítica de la información recogida; que comprende, la limpieza de información defectuosa: contradictoria, incompleta, o no pertinente. En tanto que la repetición de la información en la recolección de datos, permite corregir fallas de contestación.

Por su parte la tabulación de datos según las variables de la hipótesis en cuadros de cruce de variables, facilita la comprensión de los datos recopilados. Finalmente el estudio estadístico de los datos permite la presentación de resultados de la investigación.

i. Análisis e interpretación de resultados

En el análisis e interpretación de los resultados es preciso analizar los resultados estadísticos, destacando tendencias fundamentales de acuerdo con los objetivos e hipótesis. Posteriormente la interpretación de los resultados, se apoya en el marco teórico de la investigación que permiten comprobar la hipótesis planteada y establecer conclusiones y recomendaciones.

3.1.4. Enfoque

El enfoque de la investigación se ubica en el paradigma crítico – propositivo, guiando el enfoque de investigación desde los ámbitos cuantitativos. En su aspecto cuantitativo definido por el uso de la estadística descriptiva para presentar la información. Mientras que la interpretación de la información en base al marco teórico define su carácter cualitativo.

3.1.5. Operación de variables

Luego de haber identificado las variables que delimitan la hipótesis de esta investigación, es importante su posterior procesamiento según los parámetros que la definen. En la Tabla 16 se presenta la operación de las variables dependientes e independientes.

Tabla 16
Operación de variables dependiente e independiente.

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems Básicos	Técnicas e Instrumentos
Variable dependiente				
Los insumos (productos químicos y el aceite vegetal reciclado) para elaborar biodiésel	Volumen de AVU	- Volumen de AVU producido semanalmente	- ¿Los volúmenes recopilados son los esperados?	Análisis de encuestas
	Recursos empleados	- Insumos químicos necesarios	- ¿Los químicos son de fácil adquisición?	
Variable independiente				
Transformación de entradas (insumos), en salidas (Biodiésel) por medio del uso de recursos, físicos, tecnológicos y humanos.	Entradas	- Materias primas - Insumos	- ¿Cantidad de AVU necesario? - ¿Cantidad de insumos necesario?	Encuesta
	Transformación	- Proceso de transesterificación	¿El proceso empleado es el adecuado?	Encuesta
	Salidas	- Biodiésel Producido - Uso del biodiésel	¿El biodiésel suple las necesidades caloríficas?	Encuesta

3.1.6. Encuesta

Radica en la recopilación de información sobre la muestra, elaborada en función de los objetivos de la investigación. Aplicando un conjunto de preguntas generadas cuidadosamente sobre aspectos de interés. La encuesta se encuentra dirigida a los gerentes y administradores de restaurantes y locales de expendio de comida rápida en la ciudad de Latacunga. Con objeto de recabar el criterio de la población respecto al uso posterior del aceite residual del proceso de fritura. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la encuesta realizada en la investigación de campo.

a. Recolección de información

La recopilación de la información contempla estrategias metodológicas requeridas para determinar el volumen de aceite vegetal usado en restaurantes y locales de comida rápida en la ciudad de Latacunga. Por lo que es conveniente contestar a las preguntas planteadas en la Tabla 17:

Tabla 17
Preguntas básicas para la recolección de información.

PREGUNTAS BÁSICAS	EXPLICACIÓN
¿Para qué?	Establecer la cantidad volumétrica de aceite vegetal de residuo en restaurantes y locales de comida rápida
¿De qué personas u objetos?	Administradores de restaurantes de comida rápida.
¿Sobre qué aspectos?	Volumen de desecho, Gestión de residuos
¿Quién? ¿Quiénes?	El autor de la investigación
¿Cuándo?	28 de agosto del 2015
¿Dónde?	Ciudad de Latacunga
¿Cuántas veces?	Prueba piloto y definitiva
¿Qué técnicas de recopilación?	Encuestas, Análisis
¿Con que?	Cuestionario
¿En qué situación?	En horarios normales de trabajo

b. Procesamiento de información

En el procesamiento de la información es indispensable realizar una revisión de la información para eliminar datos defectuosos, contradictorios, incompletos o no pertinentes. En ocasiones la repetición de la recolección corrige fallas de contestación. Mientras que el manejo de la información se realiza con el reajuste de cuadros o casillas con datos reducidos cuantitativamente, que no influyen significativamente en el análisis. Permitiendo al estudio estadístico presentar los resultados de forma clara.

3.1.7. Análisis e interpretación de resultados

El principal objetivo es evaluar la cantidad del volumen de aceite vegetal producido como desecho en restaurantes y locales de comida rápida en la ciudad de Latacunga, que corroboren la posible producción de biodiésel.

Pregunta N°1.- Diría usted que la disposición adecuada de los residuos de aceite vegetal usado es (los resultados se presentan en la Tabla 18)

Tabla 18
Disposición de residuos.

Concepto	Número de encuestados	%
Elimina por drenaje o basurales	6	7,14
Entrega a recicladores	48	57,14
Comercialización	12	14,29
Alimentación animal y/o compostaje	18	21,43
TOTAL	84	100

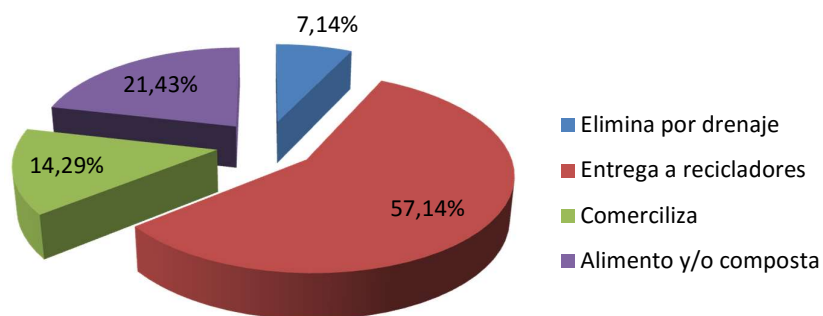


Figura 11 Disposición de aceite vegetal usado.

Análisis e interpretación

El 7,14 % de los encuestados afirman que prefieren eliminar sus residuos de aceite por el drenaje o basurales, debido a que su volumen es bajo, mientras que un 57,14 % asevera que la eliminación la realiza por entrega a gestores de reciclaje. Un 14,29 % asegura que los residuos que produce los vende a empresas de acopio, finalmente un 21,43 % alega que prefiere usar sus residuos de aceite vegetal como alimento de animales de granja (porcinos) o a su vez usarlo como composta en la elaboración de fertilizante. Por lo que es evidente que existe un alto porcentaje de encuestados que se identifican con el cuidado ambiental.

Pregunta N°2.- La producción diaria de Aceite Vegetal en su actividad comercial es: (Sus resultados se aprecian en la Tabla 19)

Tabla 19
Producción diaria de aceite vegetal usado.

Concepto	Número de encuestados	%
Menos de 5 L /día	42	50
Entre 5 y 15 L /día	30	35,71
Más de 15 L /día	12	14,29
TOTAL	84	100

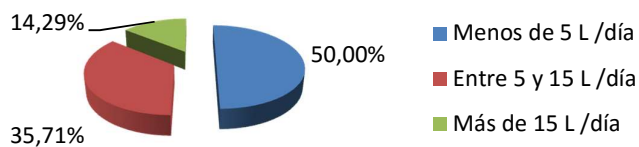


Figura 12 Producción diaria de aceite vegetal.

Análisis e interpretación

El 50 % de los encuestados afirma que su consumo de aceite vegetal por día es de 2 litros en promedio. Mientras que el 35,71 % asegura que su consumo de aceite vegetal por día es 10 litros en promedio. Finalmente un 14,29 % asevera que su consumo de aceite vegetal es de 20 litros en promedio al día. Es preciso aclarar que los mayores volúmenes de aceite vegetal lo consumen los locales de comida rápida reconocidos a nivel nacional que representan el menor porcentaje de encuestados.

Pregunta N°3.- ¿El almacenar con seguridad el aceite vegetal residual representa para usted? (La Tabla 20 presenta los resultados de la pregunta)

Tabla 20
Criterio sobre el almacenamiento de aceite.

Concepto	Número de encuestados	%
Inconveniente	54	64,29
Beneficio	30	35,71
TOTAL	84	100

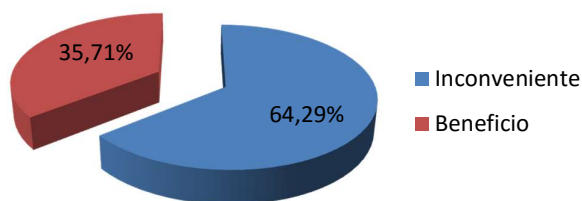


Figura 13 Almacenamiento de aceite vegetal usado.

Análisis e interpretación

El 64,29 % de encuestados asegura el acopio de aceite vegetal que le queda como residuo le representa un inconveniente debido a factores como el espacio físico que ocupa o por su disposición final. Mientras que el 35,71 % asegura que el acopio de aceite vegetal no le representa problemas de espacio físico y por el contrario, puede sacar algún tipo de rédito económico a largo plazo al venderlo a gestores de reciclaje.

Pregunta N°4.- ¿Conoce usted qué el aceite vegetal residual de la cocción de alimentos, puede ser la materia prima para la producción de biodiésel que se podría utilizar como combustible? (los resultados a la pregunta se detallan en la Tabla 21)

Tabla 21
Aceite vegetal usado como materia prima.

Concepto	Cantidad	%
Si Conoce	30	35,71
No Conoce	54	64,29
TOTAL	84	100

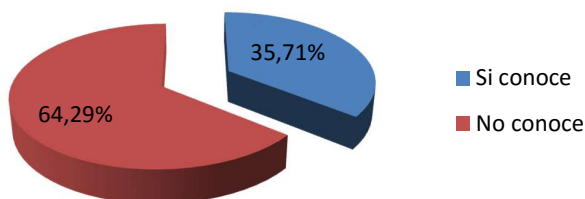


Figura 14 Biodiésel a partir de aceite vegetal usado.

Análisis e interpretación

El 37,71 % de los encuestados mencionan que no conoce sobre el tema pero presta un gran interés al conocer que se puede obtener biodiésel a partir de sus residuos. Mientras que el 64,29 % manifiesta que si conoce y apoyaría la propuesta sobre un programa de recolección de aceite vegetal usado y su transformación en biodiésel.

Pregunta N°5.- ¿Del aceite que usted usa diariamente, que cantidad genera como residuo? (La Tabla 22 presenta los resultados de las preguntas) Especifique: _____

Tabla 22
Cantidad de aceite vegetal residual.

Concepto	Número de encuestados	%
Menos de 1 L /día	42	50
Entre 1 y 3 L /día	24	28,57
Más de 3 L /día	18	21,43
TOTAL	84	100

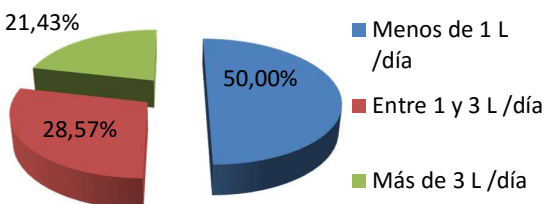


Figura 15 Proyección de la cantidad de aceite usado producido

Análisis e interpretación

El 50 % de los encuestados afirma que la cantidad de aceite vegetal usado por día es de 0,5 litros en promedio que corresponde en su mayor parte a expresiones de los gerentes de restaurantes. Mientras que el 28,57 % asegura que en promedio produce 2 litros aceite vegetal usado. Finalmente un 21,43 % asevera que su producción de aceite vegetal usado es de 5 litros por día como media, según lo expresado por los gerentes de cadenas de restaurantes.

Pregunta N°6.- ¿Cuál es el destino que usted generalmente le da a su aceite residual? (Los resultados se presentan en la Tabla 23)

Tabla 23
Destino de los residuos de aceite vegetal.

Concepto	Número de encuestados	%
Alimento animal y/o Composta	6	7,14
Venta a Recicladores	48	57,14
Eliminación	30	35,71
TOTAL	84	100

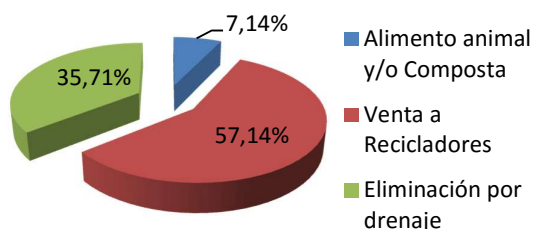


Figura 16 Destino de los residuos de aceite vegetal.

Análisis e interpretación

El 7,14 % de los encuestados afirma que la cantidad de aceite vegetal que desecha lo destina finalmente a compostaje. Mientras que el 57,14 % asegura que la cantidad de aceite vegetal que desecha prefiere venderlo a gestores ambientales. Finalmente un 35,71 % asevera que sus residuos de aceite vegetal los elimina en conjunto con desechos sólidos.

Pregunta N°7.- ¿En el caso de comercializar sus residuos de aceite vegetal, un precio razonable que le daría sería? (la Tabla 24 muestra los resultados de la pregunta)

Tabla 24
Precios propuestos a los residuos de aceite vegetal

Concepto	Número de encuestados	%
De menos de 2 dólares por galón	54	64,29
De entre 2 y 5 dólares por galón	24	28,57
Mayor a 5 dólares por galón	6	7,14
TOTAL	84	100

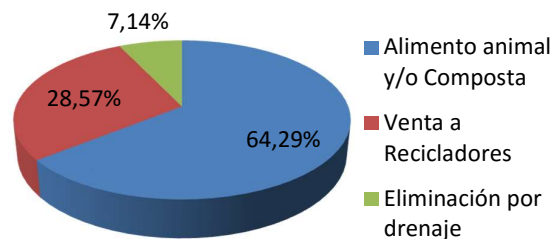


Figura 17 Costos a los residuos de aceite vegetal.

Análisis e interpretación

El 64,29 % de los encuestados afirma que el precio que propondría estaría entre menos de 2 dólares el galón. Mientras que el 28,57 % asegura que un precio razonable para sus desechos estaría en el rango de entre 2 y 5 dólares el galón. Finalmente un 7,14 % asegura que un precio correcto para sus desechos esta sobre los 5 dólares por galón de aceite.

a. Análisis general de la encuesta

En base a la encuesta realizada se puede evidenciar que el 7,14 % de encuestados desconoce procedimientos adecuados de la disposición del aceite vegetal usado y un 64,29 % desconoce la posibilidad de usar sus desechos de aceite en la producción de biodiésel, sin embargo apoyaría la iniciativa de reciclaje y reconoce los beneficios al medioambiente.

Del total de encuestados, los volúmenes más conservadores de producción de residuos de aceite vegetal los generan los locales de comida rápida de pequeños restaurantes, con una producción estable en todo el año a un promedio de 0,5 litros por día; que corresponde a 10 litros de aceite por mes, resultando en un total de 840 litros de aceite residual. De todo el aceite vegetal, producto del residuo en la cocción de alimentos, si solo el 35,71 % de encuestados que afirma conocer que se puede usar sus residuos en la elaboración de biodiésel y confirma su apoyo a iniciativas de reciclaje podemos deducir que aproximadamente 300 litros al mes de aceite vegetal residual dejarían de contaminar los rellenos sanitarios o las fuentes hídricas al convertirse en biodiésel.

Es preciso acotar además, que los réditos económicos a los comerciantes que en lugar de desechar sus residuos de aceite vegetal los re-direccionen a la producción de biodiésel podrían estar alrededor de los 150 dólares mensuales, dado que al realizar la investigación un precio razonable de estos desechos es de alrededor de 2 dólares por galón, en el caso de organizar una empresa de recolección dedicada a la compra de estos residuos y su posterior transformación en biodiésel.

3.2. Parámetros de diseño y selección

El estudio de volumen de aceite vegetal reciclado es el preámbulo para la construcción de un micro reactor de biodiésel a partir de los residuos de la fritura de alimentos en locales de comida rápida, el mismo que responde a parámetros de diseño acordes a las características de la materia prima, los volúmenes y el carácter demostrativo de este trabajo de investigación:

- Tipo de reactor.- Debido a la producción de biodiésel por lotes, alto contenido de agua e impurezas en suspensión que generalmente llevan los aceites luego de usarlos en la fritura de alimentos, la selección de un reactor discontinuo presenta las mayores ventajas sobre un diseño de tipo continuo el cual requiere niveles de acidez constantes del aceite y su aplicación es más adecuada en la producción a gran escala de biodiésel, técnica que no es acorde a los objetivos primarios de este trabajo de investigación, que es el resolver un problema de contaminación ambiental sin perjuicio de la seguridad alimentaria.
- Volumen de aceite a procesar.- De acuerdo al estudio realizado al inicio de este capítulo, las cantidades más conservadoras de los residuos de aceite vegetal están en el orden de 300 litros al mes, por lo que un micro reactor que permita procesar 20 litros de aceite por lote confirmaría la producción viable de biodiésel provenientes de los desperdicios recolectados en restaurantes y locales de comida rápida en la ciudad de Latacunga

- Tipo de catalizador.- Según la legislación actual sobre la adquisición y transporte de sustancias sujetas a fiscalización por el consejo nacional de control se sustancias estupefacientes y psicotrópicas, es inviable la obtención de Hidróxido de Sodio concentrado, que garanticen resultados óptimos en la producción de biodiésel se opta por utilizar un desinfectante de fácil adquisición como lo es la lejía de sosa comúnmente llamada sello rojo.

3.3. Diseño mecánico

En esta sección se describen los detalles para la fabricación de los tanques contenedores requeridos en el procesamiento de biodiésel en proceso discontinuo, así como los parámetros de selección de los materiales en los que son elaborados. El sistema de procesamiento de biodiésel tipo batch, planteado cuenta con dos etapas, de reacción y de purificación.

Los contenedores de insumos químicos y aceite vegetal usado deber ser fabricados en polietileno de alta densidad (HDPE), de cierre hermético y entrada amplia que permita eliminar residuos sólidos. El tanque de almacenamiento de aceite vegetal usado posee las siglas (T - AVU). Mientras que el tanque de metanol (T – Metanol) debe mantenerse siempre en un lugar fresco y seco, bajo la sombra y alejado de cualquier lugar donde se puedan generar chispas.

En la etapa de reacción, el tanque en el que se mezclan el metanol y la lejía como reactivos se designa como (T1), mientras que el tanque en donde se realiza el proceso de transesterificación es designado (T2). Todo el proceso de producción está controlado desde un panel eléctrico (C1) de cierre hermético y entrada amplia que permita eliminar residuos sólidos. La Figura 18. Se presenta el esquema del micro reactor de biodiésel en proceso discontinuo.

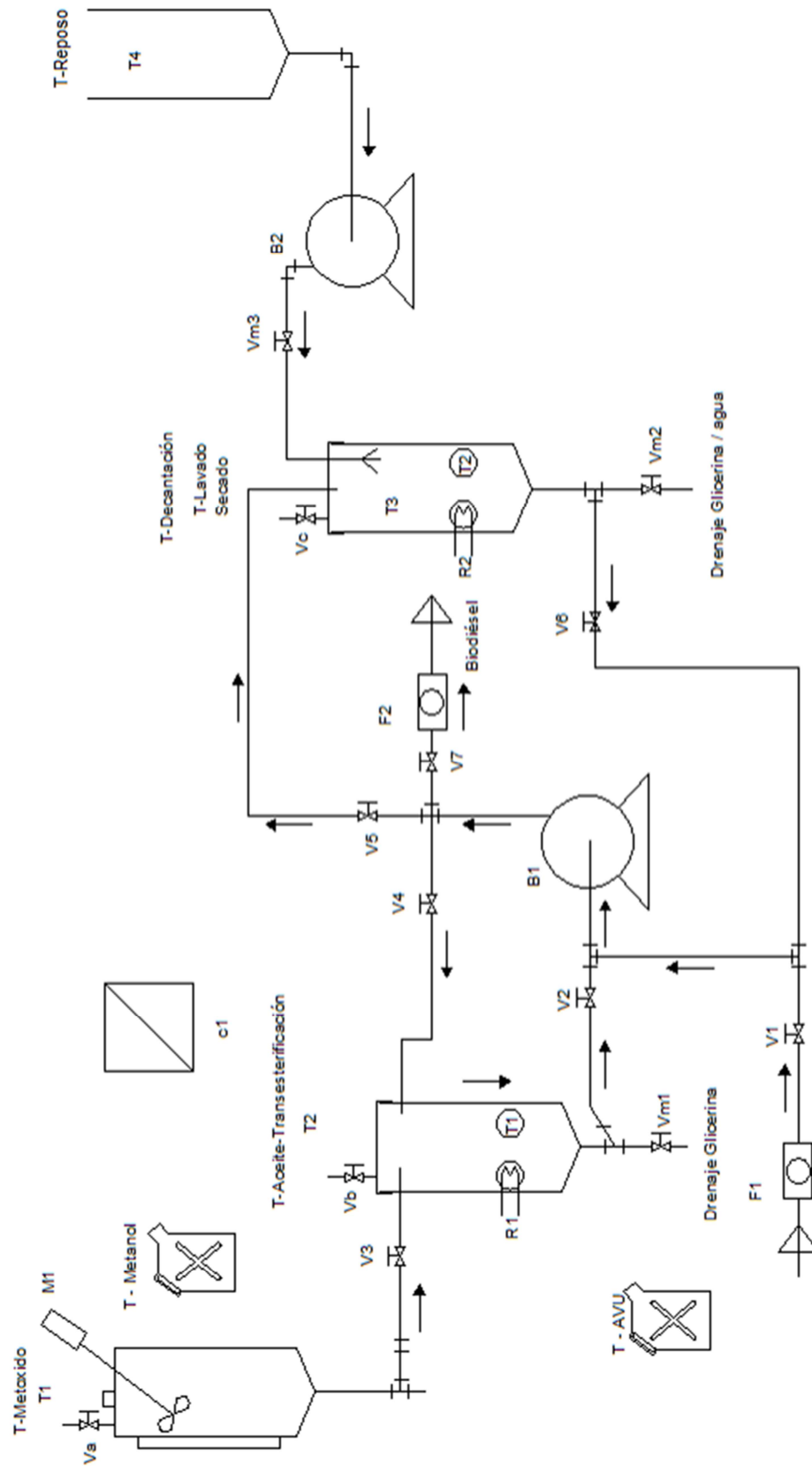


Figura 18 Esquema de micro reactor tipo batch.

3.3.1. Material de construcción de los tanques

El material en que se fabrican los tanques debe ser compatible con las sustancias que intervienen en la producción de Biodiésel en proceso catalítico, como son: el hidróxido de sodio (NaOH) y el metanol (CH₃OH). En la Tabla 25 se presenta un detalle de algunos materiales utilizados en la industria y su comportamiento a distintos químicos corrosivos de uso habitual en la manufactura. Es importante recalcar que dicho material debe poseer la tensión admisible (σ_a) suficiente para garantizar la integridad estructural del recipiente.

En el cálculo del espesor de la lámina metálica en la que son fabricados los depósitos, la tensión máxima admisible del material (σ_t) es determinante. Y su valor cuantitativo es el resultado de dividir la tensión admisible de la plancha por el coeficiente de seguridad recomendado (Budynas & Nisbett, 2008), como lo indica la Ecuación 5.

$$\sigma_t = \frac{\sigma_a}{n}$$

Ecuación 5 Tensión máxima admisible

Donde:

n: Coeficiente de Seguridad, (1,5)


σ_a : Tensión admisible del Material

Las mejores características constructivas las presenta el acero inoxidable, además de poseer un límite elástico para el AISI 304 y 316 de 2600 kg/cm² (Budynas & Nisbett, 2008). Que al operarlo con un factor de seguridad de 1,5 que garantice su integridad estructural. Dichos valores proporcionan una tensión máxima admisible para la fabricación de tanques de:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_a}{n} = \frac{2600}{1,5} = 1733 \text{Kg/cm}^2$$

Tabla 25
Materiales y su compatibilidad con químicos.

Material	KOH	NaOH	Etanol	Metanol	Glicerina
Acero inoxidable 316	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Excelente
Acero inoxidable 304	Buena	Buena	Excelente	Excelente	Excelente
Acero al carbono	Efecto severo	Efecto severo	Buena	Excelente	Excelente
Hierro Forjado	Buena	Efecto severo	Buena	Excelente	Excelente
Latón	Efecto severo	Efecto severo	Excelente	Excelente	Buena
Aluminio	Efecto severo	Efecto severo	Buena	Excelente	Excelente
Bronce	Efecto severo	Efecto severo	Excelente	Excelente	Excelente
Cobre	Buena	Buena	Excelente	Buena	Excelente
Titanio	Efecto severo	Buena	Excelente	Buena	Excelente
Grafito	Regular	N/A	Excelente	Excelente	Excelente
Magneto cerámico	Excelente	N/A	N/A	Excelente	N/A
PVC	Buena	Excelente	Regular	Excelente	Excelente
CPVC	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Excelente
Polipropileno	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Polipropileno de baja densidad	Excelente	Efecto severo	Buena	Excelente	Excelente
Policarbonato	Efecto severo	Efecto severo	Buena	Buena	Excelente
Poliuretano	Efecto severo	Buena	Efecto severo	Efecto severo	Efecto severo
Caucho natural	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Nitrilo (Buna N)	Buena	Excelente	Regular	Excelente	Excelente
Teflón	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Neopreno	Buena	Buena	Excelente	Excelente	Excelente
Silicona	Regular	Excelente	Buena	Excelente	Excelente
PVDF	Excelente	Efecto severo	N/A	Excelente	Excelente
Epaxy	Excelente	Excelente	Excelente	Buena	Excelente
Nylon	Regular	Excelente	Excelente	Buena	Excelente
Vitan	Buena	Buena	Excelente	Regular	Excelente

Continua 

Material	Ácidos grasos	Aceite de soya	Ácido fosfórico	Ácido sulfúrico	Diésel 2
Acero inoxidable 316	Excelente	Excelente	Efecto severo	Efecto severo	Excelente
Acero inoxidable 304	Buena	Excelente	Efecto severo	Regular	Excelente
Acero al carbono	Regular	Buena	Efecto severo	Efecto severo	Excelente
Hierro Forjado	Regular	Excelente	Efecto severo	Efecto severo	Excelente
Latón	Regular	N/A	Efecto severo	N/A	Excelente
Aluminio	Excelente	Excelente	Regular	Efecto severo	Excelente
Bronce	Excelente	Excelente	Buena	Buena	Excelente
Cobre	Efecto severo	N/A	Efecto severo	Efecto severo	Excelente
Titanio	Buena	Excelente	Regular	Efecto severo	Buena
Grafito	Excelente	Excelente	Buena	Regular	Excelente
Magneto cerámico	N/A	N/A	Regular	Excelente	N/A
PVC	Excelente	Excelente	Buena	Efecto severo	Excelente
CPVC	Excelente	Excelente	Excelente	Regular	Excelente
Polipropileno	Excelente	Excelente	Excelente	Regular	Excelente
Polipropileno de baja densidad	Efecto severo	Excelente	Buena	Buena	Regular
Policarbonato	Buena	N/A	Excelente	Efecto severo	Excelente
Poliuretano	Buena	Buena	Efecto severo	Efecto severo	Regular
Caucho natural	Regular	Efecto severo	Buena	Efecto severo	Efecto severo
Nitrilo (Buna N)	Buena	Excelente	Efecto severo	Regular	Excelente
Teflón	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Neopreno	Regular	Regular	Buena	Efecto severo	Buena
Silicona	Regular	Excelente	Efecto severo	Efecto severo	Efecto severo
PVDF	Excelente	Excelente	Buena	Excelente	Excelente
Epaxy	Excelente	Excelente	Buena	Regular	Excelente
Nylon	Excelente	Excelente	Buena	Efecto severo	Excelente
Vitan	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

Fuente: (García G. G., 2008)

3.3.2. Tanque de metóxido

Considerando un volumen de metóxido equivalente a un quinto del volumen de aceite vegetal a procesar (20 L). Es decir un volumen de 4 L y un factor de corrección de 0.15, en relación con el volumen de la caída cónica de 32,8° (Zlokarnik, 2001), se tiene:

$$V_d = f_s * V_r$$

Ecuación 6 Diferencial de volumen

Donde:

f_s : factor de corrección (0,15)

V_r : Volumen real [L] (4 L)

V_d : Diferencial de Volumen [L]

$$V_d = 0,15 * 4 = 0,6 L$$

Se tiene entonces un volumen total de metóxido de:

$$V_{Tanque\ metóxido} = V_r + V_d + 70 \% * V_r$$

Ecuación 7 Volumen total de reactivo

Donde:

V_r : Volumen real [L] (4L)

V_d : Diferencial de Volumen [L] (0,6L)

$$V_{Tanque\ metóxido} = 4 + 0,6 + 70 \% * 4 = 7,4 L$$

Este volumen se encuentra distribuido entre la estructura cilíndrica y la base cónica del tanque, considerando dimensiones de diseño como:

Diámetro del tanque [mm]: 160 mm

Altura del tanque [mm]: 330 mm

El volumen contenido en la estructura cilíndrica del tanque se calcula mediante la Ecuación 8.

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \cdot h_1$$

Ecuación 8 Volúmen del cilindro

Donde:

$V_{cilindro}$: Volumen contenido en la estructura cilíndrica

D_1 : diámetro del tanque [mm] (160 mm)

h_1 : Altura del tanque [mm] (330 mm)

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \left(\frac{160}{2}\right)^2 \cdot 330 = 6,65 \times 10^6 \text{ mm}^3 \rightarrow 6,7 \text{ Litro}$$

Mientras que el perímetro de la base cilíndrica del tanque, que representa la longitud de la plancha de acero inoxidable con la que se fabrica. Se calcula con la Ecuación 9.

$$P_{cilindro} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_1}{2}$$

Ecuación 9 Perímetro del cuerpo cilindrico

Donde:

$P_{cilindro}$: Perímetro de la base cilíndrica

D_1 : diámetro del tanque [mm] (160 mm)

$$P_{cilindro} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{160}{2} = 503 \text{ mm}$$

El volumen contenido en la base cónica del tanque se calcula con la Ecuación 10.

$$V_{base\ cónica} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \cdot h$$

Ecuación 10 Volumen de la base conica

Donde:

D₁: Diámetro interno del tanque [mm] (160 mm)

h: Profundidad de la base cónica [mm] (47 mm)

$$V_{base\ cónica} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{160}{2}\right)^2 \cdot (47) = 0,315 \times 10^6\ mm^3 \rightarrow 0,32\ Litros$$

$$V_{total} = V_{cilindro} + V_{base\ cónica}$$

Ecuación 11 Volumen total contenido

Donde:

V_{cilindro}: Volumen del cilindro [L] (6,7L)

V_{base cónica}: Volumen de la base cónica [L] (0,3L)

$$V_{total} = 6,7 + 0,3 = 6,95\ L$$

La Figura 19 muestra el esquema del fondo del tanque y la base cónica del tanque de metóxido, donde el diámetro del cilindro se "D1", la profundidad de la base cónica es "h" y finalmente la longitud lateral de la base cónica representada por "h_i"

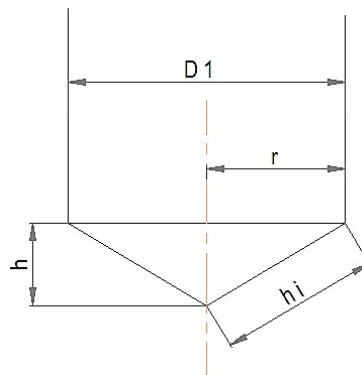


Figura 19 Dimensiones del tanque de metóxido.

La magnitud de "h_i", establece el radio de la plancha circular de acero inoxidable con la que se fabrica la base cónica. Es calculada mediante el teorema de Pitágoras, Ecuación 12.

$$h_i = \sqrt{\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 + h^2}$$

Ecuación 12 Radio de la plancha circular

Donde:

D₁: diámetro del cilindro [mm] (160 mm)

h: Profundidad de la base cónica [mm] (47 mm)

$$h_i = \sqrt{\left(\frac{160}{2}\right)^2 + (47)^2} = 93 \text{ mm}$$

$$D_2 = 2 \cdot h_i$$

Ecuación 13 Diametro de la plancha circular

Donde:

h_i: Radio de la placa circular de la base cónica [mm] (93 mm)

D₂: Diámetro de la plancha circular de la base cónica [mm] (186 mm)

$$D_2 = 2 \cdot 93 = 186 \text{ mm}$$

La Figura 20, muestra el corte que permite formar la base cónica. Donde el ángulo “β” es calculado mediante la Ecuación 14.

$$\beta = 360 - \frac{180 \cdot D_1}{h_i}$$

Ecuación 14 Ángulo de corte en la plancha

Donde:

D₁: Diámetro interior del tanque [mm] (160 mm)

h_i: Radio de la plancha circular de la base cónica [mm] (93 mm)

β: Ángulo del área a extraer del círculo que forma el cono [grados] (49°)

$$\beta = 360 - \frac{180 \cdot 160}{93} = 49^\circ$$

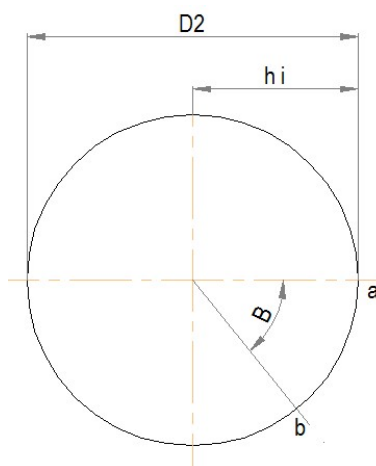


Figura 20 Placa de la base cónica del tanque de metóxido.

En la elaboración de la tapa del tanque de metóxido, es preciso reforzar su borde interior con un anillo de acero inoxidable de 158 mm de diámetro exterior, 20 mm de altura y 1,5 mm de espesor. Que permita su fijación hermética.

Perforaciones requeridas para el ingreso de insumos químicos o válvula de alivio no deben interferirse entre sí, o con los soportes del motor de agitación. La Tabla 26, presenta el resumen de las placas de acero inoxidable requeridas en la construcción del tanque, mientras en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.-3**, se presenta los planos de construcción definitivos del tanque de metóxido.

Tabla 26
Placas y accesorios del tanque de metóxido

Marca	Cantidad	Descripción	Material	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)
1	1	Lam 359x507x1,5	SA240-304	2,19	2,19
2	1	Lam 193x202x1,5	SA240-304	0,33	0,33
3	1	Lam Φ 223x4	SA240-304	1,22	1,22
4	4	Lam 50x50x4	SA240-304	0,07	0,29
5	8	Lam 47x50x3	SA240-304	0,03	0,27
6	4	Lam 70x70x1,5	SA240-304	0,06	0,23
7	4	Eje Φ 1/2"x26	AISI 304	0,02	0,08
8	4	Perno Φ 1/2"x2	AISI 304	0,05	0,21
9	8	Lam 25x30x3	SA 240-304	0,01	0,11
10	8	Eje Φ 1/4"x40	AISI 304	0,01	0,08
11	4	Tuerca Φ 1/2"	AISI 304	0,02	0,08
12	1	Lam 20x492x1,5	SA240-304	0,12	0,12
13	1	Tub Φ e1" sanitx10	AISI 304	0,01	0,01
14	1	Agitador Tq Metóxido		1,45	1,45

a. Cálculo de la presión de trabajo

El proceso de mezclar el metanol e hidróxido de sodio se realiza a presión atmosférica. Por lo que la presión de diseño del recipiente se determina con la Ecuación 15. (Budynas & Nisbett, 2008)

$$P > 1,2 \cdot P_{trab.}$$

Ecuación 15 Presión de diseño

Donde:

$P_{trab.}$: Presión de trabajo [atm] (1 atm)

P: Presión de Diseño [atm] (1,2 atm)

$$P > 1,2 \cdot (1 \text{ atm})$$

b. Cálculo del espesor del recipiente

El espesor del cuerpo y base cónica del tanque se calcula con las Ecuación 16 y Ecuación 17.

$$t_{cilindro} = \frac{\gamma \cdot d \cdot r}{\sigma_t \cdot E_s}$$

Ecuación 16 Espesor del cilindro

$$t_{cono} = \frac{\gamma \cdot d^2 \cdot \text{tga} \alpha}{4 \cdot \sigma_t \cdot E_s \cdot \cos \alpha}$$

Ecuación 17 Espesor del cuerpo cónico

Donde:

γ : Peso específico del producto almacenado [kg/m^3] (0,945 kg/m^3).

d: Nivel máximo de producto almacenado [cm] (33 cm).

r: radio del cilindro o cono [cm] (8 cm)

σ_t : Tensión máxima admisible del material [kg/m^2] ($1,733 \times 10^7 \text{ kg}/\text{m}^2$).

E_s : Eficiencia de soldadura. (0,95) (Mott, 2006)

α : Semiángulo de apertura del cono [grados] (30°).

El límite elástico del acero inoxidable AISI 304 y 316 es 2600 kg/cm^2 . Por un factor de seguridad de 1,5. Proporciona una tensión máxima admisible de:

$$\frac{2600 \text{ Kg/cm}^2}{1,5} = 1733 \text{ Kg/cm}^2$$

La densidad máxima del líquido a ser contenido en el recipiente es de $0,945 \text{ kg/m}^3$ (Baummeiter & Avallone, 1985), que corresponde a la densidad más alta de los fluidos que intervienen en el proceso de elaboración de metóxido.

$$t_{cilindro} = \frac{0,945 \cdot 33 \cdot 8}{1733 \cdot 0,95} = 0,115 \text{ cm} \cong 1,15 \text{ mm}$$

El espesor normalizado de una plancha de acero inoxidable AISI 316 es de 1,5 mm. Por lo que se toma este espesor para el fondo del tanque.

$$t_{cono} = \frac{0,945 \cdot (33)^2 \cdot \text{tg} 30}{4 \cdot 1733 \cdot 0,95 \cdot \text{cos} 30} = 0,1042 \text{ cm} \cong 1,04 \text{ mm}$$

Por los resultados de los cálculos se adopta un espesor único para todo el recipiente de 1,5 mm.

3.3.3. Tanque Reactor

Considerando que se procesara un volumen de 20 litros de aceite vegetal usado, un factor de corrección de 0,15, con relación al volumen de la caída cónica de 30° (Zlokarnik, 2001). La corrección del volumen de aceite vegetal a procesar es determinada por la Ecuación 6. Mientras que el volumen total del tanque reactor corresponde a la suma algebraica entre el volumen de aceite usado y el volumen de metóxido, que se distribuye entre el cuerpo del tanque y su base cónica.

$$V_d = (0,15) \cdot (20) = 3 \text{ L}$$

Donde:

V_r : es el volumen real almacenado [L] (20 L)

f_s : factor de corrección (0,15)

$$V_{AVU} = 20 + 3 = 23 L$$

$$V_{Tanque Reactor} = V_{metóxido} + V_{AVU}$$

$$V_{Tanque reactor} = 7,4 + 23 = 30,4 L$$

Dimensiones de diseño:

Diámetro del tanque [mm]: 275 mm

Altura del tanque [mm]: 500 mm

El volumen en el cuerpo cilíndrico se calcula mediante la Ecuación 8.

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \left(\frac{275}{2}\right)^2 \cdot 500 = 29,7 \times 10^6 mm^3 \rightarrow 29,7 Litro$$

Donde:

$V_{cilindro}$: Volumen contenido en el cuerpo cilíndrico

D_1 : diámetro del tanque [mm] (275 mm)

h_1 : Altura del tanque [mm] (500 mm)

Mientras que el perímetro de la base cilíndrica del tanque, que representa la longitud de la plancha de acero inoxidable con la que se fabrica. Se calcula con la Ecuación 9.

$$P_{cilindro} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{275}{2} = 864 mm$$

Donde:

$P_{cilindro}$: Perímetro de la base cilíndrica [mm] (864 mm)

D_1 : diámetro del tanque [mm] (275 mm)

El volumen de la base cónica del tanque se calcula con la Ecuación 10.

$$V_{base\ cónica} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{275}{2}\right)^2 \cdot (79) = 1,56 \times 10^6\ mm^3 \rightarrow 1,56\ Litros$$

Donde:

D_1 : diámetro del tanque [mm] (275 mm)

h: Profundidad de la base cónica [mm] (79 mm)

$$V_{total} = 29,7 + 1,56 = 31,26\ L$$

Dónde:

$V_{cilindro}$: Volumen del cuerpo cilíndrico [L] (29,7 L)

$V_{base\ cónica}$: Volumen de la base cónica [L] (1,56 L)

La Figura 21 muestra el esquema del fondo del tanque y la base cónica del tanque reactor, donde el diámetro del cilindro es " D_1 ", la profundidad de la base cónica es " h ". La longitud lateral es representada por " h_i "

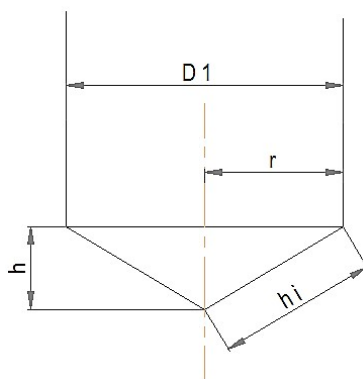


Figura 21 Dimensiones del tanque reactor

La magnitud de " h_i ", establece el radio de la plancha circular de acero inoxidable con la que se fabrica la base cónica. Es calculada mediante el teorema de Pitágoras, Ecuación 12, mientras que la Ecuación 13 representa el diámetro de la placa circular en la que se fabrica la base cónica.

$$h_i = \sqrt{\left(\frac{275}{2}\right)^2 + (79)^2} = 159 \text{ mm}$$

Donde:

D₁: diámetro del cilindro [mm] (275 mm)

h: Profundidad de la base cónica [mm] (79 mm)

$$D_2 = 2 \cdot 159 = 317 \text{ mm}$$

Dónde:

h_i: Radio de la placa circular de la base cónica [mm] (159 mm)

D₂: Diámetro de la plancha circular de la base cónica [mm] (317 mm)

La Figura 22, muestra el corte que permite formar la base cónica. Donde el ángulo “β” es calculado mediante la Ecuación 14.

$$\beta = 360 - \frac{180 \cdot 275}{159} = 47,8^\circ \approx 48^\circ$$

Donde:

D₁: Diámetro interior del tanque [mm] (275 mm)

h_i: Radio de la plancha circular [mm] (159 mm)

β: Ángulo del área a extraer del círculo que forma el cono [grados] (48°)

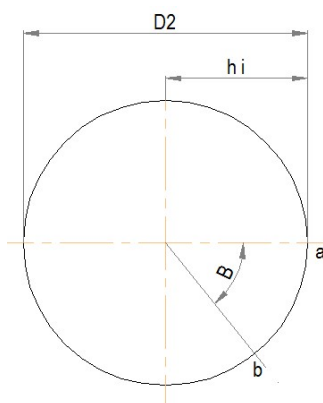


Figura 22 Placa de la base cónica del tanque reactor.

En la elaboración de la tapa del tanque reactor, es preciso reforzar su borde superior con un anillo de acero inoxidable de 273 mm de diámetro exterior y 20 mm de altura y 1,5 mm de espesor. Que permita la fijación hermética de la tapa circular de 338 mm de diámetro.

Perforaciones requeridas para el ingreso de insumos químicos o válvula de alivio no deben interferirse entre sí, o con sensores de temperatura. La Tabla 27, presenta el resumen de las placas de acero inoxidable requeridas en la construcción del tanque, mientras en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**-4 se presenta los planos de construcción definitivos del tanque reactor.

Tabla 27
Placas y accesorios del tanque reactor

Marca	Cantidad	Descripción	Material	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)
1	1	Lam 529x869x1,5	SA240-304	5,51	5,51
2	1	Lam 320x335x1,5	SA240-304	0,91	0,91
3	1	Lam Φ 338x4	SA240-304	2,79	2,79
4	4	Lam 50x50x4	SA240-304	0,08	0,30
5	8	Lam 47x50x3	SA240-304	0,03	0,27
6	8	Lam 70x70x1,5	SA240-304	0,06	0,23
7	4	Eje Φ 1/2"x26	AISI 304	0,02	0,08
8	4	Perno Φ 1/2"x2"	AISI 304	0,05	0,21
9	8	Lam 25x30x3	SA 240-304	0,01	0,11
10	8	Eje Φ 1/4"x40	AISI 304	0,01	0,08
11	4	Tuerca Φ 1/2"	AISI 304	0,02	0,08
12	1	Lam 470x1035x1,5	SA240-304	5,84	5,84
13	1	Lam 379x391x3	SA240-304	1,27	1,27
14	1	Lam 367x853x1,5	SA240-304	0,68	0,68
18	1	Lam 20x853x1,5	SA240-304	0,20	0,20

a. Cálculo de presión de trabajo

El proceso de transesterificación se efectúa a presión atmosférica. Por lo que la presión de diseño del recipiente se determina con la Ecuación 15. (Budynas & Nisbett, 2008)

$$P > 1,2 \cdot (1 \text{ atm})$$

Donde:

P_{trab} : Presión de trabajo [atm] (1 atm)

P: Presión de Diseño [atm] (1,2 atm)

b. Cálculo del espesor del recipiente

El espesor del cuerpo y base cónica del tanque se calcula con las Ecuación 16 y la Ecuación 17.

Donde:

γ : Peso específico del producto almacenado [kg/m^3] (0,945 kg/m^3).

D: Nivel máximo de producto almacenado [cm] (20 cm).

r: radio del cilindro o cono [cm] (13,8 cm)

σ_t : Tensión máxima admisible del material [kg/m^2] ($1,733 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$).

Es: Eficiencia de soldadura (0,95) (Mott, 2006).

α : Semiángulo de apertura del cono [grados] (30°).

El límite elástico del acero inoxidable por un factor de seguridad de 1,5. Proporciona una tensión máxima admisible de:

$$\frac{2600 \text{ Kg/cm}^2}{1,5} = 1733 \text{ Kg/cm}^2$$

La densidad máxima del líquido a ser contenido en el recipiente es de 0,945 kg/m^3 (Baummeiter & Avallone, 1985). Que corresponde a la densidad más alta de los fluidos que intervienen en el proceso de elaboración de metóxido.

$$t_{cilindro} = \frac{0,945 \cdot 20 \cdot 13,8}{1733 \cdot 0,95} = 0,157 \text{ cm} \cong 1,5 \text{ mm}$$

El espesor normalizado de una plancha de acero inoxidable AISI 316 es de 1,5 mm. Por lo que se toma este espesor para el fondo del tanque.

$$t_{cono} = \frac{0,945 \cdot (20)^2 \cdot \text{tg}30}{4 \cdot 1733 \cdot 0,95 \cdot \cos 30} = 0,038 \text{ cm} \cong 0,38 \text{ mm}$$

Por los resultados de los cálculos se adopta un espesor único para todo el recipiente de 1,5 mm. Perforaciones para instrumentos como: termocuplas o resistencias; ubicadas en los laterales del tanque. Deben colocarse en la parte baja del cilindro, preferentemente entre 30 y 100 mm sobre la línea del cono; la termocupla debe estar 100 mm por encima de la resistencia en la misma línea.

3.3.4. Tanque de decantación

La función principal del Tanque de decantación, es contener el biodiésel y la glicerina producidos en la reacción de transesterificación, que posteriormente se separan de forma natural por su diferencia de densidades. De acuerdo a estas consideraciones el volumen que se estima para el tanque de decantación es:

Volumen del tanque Reactor: 30,4 L

Volumen requerido para el lavado (opcional): 6,6 L

Para un volumen total estimado de: 37 L

Considerando un factor de corrección de 0,15, con relación al volumen de la caída cónica de 30°, se tiene, de acuerdo a la Ecuación 6:

$$V_d = (0.15) \cdot (37) = 5,6 L$$

Donde:

fs: factor de corrección (0,15)

Vr: Volumen real [L] (37 L)

Vd: Diferencial de Volumen [L]

Se tiene entonces un volumen total de metóxido de:

$$V_{\text{Tanque decantación}} = V_r + V_d$$

$$V_{\text{Tanque decantación}} = 37 + 5,6 = 43 L$$

Este volumen se encuentra distribuido entre la estructura cilíndrica y la base cónica que conforman el tanque, considerando dimensiones de diseño como:

Diámetro del tanque [mm]: 370 mm

Altura del tanque [mm]: 370 mm

El volumen contenido en la estructura cilíndrica del tanque se calcula mediante la Ecuación 8.

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \left(\frac{370}{2}\right)^2 \cdot 370 = 39,78 \times 10^6 \text{ mm}^3 \rightarrow 39,78 \text{ Litros}$$

Donde:

D₁: diámetro del tanque [mm] (370 mm)

h₁: Altura del tanque [mm] (370 mm)

Mientras que el perímetro de la base cilíndrica del tanque, que representa la longitud de la plancha de acero inoxidable con la que se fabrica. Se calcula con la Ecuación 9.

$$P_{cilindro} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{370}{2} = 1162 \text{ mm}$$

Donde:

P_{cilindro}: Perímetro de la base cilíndrica

D₁: diámetro del tanque [mm] (370 mm)

El volumen contenido en la base cónica del tanque se calcula con la Ecuación 10, mientras que con la Ecuación 11 se calcula el volumen total contenido.

$$V_{base\ cónica} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{370}{2}\right)^2 \cdot (106,8) = 3,8 \times 10^6 \text{ mm}^3 \rightarrow 3,8 \text{ Litros}$$

Donde:

D_1 : Diámetro interno del tanque [mm] (370 mm)

h : Profundidad de la base cónica [mm] (106,8 mm)

$$V_{total} = 39,78 + 3,8 = 43,63 L$$

Donde:

$V_{cilindro}$: Volumen del cuerpo cilíndrico del tanque [L] (39,78L)

$V_{base\ cónica}$: Volumen de la base cónica [L] (3,8L)

La Figura 23 muestra el esquema del fondo del tanque y la base cónica del tanque de decantación, donde el diámetro del cilindro es " D_1 ", la profundidad de la base cónica " h " y finalmente la longitud lateral de la base cónica representada por " h_i "

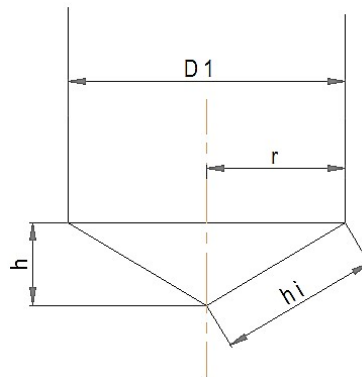


Figura 23 Dimensiones del tanque de decantación.

La magnitud de " h_i ", establece el radio de la plancha circular de acero inoxidable con la que se fabrica la base cónica. Es calculada mediante el teorema de Pitágoras, Ecuación 12 y la Ecuación 13 define el diámetro bruto de la placa circular que forma la base cónica

Donde:

D_1 : Diámetro interno del tanque [mm] (370 mm)

h : Profundidad de la base cónica [mm] (106,8 mm)

$$h_i = \sqrt{\left(\frac{370}{2}\right)^2 + (106,8)^2} = 214 \text{ mm}$$

$$D_2 = 2 \cdot 214 = 428 \text{ mm}$$

Donde:

h_i : Radio de la placa circular de la base cónica [mm] (214 mm)

D_2 : Diámetro de la plancha circular de la base cónica [mm] (428 mm)

La Figura 24, muestra el corte que permite formar la base cónica. Donde el ángulo “ β ” es calculado mediante la Ecuación 14.

$$\beta = 360 - \frac{180 \cdot 370}{214} = 48,5^\circ \approx 49$$

Dónde:

D_1 : Diámetro interno del tanque [mm] (370 mm)

h_i : Radio de la placa circular de la base cónica [mm] (214 mm)

β : Ángulo del área a extraer del círculo que forma el cono [grados] (49°)

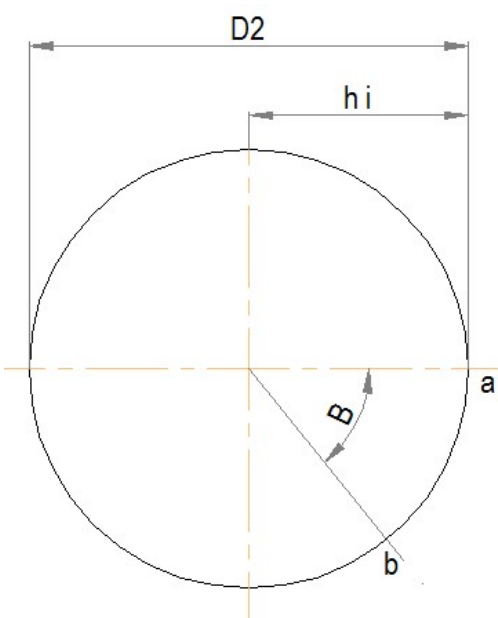


Figura 24 Placa de la base cónica del tanque de decantación

En la elaboración de la tapa del tanque de decantación, es preciso reforzar su borde superior con un anillo de acero inoxidable de 368 mm de diámetro exterior, 20 mm de altura y 1,5 mm de espesor. Que permita la fijación hermética de la tapa circular de 433 mm de diámetro. Perforaciones requeridas para el ingreso de insumos químicos o válvula de alivio no deben interferirse entre sí, o con sensores de temperatura. La Tabla 28, presenta el resume de las placas de acero inoxidable requeridas en la construcción del tanque, mientras en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 5 se presenta los planos de construcción definitivos del tanque de decantación.

Tabla 28
Placas y accesorios del tanque de decantación

Marca	Cantidad	Descripción	Material	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)
1	1	Lam 399x1167x1,5	SA240-304	5,59	5,59
2	1	Lam 425x445x1,5	SA240-304	1,61	1,61
3	1	Lam Φ 433x4	SA240-304	4,63	4,63
4	4	Lam 50x50x4	SA240-304	0,08	0,30
5	8	Lam 47x50x3	SA240-304	0,03	0,27
6	4	Lam 70x70x1,5	SA240-304	0,06	0,23
7	4	Eje Φ 1/2"x26	AISI 304	0,02	0,08
8	4	Perno Φ 1/2"x2"	AISI 304	0,05	0,21
9	8	Lam 25x30x3	SA 240-304	0,01	0,11
10	8	Eje Φ 1/4"x40	AISI 304	0,01	0,08
11	4	Tuerca Φ 1/2"	AISI 304	0,02	0,08
12	1	Lam 470x1035x1,5	SA240-304	5,44	5,44
13	1	Lam 379x391x3	SA240-304	2,08	2,08
14	1	Lam 367x853x1,5	SA240-304	0,89	0,89
18	1	Lam 20x853x1,5	SA240-304	0,28	0,28

a. Cálculo de las presiones de trabajo

El proceso de transesterificación se efectúa a presión atmosférica. Por lo que la presión de diseño del recipiente se determina con la Ecuación 15 (Budynas & Nisbett, 2008).

$$P > 1,2 \cdot (1 \text{ atm})$$

Donde:

Prab: Presión de trabajo [atm] (1 atm)

P: Presión de Diseño [atm] (1,2 atm)

b. Cálculo del espesor del recipiente

El espesor del cuerpo y base cónica del tanque se calcula con la Ecuación 16 y la Ecuación 17.

Donde:

γ : Peso específico del producto almacenado [kg/m^3] (0,945 kg/m^3).

d: Nivel máximo de producto almacenado [cm] (15 cm).

r: radio del cilindro o cono [cm] (21,4 cm)

σ_t : Tensión máxima admisible del material [kg/m^2] ($1,733 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$).

Es: Eficiencia de soldadura. (0,95). (Mott, 2006)

α : Semiángulo de apertura del cono [grados] (30°).

El límite elástico del acero inoxidable AISI 316 es 2600 kg/cm^2 . Por un factor de seguridad de 1,5. Proporciona una tensión máxima admisible de:

$$\frac{2600 \text{ Kg/cm}^2}{1,5} = 1733 \text{ Kg/cm}^2$$

La densidad máxima del líquido a ser contenido en el recipiente es de $0,945 \text{ kg/m}^3$ (Baummeiter & Avallone, 1985). Que corresponde a la densidad más alta de los fluidos que intervienen en la elaboración de metóxido.

$$t_{cilindro} = \frac{0,945 \cdot 15 \cdot 21,4}{2167 \cdot 0,95} = 1,47 \text{ cm} \cong 1,5 \text{ mm}$$

El espesor normalizado de una plancha de acero inoxidable AISI 316 es de 1,5 mm. Por lo que se toma este espesor para el fondo del tanque.

$$t_{cono} = \frac{0,945 \cdot (15)^2 \cdot \text{tg}30}{4 \cdot 2167 \cdot 0,95 \cdot \cos 30} = 0,17 \text{ cm} \cong 1,7 \text{ mm}$$

Por los resultados de los cálculos se adopta un espesor único para todo el recipiente de 1,5 mm.

3.3.5. Tanque de producto en reposo

La función principal del tanque de producto en reposo, es contener los residuos lo suficiente para que se realice la decantación del biodiésel obtenido. De acuerdo a estas consideraciones el volumen que se estima para el contenedor es de un tercio del volumen de aceite a procesar:

Volumen del tanque de reposo (opcional): 6,6 L

Considerando un factor de corrección de 0,15, en relación con el volumen de la caída cónica de 30°, se tiene, de acuerdo a la Ecuación 6:

$V_r = 6,6 \text{ L}$

$$V_d = (0.15) \cdot (6,6) = 0,99 \text{ L}$$

Donde:

fs: factor de corrección (0,15)

Vr: Volumen real [L] (6,6 L)

Vd: Diferencial de Volumen

Se tiene entonces un volumen total es:

$$V_{\text{Tanque de reposo}} = V_r + V_d$$

$$V_{\text{Tanque de reposo}} = 6,6 + 0,99 = 7,59 \text{ L}$$

Este volumen se encuentra distribuido entre la estructura cilíndrica y la base cónica que conforman el tanque, considerando dimensiones de diseño como:

Diámetro del tanque: 200 mm

Altura del tanque: 215 mm

El volumen contenido en la estructura cilíndrica del tanque se calcula mediante la Ecuación 8.

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \left(\frac{200}{2}\right)^2 \cdot 215 = 6,7 \times 10^6 \text{ mm}^3 \rightarrow 6,7 \text{ Litros}$$

Dónde:

$V_{cilindro}$: Volumen contenido en la estructura cilíndrica

D_1 : diámetro del tanque [mm] (200 mm)

h_1 : Altura del tanque [mm] (215 mm)

Mientras que el perímetro de la base cilíndrica del tanque se calcula con la Ecuación 9.

$$P_{cilindro} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{200}{2} = 628 \text{ mm}$$

Donde:

$P_{cilindro}$: Perímetro de la base cilíndrica

D_1 : diámetro del tanque [mm] (200 mm)

El volumen contenido en la base cónica del tanque se calcula con la Ecuación 10 y la Ecuación 11 presenta el volumen total del recipiente.

$$V_{base\ cónica} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{200}{2}\right)^2 \cdot (58) = 0,61 \times 10^6 \text{ mm}^3 \rightarrow 0,61 \text{ Litros}$$

Donde:

D_1 : diámetro del tanque [mm] (200 mm)

h : Profundidad de la base cónica [mm] (58 mm)

$$V_{total} = 6,7 + 0,61 = 7,4 \text{ L}$$

Dónde:

$V_{cilindro}$: Volumen del cuerpo cilíndrico del tanque [L] (6,7L)

$V_{base\ cónica}$: Volumen de la base cónica [L] (0,61L)

La Figura 25 muestra el esquema del fondo del tanque y la base cónica del tanque de metóxido, donde el diámetro del cilindro se “D₁”, la profundidad de la base cónica es “h” y finalmente la longitud lateral de la base cónica representada por “h_i”

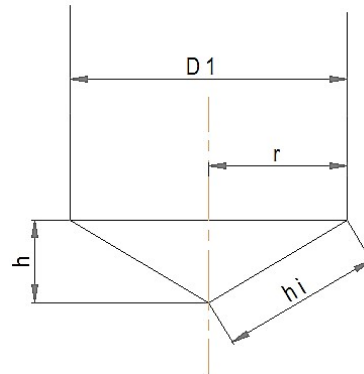


Figura 25 Dimensiones del tanque de reposo.

La magnitud de “h_i”, establece el radio de la plancha circular de acero inoxidable con la que se fabrica la base cónica. Es calculada mediante el teorema de Pitágoras, Ecuación 12 y la Ecuación 13 presenta el diámetro de la placa circular que formara la base cónica.

$$h_i = \sqrt{\left(\frac{200}{2}\right)^2 + (58)^2} = 116 \text{ mm}$$

Donde:

D₁: Diámetro interno del tanque [mm] (200 mm)

h: Profundidad de la base cónica [mm] (58 mm)

$$D_2 = 2 \cdot 116 = 231 \text{ mm}$$

Dónde:

h_i: Radio de la placa circular de la base cónica [mm] (116 mm)

D₂: Diámetro de la plancha circular de la base cónica [mm] (231 mm)

La Figura 26, muestra el corte que permite formar la base cónica. Donde el ángulo “ β ” es calculado mediante la Ecuación 14.

$$\beta = 360 - \frac{180 \cdot 200}{116} = 48,5^\circ \approx 48^\circ$$

Donde:

D₁: Diámetro interno del tanque [mm] (200 mm)

h_i: Radio de la placa circular de la base cónica [mm] (116 mm)

β : Ángulo del área a extraer del círculo que forma el cono [grados] (48°)

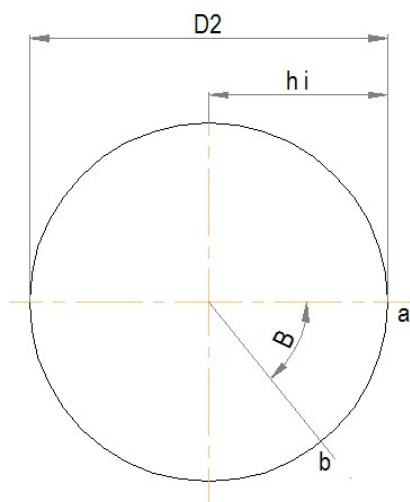


Figura 26 Placa de la base cónica del tanque reposo

En la elaboración de la tapa del tanque de reposo, es preciso reforzar su borde superior con un anillo de acero inoxidable de 198 mm de diámetro exterior, 20 mm de altura y 1,5 mm de espesor. Que permita la fijación hermética de la tapa circular de 263 mm de diámetro.

Perforaciones requeridas para el ingreso de insumos químicos o válvula de alivio no deben interferirse entre sí, o con los soportes del motor de agitación. La Tabla 29, presenta el resume de las placas de acero inoxidable requeridas en la construcción del tanque, mientras en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.-5**, se presenta los planos de construcción definitivos del tanque de producto en reposo.

Tabla 29
Placas y accesorios del tanque de reposo

Marca	Cantidad	Descripción	Material	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)
1	1	Lam 399x507x1,5	SA240-304	2,19	2,19
2	1	Lam 193x202x1,5	SA240-304	0,33	0,33
3	1	Lam Φ 223x4	SA240-304	1,22	1,22
4	4	Lam 50x50x4	SA240-304	0,07	0,29
5	8	Lam 47x50x3	SA240-304	0,03	0,27
6	4	Lam 70x70x1,5	SA240-304	0,06	0,23
7	4	Eje Φ 1/2"x26	AISI 304	0,02	0,08
8	4	Perno Φ 1/2"x2"	AISI 304	0,05	0,21
9	8	Lam 25x30x3	SA 240-304	0,01	0,11
10	8	Eje Φ 1/4"x40	AISI 304	0,01	0,08
11	4	Tuerca Φ 1/2"	AISI 304	0,02	0,08
12	1	Lam 20x492x1,5	SA240-304	0,12	0,12

a. Cálculo de la presión de trabajo

El proceso de mezclar el metanol e hidróxido de sodio se realiza a presión atmosférica. Por lo que la presión de diseño del recipiente se determina con la Ecuación 15 (Budynas & Nisbett, 2008).

$$P > 1,2 \cdot (1 \text{ atm})$$

Donde:

P_{trab} : Presión de trabajo [atm] (1 atm)

P: Presión de Diseño [atm] (1,2 atm)

b. Cálculo del espesor del recipiente

El espesor del cuerpo y base cónica del tanque se calcula con la Ecuación 16 y la Ecuación 17.

Donde:

γ : Peso específico del producto almacenado [kg/m^3] (0,945 kg/m^3).

d: Nivel máximo de producto almacenado [cm] (33 cm).

r: radio del cilindro o cono [cm] (10 cm)

σ_t : Tensión máxima admisible del material [kg/m^2] ($1,733 \times 10^7 \text{ kg}/\text{m}^2$).

Es: Eficiencia de soldadura. (0,85) (Mott, 2006)

α : Semiángulo de apertura del cono [grados] (30°).

El límite elástico del acero inoxidable AISI 316 es 2600 kg/m². Por un factor de seguridad de 1,5. Proporciona una tensión máxima admisible de:

$$\frac{2600 \text{ Kg/cm}^2}{1,5} = 1733 \text{ Kg/cm}^2$$

La densidad máxima del líquido a ser contenido en el recipiente es de 0,945 kg/m³ (Baummeiter & Avallone, 1985). Que corresponde a la densidad más alta de los fluidos que intervienen en el proceso.

$$t_{cilindro} = \frac{0,945 \cdot 33 \cdot 10}{1733 \cdot 0,95} = 0,189 \text{ cm} \cong 1,89 \text{ mm}$$

El espesor normalizado de una plancha de acero inoxidable AISI 316 es de 1,5 mm. Por lo que se toma este espesor para el fondo del tanque.

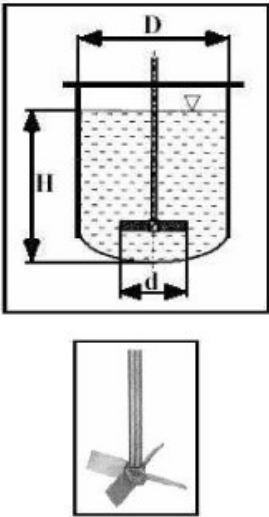
$$t_{cono} = \frac{0,945 \cdot (33)^2 \cdot \text{tg}30}{4 \cdot 1733 \cdot 0,95 \cdot \cos 30} = 0,104 \text{ cm} \cong 1,04 \text{ mm}$$

Por los resultados de los cálculos se adopta un espesor único para todo el recipiente de 1,5 mm.

3.3.6. Mezclador del tanque de metóxido.

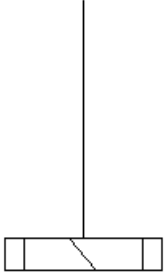
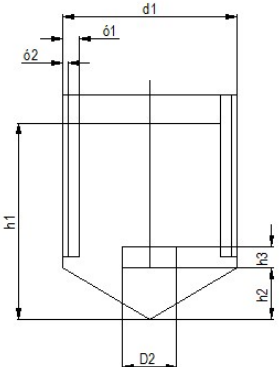
La agitación es definida como el movimiento circulatorio inducido a un fluido dentro de un contenedor, de forma circular y formando vértices. Con el objeto de incrementar la transferencia de calor o la distribución homogénea de sustancias inicialmente separadas. En el diseño del tanque de metóxido, un mezclador de aspas inclinadas a 45° permite una combinación uniforme de los insumos químicos a baja velocidad, de entre 20 y 150 rpm (Vian & Ocón, 1976). Garantizando un funcionamiento eficiente para fluidos de baja viscosidad, de volúmenes pequeños, o disolución de producto. Un acople de engranaje (caja reductora), es más eficiente en fluidos de mayor viscosidad y volumen. La Tabla 30, presenta las características principales de un agitador de placas planas inclinadas 45°.

Tabla 30
Agitador de placas planas inclinadas 45°.

Descripción	- 4 – 6 palas rectas - Ángulo de inclinación 45	
Campo de flujo generado	Axial / Radial	
Régimen alcanzado	De transición - turbulento	
Velocidad tangencial	3 – 15 m/s	
Viscosidad del medio	Hasta 20 Pa*s	
Posición del rodete (d2/d1)	0,2 – 0,5 (alejado de la pared)	
Aplicaciones	Homogeneizar suspender	

Las dimensiones de un sistema de agitación se encuentran estandarizadas de acuerdo con la norma DIN 28131, según criterios como: Mecánica, el proceso y aplicación, como lo indica la Tabla 31. (Epry, 1999).

Tabla 31
Dimensiones del sistema de agitación.

DENOMINACIÓN	SÍMBOLO	GEOMETRÍA
Agitador de palas planas inclinadas		 <p> $h1/d1 = 1$ $d2/d1 = 0,337$ $h2/d1 = 0,17 + 0,34$ $h3/d2 = 0,177$ $a = 45^\circ$ 4 Blatter $\delta1/d1 = 0,1$ $\delta2/d1 = 0,02$ </p>

En el diseño de mezclador para el tanque de metóxido se considera un diámetro interior de 200 mm (D_1). Por lo que el diámetro del agitador (D_2) se calcula con la Ecuación 18.

$$D_2 = 0,66 * D_1$$

Ecuación 18 Diametro del agitador

Donde:

D_1 : Diámetro interno del tanque [mm] (200 mm)

$$D_2 = 0,66 * 200 = 132 \text{ mm}$$

El ancho de las paletas de agitador (h_3) se estima con la Ecuación 19.

$$h_3 = 0,2 * D_2$$

Ecuación 19 Ancho de las paletas del agitador

Donde:

D_2 : diámetro del agitador [mm] (132 mm)

$$h_3 = 0,2 * 132 = 26 \text{ mm}$$

La separación de la base del tanque al deflector (h_2) la determina la Ecuación 20.

$$h_2 = 0,51 * D_1$$

Ecuación 20 Separación desde la base al deflector

Donde:

D_1 : Diámetro interno del tanque [mm] (200 mm)

$$h_2 = 0,51 * 200 = 102 \text{ mm}$$

El ancho del deflector (δ_1) se establece con la Ecuación 21

$$\delta_1 = 0,1 * D_1$$

Ecuación 21 Ancho del deflector

Donde:

D_1 : Diámetro interno del tanque [mm] (200 mm)

$$\delta_1 = 0,1 * 200 = 20 \text{ mm}$$

El espesor del deflector (δ_2) la determina la Ecuación 22.

$$\delta_2 = 0,02 * D_1$$

Ecuación 22 Espesor del deflector

Donde:

D_1 : Diámetro interno del tanque [mm] (200 mm)

$$\delta_2 = 0,02 * 200 = 4 \text{ mm}$$

La altura del deflector (h_{def}) se evalúa con la Ecuación 23, en la que el nivel del líquido dentro del tanque (h_1) se de 280 mm.

$$h_{def} = h_1 - h_2$$

Ecuación 23 Altura del deflector

Donde:

h_1 : nivel del líquido en el tanque [mm] (280 mm)

h_2 : La separación de la base del tanque al deflector [mm] (178 mm)

$$h_{def} = 280 - 102 = 178 \text{ mm}$$

Debido al reducido tamaño del tanque de metóxido el uso de deflectores dentro de este resulta innecesario y constructivamente complicado por lo que se opta por omitir el uso es estos en la fabricación del tanque.

Es así que la selección de un motor acoplado a un reductor de velocidad tipo: EM5R-56-1M de 54 rpm (Corecomm, 1995), el cual se acerca más a las condiciones de velocidad requeridas. Trabajando con una relación de transmisión de 15:1 y proporcionando una velocidad de salida baja, por lo que el número de revoluciones por minuto del impulsor se establece según la Ecuación 24:

$$N = N_s \cdot f$$

Ecuación 24 Revoluciones del impulsor

Donde:

N: Velocidad angular impulsor [rpm]

N_s: Velocidad angular nominal [rpm] (810 rpm)

f: relación de transmisión (Epry, 1999)

$$N = 810 \cdot \frac{1}{15} = 54 \text{ rpm o } 0,9 \text{ rps}$$

La Tabla 32, presenta el resumen de las placas de acero inoxidable requeridas en la construcción del agitador, mientras en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.-3C**, se presenta los planos de construcción definitivos del agitador para el tanque de metóxido.

Tabla 32
Placas y accesorios del agitador

Marca	Cantidad	Descripción	Material	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)
1	1	Eje $\Phi 5/8 \times 30$	AISI 304	0,41	0,41
2	1	Eje $\Phi 1 \frac{1}{2} \times 25$	NYLON	0,01	0,01
3	1	Perno $\Phi 5/16 \text{UNC} \times 1/2$ "	AISI 304	0,01	0,01
4	1	Eje $\Phi 1 \times 30$	AISI 304	0,07	0,07
5	4	Lam 27x59x4	SA240-304	0,05	0,19
6	2	Prisionero $\Phi 1/4 \text{UNC} \times 1/2$ "	AISI 304	0,01	0,01
7	1	Lam 93x296x3	SA240-304	0,52	0,52
8	1	Eje $\Phi 1 \times 60$	AISI 304	0,18	0,18

a. Potencia consumida por el agitador

En el diseño del recipiente de agitación es importante la potencia necesaria para mover el mezclador. Puesto que la potencia requerida no puede predecirse teóricamente, se tienen correlaciones empíricas para estimar los requerimientos de potencia en presencia o ausencia de turbulencia. Entre las variables que pueden ser controladas y que influyen en la potencia consumida por un agitador están:

- Dimensiones del tanque y del rodete: Diámetro del tanque (D_1), Diámetro del rodete (D_2), altura del líquido (h_1), ancho de la placa

deflectora (δ_1), distancia del fondo del tanque hasta el rodete (h_2) y dimensiones de las paletas.

- Viscosidad (μ) y densidad (ρ) del fluido.
- Velocidad de giro del agitador (N).

El cálculo de la potencia consumida se hace a través una relación entre el número de Reynolds (N_{Re}) y el número de potencia (N_p), como se visualiza en la Figura 27.

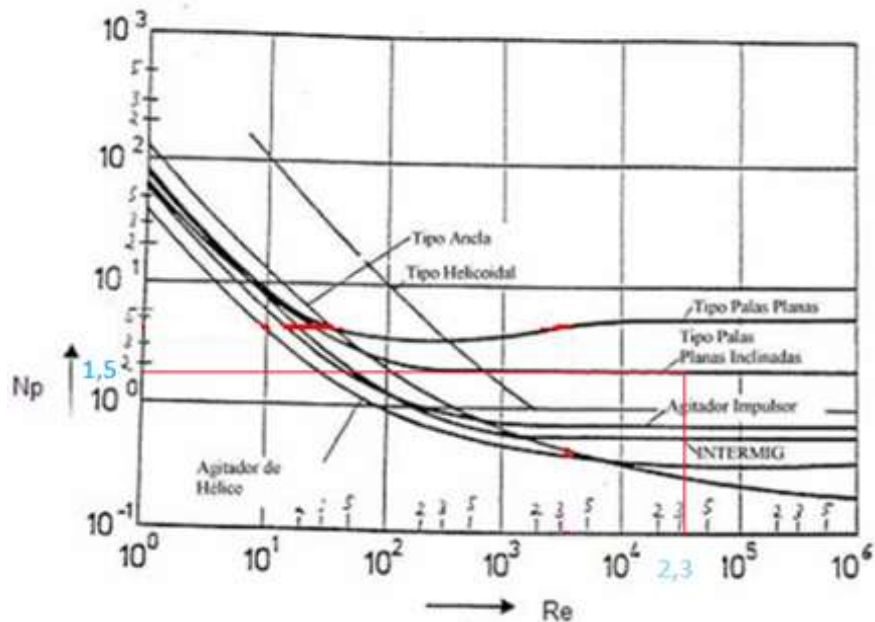


Figura 27 Correlación de potencia

Fuente: (Dobarganes & Márquez, 1995)

En el cálculo de la potencia consumida por el agitador es preciso estimar primero el número de Reynolds para el tanque de metóxido, en función de las variables definidas en la Ecuación 25.

$$N_{Re} = \frac{D_2^2 N \rho}{\mu}$$

Ecuación 25 Número de Reynolds

Donde:

D_2 : diámetro de las aletas [m] (0,132 m)

N : número de revoluciones [rps] (0,9 rps)

ρ : densidad del líquido más denso [kg/m^3] (metanol 791,5 kg/m^3 a 20°C)

μ : viscosidad absoluta de la mezcla [$\text{Pa}\cdot\text{s}$] ($5,41 \times 10^{-4} \text{Pa}\cdot\text{s}$ a 25°C)

$$N_{Re} = \frac{(0,133)^2 \cdot 0,9 \cdot 791,5}{5,41 \times 10^{-4}} = 2,329 \times 10^4$$

De acuerdo a la correlación de potencias de la Figura 27, el número de Reynolds calculado se relaciona con un número de potencia (N_p) de 1,5. El cálculo de la potencia del agitador en el tanque de metóxido se realiza de acuerdo a la Ecuación 26 (Badger & Banchemo, 1955).

$$N_p = \frac{P}{N^3 \cdot \rho \cdot D_2^5}$$

Ecuación 26 Potencia del agitador

$$P = N_p \cdot (N^3 \cdot \rho \cdot D_2^5)$$

Donde:

N_p : número de potencia (1,5 m)

N : número de revoluciones [rps] (0,9 rps)

D_2 : diámetro de las aletas [m] (0,132 m)

ρ : densidad del líquido más denso [kg/m^3] (metanol 791,5 kg/m^3 a 20°C)

$$P = \frac{1,5}{1} \cdot ((0,9)^3 \cdot 791,5 \cdot (0,133)^5) = 0,036 \text{ W o } 0,00005 \text{ Hp}$$

Para evitar un sobrecalentamiento del motor se toma en cuenta un factor de seguridad que varía desde el 30 % que indica un sistema completamente seguro, 20% para un sistema medianamente seguro y un 10 % en un sistema de protección bajo (Baummeiter & Avallone, 1985). Con la Figura 27, se calcula la potencia corregida que debe tener el motor que acciona el agitador en el tanque de metóxido.

$$P_c = P + (f_s \cdot P)$$

Ecuación 27 Potencia corregida

Donde:

P: Potencia calculada [Hp] (0,00005 Hp)

f_s: Factor de seguridad (30 % o 0,3)

P_c: Potencia corregida

$$P_c = 0,00005 + (0,3 \cdot 0,00005) = 0,000065 \text{ Hp} \approx 0,048 \text{ W}$$

La potencia necesaria calculada para el motor no está disponible en el mercado, por lo tanto se sobredimensiona y selecciona la potencia del mismo en base al equipo seleccionado a una potencia de 0,025 Hp. En la selección del motor eléctrico para el agitador del tanque de metóxido, se toma en consideración los valores de potencia, velocidad del motor y del reductor con las siguientes características técnicas (Corecomm, 1995).

Potencia: 0,025 Hp

Velocidad: 54 rpm

Voltaje: 115 Vac

Frecuencia: 60 Hz

Número de fases: Monofásico

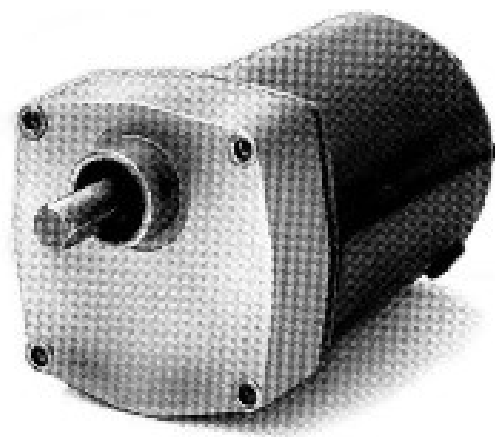


Figura 28 Moto reductor EM5R – 63-1

Fuente: (Corecomm, 1995)

b. Diámetro del eje del agitador

El eje acopla el motor-reductor y el agitador mecánico y permite la sujeción entre estos componentes. Para el dimensionamiento del eje es necesario un previo análisis estático según la teoría de diseño mecánico de elementos de máquinas, mediante la Ecuación 28, (Mott, 2006).

$$d = \left(\frac{32N}{\pi} \left[(K_t M)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right)^{1/3}$$

Ecuación 28 Dimensionamiento de ejes

Donde:

d: Diámetro del eje, [m]

N: factor de seguridad del diseño (2)

T: Torque transmitido por el eje [Nm]

S_y: Resistencia a la fluencia del material, [MPa]

K_t: Factor de concentración de esfuerzos.

No se necesita un factor de concentración de esfuerzos en el término del esfuerzo cortante torsional, ya que se supone constante y las concentraciones de esfuerzo tienen poco o ningún efecto sobre el potencial de falla. En el caso del agitador al no existir fuerzas transversales que causen flexión, la Ecuación 29, se reduce a:

$$d = \left(\frac{32N}{\pi} \left[\frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right)^{1/3}$$

Ecuación 29 Diametro del eje

Como el eje está sometido al torque producido por el motor-reductor y no a cargas perpendiculares que provoquen flexión, el diseño se lo realiza en base al momento de torsión aplicado. El acero utilizado en la construcción del eje AISI 1045 con un coeficiente de resistencia a la fluencia S_y = 310 Mpa como indica la Tabla 33.

Tabla 33
Propiedades mecánicas a la tensión de aceros

1 UNS NÚM	2 SAE /AISI No.	3 PROCESAMIENTO	4 RESISTENCIA ÚLTIMA MPa (kPSI)	5 RESISTENCIA DE FLUENCIA MPa (kPSI)	6 ELONGACIÓN EN 2 in. %	7 REDUCCIÓN EN ÁREA %	8 DUREZA BRINELL
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27,5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37,5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39,5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49,5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61,5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

Fuente: (Baummeiter & Avallone, 1985)

HR: Rodados en caliente

CD: Estirados en frío

El cálculo del torque transmitido por el eje se efectúa mediante la Ecuación 30.

$$T = \frac{P}{\omega}$$

Ecuación 30 Torque transmitido

Dónde:

P = Potencia del motor [W] (0,025 Hp o 19,23 Watt)

ω = Velocidad angular [rad/s] (0,9 rev/s o 5,65 rad/s)

T = Torque [Nm]

$$T = \frac{19,23}{5,65} = 3,4 \text{ Nm}$$

El cálculo del diámetro del eje de acuerdo a la Ecuación 29.

$$d = \left(\frac{32 * 2}{\pi} \left[\frac{3}{4} \left(\frac{15,168}{310e6} \right)^2 \right]^{1/2} \right)^{1/3} = 5,78 \text{ mm} \approx 6 \text{ mm}$$

El agitador tipo aspas planas inclinadas se encuentra constituido por paletas, inclinadas 45° bajo la vertical y soldadas en una barra cilíndrica, la misma que se acopla en el primer eje que sirve de acople entre el agitador y el reductor, por lo que su diámetro requiere ser de menor medida de manera que pueda ser alojado dentro del acople con el propósito de transmitir torque. Al ser calculado un diámetro de 6 mm suficiente para transmitir el torque sin llegar a la falla, por lo que se selecciona un diámetro de 15,875 mm para la barra sobre la cual se soldará las paletas del agitador.

c. Análisis dinámico del eje de agitación

Considerando que el eje-acople se somete únicamente a esfuerzos cortantes, el análisis dinámico se enfoca en comprobar el valor del factor de seguridad de diseño escogido para el cálculo del diámetro del eje en condiciones de esfuerzos variables, usando la Ecuación 31 y la Ecuación 32.

$$n = \frac{S_{Se}}{\tau_a}$$

Ecuación 31 Factor de seguridad

$$S_{Se} = 0,577 * 0,5S_{ut} * k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f$$

Ecuación 32 Límite de resistencia a la fatiga

Donde:

S_{Se} : Límite de resistencia a la fatiga.

S_{ut} : Resistencia a la tracción [MPa] (570 MPa).

τ_a : Esfuerzo cortante amplitud [MPa] (MPa)

k_a : Factor de superficie.

k_b : Factor de tamaño.

k_c : Factor de confiabilidad.

k_d : Factor de temperatura.

k_e : Factor de modificación por concentración de esfuerzos.

k_f : Factor de efectos varios.

n : Factor de seguridad

Los valores de cada factor se establecen a continuación:

- Factor de superficie (k_a)

$$k_a = aS_{ut}^b$$

Ecuación 33 Factor de superficie

Donde:

a: factor de superficie (4,51)

b: exponente del factor de superficie (-0,265)

S_{ut} : Resistencia a la tracción [MPa] (570 MPa).

$$k_a = 4.51 \cdot (570)^{-0.265} = 0,839$$

Tabla 34
Parámetros en el factor de la condición superficial.

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Esmerilado	1,34	1,58	-0,085
Maquinado o laminado en frío	2,70	4,51	-0,265
Laminado en caliente	14,4	57,7	-0,718
Como sale de la froja	39,9	272,1	-0,995

De C.J. Noll y C. Lipson, "Allowable Working Stresses", en Society for Experimental Stress Analysis, vol 3. Núm. 2, 1946, p. 29. Reproducida por O. J. Horger (ed.), Metals Engineering Design ASME Handbook, McGraw-Hill, Nueva York. Copyright 1953 por The McGraw-Hill Companies, Inc reproducido con autorización.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

- Factor de tamaño (k_b)

$$k_b = \begin{cases} (d/0,3)^{-0,107} = 0,879d^{-0,107} & 0,11 \leq d \leq 1 \text{ in} \\ 0,91d^{-0,157} & 2 < d \leq 1 \text{ in} \\ (d/7,62)^{-0,107} = 1,24d^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51^{-0,157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Ecuación 34 Factor de tamaño

Para cargas axiales el efecto de tamaño no aplica, por tanto:

$$k_b = 1$$

$$1,24d^{-0,107} \quad 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$$

Donde:

d: diámetro del eje 15,875 mm

$$k_b = 1,24(15,875)^{-0,107} = 0,922$$

- Factor de confiabilidad (k_c).

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torsión} \end{cases}$$

Ecuación 35 Factor de confiabilidad

$$k_c = 0,59$$

La carga combinada se maneja usando el esfuerzo de von Mises. Para una torsión pura, la energía de distorsión predice un $k_{c(\text{torsión})}=0,577$.

- Factor de temperatura (k_d)

Considerando la temperatura máxima de trabajo (55 °C) y un factor de seguridad de 1,5. Al interpolar estos datos en la Tabla 35, Resulta:

$$\text{Temperatura} = 55 * 1,5 \text{ (82,5°C)}.$$

Tabla 35
Factor de temperatura en la resistencia a la tensión.

Temperatura °C	S_T/S_{RT}	Temperatura °F	S_T/S_{RT}
20	1,000	70	1,000
50	1,010	100	1,008
100	1,020	200	1,020
150	1,025	300	1,024
200	1,020	400	1,018
250	1,000	500	0,995
300	0,975	600	0,963
350	0,943	700	0,927
400	0,900	800	0,872
450	0,843	900	0,797
500	0,768	1000	0,698
550	0,672	1100	0,567
600	0,549		

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$k_d = 1,017$$

- Factor de confiabilidad (k_e)

Tabla 36

Factores de confiabilidad y resistencia a la fatiga.

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_o
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,620

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$k_d = 1$$

- Factor de efectos varios (k_f)

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

Ecuación 36 Factor de efectos varios

Según la Figura 29, Al no existir una muesca en el eje del agitador.

$$q = 0$$

Por lo que el valor del factor de efectos varios es:

$$K_f = 1$$

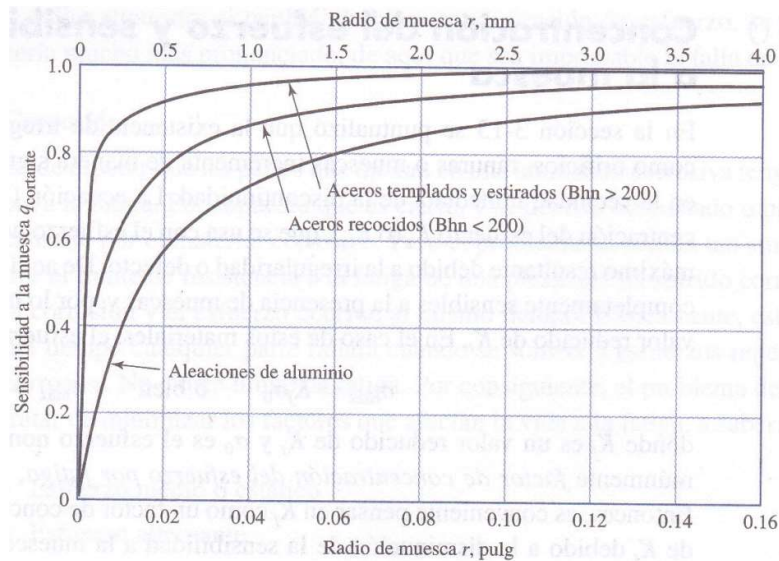


Figura 29 Sensibilidad de la muesca al someterse a torsión.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

- Factor de seguridad

Antes de calcular el factor de seguridad del eje del agitador es preciso estimar el esfuerzo cortante:

$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} = \frac{16T_{max}}{2\pi d^3}$$

Ecuación 37 Esfuerzo cortante

$$n = \frac{0,577 * 0,5S_{ut} * k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f}{\frac{16T_{max}}{2\pi d^3}}$$

Donde:

S_{ut}: Resistencia a la tracción [MPa] (570 MPa).

τ_a: Esfuerzo cortante amplitud [MPa] (MPa)

k_a: Factor de superficie.

k_b: Factor de tamaño.

k_c: Factor de confiabilidad.

k_d: Factor de temperatura.

k_e: Factor de modificación por concentración de esfuerzos.

k_f: Factor de efectos varios.

d: diámetro del eje 15,875 mm

$$n = \frac{0,577 * 0,5 * 570 * 0,84 * 0,92 * 0,59 * 1,017 * 1 * 1}{\frac{16 * 15,168}{2\pi(0,015)^3}} = 7,912$$

Un factor de seguridad un 400 % (8), más alto que el estimado para el cálculo de diámetro del eje, se asegura que el eje no fallara por fatiga.

3.3.7. Sistema de tuberías

En el diseño de las tuberías que componen las distintas líneas de proceso, es conveniente dividir las en tramos comprendidos entre dos equipos consecutivos. De manera que el diámetro óptimo de la conducción y pérdidas de carga se evalúan independientemente en cada tramo.

a. Diámetro óptimo de la tubería

Un aspecto muy importante a considerar en el diseño del sistema de tuberías es la velocidad que alcanza el fluido por el interior de los conductos, que es definido por el caudal y el diámetro de la sección interna del conducto. En la que cada fluido tiene un valor máximo, que al ser sobrepasado produce un deterioro del producto por tratamiento mecánico inadecuado. La Tabla 37, recoge los valores aproximados más utilizados en casos prácticos, sin embargo. Las velocidades se aplican con más frecuencia cuando el flujo es por gravedad desde tanques elevados (McCabe, 1991).

Tabla 37
Velocidades recomendadas de fluidos en tuberías

Fluido	Tipo de Flujo	Velocidad	
		ft/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,5 - 1	0,15 - 0,30
	Entrada de bomba	1 - 3	0,3 - 0,9
	Salida de bomba	4 - 10	1,2 - 3
	Línea de Conducción	4 - 8	1,2 - 2,4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0,2 - 0,5	0,06 - 0,15
	Salida de Bomba	0,5 - 2	0,15 - 0,6
Vapor de Agua		30 - 50	9 - 15
Aire o gas		30 - 100	9 - 30

Fuente: (McCabe, 1991)

La selección del diámetro mínimo de la tubería se encasilla al diámetro normalizado inmediatamente aproximado al valor calculado. Mientras que la caída de presión por el rozamiento producido entre el fluido y las paredes internas influyen en la selección de la bomba y el diámetro de la tubería. Generalmente los valores de caída de presión que no se deben superarse en conductos para caudales entre 0 a 60 m³/h (McCabe, 1991) son:

- Para zonas de aspiración de bombas: 0,40 kg/cm² (0,39 bar)
- Para zonas de impulsión: 0,60 a 0,8 kg/cm² (0,59 a 0,78 bar)

Las pérdidas de carga generadas por los accesorios como válvulas, codos, reducciones, “tes”. Es otro factor a considerar de acuerdo a su longitud equivalente, la cual interpreta a un accesorio como un tramo recto de tubería que produce la misma pérdida, de esta manera la longitud total de la red es la suma de su longitud efectiva y la longitud equivalente, en la Figura 30 se presentan las longitudes equivalentes de algunos accesorios (Budynas & Nisbett, 2008). La Figura 31 presenta el diagrama de Moody utilizado para estimar el coeficiente de fricción de acuerdo al número de Reynolds.

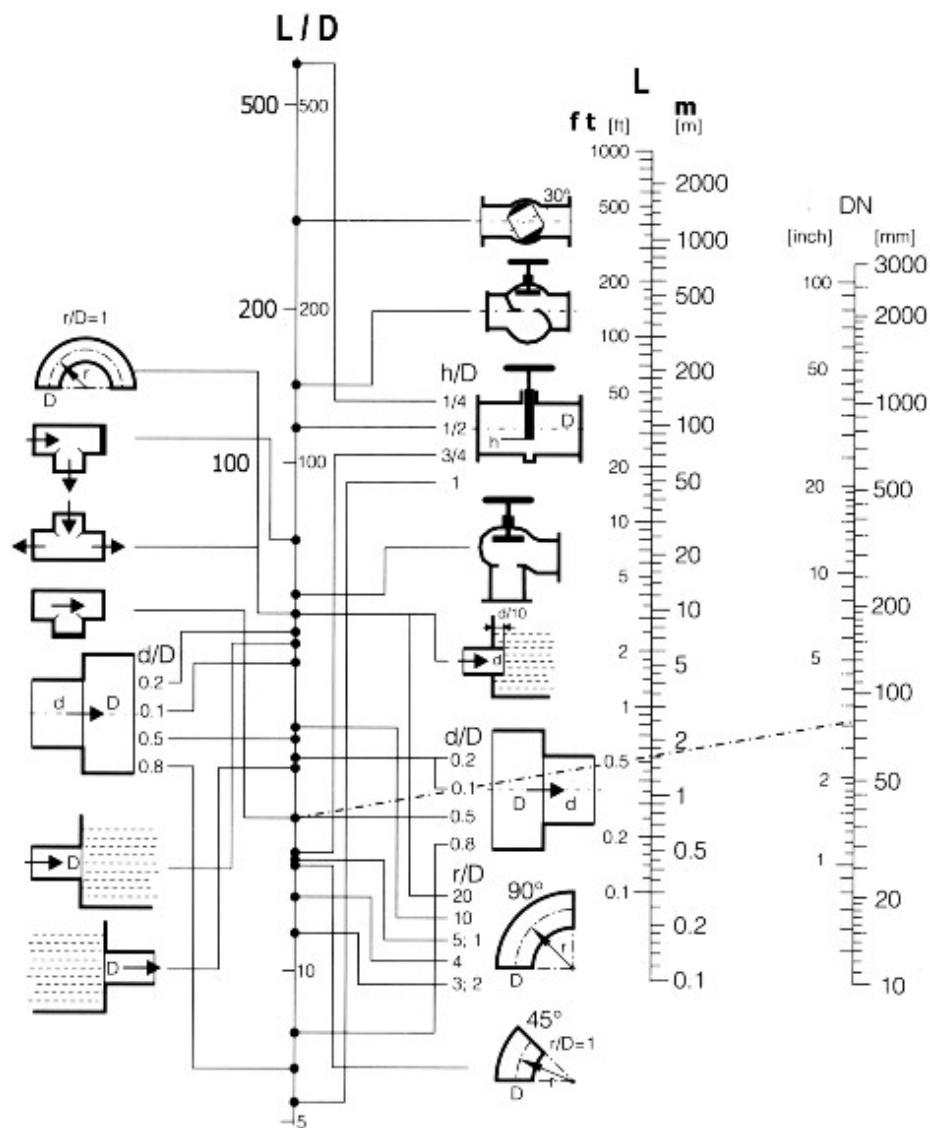


Figura 30 Longitudes equivalentes para algunos accesorios

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

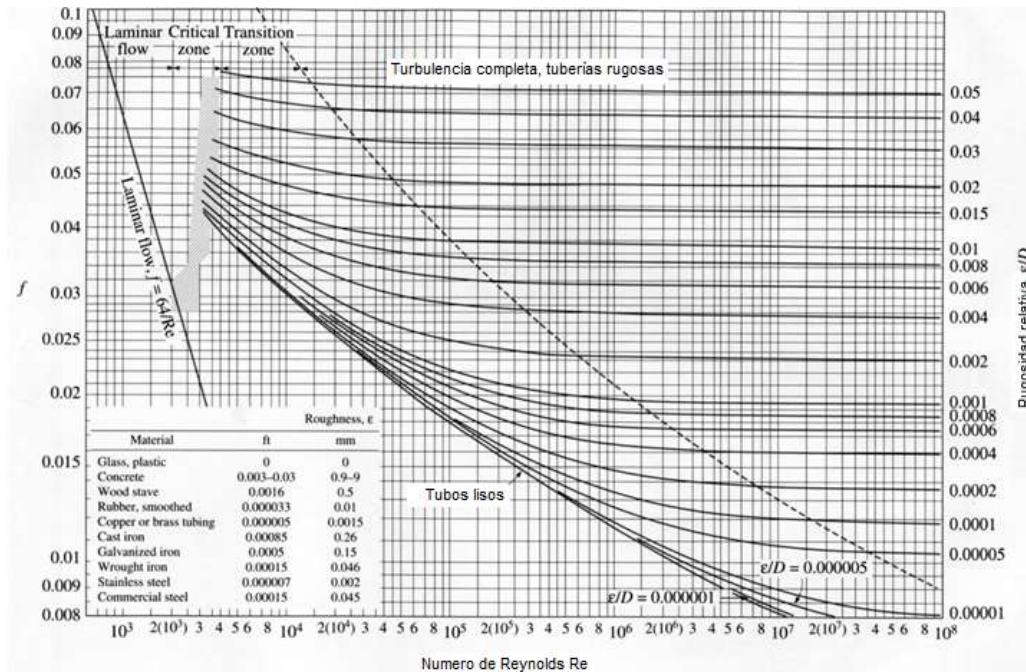


Figura 31 Diagrama de Moody para el factor de fricción.

Fuente: (Darby, 2001)

- Tramo de succión del tanque metóxido al tanque reactor

Al establecer las pérdidas de carga en este trayecto es importante establecer que el tipo de fluido que circula es una mezcla entre metanol e hidróxido de Sodio con una densidad de 792 kg/m^3 , viscosidad de $0,5 \text{ cps}$ ($0,0005 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), una velocidad del fluido recomendada de $0,15 \text{ m/s}$ (fluido poco viscoso en flujo por gravedad), un caudal de $4,11 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ($2,466 \text{ l/min}$), un diámetro interior de $17,12 \text{ mm}$ para una tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada de cedula 10s en acero inoxidable. El número de Reynolds se calcula de acuerdo a la Ecuación 25.

$$N_{Re} = \frac{17,12 * 0,15 * 792}{0,5} = 4,068 \times 10^3$$

Donde:

D_2 : es el diámetro interior de la tubería ($17,12 \text{ mm}$)

N : es la velocidad del fluido ($0,15 \text{ m/s}$)

ρ : es la densidad del fluido (792 kg/m^3)

μ : es la viscosidad cinemática ($0,5 \text{ cps}$)

El cálculo de la pérdida por la carga en la zona de aspiración de una bomba se calcula con la Ecuación 38 y su valor no debe sobrepasar los 0,40 kg/cm² o 0,39 Bar.

$$H = \left(\frac{4 * f * L}{d} \right) * \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 38 Perdida de carga en tuberías

Donde:

f: coeficiente de fricción adimensional, diagrama de Moody (0,016)

L: longitud de la tubería (500 mm)

d: Diámetro interior de la tubería según datos de fabricante (17,12 mm)

v: Velocidad del fluido (0,15 m/s)

g: gravedad (9,81m/s²)

Longitudes equivalentes de los accesorios: válvula (1,9 m), unión (0,7 m), "te" (0,9 m), reducción (0,36 m), codo (0,16 m), longitud total (4,52 m).

$$H = \left(\frac{4 * 0,016 * 4,52}{17,12} \right) * \frac{0,15^2}{2 * 9,8} = 0,019 \text{ m cda (0,0018 Bar)}$$

Este resultado confirma que la pérdida de carga no supera los límites recomendados en la zona de aspiración de bombas.

- Tramo de succión del tanque reactor a la bomba

Al establecer las pérdidas de carga en este trayecto es importante establecer que el tipo de fluido que circula es aceite vegetal usado con una densidad de 944 kg/m³, viscosidad de 8,4 cps (0,0084 Pa.s), una velocidad del fluido recomendada de 0,06 m/s (fluido viscoso en la entrada de la bomba), un caudal de 8,44x10⁻⁴ m³/s (50,64 l/min.), un diámetro interior de 27,86 mm para una tubería de 1 pulgada de cedula 10s en acero inoxidable. El número de Reynolds se calcula de acuerdo a la Ecuación 25.

$$N_{Re} = \frac{27,86 * 0,06 * 944}{0,084} = 0,187x10^3$$

Donde:

D_2 : es el diámetro interior de la tubería (27,86 mm)

N : es la velocidad del fluido (0,06 m/s)

ρ : es la densidad del fluido (944 kg/m³)

μ : es la viscosidad cinemática (8,4 cps)

El cálculo de la pérdida por la carga en la zona de aspiración de una bomba se calcula con la Ecuación 38 y su valor no debe sobrepasar los 0,40 kg/cm² o 0,39 Bar.

$$H = \left(\frac{4 * 0,341 * 10,9}{27,86} \right) * \frac{0,06^2}{2 * 9,8} = 0,098 \text{ mcda (0,01 Bar)}$$

Donde:

f : coeficiente de fricción adimensional, diagrama de Moody (0,341)

L : longitud de la tubería (900 mm)

d : Diámetro interior de la tubería según datos de fabricante (27,86 mm)

v : Velocidad del fluido (0,06 m/s)

g : Gravedad (9,81m/s²)

Longitudes equivalentes de los accesorios: válvula (3,5 m), unión (1,4 m x 2), "te" (2,8 m), codo (0,45 m x 2), longitud total (10,9 m).

Este resultado confirma que la pérdida de carga no supera los límites recomendados en la zona de aspiración de bombas.

- Tramo de succión de depósito aceite vegetal a la bomba

Al establecer las pérdidas de carga en este trayecto es importante establecer que el tipo de fluido que circula es aceite vegetal usado con una densidad de 944 kg/m³, viscosidad de 8,4 cps (0,0084 Pa.s), una velocidad del fluido recomendada de 0,06 m/s (fluido viscoso en la entrada de la bomba), un caudal de 5,55x10⁻⁴ m³/s (33,3 l/min.), un diámetro interior de 27,86 mm para una tubería de 1 pulgada de cedula 10s en acero inoxidable. El número de Reynolds se calcula de acuerdo a la Ecuación 25.

$$N_{Re} = \frac{27,86 * 0,06 * 944}{0,084} = 0,187 \times 10^3$$

Donde:

D₂: es el diámetro interior de la tubería (27,86 mm)

N: es la velocidad del fluido (0,06 m/s)

ρ : es la densidad del fluido (944 kg/m³)

μ : es la viscosidad cinemática (8,4 cps)

El cálculo de la pérdida por la carga en la zona de aspiración de una bomba se calcula con la Ecuación 38 y su valor no debe sobrepasar los 0,40 kg/cm² o 0,39 Bar.

$$H = \left(\frac{4 * 0,341 * 7,65}{27,86} \right) * \frac{0,06^2}{2 * 9,8} = 0,069 \text{ mcda (0,01 Bar)}$$

Donde:

f: coeficiente de fricción adimensional, diagrama de Moody (0,341)

L: longitud de la tubería (450 mm)

d: Diámetro interior de la tubería según datos de fabricante (27,86 mm)

v: Velocidad del fluido (0,06 m/s)

g: Gravedad (9,81m/s²)

Longitudes equivalentes de los accesorios: válvula (3,5 m), unión (1,4 m), "te" (2,3 m), longitud total (7,65 m).

Este resultado confirma que la pérdida de carga no supera los límites recomendados en la zona de aspiración de bombas.

- Tramo de descarga de la bomba al tanque reactor

Al establecer las pérdidas de carga en este trayecto es importante establecer que el tipo de fluido que circula es aceite vegetal usado con una densidad de 944 kg/m³, viscosidad de 8,4 cps (0,0084 Pa.s), una velocidad del fluido recomendada de 0,15 m/s (fluido viscoso en la salida de la bomba).

Un caudal de $5,55 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (33,3 l/min), un diámetro interior de 17,12 mm para una tubería de ½ pulgada de cedula 10s en acero inoxidable. El número de Reynolds se calcula de acuerdo a la Ecuación 25

$$N_{Re} = \frac{17,12 * 0,15 * 944}{0,084} = 0,288 \times 10^3$$

Donde:

D₂: es el diámetro interior de la tubería (17,12 mm)

N: es la velocidad del fluido (0,15 m/s)

ρ : es la densidad del fluido (944 kg/m³)

μ : es la viscosidad cinemática (8,4 cps)

El cálculo de la pérdida por la carga en la zona de aspiración de una bomba se calcula con la Ecuación 38 y su valor no debe sobrepasar los 0,40 kg/cm² o 0,39 Bar.

$$H = \left(\frac{4 * 0,222 * 8,86}{17,12} \right) * \frac{0,15^2}{2 * 9,8} = 0,527 \text{ mcda (0,0527 Bar)}$$

Donde:

f: coeficiente de fricción adimensional, diagrama de Moody (0,222)

L: longitud de la tubería (1200 mm)

d: Diámetro interior de la tubería según datos de fabricante (17,12 mm)

v: Velocidad del fluido (0,15 m/s)

g: Gravedad (9,81m/s²)

Longitudes equivalentes de los accesorios: válvula (1,9 m), unión (1,4 m x 2), "te" (0,9 m x 2), válvula check (2 m), reducción (0,4 m), codo (0,16 m) longitud total (8,86 m).

Este resultado confirma que la pérdida de carga no supera los límites recomendados en la zona de aspiración de bombas.

- Tramo de descarga de la bomba al tanque de decantación

Al establecer las pérdidas de carga en este trayecto es importante establecer que el tipo de fluido que circula es aceite vegetal usado con una densidad de 944 kg/m^3 , viscosidad de $8,4 \text{ cps}$ ($0,0084 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), una velocidad del fluido recomendada de $0,15 \text{ m/s}$ (fluido viscoso en la salida de la bomba), un caudal de $5,55 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ($33,3 \text{ l/min.}$), un diámetro interior de $17,12 \text{ mm}$ para una tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada de cedula 10s en acero inoxidable. El número de Reynolds se calcula de acuerdo a la Ecuación 25

$$N_{Re} = \frac{17,12 * 0,15 * 944}{0,084} = 0,288 \times 10^3$$

Donde:

D_2 : es el diámetro interior de la tubería ($17,12 \text{ mm}$)

N : es la velocidad del fluido ($0,15 \text{ m/s}$)

ρ : es la densidad del fluido (944 kg/m^3)

μ : es la viscosidad cinemática ($8,4 \text{ cps}$)

El cálculo de la pérdida por la carga en la zona de aspiración de una bomba se calcula con la Ecuación 38 y su valor no debe sobrepasar los $0,40 \text{ kg/cm}^2$ o $0,39 \text{ Bar}$.

$$H = \left(\frac{4 * 0,222 * 9,38}{17,12} \right) * \frac{0,15^2}{2 * 9,8} = 0,558 \text{ mcda} \text{ (} 0,0558 \text{ Bar)}$$

Donde:

f : coeficiente de fricción adimensional, diagrama de Moody ($0,222$)

L : longitud de la tubería (1400 mm)

d : Diámetro interior de la tubería según datos de fabricante ($17,12 \text{ mm}$)

v : Velocidad del fluido ($0,15 \text{ m/s}$)

g : Gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Longitudes equivalentes de los accesorios: válvula (1,9 m), unión (1,4 m x 2), "te" (0,9 m x 2), válvula check (2 m), reducción (0,4 m), codo (0,16 m x 3) longitud total (9,38 m).

Este resultado confirma que la pérdida de carga no supera los límites recomendados en la zona de aspiración de bombas.

- Tramo de succión tanque de decantación bomba

Al establecer las pérdidas de carga en este trayecto es importante establecer que el tipo de fluido que circula es aceite vegetal usado con una densidad de 944 kg/m³, viscosidad de 8,4 cps (0,0084 Pa.s), una velocidad del fluido recomendada de 0,06 m/s (fluido viscoso en la entrada de la bomba), un caudal de 5,55x10⁻⁴ m³/s (33,3 l/min), un diámetro interior de 27,86 mm para una tubería de 1 pulgada de cedula 10s en acero inoxidable. El número de Reynolds se calcula de acuerdo a la Ecuación 25.

$$N_{Re} = \frac{27,86 * 0,06 * 944}{0,084} = 0,187 \times 10^3$$

Donde:

D₂: es el diámetro interior de la tubería (27,86 mm)

N: es la velocidad del fluido (0,06 m/s)

ρ : es la densidad del fluido (944 kg/m³)

μ : es la viscosidad cinemática (8,4 cps)

El cálculo de la pérdida por la carga en la zona de aspiración de una bomba se calcula con la Ecuación 38 y su valor no debe sobrepasar los 0,40 kg/cm² o 0,39 Bar.

$$H = \left(\frac{4 * 0,341 * 10,5}{27,86} \right) * \frac{0,06^2}{2 * 9,8} = 0,094 \text{ mcda (0,0094 Bar)}$$

Donde:

f: coeficiente de fricción adimensional, diagrama de Moody (0,341)

L: longitud de la tubería (600 mm)

d: Diámetro interior de la tubería según datos de fabricante (27,86 mm)

v: Velocidad del fluido (0,06 m/s)

g: Gravedad (9,81m/s²)

Longitudes equivalentes de los accesorios: válvula (3,5 m), unión (1,4 m x 2), "te" (2,3 m x 2), Unión simple (0,16 m), longitud total (10,5 m).

Este resultado confirma que la pérdida de carga no supera los límites recomendados en la zona de aspiración de bombas.

- Tramo de descarga de la bomba a la salida

Al establecer las pérdidas de carga en este trayecto es importante establecer que el tipo de fluido que circula es aceite vegetal usado con una densidad de 944 kg/m³, viscosidad de 8,4 cps (0,0084 Pa.s), una velocidad del fluido recomendada de 0,15 m/s (fluido viscoso en la salida de la bomba), un caudal de 5,55x10⁻⁴ m³/s (33,3 l/min), un diámetro interior de 17,12 mm para una tubería de ½ pulgada de cedula 10s en acero inoxidable. El número de Reynolds se calcula de acuerdo a la Ecuación 25.

$$N_{Re} = \frac{17,12 * 0,15 * 944}{0,084} = 0,288x10^3$$

Donde:

D₂: es el diámetro interior de la tubería (17,12 mm)

N: es la velocidad del fluido (0,15 m/s)

ρ : es la densidad del fluido (944 kg/m³)

μ : es la viscosidad cinemática (8,4 cps)

El cálculo de la pérdida por la carga en la zona de aspiración de una bomba se calcula con la Ecuación 38 y su valor no debe sobrepasar los 0,40 kg/cm² o 0,39 Bar.

$$H = \left(\frac{4 * 0,222 * 5,2}{17,12} \right) * \frac{0,15^2}{2 * 9,8} = 0,309 \text{ mcda (0,0309 Bar)}$$

Donde:

f: coeficiente de fricción adimensional, diagrama de Moody (0,222)

L: longitud de la tubería (1200 mm)

d: Diámetro interior de la tubería según datos de fabricante (17,12 mm)

v: Velocidad del fluido (0,15 m/s)

g: Gravedad (9,81m/s²)

Longitudes equivalentes de los accesorios: unión (0,7 m), tee (0,9 m), válvula check (2 m), reducción (0,4 m), longitud total (5,2 m).

Este resultado confirma que la pérdida de carga no supera los límites recomendados en la zona de aspiración de bombas.

b. Cálculos previos la selección de la bomba

La altura total de aspiración de la bomba (m.c.a), que representa la suma algebraica de la distancia de la superficie libre de líquido al eje de la bomba, la presión sobre el líquido y las pérdidas de carga por rozamiento en la tubería. Como se muestra en la Ecuación 39.

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} = \frac{P_1}{\rho \cdot g} + Z_1 - h_{fs}$$

Ecuación 39 Altura total de aspiración

Donde:

P_A: Presión a la entrada de la bomba (m.c.l.)

P₁: Presión absoluta en la superficie del líquido, (101325 Pa.)

ρ: densidad del fluido (944 kg/m³)

g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

Z₁: altura de succión, (-0,4 m.)

H_{fs}: Pérdidas de presión por rozamiento en la conducción, (1,654 m.c.l.)

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} = \frac{101325}{944 \cdot 9,81} + (-0,4) - 1,654 = 8,891 \text{ m. c. a}$$

El valor de la carga neta positiva de aspiración ($NPSH_{dis}$) es determinada de acuerdo a la Ecuación 40.

$$NPSH_{dis} = \frac{P_A - P_V}{\rho \cdot g} = \frac{P_1 - P_V}{\rho \cdot g} + Z_1 - h_{fs}$$

Ecuación 40 Carga neta positiva de aspiración

Donde:

P_A : Presión a la entrada de la bomba (9,521x104 Pa)

P_V : Presión de vaporización (12800 Pa) (Michelena & Martín, 2008)

P_1 : Presión absoluta en la superficie del líquido, (101325 Pa.)

ρ : densidad del fluido (944 kg/m³)

g : aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

Z_1 : Altura de succión, (-0,4 m.)

h_{fs} : Pérdidas de presión por rozamiento en la conducción (1,654 m.c.a.)

$$NPSH_{dis} = \frac{101325 - 12800}{944 \cdot 9,81} + (-0,4) - 1,654 = 7,508 \text{ m. c. a}$$

La altura total de impulsión (m.c.a.), representa la suma algebraica de la altura estática de impulsión, su pérdida de carga y la presión sobre el líquido en el punto de recepción. Su valor se calcula de acuerdo a la Ecuación 41.

$$\frac{P_B}{\rho \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + Z_2 + h_{fs}$$

Ecuación 41 Altura total de impulsión

Datos:

P_2 : Presión absoluta en la superficie del líquido, (101325 Pa.)

ρ : densidad del fluido (944 kg/m³)

g : aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

Z_2 : Altura de descarga, (1,5 m.)

h_{fs} : Pérdidas de presión por rozamiento en la conducción, (1,654 m.c.a.)

$$\frac{P_B}{\rho \cdot g} = \frac{101325}{944 \cdot 9,81} + 1,5 + 1,654 = 14,099 \text{ m. c. a}$$

La carga de la bomba, que expresa la presión suministrada al fluido (m.c.a.), se describe en la Ecuación 42. Considerando que el rozamiento de la bomba influye en su rendimiento y es definido por el fabricante.

$$\Delta h = \frac{P_B - P_A}{\rho \cdot g} + h_{fs}$$

Ecuación 42 La carga de la bomba

Donde:

P_A : presión a la entrada de la bomba ($1,305 \times 10^5$ Pa)

P_B : presión a la salida de la bomba ($8,231 \times 10^4$ Pa)

ρ : densidad del fluido (944 kg/m^3)

g : aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Z_2 : altura de descarga, (1,5 m).

H_{fs} : pérdidas de presión por rozamiento en la conducción (1,654 m.c.a.)

$$\Delta h = \frac{8,231 \times 10^4 - 1,305 \times 10^5}{944 \cdot 9,81} + 1,654 = 6,862 \text{ m}$$

La potencia teórica de la bomba se calcula con a la Ecuación 43.

$$P_b = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h_b$$

Ecuación 43 Potencia teorica de la bomba

Donde:

P_b : potencia teórica de la bomba [W]

ρ : densidad del fluido [kg/m^3] (944 kg/m^3)

g : aceleración de la gravedad [m/s^2] ($9,8 \text{ m/s}^2$)

Q : caudal [m^3/s] ($8,444 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)

h_b : altura dinámica de la bomba [m] (6,862 m)

$$P_b = 944 \cdot 9,8 \cdot 8,444 \times 10^{-4} \cdot 6,862 = 53,645 \text{ W}$$

c. Selección de la bomba de succión

Los datos calculados previos a la selección de la bomba son determinantes al momento de seleccionar la bomba más adecuada de acuerdo al catálogo. Para lo cual es preciso establecer el caudal de trabajo y la altura dinámica, datos con los que se ingresa en la Figura 32 del inventario de bombas fabricadas por la empresa Grundfos (Grundfos, 1995).

- Caudal en que trabaja la bomba [l/s] ($8,444 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ o 0,844 l/s)
- La altura dinámica de la bomba [m] (6,862 m)

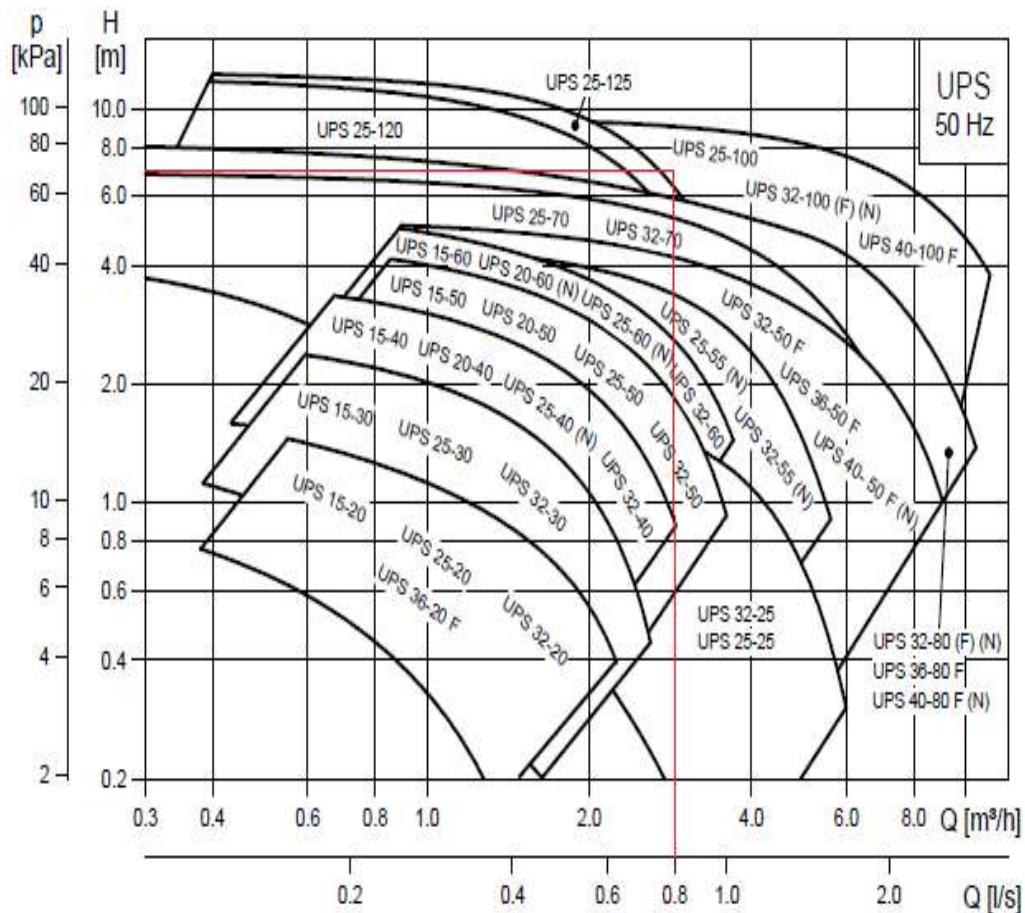


Figura 32 Rango de Actuación de las Bombas

Fuente: (Grundfos, 1995)

De acuerdo al catálogo la bomba más adecuada es la UPS 32-100(F)(N), que presenta valores eléctricos definidos en la Figura 33.

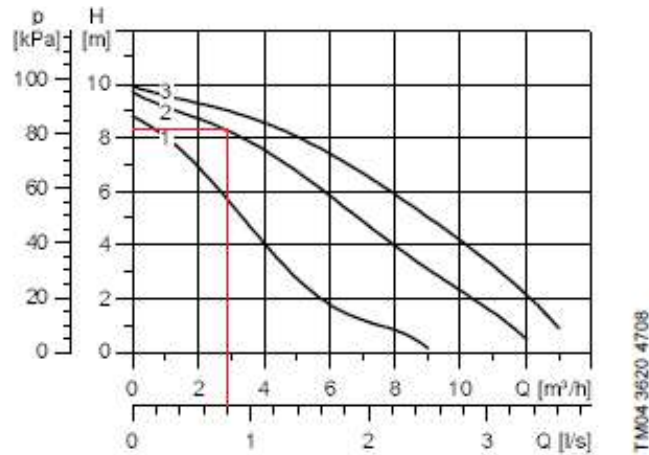


Figura 33 Datos eléctricos de la bomba

Fuente: (Grundfos, 1995)

De acuerdo a los datos despididos por la Figura 33, se procede a identificar la potencia e intensidad requerida por dicha bomba en la Tabla 38

Tabla 38
Datos eléctricos 1x120 V, 60 Hz

Velocidad	P1 (W)	I _{1/1} (A)
3	345	4,49
2	340	4,42
1	280	3,64

Fuente: (Grundfos, 1995)

3.3.8. Bastidor del micro reactor de biodiésel

En el análisis de los esfuerzos de los perfiles que conforman el bastidor, se procede a utilizar el software MDSolids 2.6. Siendo necesario conocer las cargas que van a soportar los distintos perfiles, así como la distribución de las cargas sobre estos. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.-2** se detallan las dimensiones específicas de las vigas que conforman el bastidor.

Entre las consideraciones para el análisis es posible destacar que las cargas distribuidas, son consideradas por unidad de longitud [N/mm]. La carga producida por el peso de los recipientes y tuberías es considerada

como una carga puntual distribuida en los nodos creados en los extremos de los perfiles.

En la Tabla 39 se muestra en detalle el tipo de carga para cada componente. Las barras que conforman el bastidor se presentan en la Tabla 40 en la que se presenta la nomenclatura, el tipo de perfil y su simbología.

Tabla 39
Cargas sobre cada componente del micro reactor.

Componente	Nomenclatura	Masa [kg]	Fuerza total [N]	Longitud perfiles [mm]	Carga distribuida/Puntual por nodo
Tanque de Metóxido / agitador	TM	20,94	205,42	-	51,36 [N/nodo]
Tanque Reactor	TR	47,54	466,37	-	116,59 [N/nodo]
Tanque de Decantación	TD	60,23	590,86	-	147,72 [N/nodo]
Tanque de Reposo	To	12,37	121,35	-	30,34 [N/nodo]
Bomba Principal	B1	20	196,2	1200	0,16 [N/mm]
Bomba secundaria	B2	15	147,15	1000	0,15 [N/mm]
Panel de control	Pc	35	343,35	3000	0,12 [N/mm]

Tabla 40
Nomenclatura de las barras que forman el bastidor

Tipo de barra	Denominación	Perfil
Largueros	L	25x25x3
Verticales	LP	25x25x3
Cuadro	C	38x38x2
Cuadros verticales	Cp	38x38x2
Larguero	La	38x38x3

Las vigas que conforman el bastidor se numeran de acuerdo a la nomenclatura del perfil que se emplea, en la Figura 34 se presentan las vigas que conforman la parte superior, mientras que en la Figura 35 se

encuentran las vigas de la parte inferior. En la Figura 36 se presenta la ubicación de las fuerzas más representativas que actúan sobre las vigas.

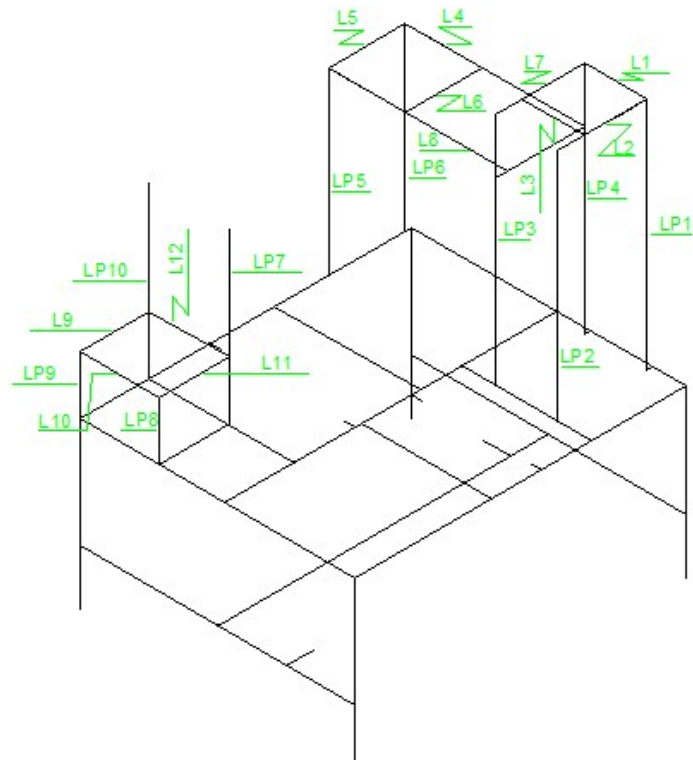


Figura 34 Denominación de las vigas superiores del bastidor

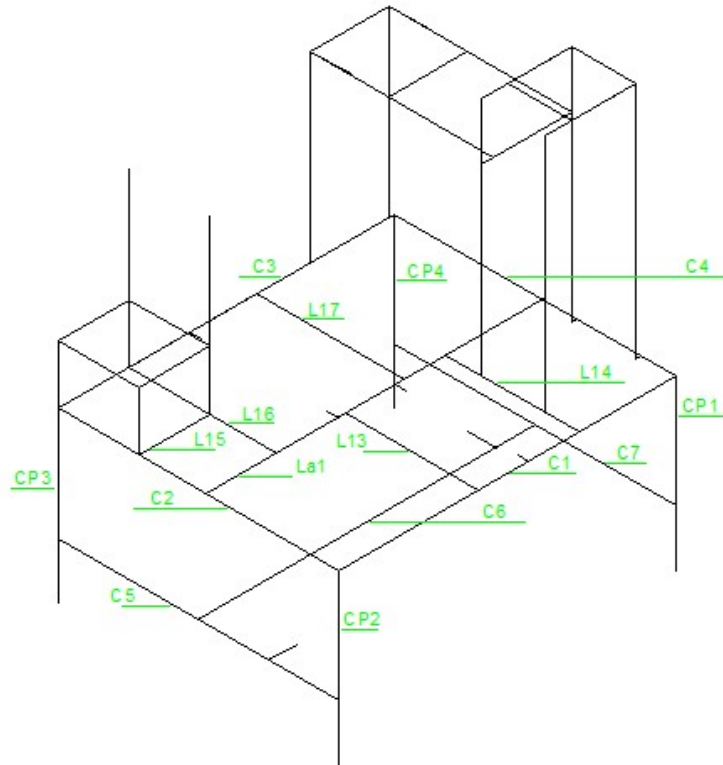


Figura 35 Denominación de las vigas inferiores del bastidor

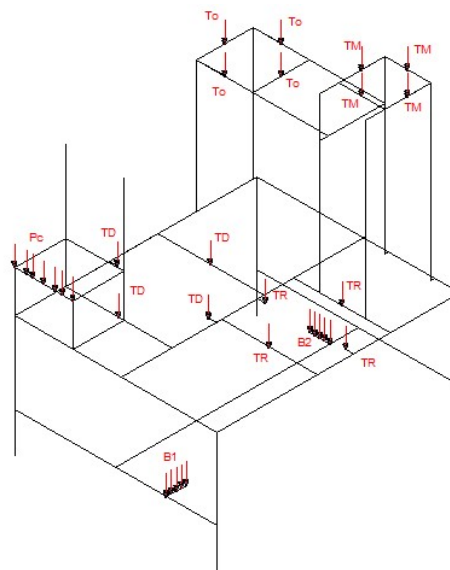


Figura 36 Distribución de las cargas sobre el bastidor

- Diseño de los travesaños “L1, L3, L2 y L7”

Los travesaños soportan la carga del tanque de metóxido distribuido como una carga puntual sobre las vigas. De 51,36 N a 88,5 mm del extremo del

travesaño "L" de 177 mm. Y 113,5 mm del travesaño de 322 mm, con 25x25x3 mm de sección elaborados en acero inoxidable 316 con un límite de fluencia de 40 kpsi. Estos datos son introducidos en el programa MDSoids 2.6 el cual genera el diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores.

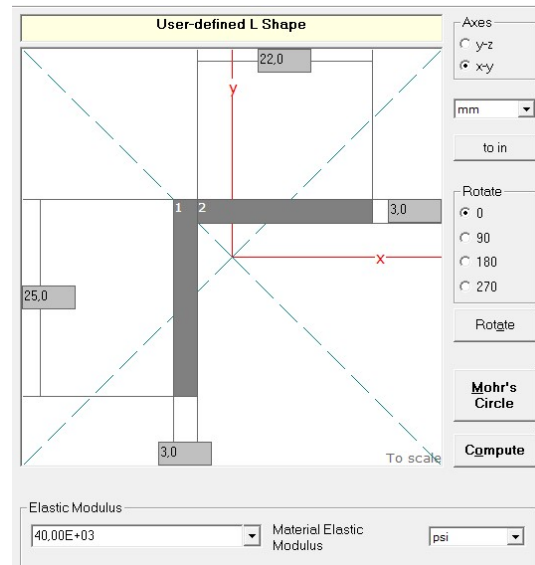


Figura 37 Sección lateral de las vigas superiores

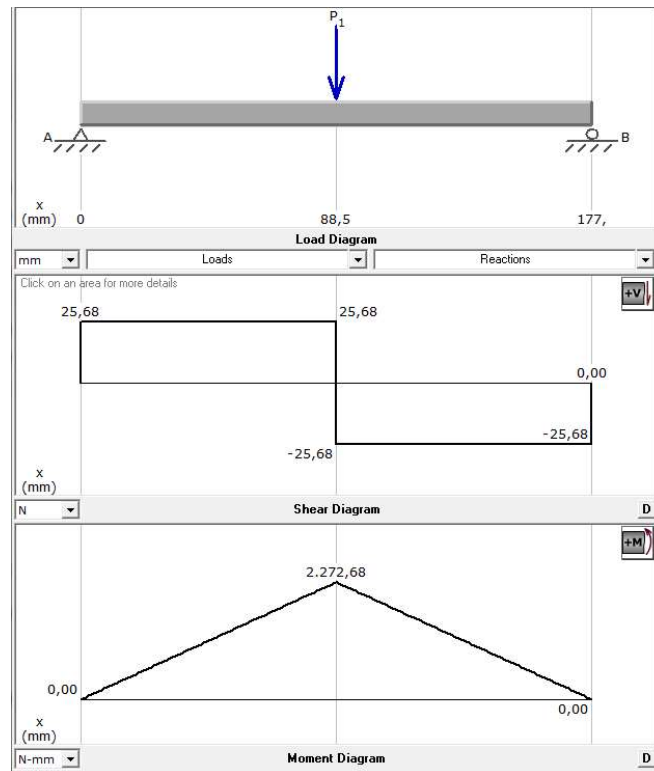


Figura 38 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "L1 y L3"

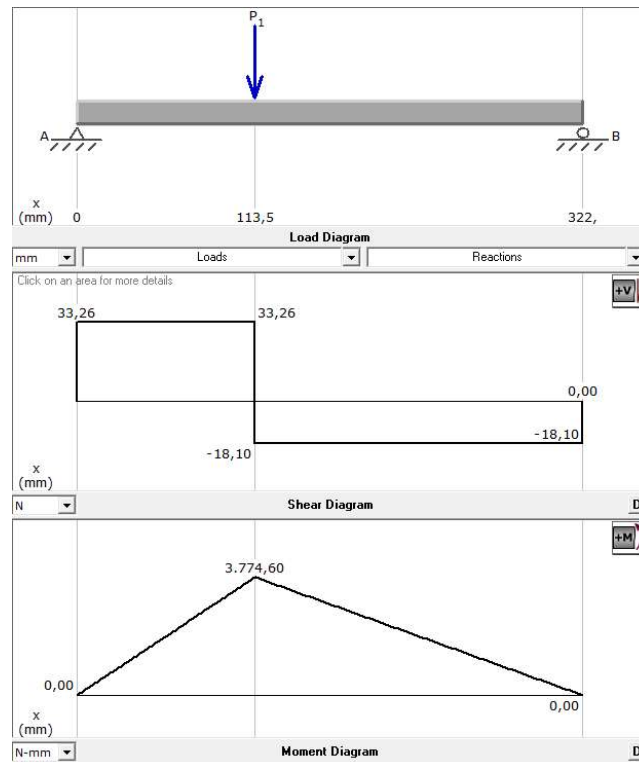


Figura 39 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “L2 y L7”

X Axis Properties			
Elastic Modulus	E	40.000,0000	psi
From bottom to centroid	y (bot)	17,6489	mm
From centroid to top	y (top)	7,3511	mm
Area of shape	A	141,0000	mm ²
Moment of Inertia	Ix	8.203,6223	mm ⁴
Section Modulus	Sx	464,8225	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	464,8225	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	1.115,9776	mm ³
Radius of Gyration	rx	7,6277	mm
Plastic Modulus	Zx	837,6900	mm ³
Shape Factor		1,8022	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	22,1800	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	2,8200	mm
Polar Moment of Inertia	J	16.407,2447	mm ⁴
Product of Inertia	Ixy	4.827,1277	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	13.030,7500	mm ⁴
Minumum Moment of Inertia	I _{min}	3.376,4947	mm ⁴
Angle from x axis to I _{max} axis	B	45,0000	degrees
		Clockwise	

Figura 40 Resultados de análisis de esfuerzos en “L1, L2, L3 y L7”

Utilizando el catálogo de perfiles angulares de lados iguales se selecciona un perfil tipo “L” más cercano a las principales propiedades y dimensiones calculadas por el programa:

Tipo de perfil: L

Dimensiones: 25x25x3 mm

Módulo de inercia: 0,44 cm³

Sección: 1,35 cm²

Radio mínimo de giro: 0,59 cm

- Análisis de estabilidad de las columnas “LP1, LP2, LP3 y LP4”

El cálculo de la resistencia de las columnas del bastidor se realiza por el análisis de estabilidad mediante el diagrama de cuerpo libre. Requiriendo las cargas sobre la barra horizontal para seleccionar la sección transversal de la viga y su longitud (850 mm) los resultados se visualizan en la Figura 41

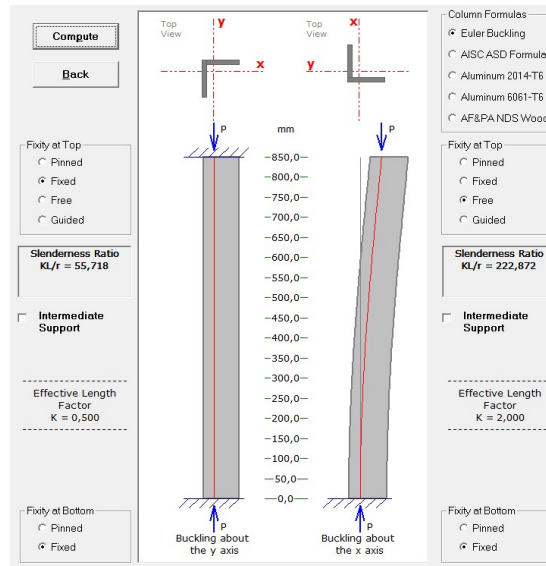


Figura 41 Análisis de las columnas “LP1, LP2, LP3 y LP4”

- Diseño de los travesaños “L5, L6, L4 y L8”

Estos travesaños soportan la carga del tanque de reposo distribuido sobre la viga. De 30,34 N, ubicado a 114 mm del extremo del travesaño tipo “L” de

228 mm de longitud y a 139 mm del travesaño de 650 mm de longitud con 25x25x3 mm de sección, elaborados en acero inoxidable 316 con un límite de fluencia de 40 kpsi. Los resultados se presentan a continuación.

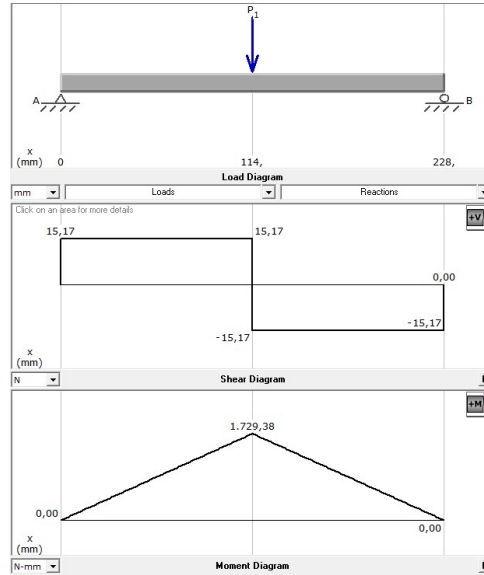


Figura 42 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “L5 y L6”

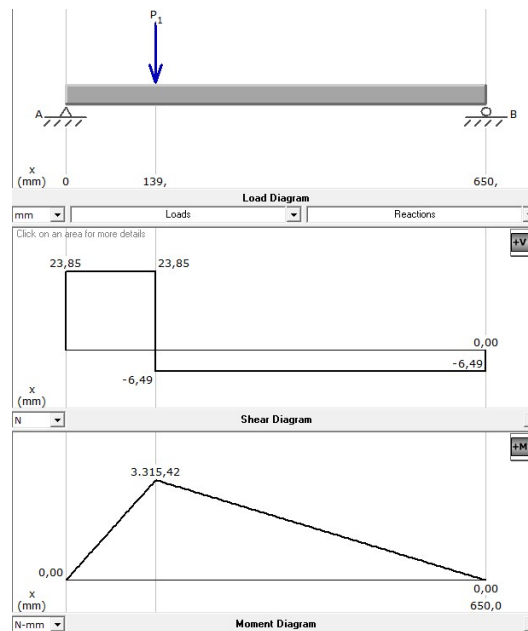


Figura 43 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “L4 y L8”

Y Axis Properties			
Elastic Modulus	E	40.000,0000	psi
From left to centroid	x (left)	7,3511	mm
From centroid to right	x (right)	17,6489	mm
Area of shape	A	141,0000	mm ²
Moment of Inertia	I _y	8.203,6223	mm ⁴
Section Modulus	S _y	464,8225	mm ³
Section Modulus (left)	S (left)	1.115,9776	mm ³
Section Modulus (right)	S (right)	464,8225	mm ³
Radius of Gyration	r _y	7,6277	mm
Plastic Modulus	Z _y	837,6900	mm ³
Shape Factor		1,8022	
From left to plastic n.a.	x _p (left)	2,8200	mm
From plastic n.a. to right	x _p (right)	22,1800	mm
Polar Moment of Inertia	J	16.407,2447	mm ⁴
Product of Inertia	I _{xy}	4.827,1277	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	13.030,7500	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	3.376,4947	mm ⁴
Angle from y axis to I _{max} axis	B	45,0000	degrees
		Counterclockwise	

Figura 44 Resultados de análisis de esfuerzos en “L2, L4, L7 y L8”

Utilizando el catálogo de perfiles angulares de lados iguales se selecciona un perfil tipo “L” más seco a las principales propiedades y dimensiones calculadas por el programa.

Tipo de perfil: L

Dimensiones: 25x25x3 mm

Módulo de inercia: 0,44 cm³

Sección: 1,35 cm²

Radio mínimo de giro: 0,59 cm

- Análisis de estabilidad de las columnas “LP5 y LP6”

En el cálculo de las columnas del bastidor se realiza el análisis de estabilidad mediante el diagrama de cuerpo libre. El programa MDsolid 2.6 requiere las cargas sobre la barra horizontal para seleccionar la sección transversal de la viga y su longitud (610 mm) los resultados se presentan en la Figura 45.

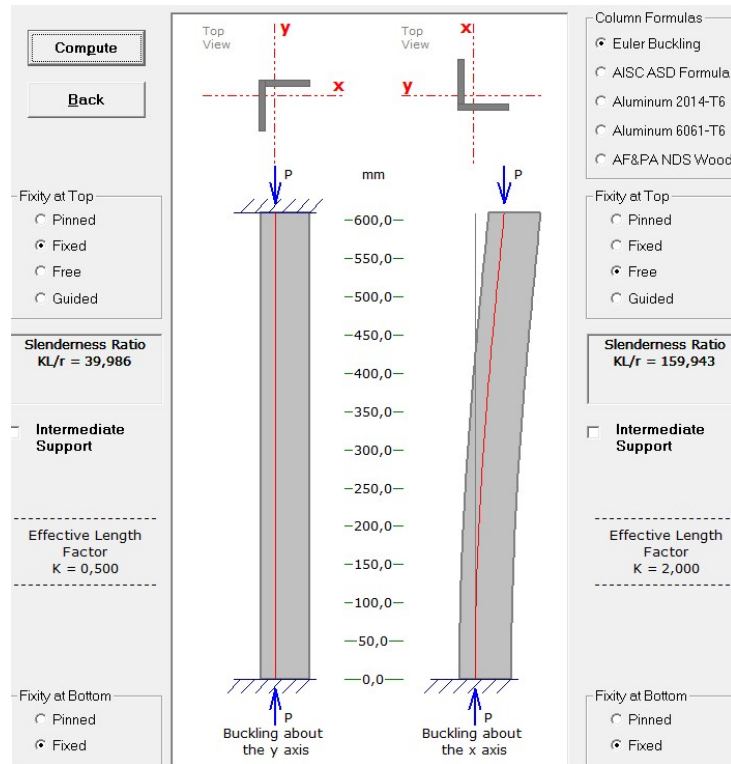


Figura 45 Análisis de las columnas “LP5 y LP6”

- Diseño de los travesaños “L13 y L14”

Estos travesaños soportan la carga del tanque reactor que se distribuye sobre la viga. La carga puntual que soportan es de 116,59 N, ubicado a 198,5 mm sobre el extremo de la viga de 397 mm. Mientras que sobre la otra viga se ubican además las reacciones de “L2 y L7” (18,1 N) a 85 mm y 312 mm del extremo su sección es de tipo “L” de 25x25x3 mm, de acero inoxidable 316 con un límite de fluencia de 40 kpsi. Los resultados se presentan a continuación.

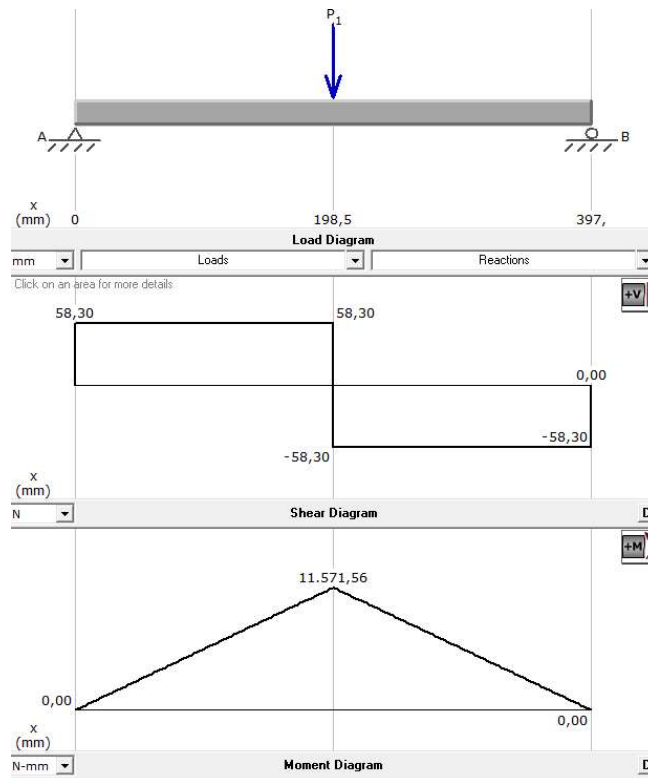


Figura 46 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "L13"

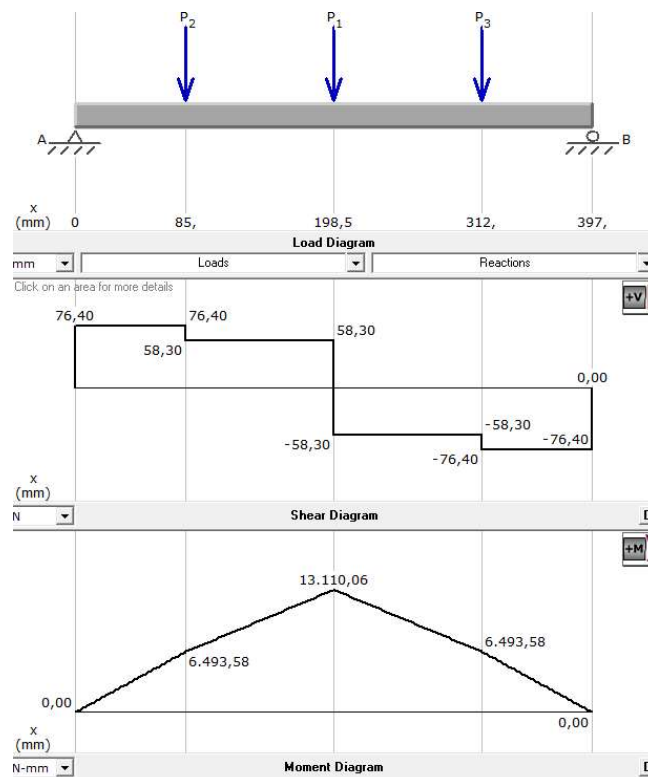


Figura 47 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "L14"

Y Axis Properties			
Elastic Modulus	E	40.000,0000	psi
From left to centroid	x (left)	7,3511	mm
From centroid to right	x (right)	17,6489	mm
Area of shape	A	141,0000	mm ²
Moment of Inertia	Iy	8.203,6223	mm ⁴
Section Modulus	Sy	464,8225	mm ³
Section Modulus (left)	S (left)	1.115,9776	mm ³
Section Modulus (right)	S (right)	464,8225	mm ³
Radius of Gyration	ry	7,6277	mm
Plastic Modulus	Zy	837,6900	mm ³
Shape Factor		1,8022	
From left to plastic n.a.	xp (left)	2,8200	mm
From plastic n.a. to right	xp (right)	22,1800	mm
Polar Moment of Inertia	J	16.407,2447	mm ⁴
Product of Inertia	Ixy	4.827,1277	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	13.030,7500	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	3.376,4947	mm ⁴
Angle from y axis to I _{max} axis	B	45,0000	degrees
		Counterclockwise	

Figura 48 Resultados de análisis de esfuerzos en “L13 y L14”

Utilizando el catálogo de perfiles angulares se selecciona un perfil tipo “L” más seco a las propiedades y dimensiones calculadas por el programa.

Tipo de perfil: L

Dimensiones: 25x25x3 mm

Módulo de inercia: 0,44 cm³

Sección: 1,35 cm²

Radio mínimo de giro: 0,59 cm

- Diseño de los travesaños “L16 y L17”

Los travesaños “L16 y L17” soportan la carga del tanque de decantación de 147,72 N ubicada a 244,5 mm sobre el extremo de la viga de 489 mm de largo. La reacción de la viga “L12” (18 N) sobre la “L16” se ubica a 251 mm del extremo del travesaño de 489 mm de largo. Su sección es de tipo “L” de 25x25x3 mm, elaborados en acero inoxidable 316 con un límite de fluencia de 40 kpsi. Estos datos son introducidos en el programa MDSoids 2.6 el cual genera el diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores.

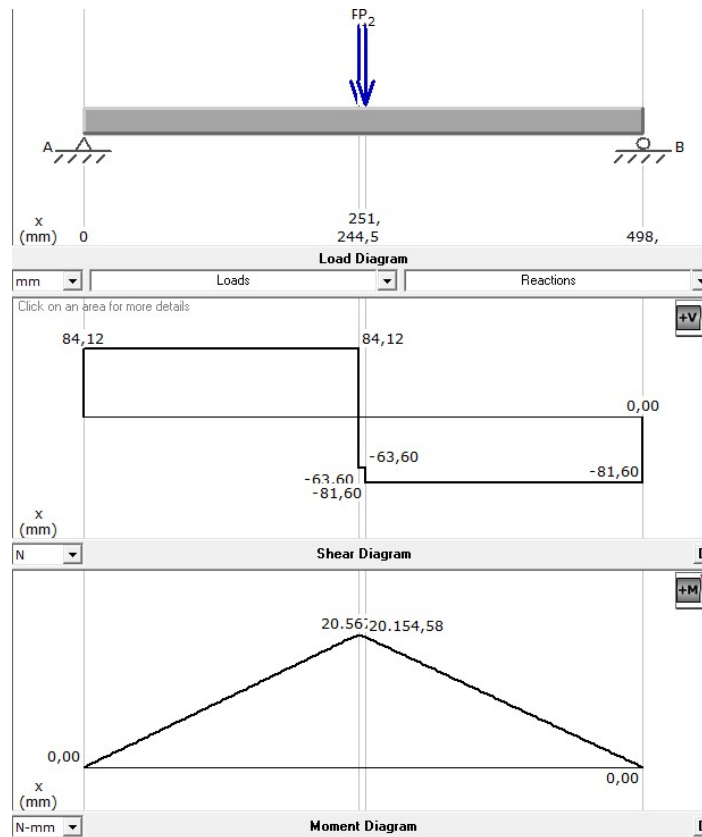


Figura 49 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "L16"

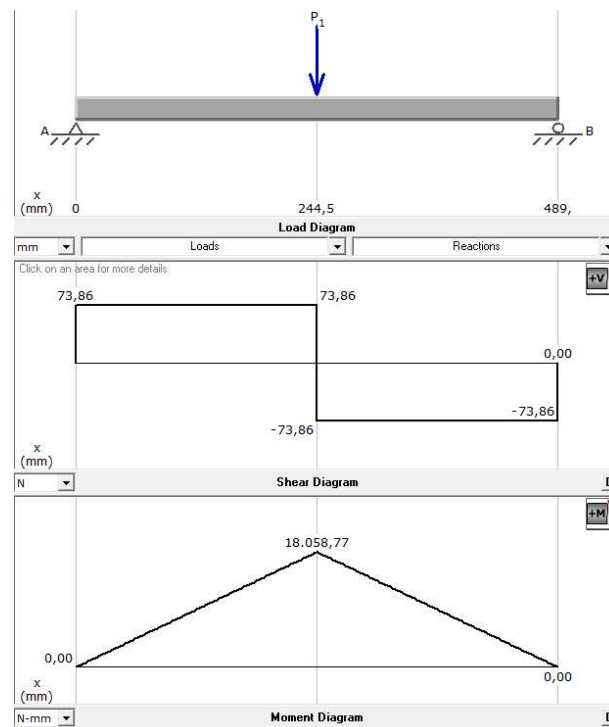


Figura 50 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "L17"

Y Axis Properties			
Elastic Modulus	E	40.000,0000	psi
From left to centroid	z (left)	7,3511	mm
From centroid to right	z (right)	17,6489	mm
Area of shape	A	141,0000	mm ²
Moment of Inertia	I _y	8.203,6223	mm ⁴
Section Modulus	S _y	464,8225	mm ³
Section Modulus (left)	S (left)	1.115,9776	mm ³
Section Modulus (right)	S (right)	464,8225	mm ³
Radius of Gyration	r _y	7,6277	mm
Plastic Modulus	Z _y	837,6900	mm ³
Shape Factor		1,8022	
From left to plastic n.a.	z _p (left)	2,8200	mm
From plastic n.a. to right	z _p (right)	22,1800	mm
Polar Moment of Inertia	J	16.407,2447	mm ⁴
Product of Inertia	I _{yz}	-4.827,1277	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	13.030,7500	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	3.376,4947	mm ⁴
Angle from y axis to I _{max} axis	β	45,0000	degrees
		Counterclockwise	

Figura 51 Resultados de análisis de esfuerzos en “L16 y L17”

Utilizando el catálogo de perfiles angulares se selecciona un perfil tipo “L” más seco a las propiedades y dimensiones calculadas por el programa.

Tipo de perfil: L

Dimensiones: 25x25x3 mm

Módulo de inercia: 0,44 cm³

Sección: 1,35 cm²

Radio mínimo de giro: 0,59 cm

- Diseño de los travesaños “La1”

Este travesaño soporta la carga del tanque de decantación, del tanque reactor y las reacciones de los travesaños L16, L13, L17 y L14. Las cargas que soporta son: de 81,6 N ubicada a 885 mm sobre el extremo del travesaño de 1124 mm de largo. De 147,72 N ubicada a 653 mm, de 116,59 N ubicada a 448 mm, de 73,86 N ubicada a 431,5 mm, de 76,4 N ubicada a 280 mm respectivamente. Con una sección tipo “L” de 38x38x3 mm, elaborado en acero inoxidable 316 con un límite de fluencia de 40 kpsi. Estos datos son introducidos en el programa MDSoids 2.6 el cual genera el diagrama de fuerzas cortantes, de momentos flectores.

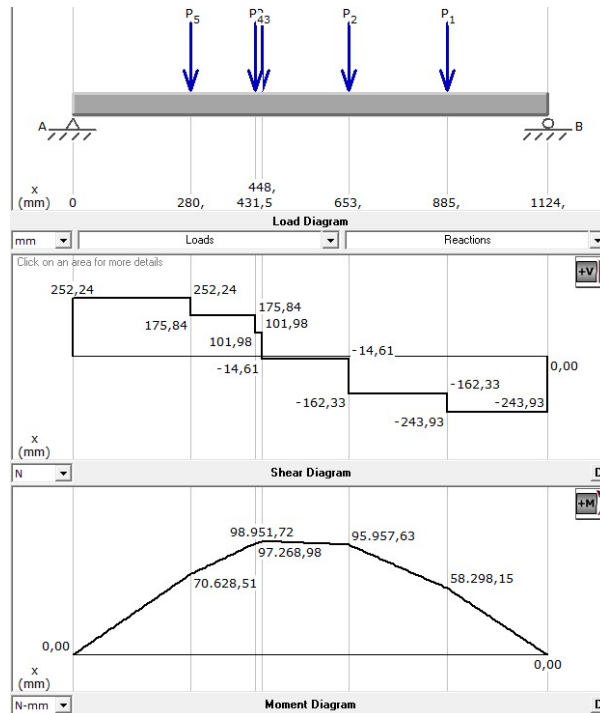


Figura 52 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “La1”

Y Axis Properties			
Elastic Modulus	E	40.000,0000	psi
From left to centroid	x (left)	10,6096	mm
From centroid to right	x (right)	27,3904	mm
Area of shape	A	219,0000	mm ²
Moment of Inertia	Iy	30.535,6199	mm ⁴
Section Modulus	Sy	1.114,8288	mm ³
Section Modulus (left)	S (left)	2.878,1152	mm ³
Section Modulus (right)	S (right)	1.114,8288	mm ³
Radius of Gyration	ry	11,8081	mm
Plastic Modulus	Zy	2.007,9671	mm ³
Shape Factor		1,8011	
From left to plastic n.a.	xp (left)	2,8816	mm
From plastic n.a. to right	xp (right)	35,1184	mm
Polar Moment of Inertia	J	61.071,2397	mm ⁴
Product of Inertia	Ixy	18.173,6301	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	48.709,2500	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	12.361,9897	mm ⁴
Angle from y axis to I _{max} axis	B	45,0000	degrees
		Counterclockwise	

Figura 53 Resultados de análisis de esfuerzos sobre “La1”

Utilizando el catálogo de perfiles angulares se selecciona un perfil tipo “L” con las siguientes características.

Tipo de perfil: L

Dimensiones: 40x40x3 mm

Módulo de inercia: 1,22 cm³

Sección: 2,25 cm²

Radio mínimo de giro: 0,76 cm

- Diseño del travesaño "C1"

Las cargas que soporta son: de 76,4 N ubicada a 343 mm sobre el extremo del travesaño de 1200 mm, de 116,59 N ubicada a 505 mm, de 58,3 N ubicada a 703,5 mm respectivamente. De sección cuadrada de 40x40x1,5 mm, de acero inoxidable 316 con un límite de fluencia de 40 kpsi. El programa MDSoids 2.6 genera el diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores.

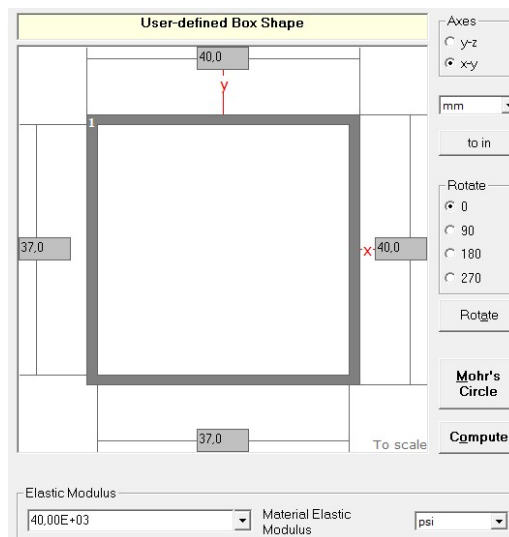


Figura 54 Sección lateral de las vigas inferiores

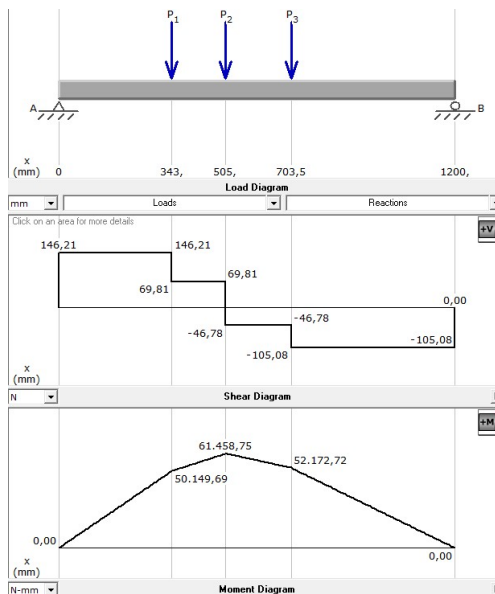


Figura 55 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "C1"

X Axis Properties			
Elastic Modulus	E	40.000,0000	psi
From bottom to centroid	y (bot)	20,0000	mm
From centroid to top	y (top)	20,0000	mm
Area of shape	A	231,0000	mm ²
Moment of Inertia	Ix	57.153,2500	mm ⁴
Section Modulus	Sx	2.857,6625	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	2.857,6625	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	2.857,6625	mm ³
Radius of Gyration	rx	15,7295	mm
Plastic Modulus	Zx	3.336,7500	mm ³
Shape Factor		1,1677	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	20,0000	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	20,0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	114.306,5000	mm ⁴
Product of Inertia	Ixy	0,0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	57.153,2500	mm ⁴
Minumum Moment of Inertia	I _{min}	57.153,2500	mm ⁴
Angle from x axis to I _{max} axis	B	0,0000	degrees
		Clockwise	

Figura 56 Resultados de análisis de esfuerzos en "C1"

Utilizando el catálogo de perfiles angulares se selecciona un perfil tipo tubo cuadrado más seco a las propiedades y dimensiones calculadas.

Tipo de perfil: cuadrado

Dimensiones: 40x40x3 mm

Módulo de inercia: 2,74 cm³

Sección: 2,25 cm²

Radio mínimo de giro: 1,56 cm

- Análisis de estabilidad de las columnas CP1, CP2, CP3 y CP4

En el cálculo de las columnas del bastidor se realiza el análisis de estabilidad mediante el diagrama de cuerpo libre. El programa MDsolid 2.6 requiere pre-calcular las cargas sobre la barra horizontal y luego proceder a seleccionar la sección transversal de la viga y su longitud (564 mm) los resultados se presentan en la Figura 57

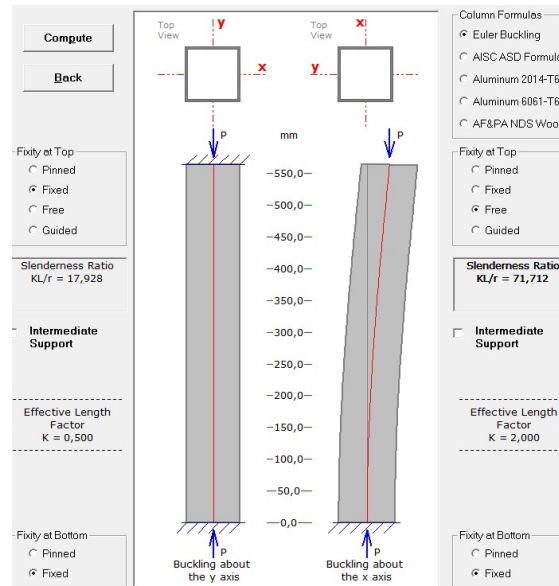


Figura 57 Análisis de las columnas “CP1, CP2, CP3 y CP4”

- Diseño del travesaño “C2”

El travesaño soporta cargas de: 252,24 N ubicada a 565 mm sobre el extremo del travesaño de 1000 mm, de 18 N ubicada a 300 mm, respectivamente. Con una sección cuadrada 40x40x1,5 mm, elaborado en acero inoxidable 316 con un límite de fluencia de 40 kpsi. El programa MDSoids 2.6 genera el diagrama de fuerzas cortantes.

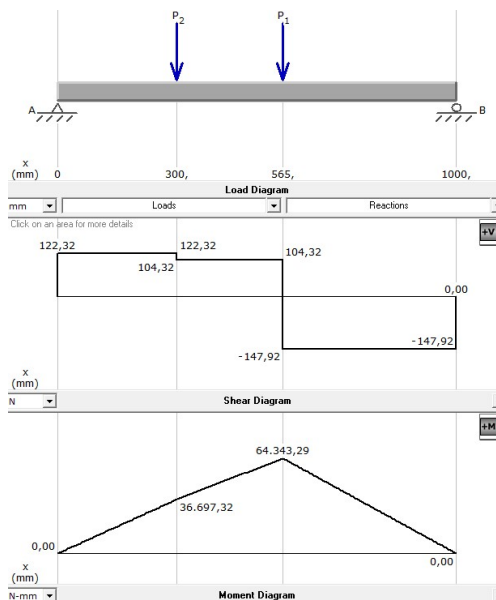


Figura 58 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “C2”

X Axis Properties			
Elastic Modulus	E	40.000,0000	psi
From bottom to centroid	y (bot)	20,0000	mm
From centroid to top	y (top)	20,0000	mm
Area of shape	A	231,0000	mm ²
Moment of Inertia	I _x	57.153,2500	mm ⁴
Section Modulus	S _x	2.857,6625	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	2.857,6625	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	2.857,6625	mm ³
Radius of Gyration	r _x	15,7295	mm
Plastic Modulus	Z _x	3.336,7500	mm ³
Shape Factor		1,1677	
From bottom to plastic n.a.	y _p (bot)	20,0000	mm
From plastic n.a. to top	y _p (top)	20,0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	114.306,5000	mm ⁴
Product of Inertia	I _{xy}	0,0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	57.153,2500	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	57.153,2500	mm ⁴
Angle from x axis to I _{max} axis	B	0,0000	degrees
		Clockwise	

Figura 59 Resultados de análisis de esfuerzos en "C2"

Utilizando el catálogo de perfiles angulares se selecciona un tubo cuadrado de las siguientes características.

Tipo de perfil: cuadrado

Dimensiones: 40x40x3 mm

Módulo de inercia: 2,74 cm³

Sección: 2,25 cm²

Radio mínimo de giro: 1,56 cm

- Diseño de los travesaños "C3"

Este travesaño soporta las reacciones de los travesaños L9, L10, L16, L17, L4, L8 y el tanque de decantación. Las cargas que soporta son: 12 N ubicada a 13 mm sobre el extremo del travesaño de 1200 mm de largo, 18 N ubicada a 213 mm, 84,12 N ubicada a 252 mm, 147,72 N ubicada a 471 mm, 73,86 N ubicada a 705,5 mm, 23,85 N ubicada a 901 mm, 23,85 N ubicada a 1154 mm respectivamente. Con una sección cuadrada de 40x40x1.5, elaborado en acero inoxidable 316 con un límite de fluencia de 40 kpsi. Estos datos son introducidos en el programa MDSoids 2.6 el cual genera el diagrama de fuerzas cortantes, de momentos cortantes.

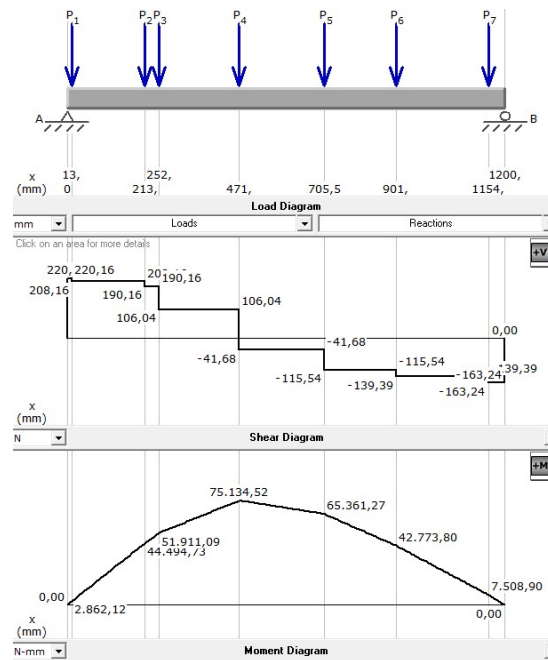


Figura 60 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en “C3”

X Axis Properties			
Elastic Modulus	E	40.000.0000	psi
From bottom to centroid	y (bot)	20.0000	mm
From centroid to top	y (top)	20.0000	mm
Area of shape	A	231.0000	mm ²
Moment of Inertia	I _x	57.153.2500	mm ⁴
Section Modulus	S _x	2.857.6625	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	2.857.6625	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	2.857.6625	mm ³
Radius of Gyration	r _x	15,7295	mm
Plastic Modulus	Z _x	3.336.7500	mm ³
Shape Factor		1,1677	
From bottom to plastic n.a.	y _p (bot)	20.0000	mm
From plastic n.a. to top	y _p (top)	20.0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	114.306.5000	mm ⁴
Product of Inertia	I _{xy}	0.0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	57.153.2500	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	57.153.2500	mm ⁴
Angle from x axis to I _{max} axis	B	0,0000	degrees
		Clockwise	

Figura 61 Resultados de análisis de esfuerzos en “C3”

Utilizando el catálogo de perfiles angulares se selecciona un perfil de las siguientes características.

Tipo de perfil: cuadrado

Dimensiones: 40x40x3 mm

Módulo de inercia: 2,74 cm³

Sección: 2,25 cm²

Radio mínimo de giro: 1,56 cm

- Diseño del travesaño "C4"

El travesaño soporta cargas: 23,85 N ubicada sobre el extremo del travesaño de 1000 mm, 33,26 N ubicada a 650 mm, 33,26 N ubicada a 877 mm, 252,24 N ubicada a 527 mm, respectivamente. Con una sección cuadrada de 40x40x1.5 mm, elaborado en acero inoxidable 316 con un límite de fluencia de 40 kpsi. Estos datos se introducen en el programa MDSoids 2.6 el cual genera el diagrama de fuerzas cortantes, de momentos cortantes.

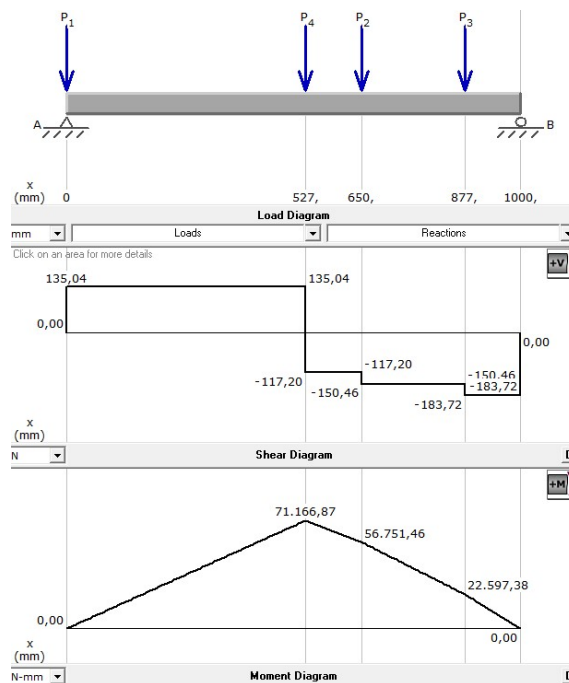


Figura 62 Cuerpo libre, esfuerzos y momentos flectores en "C4"

Y Axis Properties			
Elastic Modulus	E	40.000.0000	psi
From left to centroid	z (left)	20.0000	mm
From centroid to right	z (right)	20.0000	mm
Area of shape	A	231.0000	mm ²
Moment of Inertia	I _y	57.153.2500	mm ⁴
Section Modulus	S _y	2.857.6625	mm ³
Section Modulus (left)	S (left)	2.857.6625	mm ³
Section Modulus (right)	S (right)	2.857.6625	mm ³
Radius of Gyration	r _y	15.7295	mm
Plastic Modulus	Z _y	3.336.7500	mm ³
Shape Factor		1.1677	
From left to plastic n.a.	z _p (left)	20.0000	mm
From plastic n.a. to right	z _p (right)	20.0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	114.306.5000	mm ⁴
Product of Inertia	I _{yz}	0.0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	57.153.2500	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	57.153.2500	mm ⁴
Angle from y axis to I _{max} axis	B	90.0000	degrees
		Clockwise	

Figura 63 Resultados de análisis de esfuerzos en "C4"

Utilizando el catálogo de perfiles angulares de lados iguales se selecciona un perfil tipo tubo cuadrado más cercano a las principales propiedades y dimensiones calculadas por el programa.

Tipo de perfil: cuadrado

Dimensiones: 40x40x3 mm

Módulo de inercia: 2,74 cm³

Sección: 2,25 cm²

Radio mínimo de giro: 1,56 cm

3.4. Diseño térmico

El aislamiento térmico no elimina la transferencia de calor, simplemente la reduce. Mientras mayor es el espesor del aislamiento, menor es la transferencia de calor, con un consecuente incremento en el costo de implementación del material aislante. Es así que la determinación del espesor óptimo de aislamiento requiere un análisis de la transferencia de calor de la superficie aislada.

El cálculo para predecir las pérdidas de calor y las temperaturas superficiales de los tanques, se basan en la consideración de que la estructura y densidad del sistema aislante es uniforme en las paredes del tanque. Es preciso destacar la estructura cilíndrica de los tanques como forma básica para los cálculos de la pérdida de calor y la temperatura superficial. En estructuras cilíndricas de hasta 609 mm de diámetro nominal, se emplean las siguientes relaciones (Yunus A. Cengel, 2011)

3.4.1. Cálculo del factor diseño del tanque reactor

El factor de diseño es determinante al momento de realizar el análisis de transferencia de calor sobre el perímetro total del tanque. Al considerar su área integral en relación con el área del cuerpo del tanque, para lo cual se emplean las siguientes ecuaciones, a partir de las dimensiones internas del tanque como se muestra en la Figura 64.

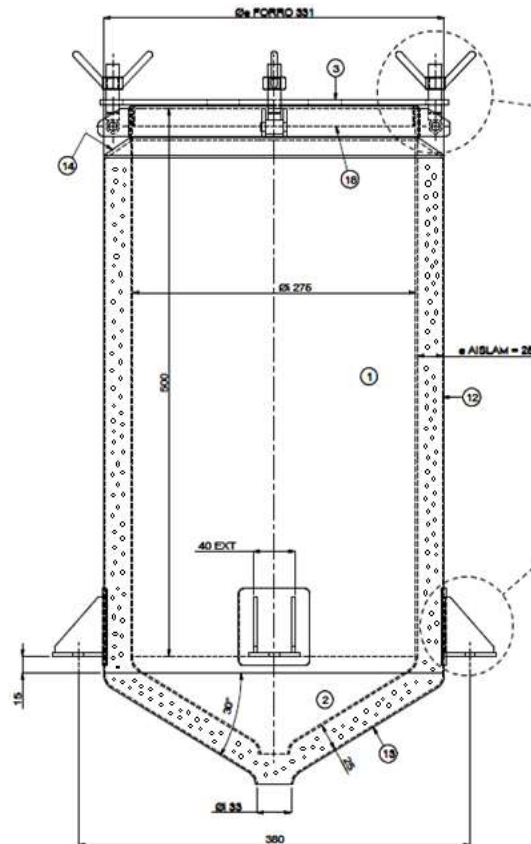


Figura 64 Dimensiones internas del tanque reactor.

El área del cuerpo cilíndrico es calculada según la Ecuación 44.

$$A_{lateral} = \pi * D * L$$

Ecuación 44 Área lateral del cilindro

Donde:

D: diámetro interno del tanque [mm] (275 mm).

L: longitud característica [mm] (500 mm).

$$A_{lateral} = \pi * 275 * 500 = 0,422 \text{ m}^2$$

El área de la tapa del tanque es calculada acorde a la Ecuación 45.

$$A_{tapa} = \pi * \frac{D^2}{4}$$

Ecuación 45 Área de la tapa del tanque

Donde:

D: Diámetro interno de la tapa [mm] (275 mm)

$$A_{tapa} = \pi * \frac{275^2}{4} = 0,06 \text{ m}^2$$

El área de la base cónica es calculada por la Ecuación 46.

$$A_{base} = \pi * hi^2 - \frac{\pi * hi^2 * \beta}{180}$$

Ecuación 46 Área de la base conica

Donde:

hi: radio que conforma el cono [m] (0,16 m)

β : ángulo extraído de la placa circular que forma el cono [grados] (48°)

$$A_{base} = \pi * 0,16 - \frac{\pi * 0,16 * 48^\circ}{180^\circ} = 0,06 \text{ m}^2$$

El área total del cuerpo del tanque se establece con la Ecuación 47.

$$A_{total} = A_{lateral} + A_{tapa} + A_{base}$$

Ecuación 47 Área total del tanque cilindrico

Donde:

$A_{lateral}$: Área de las paredes laterales [m²] (0,42 m²)

A_{tapa} : Área interna de la tapa del tanque [m²] (0,06 m²)

A_{base} : Área de la base cónica [m²] (0,06 m²)

$$A_{total} = 0,42 + 0,06 + 0,06 = 0,55 \text{ m}^2$$

El factor de diseño se establece en la Ecuación 48.

$$f_d = \frac{A_{total}}{A_{lateral}}$$

Ecuación 48 Factor de diseño para análisis termico

Donde:

A_{total} : área total del tanque reactor [m^2] (0,55 m^2)

$A_{lateral}$: área del cuerpo cilíndrico del tanque [m^2] (0,42 m^2)

$$f_d = \frac{0,55}{0,42} = 1,3$$

3.4.2. Calor requerido para calentar el fluido dentro del tanque reactor

La energía requerida para calentar el fluido en el interior del tanque se define en la Ecuación 49:

$$E_{per} = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Ecuación 49 Energía interior requerida

Donde:

E_{per} : Energía para calentar el fluido durante el transcurso del tiempo [J]

m : masa del fluido almacenado en el tanque [kg] (28,09 kg)

C_p : Calor específico del fluido [J/kg $^{\circ}$ K] (2533 J/kg $^{\circ}$ K) (Huergas, 2010)

ΔT : Variación máxima admisible en la temperatura del fluido [$^{\circ}$ K] (38 $^{\circ}$ K)

T_{α} : Temperatura ambiente [$^{\circ}$ K] (17 $^{\circ}$ C o 290,15 $^{\circ}$ K)

T_{dis} : Temperatura de diseño [$^{\circ}$ K] (55 $^{\circ}$ C o 328,15 $^{\circ}$ K) (Huergas, 2010)

$$E_{per} = 28,09 \cdot 2533 \cdot 38 = 2,70 \cdot 10^6 J$$

El tiempo requerido para alcanzar esta energía, previo al inicio del proceso de transesterificación es de 30 minutos.

$$Q_{mad} = \frac{E_{per}}{t}$$

Ecuación 50 Calor desprendido desde el interior

Donde:

Q_{mad} : Calor máximo desprendido desde el interior [W]

E_{per} : Energía cedida al ambiente en el tiempo [J] (2,70x106 J)

t: Tiempo requerido para alcanzar la temperatura de proceso [s] (0.5 h o 1800 s) (Hurgas, 2010).

$$Q_{mad} = \frac{2,704 \times 10^6}{1800} = 1,50 \text{ KW}$$

a. Coeficiente de convección interno y externo del tanque reactor.

El tanque reactor pierde calor en dirección radial y axial, por lo que en el análisis de estos valores es necesario utilizar el factor de diseño calculado en el ítem 3.4.1, para analizar el tanque como una superficie única. Tomando en cuenta las condiciones del entorno, el fluido almacenado y los materiales del tanque. En condiciones de convección natural se usan las siguientes relaciones, según corresponda (Martínez, 1992). Es así que el número de Prandtl aplicado a un cilindro vertical es calculado con la Ecuación 51.

$$Pr = \frac{\mu_{fluido} * Cp_{fluido}}{K_{fluido}}$$

Ecuación 51 Número de Prandtl

Donde:

μ_{fluido} : Viscosidad dinámica a la temperatura de operación [kg/ms] (0,011kg/ms o 0,1089 poises)

Cp_{fluido} : Calor específico a temperatura de operación [J/kg°K] (2000 J/kg°K o 2000 m²/°Ks²) (Enom, 2007)

K_{fluido} : Conductividad térmica del fluido [W/m°K] (0,17 W/m°K)

$$Pr = \frac{0,011 * 2 \times 10^3}{0,17} = 128,12$$

El número de Grashof se calcula con la Ecuación 52.

$$Gr_x = \frac{g\beta(T_{\infty} - T_s)L^3}{\nu^2}$$

Ecuación 52 Número de Grashof

Donde:

g: Aceleración de la gravedad [m/s²] (9,81 m/s²)

β: Coeficiente de expansión térmica [°K⁻¹] (0,00079 °K⁻¹)

T_s: Temperatura de la superficie [°K] (17°C o 290,15°K)

T_∞: Temperatura de operación [°K] (55°C o 328,15°K) (Huergas, 2010)

L: Longitud característica [m] (0,5 m)

v: Viscosidad cinemática [m²/s] (1,25x10⁻⁵ m²/s o 0,125 stokes).

$$Gr_x = \frac{9,81 * 0,00079 * (328,15 - 290,15)(0,5)^3}{(1,25x10^{-5})^2} = 2,34x10^8$$

El número de Rayleigh se define según la Ecuación 53.

$$Ra_x = Gr_x Pr$$

Ecuación 53 Número de Rayleigh

Donde:

Gr_x: Número de Grashof de un punto "x" de la superficie (2,34x10⁸)

Pr: es el número de Prandtl (128,12)

$$Ra_x = 2,34x10^8 * 128,12 = 2,99x10^{10}$$

La verificación de la relación entre diámetro y altura del tanque en relación al número de Grashof se determina con la Ecuación 54.

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_x^{0,25}}$$

Ecuación 54 Relación de proporción, diámetro altura

Donde:

D: es el diámetro [mm] (275 mm)

L: es la longitud característica [mm] (500 mm)

Gr_x: número de Grashof asociado a la superficie (2,34x10⁸)

$$\frac{275}{500} \geq \frac{35}{(2,34 \times 10^8)^{0,25}}$$

$$0,55 \geq 0,28$$

El cálculo del número de Nusselt es determinado con la Ecuación 55.

$$Nu^{1/2} = 0,83 + \frac{0,39Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,49}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{6/27}}$$

Ecuación 55 Número de Nusselt

Donde:

Pr: es el número de Prandtl (128,12)

Ra: es el número de Rayleigh ($2,99 \times 10^{10}$)

$$Nu \left(0,83 + \frac{0,39(2,99 \times 10^{10})^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,49}{128,12}\right)^{9/16}\right]^{6/27}} \right)^2 = 492,43$$

El coeficiente de convección interno (h_1) es calcula en la Ecuación 56.

$$Nu = \frac{hL}{K}$$

Ecuación 56 Coeficiente de convección interno

Donde:

Nu: es el número de Nusselt (492,43)

K: Conductividad térmica del fluido [$W/m^{\circ}K$] ($0,17 W/m^{\circ}K$ o $0,17 mkg/^{\circ}Ks^3$)

L: longitud característica vertical [m] (0,5 m)

$$h_1 = \frac{Nu * K}{L} = \frac{492,431 * 0,17}{0,5} = 167,43 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

El coeficiente de convección externo (h_2) es calcula en la Ecuación 57.

$$h_2 = 2,8 + 3V_{wind}$$

Ecuación 57 Coeficiente de convección externo

Donde:

V_{wind} : Velocidad del viento [m/s] (0,5 m/s)

$$h_2 = 2,8 + 3(0,5) = 4,3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

b. Calor perdido por las paredes del reactor sin aislamiento térmico

En el cálculo del calor perdido en dirección radial se consideran tres resistencias para el flujo de calor, en la Figura 65, se observa el rango de temperaturas según las posiciones de los puntos de referencia y la Figura 66 muestra la analogía eléctrica a la transferencia de calor.

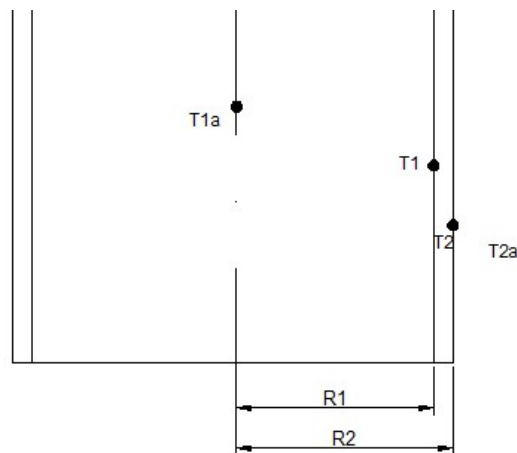


Figura 65 Corte longitudinal del tanque reactor sin aislamiento

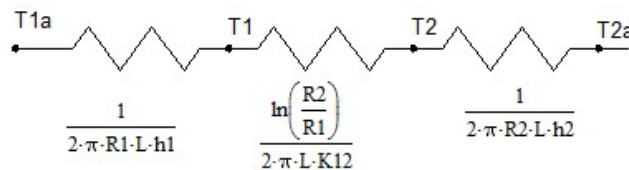


Figura 66 Transferencia de calor radial sin aislante, analogía eléctrica.

El calor que fluye desde el interior del tanque en sentido radial hacia el ambiente, está definido por la Ecuación 58. (Luiszczewski, 1999)

$$Q = \frac{T_{1\infty} - T_{2\infty}}{Res_0 + Res_1 + Res_2}$$

Ecuación 58 Calor desprendido desde el interior, sin aislante

Donde:

$T_{1\infty}$: Temperatura del fluido caliente (55°C o 328,15°K) (Huegas, 2010)

$T_{2\infty}$: Temperatura ambiente (17°C o 290,15°K)

$Res_0 = \frac{1}{2\pi R_1 L h_1}$: Resistencia a la convección en el interior del tanque

$Res_1 = \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_{1,2} L}$: Resistencia térmica de conducción del cuerpo del tanque

$Res_2 = \frac{1}{2\pi R_2 L h_2}$: Resistencia térmica de convección en el exterior

$$Q = \frac{T_{1\infty} - T_{4\infty}}{\frac{1}{2\pi R_1 L h_1} + \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_{1,2} L} + \frac{1}{2\pi R_2 L h_2}}$$

$$Q = \frac{328,15 - 290,15}{\frac{1}{2\pi(0,14)(0,5)(167,43)} + \frac{\ln\left(\frac{0,139}{0,138}\right)}{2\pi(16,3)(0,5)} + \frac{1}{2\pi(0,14)(0,5)(4,3)}}$$

$$Q = 69,52 \text{ W}$$

El calor total es el producto del calor perdido por las paredes cilíndricas verticales calculadas anteriormente por el factor de diseño descrito en el apartado 3.4.1, como lo describe la Ecuación 59:

$$Q_{total} = Q_{radial} \times f$$

Ecuación 59 Calor total radiado

Donde

f_d : es el factor de diseño (1,3)

Q_{radial} : calor disipado en dirección radial del tanque (69,52 W)

$$Q_{total} = 69,52 \times 1,3 = 90,38 \text{ W}$$

El cálculo de las temperaturas entre los límites de las paredes se obtiene aplicando la Ecuación 60 y la Ecuación 61:

$$T_1 = T_{int} - Q * \left(\frac{1}{2\pi R_1 h_{int} L} \right)$$

Ecuación 60 Temperatura en la pared interna

Donde:

T_{int} : temperatura en el interior del tanque [°K] (328,15°K) (Huergas, 2010)

Q: calor que fluye a través de la pared [W] (90,38 W)

R_1 : radio interior del tanque [m] (0,14 m)

h_{int} : coeficiente de transferencia interno [W/m²°K] (167,43 W/m²°K)

L: Longitud característica [m] (0,5 m)

$$T_1 = 328,15 - 90,377 * \left(\frac{1}{2\pi * 0,14 * 167,43 * 0,5} \right) = 326,9^\circ K$$

$$T_2 = T_1 - Q * \left(\frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_{12} L} \right)$$

Ecuación 61 Temperatura en la pared exterior, sin aislante

Donde:

T_1 : temperatura en la pared interna del tanque [°K] (328,15 °K)

Q: calor que fluye a través de la pared [W] (90,38 W)

R_1 : radio interior del tanque [m] (0,14 m)

R_2 : radio exterior de la pared interna del tanque [m] (0,14 m)

k_{12} : constante de conductividad del acero inoxidable [W/m°K] (Baummeiter & Avallone, 1985) (16,3 W/m°K)

L: Longitud característica [m] (0,5 m)

$$T_2 = 326,48 - 90,38 * \left(\frac{\ln\left(\frac{0,139}{0,138}\right)}{2\pi * 16,3 * 0,5} \right) = 326,89^\circ K$$

c. Calor perdido por las paredes del tanque con aislamiento térmico

En el cálculo del calor cedido en dirección radial se consideran cinco resistencias para el flujo de calor, en la Figura 67, se observa el rango de temperaturas según las posiciones de los puntos de referencia, la Figura 68 se muestra la analogía eléctrica a la transferencia de calor.

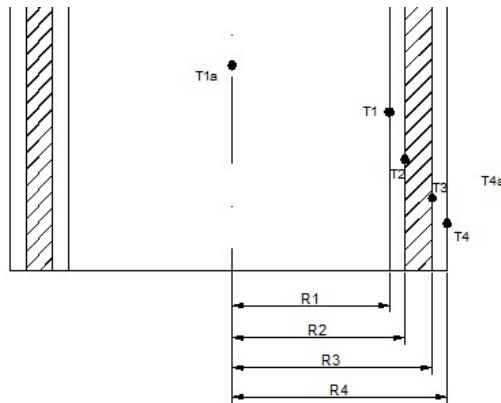


Figura 67 Corte longitudinal del tanque reactor aislado térmicamente.

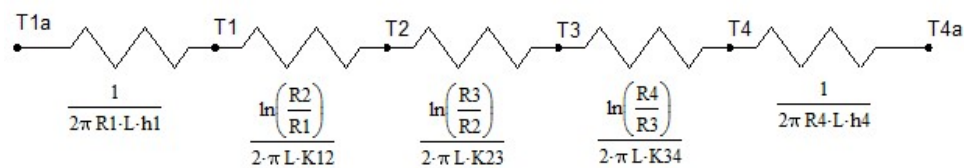


Figura 68 Transferencia de calor radial con aislante, analogía eléctrica.

El calor que fluye desde el interior del tanque en sentido radial hacia el ambiente está definido por la Ecuación 62. (Luiszczewski, 1999)

$$Q = \frac{T_{1\infty} - T_{4\infty}}{Res_0 + Res_1 + Res_2 + Res_3 + Res_4}$$

Ecuación 62 Calor desprendido desde el interior, con aislante

Donde:

$T_{1\infty}$: Temperatura del fluido caliente [°K] (55°C, 328,15°K) (Huegas, 2010)

$T_{4\infty}$: Temperatura ambiente [°K] (17°C o 290,15°K)

$Res_0 = \frac{1}{2\pi R_1 L h_1}$: Resistencia a la convección en el interior del tanque

$Res_1 = \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_{1,2} L}$: Resistencia térmica de conducción del cuerpo del tanque

$Res_2 = \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2\pi k_{2,3} L}$: Resistencia térmica de conducción del aislante.

$Res_3 = \frac{\ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right)}{2\pi k_{3,4} L}$: Resistencia térmica de conducción del recubrimiento.

$Res_4 = \frac{1}{2\pi R_4 L h_2}$: Resistencia térmica a la convección en el exterior.

$$Q = \frac{T_{1\infty} - T_{4\infty}}{\frac{1}{2\pi R_1 L h_1} + \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_{1,2} L} + \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2\pi k_{2,3} L} + \frac{\ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right)}{2\pi k_{3,4} L} + \frac{1}{2\pi R_4 L h_2}}$$

$$Q = \frac{328,15 - 290,15}{\frac{1}{2\pi(0,14)(0,5)(167,43)} + \frac{\ln\left(\frac{0,14}{0,14}\right)}{2\pi(16,3)(0,5)} + \frac{\ln\left(\frac{0,16}{0,14}\right)}{2\pi(0,04)(0,5)} + \frac{\ln\left(\frac{0,17}{0,16}\right)}{2\pi(16,3)(0,5)} + \frac{1}{2\pi(0,17)(0,5)(4,3)}}$$

$$Q = 21,38 \text{ W}$$

El calor total es el producto del calor perdido por las paredes cilíndricas verticales calculadas anteriormente por el factor de diseño descrito en el apartado 3.4.1, como lo describe la Ecuación 59:

Donde:

Q_{radial} : calor disipado en dirección radial del tanque [w] (21,38 W)

f_d : factor de diseño (1,3)

$$Q_{\text{total}} = 21,38 * 1,3 = 27,79 \text{ W}$$

El cálculo de las temperaturas entre los límites de la pared interna con la Ecuación 60:

Donde:

T_{int} : temperatura en el interior del tanque [°K] (328,15°K) (Hurgas, 2010)

Q : calor que fluye a través de la pared [W] (27,79 W)

R_1 : radio interior del tanque [m] (0,14 m)

h_{int} : coeficiente de transferencia interno [W/m²°K] (167,43 W/m²°K)

L : Longitud característica [m] (0,5 m)

$$T_1 = 328,15 - 27,79 * \left(\frac{1}{2\pi * 0,14 * 167,43 * 0,5} \right) = 327,77^\circ K$$

La temperatura en la pared que está en contacto con el aislante termino es calculado con la Ecuación 61

Donde:

T_1 : temperatura en la pared interna del tanque [$^{\circ}\text{K}$] (327,77 $^{\circ}\text{K}$)

Q : calor que fluye a través de la pared [W] (27,79 W)

R_1 : radio interior del tanque [m] (0,14 m)

R_2 : radio exterior de la pared interna del tanque [m] (0,14 m)

k_{12} : constante de conductividad, acero inoxidable [W/m $^{\circ}\text{K}$] (16,3 W/m $^{\circ}\text{K}$)

L : Longitud característica [m] (0,5 m)

$$T_2 = 327,77 - 27,79 * \left(\frac{\ln\left(\frac{0,139}{0,138}\right)}{2\pi * 16,3 * 0,5} \right) = 327,76^{\circ}\text{K}$$

La temperatura en la pared externa del aislante, e intermedia del tanque se calcula con la Ecuación 63.

$$T_3 = T_2 - Q * \left(\frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_3}\right)}{2\pi * k_{23} * L} \right)$$

Ecuación 63 Temperatura en medio del tanque

Donde:

T_2 : temperatura exterior de la pared interior del tanque [$^{\circ}\text{K}$] (327,76 $^{\circ}\text{K}$)

Q : calor que fluye a través de la pared [W] (27,79 W)

R_3 : radio exterior del material aislante [m] (0,16 m)

R_2 : radio exterior de la pared interna del tanque [m] (0,14 m)

k_{23} : constante de conductividad del aislante [W/m $^{\circ}\text{K}$] (0,04 W/m $^{\circ}\text{K}$)

L : Longitud característica [m] (0,5 m)

$$T_3 = 327,76 - 27,79 * \left(\frac{\ln\left(\frac{0,164}{0,139}\right)}{2\pi * 0,04 * 0,5} \right) = 291,18^{\circ}\text{K}$$

La temperatura en la pared exterior del tanque aislado se calcula con la Ecuación 64.

$$T_4 = T_3 - Q * \left(\frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_4}\right)}{2\pi * k_{34} * L} \right)$$

Ecuación 64 Temperatura en la pared exterior, tanque aislado

Donde:

T_3 : temperatura interior de la pared exterior del tanque [$^{\circ}K$] ($291,18^{\circ}K$)

Q : calor que fluye a través de la pared [W] ($27,79$ W)

R_3 : radio exterior del material aislante [m] ($0,16$ m)

R_4 : radio exterior de la pared externa del tanque [m] ($0,17$ m)

K_{34} : constante de conductividad, acero inoxidable [$W/m^{\circ}K$] ($16,3$ $W/m^{\circ}K$)

L : Longitud característica [m] ($0,5$ m)

$$T_4 = 291,18 - 27,79 * \left(\frac{\ln\left(\frac{0,164}{0,166}\right)}{2\pi * 16,3 * 0,5} \right) = 291,18^{\circ}K$$

d. Rendimiento térmico en el tanque reactor.

El rendimiento es la relación entre el calor absorbido por el fluido y el calor suministrado al sistema para conservarlo, como se indica en la Ecuación 66. El calor total suministrador se calcula de acuerdo a la Ecuación 65.

$$Q_s = Q_{mad} + Q_p$$

Ecuación 65 Calor suministrado al sistema

Donde:

Q_s : Es el calor total suministrado al sistema

Q_{mad} : Calor necesario dentro del tanque [W] ($1,50$ kW)

Q_p : Calor perdido por las paredes del tanque [W] ($27,79$ W)

$$Q_s = 1,50 + 27,79 = 1,53 \times 10^3 \text{ W}$$

$$N_{tc} = \frac{Q_{mad}}{Q_s} * 100 \%$$

Ecuación 66 Rendimiento total calculado

Donde:

Q_{mad} : calor máximo admisible para calentar el fluido [W] ($1,50 \times 10^3$ W)

Q_s : es el calor total suministrado al sistema [W] ($1,53 \times 10^3$ W)

N_{tc} : rendimiento total

$$N_{tc} = \frac{1,502 \times 10^3}{1,53 \times 10^3} * 100 \% = 98,18 \%$$

La Tabla 41 registra los resultados de los cálculos de transferencia de calor en el tanque reactor.

Tabla 41
Resultados del rendimiento térmico en el reactor.

Calor disipado por las paredes (q)	Espesor de las Paredes	Distribución de Temperaturas en las paredes
ANÁLISIS DEL TANQUE CON AISLANTE TÉRMICO		
q = 27,79 W	X ₁ = 0,0015 m X ₂ = 0,0025 m X ₃ = 0,0015 m	T _{int} = 328,15°K
		T ₁ = 327,77°K
		T ₂ = 327,76°K
		T ₃ = 291,17°K
		T ₄ = 291,18°K
CALOR SUMINISTRADO		
Calor necesario para calentar la Carga (Q _{mad})	Calor total suministrado al sistema (Q _s)	
1,50 kW	1,53 kW	
Rendimiento térmico de convección		
98,18 %		

3.4.3. Cálculo del factor de diseño del tanque de decantación.

En el cálculo del factor de diseño es preciso considerar su área integral en relación con el área del cuerpo del tanque, para lo cual se emplean las siguientes ecuaciones, a partir de las dimensiones internas del tanque como se muestra en la Figura 69.

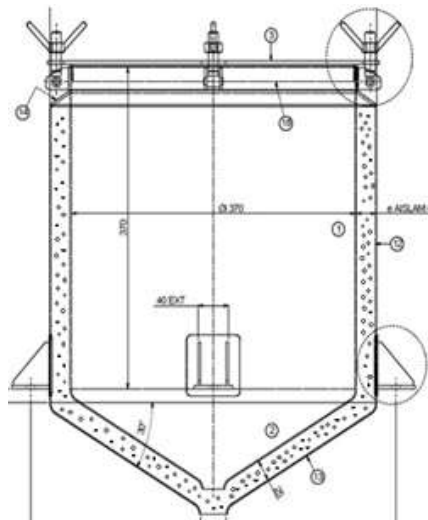


Figura 69 Dimensiones del tanque de decantación.

El área del cuerpo cilíndrico es calculada según la Ecuación 44.

Donde:

D: diámetro interno del tanque [mm] (370 mm).

L: longitud característica [mm] (370 mm).

$$A_{lateral} = \pi * 370 \text{ mm} * 370 \text{ mm} = 0,43 \text{ m}^2$$

El área de la tapa del tanque es calculada acorde a la Ecuación 45.

Donde:

D: Diámetro interno de la tapa [mm] (370 mm)

$$A_{tapa} = \pi * \frac{370^2}{4} = 0,11 \text{ m}^2$$

El área de la base cónica es calculada por la Ecuación 46.

Donde:

h: radio que conforma el cono [m] (0,21 m)

β : ángulo extraído de la placa circular que forma el cono [grados] (48°)

$$A_{base} = \pi * 0,21 \text{ mm}^2 - \frac{\pi * 0,21 \text{ mm}^2 * 48^\circ}{180^\circ} = 0,11 \text{ m}^2$$

Por lo que el área total del cuerpo del tanque se establece con la Ecuación 47.

Donde:

$A_{lateral}$: Área de las paredes laterales [m²] (0,43 m²)

A_{tapa} : Área interna de la tapa del tanque [m²] (0,11 m²)

A_{base} : Área de la base cónica [m²] (0,21 m²)

$$A_{total} = 0,43 \text{ m}^2 + 0,11 \text{ m}^2 + 0,21 \text{ m}^2 = 0,64 \text{ m}^2$$

El factor de diseño se establece en la Ecuación 48.

Donde:

A_{total} : área total del tanque reactor [m²] (0,64 m²)

$A_{lateral}$: área del cuerpo cilíndrico del tanque [m²] (0,43 m²)

3.4.4. Calor requerido para mantener la temperatura en el tanque de decantación.

La energía requerida para mantener la temperatura del fluido en el interior del tanque se define en la Ecuación 49:

Donde:

E_{per} : Energía requerida el transcurso del tiempo [J]

m : masa del fluido almacenado en el tanque [kg] (40,29 kg)

C_p : Calor específico del fluido [J/kg°K] (2533 J/kg°K) (Huergas, 2010)

ΔT : Variación máxima admisible en la temperatura del fluido [°K] (38°K)

T_{α} : Temperatura ambiente [°K] (17°C o 290,15°K)

T_{dis} : Temperatura de diseño [°K] (55°C o 328,15°K) (Huergas, 2010)

$$E_{per} = 40,297 * 2533 * 38 = 3,88 * 10^6 J$$

Esta energía, debe ser alcanzada en un lapso de tiempo relativamente corto respecto del periodo de tiempo que dura el proceso de reposo del biodiésel, de acuerdo a la Ecuación 50

Donde:

Q_{mad} : Calor requerido en el interior del tanque aislado térmicamente [W]

E_{per} : Energía necesaria para mantener la temperatura en el tiempo [J] (3,88x10⁶ J)

t : Tiempo requerido para alcanzar la temperatura de decantación [s] (45 min., 2700 s). (Huergas, 2010)

$$Q_{mad} = \frac{3,879 * 10^6 J}{2700 s} = 1,44 kW$$

a. Coeficiente de convección interno y externo del tanque de decantación

El tanque de decantación pierde calor en dirección radial y axial, por lo que en el análisis de estos valores es necesario utilizar el factor de diseño calculado en el ítem 3.4.3, para analizar el tanque como una superficie única. Tomando en cuenta las condiciones del entorno, el fluido almacenado y los materiales del tanque. En condiciones de convección natural se usan las siguientes relaciones, según corresponda (Martínez, 1992). Es así que el número de Prandtl aplicado a un cilindro vertical es calculado con la Ecuación 51.

Donde:

μ_{fluido} : viscosidad dinámica del fluido a la temperatura de operación [kg/ms] ($7,68 \times 10^{-3}$ kg/ms o 0,0768 poise)

$C_{p\text{fluido}}$: Calor específico del fluido a temperatura de operación [J/kg°K] (2000 J/kg°K) (Enom, 2007)

K_{fluido} : Conductividad térmica del fluido [W/m°K] (0,17 W/m°K)

$$Pr = \frac{7,68 \times 10^{-3} * 2000}{0,17} = 90,35$$

El número de Grashof se calcula con la Ecuación 52

Donde:

g: Aceleración de la gravedad [m/s²] (9,81 m/s²)

β : Coeficiente de expansión térmica [°K⁻¹] (0,00079 °K⁻¹)

T_s : Temperatura de la superficie (fría) [°K] (17°C o 290,15°K)

T_∞ : Temperatura de operación (caliente) [°K] (55°C o 328,15°K) (Huergas, 2010)

L: Longitud característica [mm] (370 mm)

ν : Viscosidad cinemática [m²/s] ($1,25 \times 10^{-6}$ m²/s o 0,0125 stokes).

$$Gr_x = \frac{9,81 * 0,00079 * (328,15 - 290,15)(0,37)^3}{(1,25 \times 10^{-5})^2} = 9,48 \times 10^9$$

El número de Rayleigh se define según la Ecuación 53

Donde:

Gr_x : es el número de Grashof de la superficie ($9,48 \times 10^9$)

Pr : es el número de Prandtl (90,35)

$$Ra_x = 9,48 \times 10^9 * 90,35 = 8,57 \times 10^{11}$$

La verificación de las características de diseño se realiza aplicando la Ecuación 54, para un cilindro vertical:

Donde:

D : es el diámetro [mm] (370 mm)

L : es la longitud característica [mm] (370 mm)

Gr_x : es el número de Grashof de la superficie ($9,48 \times 10^9$)

$$\frac{370}{370} \geq \frac{35}{(9,483 \times 10^9)^{0,25}}$$

$$1 \geq 0,11$$

El número de Nusselt se calcula con la Ecuación 55

Donde:

Pr : es el número de Prandtl (90,35)

Ra : es el número de Rayleigh ($8,56 \times 10^{11}$)

$$Nu = \left(0,825 + \frac{0,387(8,568 \times 10^{11})^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{90,353} \right)^{9/16} \right]^{6/2}} \right)^2 = 1,45 \times 10^3$$

El coeficiente de convección (h_1) se calcula a partir de la Ecuación 56

Donde:

K: Conductividad térmica del fluido (0,17 W/m°K)

L: longitud característica vertical [mm] (370 mm)

$$h_1 = \frac{Nu * K}{L} = \frac{1,452 \times 10^3 * 0,17}{0,37} = 667,25 \frac{W}{m^2 K}$$

El coeficiente de convección externo (h_2) se calcula de la Ecuación 57.

Donde:

V_{wind} : Velocidad del viento [m/s] (0,5 m/s)

$$h_2 = 2,8 + 3(0,5) = 4,3 \frac{W}{m^2 K}$$

b. Calor perdido por las paredes del tanque de decantación sin aislamiento térmico

En el cálculo del calor cedido en dirección radial se consideran tres resistencias para el flujo de calor, en la Figura 70, se observa el rango de temperaturas según las posiciones de los puntos de referencia, mientras que la Figura 71 se muestra la analogía eléctrica a la transferencia de calor.

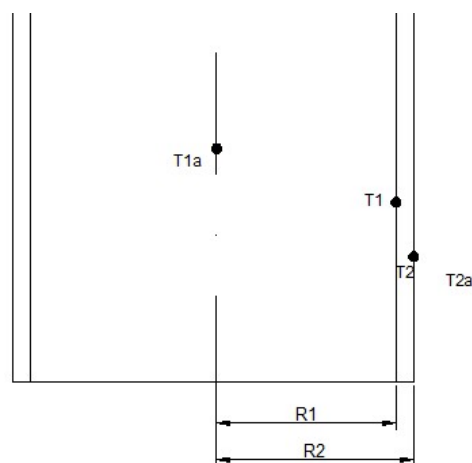


Figura 70 Corte lateral del tanque de decantación sin aislamiento

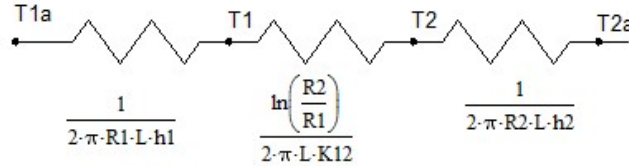


Figura 71 Trasferencia de calor radial sin aislante, analogía eléctrica.

El calor que fluye desde el interior del tanque en sentido radial hacia el ambiente está definido por la Ecuación 58. (Luiszczewski, 1999)

Donde:

$T_{1\infty}$: Temperatura del fluido [$^{\circ}\text{K}$] (55°C o $328,15^{\circ}\text{K}$) (Huergas, 2010)

$T_{2\infty}$: Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{K}$] (17°C o $290,15^{\circ}\text{K}$)

$Res_0 = \frac{1}{2\pi R_1 L h_1}$: Resistencia a la convección en el interior del tanque

$Res_1 = \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_{1,2} L}$: Resistencia térmica de conducción del cuerpo del tanque

$Res_2 = \frac{1}{2\pi R_2 L h_2}$: Resistencia térmica a la convección en el exterior.

$$Q = \frac{328,15 - 290,15}{\frac{1}{2\pi(0,19)(0,37)(667,25)} + \frac{\ln\left(\frac{0,187}{0,185}\right)}{2\pi(16,3)(0,37)} + \frac{1}{2\pi(0,19)(0,37)(4,3)}}$$

$$Q = 70,36 \text{ W}$$

El calor total es el producto del calor perdido por las paredes cilíndricas verticales calculadas anteriormente por el factor de diseño descrito en el apartado 3.4.3, como lo describe la Ecuación 59:

Donde

f_d : es el factor de diseño (1,5)

Q_{radial} : calor disipado en dirección radial del tanque [W] (70,36 W)

$$Q_{\text{total}} = 70,36 \times 1,5 = 105,54 \text{ W}$$

El cálculo de las temperaturas entre los límites de las paredes se obtiene aplicando la Ecuación 60:

Donde:

T_{int} : temperatura en el interior del tanque [$^{\circ}K$] (328,15 $^{\circ}K$) (Huergas, 2010)

Q : calor que fluye a través de la pared [W] (105,54 W)

R_1 : radio interior del tanque [m] (0,19 m)

h_{int} : coeficiente de transferencia de calor interno [$W/m^2^{\circ}K$] (667,25 $W/m^2^{\circ}K$)

L : longitud característica [m] (0,37 m)

$$T_1 = 328,15 - 105,54 * \left(\frac{1}{2\pi * 0,19 * 667,25 * 0,37} \right) = 327,78^{\circ}K$$

La temperatura en la pared exterior del tanque sin aislamiento se calcula con la Ecuación 61.

Donde:

T_1 : temperatura en la pared interna [$^{\circ}K$] (327,78 $^{\circ}K$) (Huergas, 2010)

Q : calor que fluye a través de la pared [W] (105,54 W)

R_1 : radio interior del tanque [m] (0,19 m)

R_2 : radio exterior de la pared interna del tanque [m] (0,19 m)

k_{12} : constante de conductividad del acero inox. [$W/m^{\circ}K$] (16,3 $W/m^{\circ}K$)

L : Longitud característica [m] (0,37 m)

$$T_2 = 327,78 - 105,54 * \left(\frac{\ln\left(\frac{0,187}{0,185}\right)}{2\pi * 16,3 * 0,37} \right) = 327,76^{\circ}K$$

c. Calor perdido del tanque aislado térmicamente

En el cálculo del calor cedido en dirección radial, se consideran como analogía eléctrica cinco resistencias para el flujo de calor, en la Figura 72, se observa el rango de temperaturas según las posiciones de los puntos de referencia y en la Figura 73 se muestra la analogía eléctrica de la transferencia de calor.

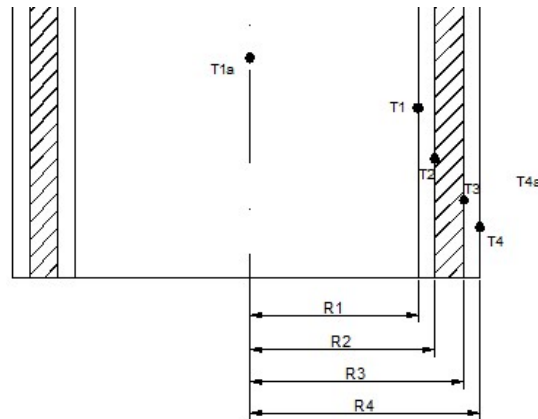


Figura 72 Corte lateral del tanque decantador aislado térmicamente.

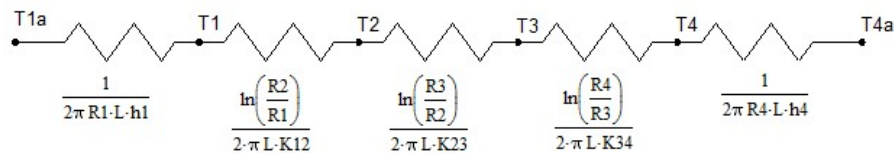


Figura 73 Transferencia de calor radial, analogía eléctrica.

El calor que fluye desde el interior del tanque en sentido radial hacia el ambiente está definido por la Ecuación 62. (Luiszczewski, 1999)

Donde:

$T_{1\infty}$: Temperatura del fluido [$^{\circ}\text{K}$] (55°C o $328,15^{\circ}\text{K}$) (Huergas, 2010)

$T_{4\infty}$: Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{K}$] (17°C o $290,15^{\circ}\text{K}$)

$Res_0 = \frac{1}{2\pi R_1 L h_1}$: Resistencia a la convección en el interior del tanque

$Res_1 = \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_{1,2} L}$: Resistencia térmica de conducción del cuerpo del tanque

$Res_2 = \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2\pi k_{2,3} L}$: Resistencia térmica de conducción del aislante.

$Res_3 = \frac{\ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right)}{2\pi k_{3,4} L}$: Resistencia térmica de conducción del recubrimiento.

$Res_4 = \frac{1}{2\pi R_4 L h_2}$: Resistencia térmica a la convección en el exterior.

$$Q = \frac{328,15^{\circ}\text{K} - 290,15^{\circ}\text{K}}{\frac{1}{2\pi(0,185)(0,37)(667,251)} + \frac{\ln\left(\frac{0,187}{0,185}\right)}{2\pi(16,3)(0,37)} + \frac{\ln\left(\frac{0,211}{0,187}\right)}{2\pi(0,04)(0,37)} + \frac{\ln\left(\frac{0,213}{0,211}\right)}{2\pi(16,3)(0,37)} + \frac{1}{2\pi(0,213)(0,37)(4,3)}}$$

$$Q = 20,81 \text{ W}$$

El calor total es el producto del calor perdido por las paredes cilíndricas verticales calculadas anteriormente por el factor de diseño descrito en el apartado 3.4.3, como lo describe la Ecuación 59:

Donde:

Q_{radial} : calor disipado en dirección radial del tanque [w] (20,81 W)

f_d : factor de diseño (1,5)

$$Q_{\text{total}} = 20,812 * 1,5 = 31,22 \text{ W}$$

El cálculo de las temperaturas entre los límites de las paredes se obtiene aplicando la Ecuación 60:

Donde:

T_{int} : temperatura en el interior del tanque [°K] (328,15°K) (Huergas, 2010)

Q : calor que fluye a través de la pared [W] (31,22 W)

R_1 : radio interior del tanque [m] (0,19 m)

h_{int} : coeficiente de transferencia de calor interno [W/m²°K] (667,25 W/m²°K)

L : Longitud característica [m] (0,37 m)

$$T_1 = 328,15 - 31,217 * \left(\frac{1}{2\pi * 0,185 * 667,251 * 0,37} \right) = 328,041 \text{ K}$$

La temperatura en la pared interior del tanque que entra en contacto con el aislante térmico se calcula con la Ecuación 63.

Donde:

T_1 : temperatura en la pared interna del tanque [°K] (328,04 °K)

Q : calor que fluye a través de la pared [W] (31,22 W)

R_1 : radio interior del tanque [m] (0,19 m)

R_2 : radio exterior de la pared interna del tanque [m] (0,19 m)

k_{12} : constante de conductividad del acero inoxidable [W/m°K] (16,3 W/m°K)

L: Longitud característica [m] (0,37 m)

$$T_2 = 328,04 - 31,22 * \left(\frac{\ln\left(\frac{0,187}{0,185}\right)}{2\pi * 16,3 * 0,37} \right) = 328,04^\circ K$$

La temperatura de la pared intermedia entre el aislante y la pared externa es calculada con la Ecuación 64.

Donde:

T₂: temperatura exterior de la pared interior del tanque (328,04°K)

Q: calor que fluye a través de la pared (31,22 W)

R₃: radio exterior del material aislante (0,21 m)

R₂: radio exterior de la pared interna del tanque (0,187 m)

K₂₃: constante de conductividad del material aislante (0,04 W/m°K)

L: Longitud característica (0,37 m)

$$T_3 = 328,04 - 31,22 * \left(\frac{\ln\left(\frac{0,187}{0,211}\right)}{2\pi * 0,04 * 0,37} \right) = 285,81^\circ K$$

La temperatura en la pared exterior del tanque y que entra en contacto con el ambiente, se calcula con la Ecuación 64

Donde:

T₃: temperatura interior de la pared exterior del tanque (285,81°K)

Q: calor que fluye a través de la pared (31,22 W)

R₃: radio exterior del material aislante (0,21 m)

R₄: radio exterior de la pared externa del tanque (0,21 m)

K₃₄: constante de conductividad del acero inoxidable (16,3 W/m°K)

L: Longitud característica (0,37 m)

$$T_4 = 285,805 - 31,217 * \left(\frac{\ln\left(\frac{0,211}{0,213}\right)}{2\pi * 16,3 * 0,37} \right) = 285,81^\circ K$$

d. Rendimiento térmico en el tanque de decantación

Se define por la relación entre el calor absorbido por el fluido dentro del tanque reactor y el calor suministrado al sistema para conservar ese calor. El calor total suministrador por el sistema se calcula con la Ecuación 65.

Donde:

Q_s : Es el calor total suministrado al sistema

Q_{mad} : Calor máximo admisible para calentar el fluido (1,44 kW)

Q_p : Calor perdido por las paredes del tanque (31,22 W)

$$Q_s = 1437 + 31,217 = 1,47 \text{ kW}$$

El resultado del rendimiento teórico del aislante en la Ecuación 66 es:

$$N_{tc} = \frac{1437}{1,47} * 100 \% = 97,87 \%$$

Donde:

Q_{mad} : calor máximo admisible para calentar el fluido (1437 W)

Q_s : es el calor total suministrado al sistema (1,47 kW)

N_{tc} : rendimiento total

La Tabla 42 registra los resultados del rendimiento térmico en el tanque

Tabla 42
Resultado del rendimiento térmico en el decantador

Calor disipado por las paredes (q)	Espesor de las Paredes	Distribución de Temperaturas en las paredes
ANÁLISIS DEL TANQUE CON AISLANTE TÉRMICO		
$q = 31.22 \text{ W}$		$T_{int} = 328,15^\circ\text{K}$
	$X_1 = 0,0015 \text{ m}$	$T_1 = 328,04^\circ\text{K}$
	$X_2 = 0,0025 \text{ m}$	$T_2 = 328,04^\circ\text{K}$
	$X_3 = 0,0015 \text{ m}$	$T_3 = 285,81^\circ\text{K}$
		$T_4 = 285,81^\circ\text{K}$
		$T_a = 290,15^\circ\text{K}$
CALOR SUMINISTRADO		
Calor necesario para calentar la Carga (Q_{mad})		Calor total suministrado al sistema (Q_s)
1437 W		1,4 kW
Rendimiento térmico de convección		
97,87 %		

3.5. Diseño eléctrico y electrónico del sistema de control

El procesamiento de biodiésel a partir de aceite vegetal usado requiere un sistema de control semiautomático, que se encargue de cada uno de los procesos que involucran el tratamiento de biodiésel y que se han descrito en el apartado 2.8.

3.5.1. Diseño electrónico del sistema de control

Comprende la implementación de un micro controlador encargado del control del proceso de elaboración de biodiésel por su versatilidad, cantidad de entradas y salidas, bajo costo y capacidad de almacenamiento.

a. Micro-controlador PIC 16F877A

Este dispositivo se asemeja a una computadora de tamaño reducido, ya que posee memoria de programa, memoria RAM, memoria de datos, puertos de entrada o salida, temporizadores convertidores A/D y comparadores entre sus recursos más destacados. Cumpliendo las funciones de administrador de los procesos del circuito electrónico, con base en las instrucciones de programa realizadas en el lenguaje de programación Basic para microcontroladores PIC. La Figura 74 muestra la apariencia física del PIC16F877A y su distribución de pines.



Figura 74 Apariencia física y pines del PIC16F877A

Fuente: (Inc, 2014)

b. Software Microcode Studio

Es un ambiente integrado de desarrollo de programación con instrucciones simplificadas para PIC's, diseñado especialmente para microEngineering Labs, Inc., de libre adquisición. Para que los programas elaborados tengan una apariencia ordenada y faciliten la comprensión del mismo, la estructura básica de un programa hecho en Microcode Studio, consta de cuatro secciones como se muestra en la Figura 75 (Inc, 2014)

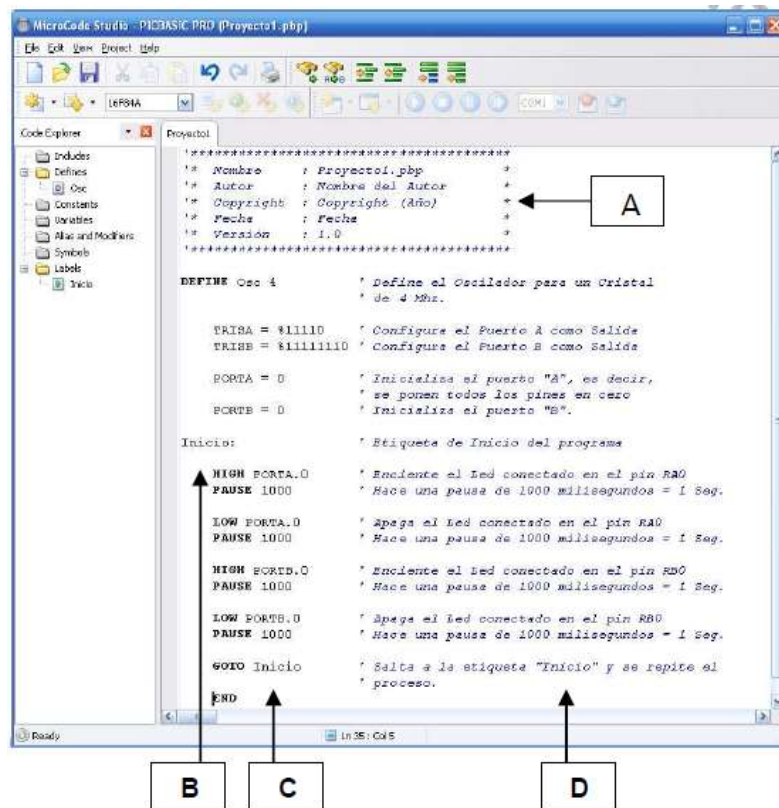


Figura 75 Estructura de un programa editado en Microcode Studio

Fuente: (Bolaños, 2009)

Sección A: Encabezado del programa, que contiene información básica o una breve descripción acerca del objetivo del programa y su aplicación en un determinado circuito electrónico.

Sección B: Empieza en la columna cero del editor de texto de Microcode Studio, en la que se pueden declarar las definiciones y las etiquetas de cada subrutina programada.

Sección C: Destinada para instrucciones de programa, separada de la columna cero del editor de texto por una tabulación.

Sección D: Destinada para realizar comentarios acerca de la función que estará cumpliendo una instrucción específica en el programa. El software necesario para el control del proceso de generación de biodiésel se adjunta como **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

c. Programador de PIC's

El software IC-Prog es un programa que permite la programación PIC's de diversas familias. Su pantalla principal presenta la información necesaria para programar el dispositivo. El área "código" contiene el programa compilado que será ejecutado por el micro controlador; el área "datos" contiene las tablas para cálculos e información sobre el autor del software y finalmente un área "configuración" que permite establecer parámetros de ejecución del dispositivo como se muestra en la Figura 76 (Bolaños, 2009)

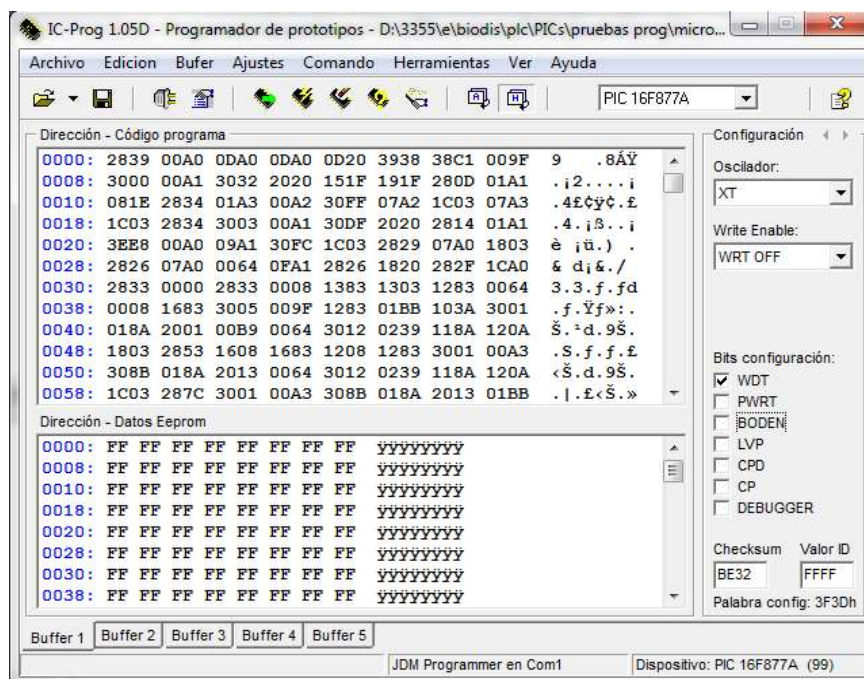


Figura 76 Entorno del software ICPROG.

Fuente: (Bolaños, 2009)

El hardware que se utiliza para programar PIC's por el puerto serial es de tipo JDM Programmer como se aprecia en la Figura 77.



Figura 77 Programador serial JDM

Fuente: (Beltran, 2011)

d. Software Proteus

El programa Proteus está conformado por dos aplicaciones: ARES e ISIS. Isis es usado para realizar esquemas de circuitos con casi todos los componentes electrónicos que se encuentran actualmente disponibles en el mercado, acompañado por una aplicación de simulación para comprobar la efectividad de un circuito determinado; permite cargar en el micro controlador los programas previamente compilados de Basic, según sea el tipo de lenguaje de programación.

La Figura 78 presenta la etapa de control del sistema de procesamiento de biodiésel, compuesto por el micro controlador, la representación de las entradas (pulsadores) y las salidas (válvulas y contactores) representados con diodos emisores de luz (LED's). La Figura 79 representa la etapa de potencia de la tarjeta de control aislada de la etapa de control con un opto acoplador MOC 3021 y un triac Q7010; de tal manera que cada salida del circuito de control que funciona con un voltaje de 5 voltios se acoplen con las electro-válvulas, motores y resistencia, que funcionan a 120 voltios de corriente alterna (Salinas Rojas, 2008). En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se representa el esquema completo de la tarjeta de control, el circuito impreso y la representación tridimensional de la tarjeta de control

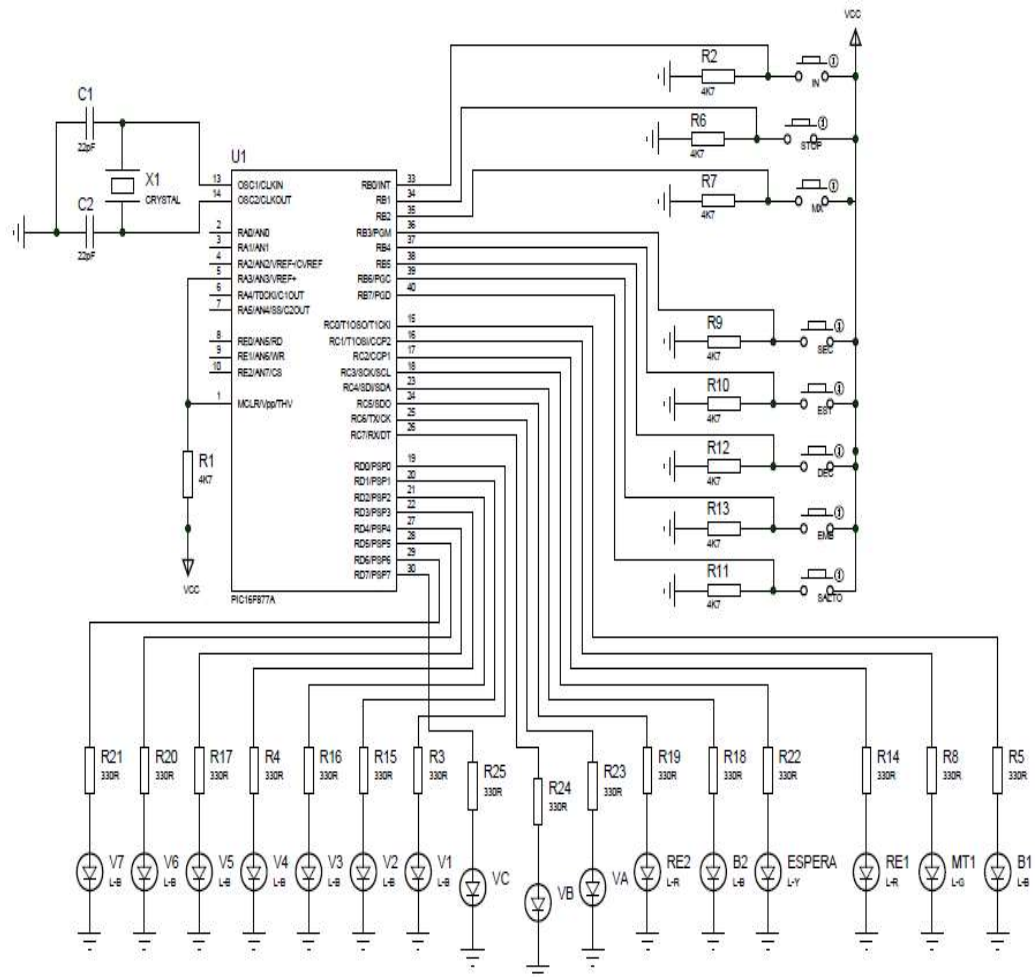


Figura 78 Etapa de control de proceso

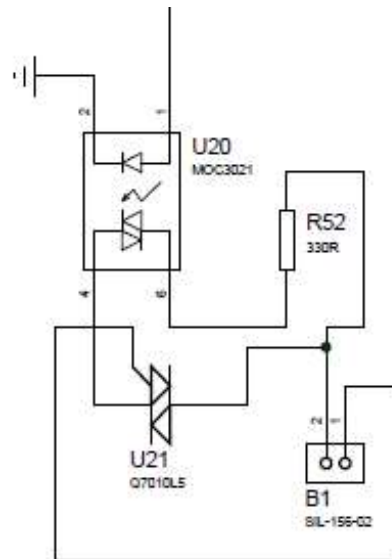


Figura 79 Etapa de potencia del proceso

e. Control electrónico de temperatura TC-72N

Control de temperatura electrónico que funciona con una termocupla tipo “K” con un rango de temperaturas de 0 a 400°C y un error de calibración del $\pm 15\%$ en temperatura máxima y $\pm 2,5\%$ en presentación de resultados, una histéresis del 0,2 % del total de la escala a la salida, un control proporcional de 1-3 % de la escala (FASTDOMAIN, 2001). La Figura 80 presenta la apariencia de un control de temperatura TC-72N.



Figura 80 Control de temperatura TC-72N

Fuente: (FASTDOMAIN, 2001)

En el sistema de control del micro reactor de biodiésel, el regulador de temperatura TC-72N está configurado para funcionar únicamente al activarse la salida que controla las resistencias eléctricas, de manera que no exista un consumo innecesario de corriente eléctrica dentro del panel de control, a lo largo del procesamiento del aceite vegetal usado en biodiésel.

f. Termocupla tipo “K”

La termocupla es el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Conformado por dos alambres de distinto material soldados en un extremo. Al aplicarle temperatura se genera un voltaje en el orden de los milivolts el cual varía con la temperatura. Este sensor se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300 °C. Que la hace funcionar en un rango de temperaturas de entre -180 y 1372 °C,

produciendo de esta manera un voltaje máximo de 54,8 mV. (Llc, 2008). La Figura 81 muestra la apariencia física de una termocupla tipo "K"



Figura 81 Termocupla tipo "K"

Fuente: (Llc, 2008)

3.5.2. Diagrama de secuencia del control electrónico

En el diagrama de la Figura 82 se expone la secuencia para la implementación del sistema de control para el procesamiento de aceite en biodiésel. El proceso se inicia con la ingesta de aceite usado al tanque reactor. A continuación se prepara la mezcla de catalizador y metanol en la proporción indicada por el test de titulación. Previo a la transesterificación se realiza un deshidratado del aceite. Luego del proceso de transesterificación se requiere un periodo de espera para eliminar la glicerina generada como residuo. El proceso de decantación se realiza en otro tanque a una temperatura constante de manera que la glicerina permanezca líquida y pueda ser extraída por decantación. El proceso de envasado previo a su utilización en diferentes aplicaciones es el paso final del proceso.

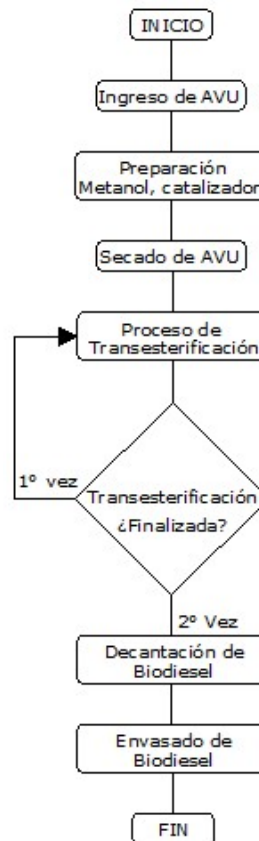


Figura 82 Diagrama de flujo del reactor de biodiésel

3.5.3. Diseño eléctrico de potencia

Involucra el sistema eléctrico de potencia, dimensionamiento del calibre de los cables, las fuentes de energía tanto de la tarjeta de control como de los actuadores sean estos: electro-válvulas, motores, elementos calefactores, bombas de recirculación.

a. Selección del calibre de los conductores

En la selección del calibre de los conductores que transportan corriente, se debe considerar: Que la capacidad de conducción de corriente de los conductores debe ser mayor o igual al valor nominal del dispositivo de protección de sobre corriente del circuito. Mientras que la caída de tensión en los conductores no debe sobrepasar el 5 % en la salida más lejana que alimente a cargas de fuerza, calefacción o alumbrado de acuerdo con la sección 110-14, inciso c) de la NOM-001-SEDE-2005.

- La corriente consumida por la bomba de recirculación principal se calcula de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$I = \frac{P}{V * \cos}$$

Ecuación 67 Corriente electrica de un motor

Donde:

P: es la potencia nominal de consumo de la bomba [W] (280 W)

V: es el voltaje [V] (120 v)

Cos σ : es el factor de potencia de la bomba (0,8)

$$I = \frac{280}{120 * 0,8} = 2,92 A$$

- La corriente consumida por la bomba secundaria se calcula de acuerdo a la Ecuación 67:

Donde:

P: es la potencia nominal de consumo de la bomba [W] (373 W)

V: es el voltaje [V] (120 v)

Cos σ : es el factor de potencia de la bomba (0,8)

$$I = \frac{373}{120 * 0,8} = 3,88 A$$

- La corriente consumida por el motor de mezclado de acuerdo a la Ecuación 67 es:

Donde:

P: potencia nominal de consumo del motor [W] (0,025 Hp o 18,642 W)

V: es el voltaje [V] (120 v)

Cos σ : es el factor de potencia de la bomba (0,8)

$$I = \frac{18,642}{120 * 0,8} = 0,19 A$$

- La corriente consumida por las dos resistencias calefactoras se calcula una a la vez ya que para todo el proceso se requiere una temperatura constante lo que genera un consumo similar de corriente en cada caso y se calcula de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$I_{R1} = \frac{P}{V}$$

Ecuación 68 Corriente electrica, resistencia

Donde:

P: es la potencia de consumo de la resistencia [W] (1500 W)

V: es el voltaje [V] (120 v)

$$I_{R1} = \frac{1500 W}{120 V} = 12,5 A$$

- Finalmente el consumo total de corriente se considera la suma de las corrientes de cada dispositivo que funcionan en los mismos lapsos de tiempo y en un caso critico se considera el funcionamiento unificado de todos los equipos por lo que la corriente consumida total se establece con la ecuación siguiente:

$$I_{total} = I_{B1} + I_{B2} + I_{Mt} + I_{R1}$$

Ecuación 69 Corriente total

Donde:

I_{B1}: Corriente de la bomba principal [A] (2,92 A)

I_{B2}: Corriente de la bomba de lavado [A] (3,88 A)

I_{Mt}: Corriente del motor de mezcla [A] (0,19 A)

I_{R1}: Corriente de la resistencia calefactora [A] (12,5 A)

$$I_{total} = 2,92 + 3,88 + 0,19 + 12,5 = 19,49 A$$

- Por lo descrito anteriormente, el consumo de corriente en el proceso de generación de biodiésel no sobrepasa los 100 A en cualquier punto del proceso, haciendo posible determinar el calibre del cable utilizado en el circuito de potencia de la Tabla 43. Que de acuerdo a los datos calculados anteriormente se selecciona un único conductor 12 AWG flexible que trabaja a una temperatura de 90°C para el circuito de control de potencia que consume 30 A en exceso, en cualquier periodo que dura el proceso de elaboración de biodiésel.

Tabla 43
Conductores aislados para 0 a 2000V nominales.

Tamaño o Designación		Temperatura nominal del conductor					
mm ²	AWG o kcmil	60°C	75°C	90°C	60°C	75°C	90°C
		COBRE			ALUMINIO		
0,824	18	-	-	14	-	-	-
1,31	16	-	-	18	-	-	-
2,08	14	20	20	25	-	-	-
3,31	12	25	25	30	-	-	-
5,26	10	30	35	40	-	-	-
8,37	8	40	50	55	-	-	-
13,3	6	55	65	75	40	50	60
21,2	4	70	85	95	55	65	76
26,7	3	85	100	110	65	75	85
33,6	2	95	115	130	75	90	100
42,4	1	110	130	150	85	100	115
53,5	1/0	125	150	170	100	120	135
67,4	2/0	145	175	195	115	135	150
85,0	3/0	165	200	225	130	155	175
107	4/0	195	230	260	150	180	205
53,5	1/0	125	150	170	100	120	135
67,4	2/0	145	175	195	115	135	150
85,0	3/0	165	200	225	130	155	175
107	4/0	195	230	260	150	180	205
127	250	215	255	290	170	205	230
152	300	240	285	320	190	230	255
177	350	260	310	350	210	250	280
203	400	280	335	380	225	270	305
253	500	320	380	450	260	310	350
304	600	355	420	475	285	340	385
355	700	385	460	520	310	375	420
380	750	400	475	535	320	385	435
405	800	410	490	555	330	395	450
458	900	435	520	585	355	425	480
507	1000	455	545	615	375	445	500
633	1250	495	590	665	405	485	545
760	1500	520	625	705	435	520	585
887	1750	545	650	735	455	545	615
1010	2000	560	665	750	470	560	630

A menos que se permita otra cosa específicamente en otro lugar de esta norma, la protección contra sobrecorriente de los conductores marcados con un asterisco (*), no debe superar 15 amperios para 2,08 mm² (14AWG); 20 A para 3,31 mm² (12AWG); y 30 A para 5,26 mm² (10AWG), todos de cobre

Fuente: NOM-001-SEDE-2005

b. Selección de las protecciones

El diseño de los sistemas de protección de las bombas, motor y resistencias calefactoras que son parte del proceso de generación de biodiésel se realiza en función de sus características nominales por lo que para las bombas de recirculación se establece contactor de 18 [A].

Para las resistencias calefactoras se dimensiona de acuerdo a la potencia nominal de cada una, estableciendo un contactor de 18 [A] individual. Para el motor de mezclado se considera únicamente un contactor a 18 [A]. Adicionalmente las dos bombas poseen un guardamotor 23 [A], todos gobernados por un disyuntor termomagnético de 63 [A] dimensionado acorde a la sumatoria de las corrientes de una bomba de recirculación y una resistencia que en la mayoría de los procesos requeridos en la producción de biodiésel funcionan a mismo tiempo.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

Comprende la construcción del micro reactor, incluyendo la puesta en funcionamiento del sistema electrónico de control, su circuito de potencia y los resultados de su operación.

4.1. Construcción e implementación de equipos mecánicos

La estructura del micro reactor fue diseñada en el capítulo anterior en función de los objetivos trazados. Partiendo de esto se construyen sus elementos constitutivos.

4.1.1. Bastidor de soporte de los tanques del micro reactor

La base metálica posee dos niveles; el nivel más bajo, soporta el peso de las bombas de recirculación, en el nivel intermedio descansan los tanques de reacción y de decantación, representando las mayores cargas aplicadas; en el nivel más alto, descansan el tanque de preparación de metóxido. Como se muestra en la Figura 83. Sus dimensiones generales son: 1 m de ancho, 1,2 metro de profundidad y 0,6 m de altura.



Figura 83 Estructura de la base metálica del Bastidor.

Cada tanque se sujeta a la estructura mediante cuatro pernos "M10" de acero inoxidable, de igual manera las bombas, motor de agitación y panel de control que quedan fijados con pernos y tuercas "M10" fijados a la estructura metálica Figura 84.



Figura 84 Pernos de sujeción utilizados.

La estructura total del bastidor está construida en acero inoxidable AISI 316 como se muestra en la Figura 85, En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**-2 se señalan las dimensiones específicas de esta estructura. Tiene una altura de 1,45 m, 1,2 m de profundidad y 1 metro de ancho.



Figura 85 Estructura metálica del bastidor

El tablero de control alberga al circuito electrónico de control y la etapa de potencia, localizado en la parte superior de la estructura metálica como se muestra en la Figura 86.



Figura 86 Tablero de control del micro reactor

4.1.2. Instalación del sistema Eléctrico

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se detalla el diagrama de conexiones eléctricas de control del micro reactor de procesamiento de biodiésel.

a. Conexión de los actuadores con el panel de control

Todos los conductores eléctricos que conectan las electroválvulas al tablero de control son de calibre 16 AWG flexible, guiados a través de espirales de cableado sujetas a la estructura con amarras plásticas como se parecía en la Figura 87, mientras de los conductores del motor, bombas y resistencias calefactoras de calibre 12 AWG flexible se sujetan a la estructura metálica.



Figura 87 Conexiones de los actuadores al tablero

b. Conexión de la termocupla tipo “K” al control de temperatura

Las termocuplas se conectan directamente al control de temperatura procurando no deformar el cable conector blindado que protege la señal del sensor como se indica la Figura 88.

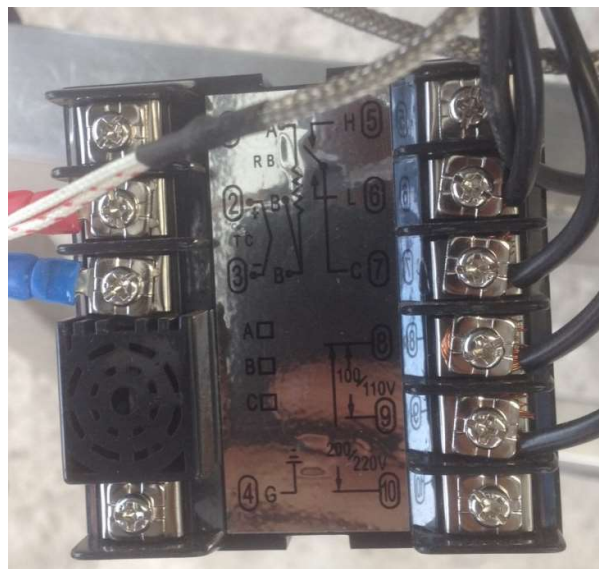


Figura 88 Conexiones eléctricas de las termocuplas.

c. Implementación del tablero de control

La botonera del tablero de control esta etiquetada en el orden en que se realiza el proceso de generación de biodiésel, es importante destacar que de ocurrir algún inconveniente con la ejecución del proceso, es posible reiniciar el sistema desde los micro-interruptores que se encuentran en el interior del tablero de control y son parte de la tarjeta de control, su ubicación se describe en la Figura 89 y Figura 90.



Figura 89 Panel de control del micro reactor.

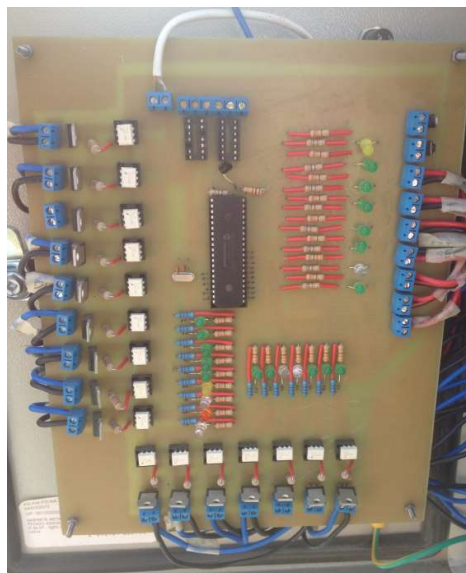


Figura 90 Tarjeta de control de proceso.

4.2. Operación del Micro reactor de biodiésel

El proceso requerido para procesar 25 litros de aceite vegetal reciclado en biodiésel, requiere seguir el procedimiento descrito en el manual de operación adjunto como **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Este apartado resume los resultados de aquellos procedimientos.

4.2.1. Pre tratamiento de aceite vegetal usado

En el proceso de acopio de aceite vegetal que realizan los administradores de locales de comida rápida, es común el uso de recipientes de 22 litros en que se comercializa el aceite de fritura. Por lo que su recepción se realiza en estos recipientes, como se observa en la Figura 91.



Figura 91 Recipiente de acopio, recepción.

El filtrado del aceite se efectúa manualmente con el uso de un filtro de papel de un recipiente a otro, calentándolo por periodos cortos de tiempo para reducir su viscosidad, recordando no agitarlos demasiado para que los lodos y otras partículas suspendidas se conserven en el fondo del tanque. Acumulando los residuos en un recipiente específico de manera que con el tiempo se decanten y se pueda extraer aceite, mientras que los residuos sólidos se destinan al compostaje o alimentación animal.

En la Figura 92 se presenta el filtrado manual del aceite vegetal reciclado controlando la presencia de lodos y otros sólidos suspendidos.



Figura 92 Filtrado del aceite reciclado

4.2.2. Secado del aceite vegetal

El secado del aceite reciclado se realiza como una etapa en el proceso de elaboración de biodiésel dentro del tanque reactor, en la Figura 93 se presenta el tanque reactor en el proceso de secado.



Figura 93 Reactor en el proceso de secado

4.2.3. Proceso de titulación

El determinar la acidez de un lote, mediante un proceso de titulación ácido base, garantiza la mejor utilización del catalizador de acuerdo a la teoría referida en este trabajo de investigación (Harold, Jiménez, & Charita, 2007). En la Figura 94 se presenta el resultado de la titulación de una muestra de aceite vegetal usado, indicando que se requiere 1 gramo de hidróxido de sodio por litro de aceite que se va a procesar; confirmando los parámetros necesarios que requiere el aceite para iniciar la transesterificación (Roldan Vilorio & Toledano, 2013).



Figura 94 Titulación ácido base

4.2.4. La transesterificación

Luego de finalizada la transesterificación se procede a extraer la glicerina, como residuo del proceso de elaboración de biodiésel, recordando que la cantidad aproximada de glicerina que se extrae es similar a la cantidad de metanol usado en la reacción. La Figura 95 presenta la glicerina extraída al procesar 25 litros de aceite usado, con 5 litros de metanol y 25 gramos de hidróxido de sodio. Es importante mencionar que la principal característica de la glicerina es su apariencia oscura y fluida. Extraída la glicerina, el contenido del tanque se considera como biodiésel y emulsión, esta última es una mezcla de biodiésel y agua que con el tiempo llega a separarse, siendo el agua la más pesada y biodiésel el más liviano.



Figura 95 Glicerina extraída de la transesterificación

4.2.5. Proceso de lavado

El lavado de biodiésel es un proceso opcional en la producción del combustible, sin embargo permite separar impurezas disueltas, que de otra manera podrían tardar en filtrarse. Este proceso, requiere un volumen de agua equivalente a la tercera parte del volumen del aceite procesado (8,3 litros para los 25 litros de aceite), se realiza con un atomizador manual para controlar la uniformidad del lavado por toda la superficie del biodiésel, el agua se separa, luego de un periodo de reposo mínimo de 24 horas. La Figura 96 presenta los residuos de agua eliminada del primer lavado.



Figura 96 Agua residual del primer lavado

Luego del drenado del agua del primer lavado se procede a repicar el lavado, con iguales periodos de espera, para el drenado de esta agua. En la Figura 97 se muestra el agua recolectada después del segundo lavado del biodiésel. Aclarando que entre el biodiésel y el agua se forma una emulsión, que se separa luego de transcurrido un periodo de reposo. Con cada lavado, el agua residual se aclara, corroborando la eliminación de impurezas.



Figura 97 Agua residual del segundo lavado

4.2.6. Embazado del biodiésel.

Antes de iniciar el embazado es preciso deshidratar el biodiésel elevando su temperatura interna hasta los 70°C para dejar que el agua en suspensión se evapore. El biodiésel debe agitarse levemente para mantener una temperatura constante en todo el fluido, dejarlo reposar hasta que la inercia térmica reduzca su temperatura a 38°C; drenar el agua residual del tanque por la válvula de purga y proceder al embazado. Para el análisis del poder calorífico del biodiésel elaborado se toman muestras aleatorias de manera que se pueda establecer un nivel promedio de su poder calorífico.

La Figura 98 presenta la muestra de biodiésel a ser analizada, su color dorado característico y su aroma alcohólico, denotan en primera instancia la calidad del biodiésel.



Figura 98 Muestra de biodiésel a analizar

La emulsión se presenta como una sustancia lechosa que contiene partículas de biodiésel suspendidas en agua residual, que luego de un periodo de tiempo tiende a separarse en: biodiésel, que se deposita en la parte superior y agua, depositada en la parte inferior. La primera etapa de este proceso se aprecia en la Figura 99, en el ítem (a) se observa que todo el contenido del recipiente es una emulsión, en el ítem (b) empieza a notarse la separación de fases, marcadas con un claro contraste en el color entre ellas.



Figura 99 Primera etapa de la disolución de la emulsión

En la Figura 100, esta separación de fases se hace cada vez más evidente como se aprecia entre los ítems (c) y (d), luego de no observar un mayor avance en la separación de fases, es posible separar el agua depositada al fondo del recipiente y el biodiésel. El agua recolectada puede eliminarse por la alcantarilla ya que no presenta riesgos de contaminación, la emulsión residual puede mezclarse con la del próximo lote reduciendo los riesgos de contaminación; el biodiésel recuperado se lo puede añadir a la producción o ser usado directamente como combustible en un quemador, considerando concentraciones como “B5”, “B10” y “B15” recomendadas en normas internacionales.



Figura 100 Segunda etapa de la disolución de la emulsión

4.2.7. Eficiencia del proceso de producción.

Al procesar un lote de 25 litros de aceite vegetal reciclado, sin considerar el volumen de glicerina extraído equivalente al 20 % del volumen de aceite procesado. Se obtuvieron 22,22 litros de biodiésel y 2,77 litros de emulsión. Dando como resultado una eficiencia del proceso de producción de biodiésel del 88,88%. El 11,11 % restante de la producción no se puede considerar como desecho ya que representa una cantidad significativa de emulsión, del que es posible recuperar biodiésel, reduciendo de esta manera las posibilidades de contaminar las fuentes hídricas.

4.3. Análisis económico de la obtención de biodiésel

En el análisis de los costos de producción de biodiésel, es preciso desglosar los precios de las materias primas requeridas, la energía utilizada, entre otros. En la Tabla 44 se establecen estos valores económicos; relacionando los insumos, su costo unitario y el biodiésel obtenido. Estableciendo en primer lugar las cantidades de insumos requeridos para la producción de un lote de biodiésel.

Aceite vegetal usado: 25 (l)

Biodiésel obtenido: 22,22 (l)

Hidróxido requerido: 25 (gr)

Electricidad: 6,61 (kWh)

Tabla 44
Análisis de costos de producir un lote biodiésel.

Ítem	Cantidad Utilizada	Costo por unidad	Costo por lote
Aceite Vegetal Usado (l)	25	0,27	6,75
Metanol (l)	5	2	10
Hidróxido de sodio (gr)	25	0,004	0,1
Electricidad (kWh)	6,61	0,085	0,56
Otros	1	1	1
TOTAL:			18,41

Los resultados de la tabla anterior, reflejan un costo de 0,83 dólares por litro de biocombustible elaborado.

4.4. Ensayos de combustión de biodiésel en un quemador

Los ensayos de combustión del biodiésel se realizaron en un quemador diésel marca “Beckett” que posee un consumo de entre 0,4 y 3 galones por hora (GPH). El quemador es parte de una cámara de combustión que posee unas dimensiones de: 2 m. de ancho, 0,5 m. de alto y una profundidad de 0,8 m. acondicionada para alcanzar una temperatura interior de 150 °C, equipo utilizado en el trabajo de investigación de (Bonilla & Cisneros, 2016). Las pruebas se efectuaron comparando las temperaturas internas alcanzadas por la cámara, al incinerar mezclas de biodiésel-diésel como: “B5”, “B10” y “B15” con un “B0” como base comparativa.

Con el fin de establecer un parámetro constante en cada prueba, el quemador se ajusta con una apertura de la compuerta de admisión de aire del 50 por ciento y una succión de la bomba de combustible establecida por el fabricante (Equipment, 2003). Quedando como variable a modificar la mezcla de biodiésel.

Para contrastar las temperaturas interiores del quemador, al incinerar las distintas concentraciones de biodiésel se utiliza una cámara térmica marca “Fluke” Ti32. Tomando como parámetro inicial una temperatura interior de 24°C. La cámara térmica funciona con el programa “Smart view” el cual genera un informe sobre la fotografía tomada y sirve de base para el análisis.

El análisis comparativo requiere el poder calorífico de las distintas mezclas de biodiésel-diésel; la Tabla 45 presenta estos valores normalizados, los mismos que son equivalentes a los a los obtenidos de la Ecuación 70 y agrupados en la Tabla 46. La ecuación anterior se usará para definir el poder calorífico de las mezclas “B5”, “B10”, “B15” de acuerdo al poder calorífico del biodiésel producido en este trabajo de investigación. Análisis realizado por el departamento de termodinámica de la Escuela Politécnica Nacional, ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Tabla 45
Poder calorífico teórico del biodiésel, diésel y sus mezclas

Análisis	B100	B15	B10	B5	Diésel
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	37,52	44,2	44,6	45,01	45,43

Fuente: (ASTM D. , 2009)

$$PC_{mezcla} = PC_{diesel} * C_{diesel} + PC_{biodiesel} * C_{biodiesel}$$

Ecuación 70 Poder calorífico calculado

Donde:

PC_{diesel} : poder calorífico de diésel (45,43 MJ/kg) (ASTM D. , 2009)

$PC_{biodiesel}$: poder calorífico del biodiésel (37,52 MJ/kg) (ASTM D. , 2009)

C_{diesel} : concentración de diésel en la mezcla

$C_{biodiesel}$: concentración de biodiésel en la mezcla

$$PC_{B15} = 45,43 * \frac{85 \%}{100 \%} + 37,52 * \frac{15 \%}{100 \%} = 44,24 \text{ MJ/kg}$$

$$PC_{B10} = 45,43 * \frac{90 \%}{100 \%} + 37,52 * \frac{10 \%}{100 \%} = 44,64 \text{ MJ/kg}$$

$$PC_{B5} = 45,43 * \frac{95 \%}{100 \%} + 37,52 * \frac{5 \%}{100 \%} = 45,03 \text{ MJ/kg}$$

Tabla 46
Poder calorífico calculado del biodiésel, diésel y sus mezclas

Análisis	B100	B15	B10	B5	B0
Poder calorífico (MJ/kg)	37,52	44,24	44,64	45,03	45,43

De acuerdo a los análisis de laboratorio, el poder calorífico superior del biodiésel obtenido del micro reactor es de 39373 kJ/kg. La Ecuación 71 permite calcular el poder calorífico inferior del biodiésel producido (Segura, 1980).

$$PCI_{biodiesel} = PCS_{biodiesel} - PC_{agua} * G$$

Ecuación 71 Poder calorífico inferior

Donde:

$PCI_{biodiesel}$: poder calorífico inferior del biodiésel

$PCS_{biodiesel}$: poder calorífico superior del biodiésel (39,37 MJ/kg) **¡Error!**

No se encuentra el origen de la referencia.

PC_{agua} : aporte calórico del vapor de agua condensado (2,497 MJ/kg) (ASTM D. , 2009)

G: porcentaje en peso del agua generada por la combustión del H₂ más la humedad inherente del combustible (kg agua/kg comb.)

$$G = 9H + H_2O$$

Donde:

9: expresa los kilos de agua generada al oxidar un kilo de hidrogeno

H: porcentaje de hidrogeno contenido en el combustible (12 %) (Campus & Marcos, 2001)

H₂O: Porcentaje de humedad del combustible (0 %)

$$PCI_{biodiesel} = 39373 - 2497,85 * ((9 * 0,12) + 0) = 36,68 \text{ MJ/kg}$$

Al aplicar la Ecuación 70 se obtienen los valores de poder calorífico inferior de las mezclas de biodiésel, que son compilados en la Tabla 47.

Donde:

PC_{diesel} : poder calorífico de diésel (45,43 MJ/kg) (ASTM D. , 2009)

$PC_{biodiesel}$: poder calorífico del biodiésel (36,68 MJ/kg)

C_{diesel} : concentración de diésel en la mezcla

$C_{biodiesel}$: concentración de biodiésel en la mezcla

$$PC_{B1} = 45,43 * \frac{85\%}{100\%} + 36,68 * \frac{15\%}{100\%} = 44,11 \text{ MJ/kg}$$

$$PC_{B1} = 45,43 * \frac{90\%}{100\%} + 36,88 * \frac{10\%}{100\%} = 44,55 \text{ MJ/kg}$$

$$PC_{B5} = 45,43 * \frac{95\%}{100\%} + 36,88 * \frac{5\%}{100\%} = 44,99 \text{ MJ/kg}$$

Tabla 47
Poder calorífico del biodiésel, diésel y sus mezclas

Análisis	B100	B15	B10	B5	Diésel
Poder calorífico (MJ/kg)	36,68	44,11	44,55	44,99	45,43

4.4.1. Resultados de la combustión de diésel, concentración "B0"

Para comparar el calor requerido por las mezclas de biodiésel, es preciso un análisis de la combustión de diésel puro como un marco de referencia para las pruebas posteriores y establecer las temperaturas máximas y mínimas del interior de la cámara. La Figura 101 presenta una muestra de diésel puro "B0". La Tabla 48 presenta los parámetros generales de la cámara de combustión y datos ambientales tomados in situ.

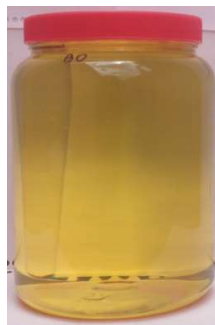


Figura 101 Muestra de diésel puro "B0"

Tabla 48
Datos del ensayo en la cámara de combustión con "B0"

Fecha de inspección:	04/03/2016 10:05:26	Ubicación:	UFA
Equipo:	Cámara de combustión	Nombre del equipo:	Beckett
Temp. ambiente:	19,5°C	Velocidad del viento:	0,3 m/s
Compuerta de aire:	50 %	Biodiésel:	B0
Humedad relativa:	64 %	Vol. de combustible:	215 ml
Emisividad:	0,95	Tiempo de consumo:	180 seg.
Fabricante:	Fluke Thermography	Temp. reflejada:	20 °C
Temp. inicia:	24°C	Cámara:	Ti32-11120124
Temp. final:	150°C		

En la Figura 102 se muestran las imágenes tomadas por la cámara térmica, (a) imagen termal y paleta de colores, (b) imagen de luz visible.

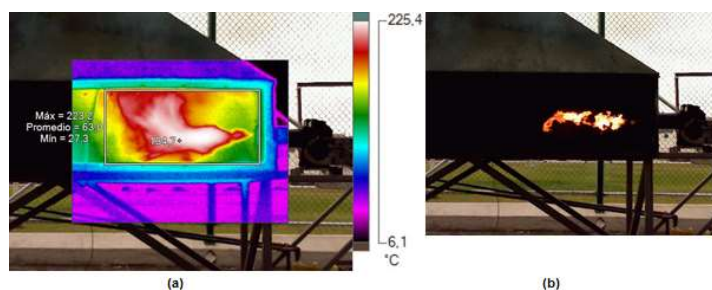


Figura 102 Imágenes térmicas al quemar "B0"

La Tabla 49 resume de la información de la cámara térmica al incinerar diésel (B0), la

Tabla 50 resume los datos del cuadro en la imagen térmica. Y la Tabla 51 muestra la información del punto central de la cámara térmica.

Tabla 49
Información de la imagen termica con un "B0"

Temperatura promedio	37,7°C
Rango de la imagen	7,7°C a 223,2°C
Modelo de cámara	Fluke Ti32
Descripción de la lente	Estándar
Hora de la imagen	04/03/2016 10:05:07
Rango de calibración	-10,0°C a 600,0°C

Tabla 50
Información del recuadro en la imagen con un "B0"

Nombre	Prom.	Mín.	Máx.	Emisividad	Segundo plano
A0	63°C	27,3°C	223,2°C	0,95	20°C

Tabla 51
Información del punto central con un "B0"

Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
Punto central	134,7°C	0,95	20°C

Con los datos de la Tabla 48 es posible determinar la masa de combustible consumido por el quemador según la Ecuación 72.

$$m = \delta * V$$

Ecuación 72 Masa del combustible inflamado

Donde:

δ : densidad del diésel [g/cm^3] ($0,84 \text{ g}/\text{cm}^3$ o $0,84 \text{ g}/\text{ml}$) (Barriga, 2007)

V: volumen de diésel consumido [ml] (215 ml)

$$m = 0,84 * 215 = 180,6 \text{ g o } 0,181 \text{ kg}$$

El calor requerido por el quemador, se calcula a partir de la Ecuación 49

Donde:

Q: energía para consumir la carga [J]

m: masa del diésel consumido [kg] (0,181 kg)

PCI: poder calorífico inferior del diésel [J/kg] (45430 kJ/kg) (Yuan, 2003)

$$Q = 0,181 \cdot 45430 = 8222,83 \text{ KJ}$$

4.4.2. Resultados de la combustión de biodiésel, concentración "B5"

Con el objetivo de comparar el calor requerido por el biodiésel "B5" con la del diésel y establecer las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas en el interior de la cámara. La Tabla 52 presenta los parámetros generales de la cámara. La Figura 103 presenta una muestra de biodiésel "B5".



Figura 103 Muestra de biodiésel "B5"

Tabla 52
Datos del ensayo en la cámara con "B5"

Fecha de inspección:	04/03/2016 9:29:38	Ubicación:	UFA
Equipo:	Cámara de combustión	Nombre del equipo:	Beckett
Temp. ambiente:	19,5°C	Velocidad del viento:	0,3 m/s
Compuerta de aire:	50 %	Biodiésel:	B5
Humedad relativa:	65 %	Vol. de combustible:	270 ml
Emisividad:	0,95	Tiempo de consumo:	190 seg.
Fabricante:	Fluke Thermography	Temp. reflejada:	20 °C
Temp. inicia:	19,5°C	Cámara:	Ti32-11120124
Temp. final:	150°C		

En la Figura 104 se muestra las imágenes tomadas por la cámara térmica, en el ítem (a) imagen termal y paleta de colores, (b) imagen de luz visible

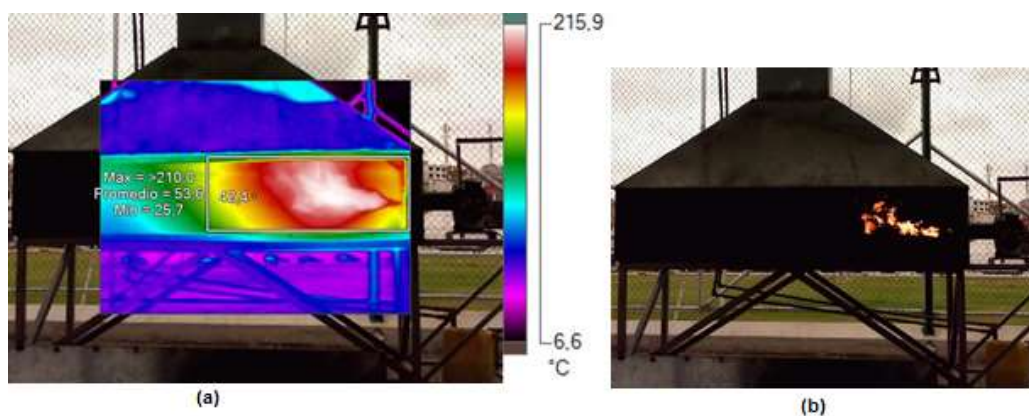


Figura 104 Imágenes térmicas al quemar "B5"

La Tabla 53 presenta el resumen de la información recopilada por la cámara térmica al incinerar biodiésel "B5", la Tabla 54 presenta los datos del cuadro en la imagen térmica. Y la Tabla 55 muestra la información del punto central de la cámara térmica.

Tabla 53
Información de la imagen termica con un "B5"

Temperatura promedio	27,4°C
Rango de la imagen	7,3°C a >210°C
Modelo de cámara	Fluke Ti32
Descripción de la lente	Estándar
Hora de la imagen	04/03/2016 9:29:38
Rango de calibración	-10,0°C a 200,0°C

Tabla 54
Información del recuadro en la imagen con un "B5"

Nombre	Prom.	Mín.	Máx.	Emisividad	Segundo plano
A0	53,6°C	25,7°C	>210°C	0,95	20°C

Tabla 55
Información del punto central con un "B5"

Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
Punto central	42,4°C	0,95	20°C

Con los datos de la Tabla 52 es posible determinar la masa del combustible consumido por el quemador según la Ecuación 72.

Donde:

δ : densidad del biodiésel [g/cm^3] ($0,88 \text{ g}/\text{cm}^3$ o $0,88 \text{ g}/\text{ml}$) (Yuan, 2003)

V: volumen de biodiésel consumido [ml] (270 ml)

$$m = 0,88 * 270 = 237,6 \text{ g o } 0,238 \text{ kg}$$

El calor requerido por el quemador para consumir esta carga se calcula a partir de la Ecuación 49.

Donde:

Q: energía para consumir la carga [J]

m: masa del biodiésel consumido "B5" [kg] (0,238 kg)

PCI: poder calorífico del "B5" [J/kg] (44,99 MJ/kg)

$$Q = 0,238 \cdot 44990 = 10707,62 \text{ KJ}$$

En el análisis comparativo de la mezcla "B5" con diésel, se considera una igual eficiencia energética, consideración que permite calcular la masa de la mezcla necesaria para obtener resultados equivalentes al diésel, al aplicar la Ecuación 49.

$$m = \frac{Q}{Cp_{biodiesel}}$$

Donde:

m: masa del biodiésel consumido [kg]

Q: Energía para consumir la carga [J] (8222,83kJ)

Cp: Calor específico del biodiésel B5 [kJ/kg] (44990 kJ/kg)

$$m_{biodiesel\ B5} = \frac{8222,83}{44990} = 0,183\ Kg$$

En un análisis visual del aspecto de la llama del quemador, no se identifica diferencia alguna al quemar biodiésel "B5" y diésel "B0".

4.4.3. Resultados de la combustión de biodiésel, concentración "B10"

Se pretende, establecer el calor requerido por "B10" y compararlo con la del diésel; establecer las temperaturas máximas y mínimas interiores. La Tabla 56 presenta los parámetros generales de la cámara de combustión. Y en la Figura 105 se aprecia una muestra de biodiésel "B10"



Figura 105 Muestra de biodiésel "B10"

Tabla 56
Datos del ensayo en la cámara con "B10"

Fecha de inspección:	04/03/2016 9:39:08	Ubicación:	UFA
Equipo:	Cámara de combustión	Nombre del equipo:	Beckett
Temp. ambiente:	19°C	Velocidad del viento:	0,3 m/s
Compuerta de aire:	50 %	Biodiésel:	B10
Humedad relativa:	65 %	Vol. de combustible:	250 ml
Emisividad:	0,95	Tiempo de consumo:	197 seg.
Fabricante:	Fluke Thermography	Temp. reflejada:	20 °C
Temp. inicia:	24°C	Cámara:	Ti32-11120124
Temp. final:	150°C		

La Figura 106 muestra las imágenes tomadas por la cámara térmica, (a) imagen termal y paleta de colores, (b) imagen de luz visible

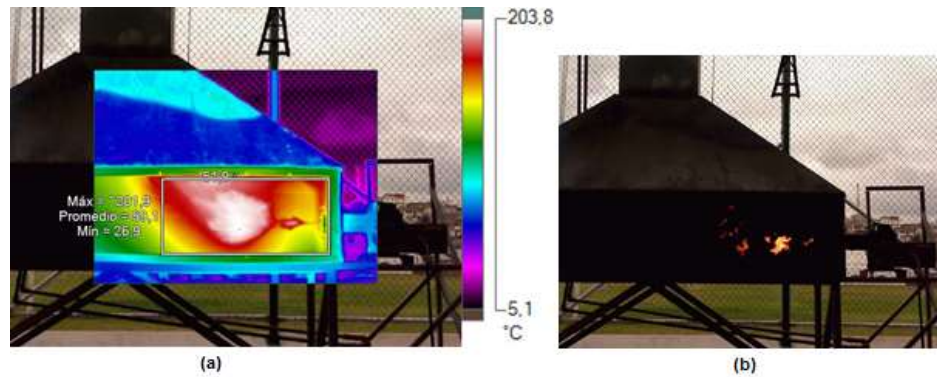


Figura 106 Imágenes térmicas al quemar "B10"

La Tabla 57 presenta el resumen de la información recopilada por la cámara térmica al incinerar biodiésel "B10", la Tabla 58 resume la información del cuadro en la imagen térmica. Y la Tabla 59 muestra los valores del punto central de la cámara térmica.

Tabla 57
Información de la imagen termica con un "B10"

Temperatura promedio	28,8°C
Rango de la imagen	5,7°C a ~201,9°C
Modelo de cámara	Fluke Ti32
Descripción de la lente	Estándar
Hora de la imagen	04/03/2016 9:39:08
Rango de calibración	-10,0°C a 200,0°C

Tabla 58
Información del recuadro en la imagen con un "B10"

Nombre	Prom.	Mín.	Máx.	Emisividad	Segundo plano
A0	59,1°C	26,9°C	~201,9°C	0,95	20°C

Tabla 59
Información del punto central con un "B10"

Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
Punto central	51,9°C	0,95	20°C

Con los datos de la Tabla 56 es posible determinar la masa del combustible consumido por el quemador según la Ecuación 72.

Donde:

δ : densidad del biodiésel [g/cm^3] ($0,869 \text{ g}/\text{cm}^3$ o $0,869 \text{ g}/\text{ml}$) (Yuan, 2003)

V: volumen de biodiésel consumido [ml] (250 ml)

$$m = 0,869 * 250 = 217,3 \text{ g o } 0,217 \text{ kg}$$

El calor requerido por el quemador para consumir esta carga se calcula a partir de la Ecuación 49.

Donde:

Q: Energía para consumir la carga [J]

m: masa del biodiésel consumido [kg] (0,217 kg)

PC: poder calorífico del biodiésel B10 [kJ/kg] (44550 kJ/kg)

$$Q = 0,217 \cdot 44550 = 9667,35 \text{ kJ}$$

En el análisis comparativo y considerando una igual eficiencia energética entre los combustibles; se calcular la masa de mezcla necesaria para obtener resultados equivalentes al diésel. Al aplicar la Ecuación 49.

Donde:

m: masa del biodiésel consumido [kg]

Q: Energía para consumir la carga [J] (8222,83 kJ)

PC: poder calorífico del biodiésel B10 [J/Kg] (44550 kJ/kg)

$$m_{biodiesel\ B10} = \frac{8222,83}{44550} = 0,185 \text{ Kg}$$

En un análisis visual se evidencia pequeñas explosiones tipo esquirlas, que visualmente no perjudican a la llama; sin embargo hacen evidente la presencia de biodiésel.

4.4.4. Resultados de la combustión de biodiésel, concentración “B15”

Se requiere determinar el calor requerido por la mezcla “B15”; compararlo con la del diésel y establecer los rangos de temperatura en el interior de la cámara. En la Figura 107 se presenta una muestra de biodiésel “B15”. Y en la Tabla 60 presenta los parámetros generales de la cámara de combustión.



Figura 107 Muestra de biodiésel "B15"

Tabla 60
Datos del ensayo en la cámara con "B15"

Fecha de inspección:	04/03/2016 9:50:05	Ubicación:	UFA
Equipo:	Cámara de combustión	Nombre del equipo:	Beckett
Temp. ambiente:	19°C	Velocidad del viento:	0,6 m/s
Compuerta de aire:	50 %	Biodiésel:	B15
Humedad relativa:	64 %	Vol. de combustible:	265 ml
Emisividad:	0,95	Tiempo de consumo:	190 seg.
Fabricante:	Fluke Thermography	Temp. reflejada:	20 °C
Temp. inicia:	25°C	Cámara:	Ti32-11120124
Temp. final:	150°C		

En la Figura 108 se muestra las imágenes tomadas por la cámara térmica, en el ítem (a) imagen termal y paleta de colores, (b) imagen de luz visible

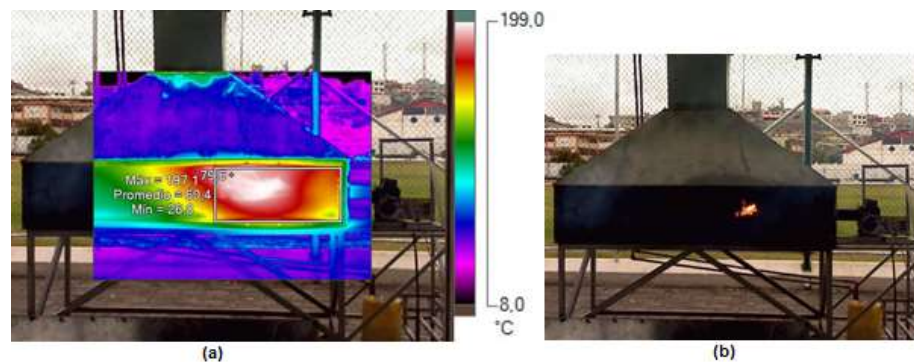


Figura 108 Imágenes térmicas al quemar "B15"

La Tabla 61 la información de la cámara térmica al incinerar "B15", la Tabla 62 resume los datos del cuadro en la imagen. Y la Tabla 63 valora el punto central.

Tabla 61
Información de la imagen termica con un "B15"

Temperatura promedio	26,7°C
Rango de la imagen	9,0°C a 197,1°C
Modelo de cámara	Fluke Ti32
Descripción de la lente	Estándar
Hora de la imagen	04/03/2016 9:50:05
Rango de calibración	-10,0°C a 200,0°C

Tabla 62
Información del recuadro en la imagen con un "B15"

Nombre	Prom.	Mín.	Máx.	Emisividad	Segundo plano
A0	60,4°C	26,8°C	197,1°C	0,95	20°C

Tabla 63
Información del punto central con un "B15"

Nombre	Temperatura	Emisividad	Segundo plano
Punto central	79,6°C	0,95	20°C

Con los datos de la Tabla 60 es posible determinar la masa del combustible consumido por el quemador según la Ecuación 72.

Donde:

δ : densidad del biodiésel [g/cm^3] (0,871 g/cm^3 o 0,871 g/ml) (Yuan, 2003)

V: volumen de biodiésel consumido [ml] (265 ml)

$$m = 0,871 * 265 = 230,8 \text{ g o } 0,231 \text{ kg}$$

El calor requerido por el quemador para consumir esta carga se calcula a partir de la Ecuación 49.

Donde:

Q: Energía para consumir la carga [J]

m: masa del biodiésel consumido [kg] (0,231 kg)

PC: poder calorífico del biodiésel "B15" [kJ/kg] (44110 kJ/kg)

$$Q = 0,231 \cdot 44110 = 10189,41 \text{ kJ}$$

En el análisis comparativo de las combinaciones de biodiésel-diésel, se considera una igual eficiencia energética entre los combustibles; que permite

calcular la masa de mezcla “B15” necesaria para obtener resultados equivalentes al diésel. Aplicando la Ecuación 49.

Donde:

m: masa del biodiésel consumido [kg]

Q: Energía para consumir la carga [J] (8222,83 kJ)

PCI: poder calorífico biodiésel B15 [kJ/kg] (44110 kJ/kg)

$$m_{biodiesel\ B15} = \frac{8222,83}{44110} = 0,186\ Kg$$

4.4.5. Análisis de los resultados obtenidos.

La Tabla 64 resume los resultados de los ensayos realizados en la cámara de combustión, al incinerar las concentraciones de biodiésel.

Tabla 64
Resumen de resultados de la combustión

Carburante	Calor requerido (kJ)	Temp interior (°C)		Vol. consumido (ml)	% de Vol. excedente al diésel
		Min	Máx		
B0	8222,83	27,3	223,2	215	0
B5	11897,62	25,7	210	270	25,5
B10	9667,35	26,9	201,9	250	16,3
B15	10189,41	26,8	197,1	265	23,3

De los resultados presentados, la mejor proporción en la que se puede trabajar es la “B10”, es decir un 10 por ciento biodiésel y 90 por ciento diésel, debido a que el porcentaje en exceso que debe consumir el quemador para obtener los mismos resultados que al usar diésel “B0” es del 16,3 por ciento. Haciendo posible interpretar, que si la proporción de biodiésel aumenta, el volumen en exceso requerido para equiparar los resultados referenciales del diésel, también se incrementa; y es posible que en algún punto se llegue a perjudicar la combustión del quemador, al no trabajar dentro de los parámetros descritos por el fabricante.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El estudio realizado en este trabajo de investigación, determina que de acuerdo con la muestra tomada de los locales que expenden comidas rápidas, el volumen mínimo de aceite vegetal usado que es posible recolectar es de 300 litros al mes a un costo promedio de 0,27 dólares por litro.
- La investigación determinó que un alto porcentaje de la población tiene inconvenientes con la disposición final de sus residuos de aceite, e ignora los beneficios económicos para sí, y de conservación ambiental para la sociedad. Al cuestionar la posibilidad usar sus desechos de aceite para producir biodiésel, un 64,29 % de encuestados desconoce esta utilidad de sus residuos.
- Las concentraciones de los reactivos utilizados para procesar biodiésel son: metanol de uso comercial al 94 % de pureza e hidróxido de sodio contenido en la lejía de uso común al 98 %. Estas concentraciones generan resultados favorables en la producción, con el inconveniente de provocar un alto índice de emulsión, que luego de al menos 72 horas se rompe y el biodiésel puede ser recuperado; sin embargo, alarga el tiempo de elaboración del combustible. El volumen de glicerina (subproducto de la transesterificación) extraído de cada lote procesado es equivalente al volumen de metanol usado. Es así que para procesar 25 litros de aceite vegetal reciclado se requiere 5 litros de metanol (20 % del aceite usado) y 25 gramos de hidróxido de sodio (verificado en la prueba de titulación).
- En acuerdo al propósito del proyecto, de reutilizar el aceite vegetal usado, y la diversidad de la acidez del aceite en cada lote que esto

conlleva, se diseñó y se puso en funcionamiento un micro reactor tipo Batch aislado térmicamente con lana de vidrio y una caída cónica de 30° de acero inoxidable 316; calentado por una resistencia eléctrica para mantener una temperatura de 55°C, ideal en el proceso de transesterificación que es controlado por una termocupla tipo K. La circulación del fluido es controlado por electroválvulas que al igual que otros instrumentos eléctricos son controlados por un controlador PIC16F877A, incorporado en la tarjeta matriz.

- Los resultados de los ensayos en el quemador diésel, confirman que el biodiésel es un buen aditivo del diésel, debido a que las temperaturas interiores alcanzadas por las mezclas “B5”, “B10”, “B15”, no difieren significativamente con las obtenidas al incinerar diésel “B0”. Sin embargo, se debe aclarar que el biodiésel posee un poder calorífico inferior al del diésel, de manera que requiere un porcentaje de volumen adicional que compense esta diferencia. Es así que se pudo establecer una relación directamente proporcional entre la cantidad de biodiésel en la mezcla y el volumen en exceso, que en algún punto podría llegar a perjudicar la combustión. De ahí que la mejor proporción ensayada es la “B10” ya que requiere una adición de solo un 16,3 por ciento del volumen.
- Los 83 centavos que cuesta producir un litro de biodiésel no logran competir con el costo actual del diésel convencional, debido principalmente a la baja del precio del petróleo y la crisis económica. Sin embargo, hay que recordar que las reservas de petróleo son limitadas y en algún momento sus precios se dispararan. Un panorama indiferente para el biodiésel, que cuenta con reservas de aceite reciclado para su fabricación.
- De acuerdo con los análisis de laboratorio del poder calorífico, realizados a muestras del biodiésel obtenido del micro reactor, se establece un valor de 39373 kJ/kg para el poder calorífico superior del biodiésel, que es muy próximo al dato teórico situado en 40000 kJ/kg

según la norma; mientras que el poder calorífico inferior se establece en 36675,32 kJ/kg frente a los 37520 kJ/kg. Valores que corroboran: la viabilidad técnica de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal reciclado en la ciudad de Latacunga, el método de producción utilizado y la funcionalidad del equipo.

5.2. Recomendaciones

- Antes de iniciar el proceso de transesterificación es preciso filtrar el aceite para eliminar los residuos de comida y agua residual del aceite. El reposo prolongado del aceite es perjudicial para el proceso de transesterificación debido a que los ácidos grasos saturados se precipitan hasta el fondo del contenedor dejando a los lípidos insaturados flotando.
- El análisis de acidez (titulación) de la muestra de aceite vegetal reciclado que se procesa, ayuda a la valoración de la cantidad de catalizador requerido para la transesterificación. Haciendo de este proceso un paso a tener en cuenta si se desea conservar la eficiencia de la producción de biodiésel.
- Inmediatamente después de haber procesado un lote de biodiésel es fundamental verificar si las tuberías y los tanques están obstruidos, lo que representa una clara avería del micro reactor. De ocurrir este percance se debe proceder al lavado del sistema de tuberías utilizando agua y algún producto quita grasa que elimine cualquier residuo.
- Es indispensable que al manipular las sustancias químicas, se tengan todas las medidas de protección personal, necesarias; como el uso obligatorio de mascarillas, guantes y gafas protectoras; recordar que la preservación de la vida de las personas está por encima del capital.
- Antes de iniciar cualquier etapa del proceso de producción, se debe verificar la apertura de las válvulas de alivio ubicadas en la parte superior de los tanques, así como el cierre de las válvulas de purga de la parte inferior. De manera que se evite la fuga inesperada de los fluidos.

- Recordar que el proceso de lavado del biodiésel es opcional, y puede acelerar la eliminación de partículas suspendidas en el combustible. Y requiere un volumen de agua equivalente a la tercera parte del aceite que se procesa, que es añadido al biodiésel con un atomizador manual permitiendo la uniformidad de este proceso. De lo contrario se produce un lavado incompleto que perjudica la disolución de la emulsión.
- La capacidad del biodiésel de ser un sustituto del diésel, puede ser verificada con ensayos de incineración más detallados. Por lo que se propone el diseño e implementación de un quemador de biodiésel B100 como proyecto de investigación.

Bibliografía

- Agudelo, J. R., Peña, D., & Mejía, R. (Diciembre de 2001). Pruebas de desempeño del ester metílico de aceite de palma en un motor diésel. *Revista Energética*(26), 16-18.
- Badger, W., & Banchemo, J. (1955). *Introduction to chemical Engineering*. Washington D.C.: Mc Graw Hill.
- Baummeiter, T., & Avallone, E. (1985). *Manual del ingeniero mecánico* (Octava ed.). México D.F.: Mc Graw Hill.
- Blangino, S. D. (2004). *Modelado y Reacción de propiedades en Biodiésel* (Desimosexta ed.). Anales: AFA.
- Bonilla, C., & Cisneros, A. (2016). *Diseño y construcción de un prototipo de control de admisión de aire, para disminuir las emisiones de monóxido de carbono en quemadores diésel, destinado al laboratorio de Control Eléctrico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L*. Latacunga: UFA.
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shingel*. Mexico D.F.: McGraw Hill.
- Campus, M., & Marcos, F. (2001). *Biodiésel Handling and use Guidelines, Los Biocombustibles*. Mexico D.F.: NREL.
- Darby, R. (2001). *Chemical engineering fluids mechanics*. New York: Dekker.
- Dobarganes, M. C., & Márquez, G. (1995). *Calidad de las grasas de frituras en el sector de restauración de Andalucía*. Madrid: Ediciones Continental.
- Epry, R. (1999). *Chemical Engineers handbook* (Séptima ed.). Washington D.C.: Mc Graw Hill.
- Fernandez, S. J. (2009). *Tecnología de las Energías Renovables*. Madrid: AMV Ediciones.
- García Camus, J. M., & García Laborda, J. (2005). *Biocarburantes líquidos*. Madrid.
- García, G. G. (2008). *Energías de siglo XXI De las Energéticas e Impacto Ambiental*. Madrid: Ediciones Mundi-prensa.
- García, P. L. (2009). *Tecnologías Energéticas e Impacto Ambiental*. Madrid: AMV Ediciones Mundi Prensa.

- Harold, M., Jimenéz, M., & Charita, R. C. (2007). *Producción Experimental de Biodiésel a Partir de la Reacción de Transesterificación Catalítica de Aceite de Ricino*. Barranquilla.
- Huergas, I. R. (2010). Producción de biodiésel a partir de cultivos alternativos: Experiencia con *Jatropha Curcas*. Tesis Magíster. Buenos Aires: Univerisdad nacional del Litoral.
- Larosa, R. (2003). *Proceso para la producción de biodiésel*. Barcelona.
- Luiszczewski, A. (1999). *Redes industriales de tubería, bombas para agua ventiladores y compresores*. Madrid: Reverté.
- Martínez, I. (1992). *Termodinámica Básica y Aplicada*. Madrid: Dossat.
- McCabe. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Cuarta ed.). Mexico D.F.: McGraw-Hill.
- Michelena, M. C., & Martín, F. M. (2008). *ENERGÍAS RENOVABLES Los biocombustibles*. Madrid: Mundi - Prensa.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. Mexico D.F.: Pearson Education.
- Roldan Vilorio, J., & Toledano, J. C. (2013). *Energías Renovables, lo que hay que saber*. Madrid: Paraninfo S.A.
- Rosado Nascimento, M. S. (2006). El biodiésel de palma como combustible para microturbinas a gas: Evaluación experimental. En *Biomassa & energia* (págs. 73-82).
- Salinas Rojas, P. A. (2008). *Mantenimiento electrónico e instrumental industrial*. Caldas: SENA.
- Segura, J. M. (1980). *Termodinámica Técnica*. Madrid: AC.
- Vian, A., & Ocón, J. (1976). *Elementos de ingeniería química* (Quinta ed.). Murcia: Aguilar S.A.
- Yuan, W. A. (2003). *Predicting the phisical propierties of biodiésel for combustion modeling*.
- Yunus A. Cengel, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa fundamentos y aplicaciones* (Cuarta ed.). Mexico D.F.: Mc graw Hill Interamericana Editores, S. A. de C. V.
- Zlokarnik, M. (2001). *Stirring theory and practice*. Alemania: Wией, VCH.

Linkografía

- A.S.T.M. (15 de Junio de 2009). Recuperado el 15 de Diciembre de 2013, de Standard Specification for Biodiésel fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels: <http://astm.org/Standards/D6751.htm>
- ASTM. (2011). *ASTM Standards*. Recuperado el 15 de Junio de 2013, de <http://www.astm.org/Standards/D6751.htm>
- ASTM, D. (15 de Junio de 2009). *Standard Specification for biodiésel fuel BlendStock*. Recuperado el 15 de Marzo de 2016, de <http://astm.org/standards/D975.htm>
- Barriga, A. (2007). *Producción y uso de aceites vegetales y Biodiésel en Ecuador, Perspectiva Tecnológicas*. Recuperado el 13 de Octubre de 2014, de <http://www.cdts.espol.edu.ec/documentos/biodiésel.pdf>
- Beltran, S. (5 de Junio de 2011). *whois.nic.li*. Recuperado el 17 de Septiembre de 2014, de <http://www.identi.li/index.php?topic=188056>
- Board, N. B. (22 de Octubre de 1996). *Biodiésel - America's first advanced biofuel!* . Recuperado el 7 de Agosto de 2015, de <http://biodiésel.org/what-is-biodiésel/biodiésel-basics>
- Bolaños, D. J. (23 de Septiembre de 2009). *ELECTONICA - LA PAGINA DEL PROFESOR BOLAÑOS*. Recuperado el 27 de Agosto de 2014, de <http://www.bolanosdj.com.ar/MICRO/tutorialpic2007.pdf>
- Corecomm, h. (12 de Enero de 1995). *Corecommhosting.com*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2015, de http://www.molon.com/standard_ac_reversible_motors.html
- Enom, i. (8 de Marzo de 2007). *VaxaSoftware page*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2015, de http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/fis/calorespec.pdf
- Equipment, H. P. (13 de Mayo de 2003). *Patriot Supply - Industrial*. Recuperado el 10 de Marzo de 2016, de Commercial & Residential HVAC Parts & Equipment: [http://www.patriot-supply.com/files/6104BAFG\[1\].pdf](http://www.patriot-supply.com/files/6104BAFG[1].pdf)

- FASTDOMAIN, I. (24 de Diciembre de 2001). *NS1.BLUEHOST.COM*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2015, de <http://www.suns-usa.com/catalog/temperature%20controller.pdf>
- Grundfos, M. (13 de Octubre de 1995). *Grundfos*. Recuperado el 3 de Enero de 2016, de The full range supplier of pumps and pump solutions: net.grundfos.com
- Gutierrez, A. (31 de Agosto de 2013). *Salud Globalite*. Recuperado el 29 de Julio de 2015, de Sana tu interior : <http://saludglobalite.com/2013/09/23/lo-que-hay-que-saber-de-los-lipidos/>
- Hangzhou, A. A. (15 de Abril de 1999). *Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the world's*. Recuperado el 29 de julio de 2015, de <http://spanish.alibaba.com/product-gs/best-price-cold-press-oil-expeller-small-cold-press-oil-machine-coconut-oil-expeller-machine-560825893.html>
- Hughes, P. D., & Hosting Systems . (30 de Abril de 2000). *Journey to Forever*. Recuperado el 4 de Agosto de 2015, de <http://es.journeytoforever.org/biocombustibles/como-hacer-biodiésel.cgi>
- Inc, M. T. (24 de julio de 2014). *microchip*. Recuperado el 15 de Agosto de 2014, de <http://microchip.com>
- Landívar, R. (13 de Enero de 2001). Recuperado el 21 de Agosto de 2015, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Tama%C3%B1o_de_la_muestra
- Llc, S. (9 de Marzo de 2008). *Arian Flow Meters Temperature Controllers Conditioners*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2015, de <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>
- Posadillo, A. (9 de Junio de 2005). *BioDiéselSpain.com*. Recuperado el 3 de Agosto de 2015, de http://www.biodiéselspan.com/plantas_detalle.php?id=201
- SoloStocks. (25 de Febrero de 2000). *Compra Venta | Mayoristas | SoloStocks*. Recuperado el 3 de Agosto de 2015, de <http://www.solostocks.com/venta-productos/biocombustibles/biodiésel/planta-biodiésel-g-1000-8740976>

Tekniska, M. K. (26 de Enero de 2009). *Masens Kemisk Tekniska AB*.

Recuperado el 5 de Agosto de 2015, de

<http://www.masenskemtekniska.se/metanol.html>

UAM. (13 de Octubre de 2009). *Universidad Autónoma de Madrid*.

Recuperado el 29 de Julio de 2015, de

http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/alimento/1-

[TCAC%20JS%20Generalidades%20aceites%20comestibles.pdf](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/alimento/1-TCAC%20JS%20Generalidades%20aceites%20comestibles.pdf)

VISITAECUADOR. (14 de Abril de 2000). *VisitaEcuador*. Recuperado el 21

de Agosto de 2015, de El Portal Oficializado de Turismo de Ecuador:

<http://www.visitaecuador.com/ve/mostrarRegistro.php?idRegistro=505&id>

[Servicio=180&idClasificacion=2&informacion=3](http://www.visitaecuador.com/ve/mostrarRegistro.php?idRegistro=505&idServicio=180&idClasificacion=2&informacion=3)

ANEXOS

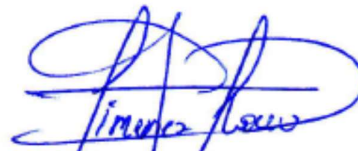
**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRONICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor: **Víctor Santiago Parra Zambonino**

En la ciudad de Latacunga, a los **28 días del mes de abril del 2016.**

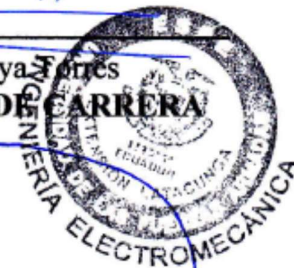
Aprobado por:



Ing. Mario Jiménez León
DIRECTOR DEL PROYECTO



Ing. Katya Fortes
DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO