



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UN REACTOR CONTINUO DE FLUJO TAPÓN (PFR) A ESCALA
LABORATORIO PARA USO DOCENTE EN EL ÁREA DE FISICOQUÍMICA DE LA ESCUELA
DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**

Carlos Rodrigo Hernández Pérez

Asesorado por el Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio

Guatemala, abril de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN REACTOR CONTINUO DE FLUJO TAPÓN (PFR) A ESCALA
LABORATORIO PARA USO DOCENTE EN EL ÁREA DE FISICOQUÍMICA DE LA ESCUELA
DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS RODRIGO HERNÁNDEZ PÉREZ
ASESORADO POR EL DR. ADOLFO NARCISO GRAMAJO ANTONIO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADOR	Ing. César Alfonzo García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE UN REACTOR CONTINUO DE FLUJO TAPÓN (PFR) A ESCALA
LABORATORIO PARA USO DOCENTE EN EL ÁREA DE FISICOQUÍMICA DE LA ESCUELA
DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 9 de agosto de 2017.



Carlos Rodrigo Hernández Pérez

Guatemala, 17 de octubre de 2018

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Director Escuela Ingeniería Química
Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Presente

Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y aprobado el informe final del Trabajo de Graduación **"DISEÑO DE UN REACTOR CONTINUO DE FLUJO TAPÓN (PFR) A ESCALA LABORATORIO PARA USO DOCENTE EN EL ÁREA DE FISICOQUÍMICA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA"**, del estudiante de Ingeniería Química Carlos Rodrigo Hernández Pérez, quien se identifica con carné estudiantil número 201314169 y DPI: 2740627980501.

Por lo tanto, después de haber realizado la revisión respectiva y haberle hecho las correcciones pertinentes, por medio de la presente, solicito su autorización para que pueda continuar con el proceso respectivo.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente.

Adolfo Gramajo
Ingeniero Químico
Colegiado 264



Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
Colegiado No. 264
Asesor del trabajo de graduación



Guatemala, 30 de enero de 2019.
Ref. EIQ.TG-IF.005.2019.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **013-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-

Solicitado por el estudiante universitario: **Carlos Rodrigo Hernández Pérez**.
Identificado con número de carné: **2740 62798 0501**.
Identificado con registro académico: **2013-14169**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DISEÑO DE UN REACTOR CONTINUO DE FLUJO TAPÓN (PFR) A ESCALA
LABORATORIO PARA USO DOCENTE EN EL ÁREA DE FISICOQUÍMICA DE LA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Adolfo Narciso Gramajo Antonio**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



"ID Y ENSEÑADA A TODOS"

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.024.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **CARLOS RODRIGO HERNÁNDEZ PÉREZ** titulado: **"DISEÑO DE UN REACTOR CONTINUO DE FLUJO TAPÓN (PFR) A ESCALA LABORATORIO PARA USO DOCENTE EN EL ÁREA DE FISICOQUÍMICA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA"**.
Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, marzo 2019

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/ale



Ref. DTG.174-2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química del trabajo de graduación titulado: **"DISEÑO DE UN REACTOR CONTINUO DE FLUJO TAPÓN (PFR) A ESCALA LABORATORIO PARA USO DOCENTE EN EL ÁREA DE FISICOQUÍMICA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA"** presentado por el estudiante: **Carlos Rodrigo Hernández Pérez** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, Abril de 2019

/echm

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Quien me inspiró para la realización de este estudio, por darme sabiduría y bendición para alcanzar mis metas como persona y como profesional.

Mis padres

Carlos Hernández y Luz Aida Pérez. Su amor será siempre mi inspiración.

Mi familia

Por brindarme su apoyo a lo largo de mi trayectoria.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por haberme dado la oportunidad de realizar el presente estudio.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ayudarme en mi formación profesional.
Facultad de Ingeniería	Por haber colaborado en mi formación académica.
Dirección General de Investigación (DIGI)	Por brindarme apoyo económico para la realización del presente estudio.
Dr. Adolfo Gramajo	Por el asesoramiento y conocimientos.
Ing. Víctor Ruiz	Por abrirme las puertas del centro de mecanizado de la Escuela de Ingeniería Mecánica.
Ing. Otto de León	Por sus conocimientos y orientación.
Ing. William Álvarez	Por su ayuda con el trámite de la beca de tesis.
Lic. Roberto Barrios	Por asesorar el proceso de financiamiento.
Ing. Hugo Ramírez	Por facilitarme equipo para el presente estudio.

Ing. Carlos Pérez

Por su asesoramiento en la estructuración del trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
GLOSARIO	XXV
RESUMEN	XXXI
OBJETIVOS.....	XXXII
INTRODUCCIÓN	XXXV
1.	ANTECEDENTES 1
2.	MARCO TEÓRICO..... 7
2.1.	Cinética de reacción 7
2.1.1.	Teoría de colisiones..... 8
2.1.2.	Velocidad de reacción 8
2.1.3.	Ley de velocidad..... 9
2.1.3.1.	Velocidad de reacción relativa 10
2.1.3.2.	El orden de reacción y la ley de velocidad 11
2.1.3.2.1.	Modelos de ley de potencia y leyes de velocidad elementales.. 12
2.1.3.2.2.	Reacciones reversibles 13
2.2.	Reacciones químicas 14
2.2.1.	Clasificación de las reacciones..... 15
2.2.1.1.	Desde el punto de vista estructural..... 15

2.3.	Reactores químicos.....	16
2.3.1.	Balance general de masa.....	16
2.3.2.	Reactores ideales.....	18
2.3.3.	Clasificación de los reactores.....	18
2.3.3.1.	Reactores intermitentes (batch)	18
2.3.3.2.	Reactores de flujo continuo	19
2.3.3.2.1.	Reactor tubular (PFR) ...	19
2.3.3.2.2.	Reactor CSTR.....	20
2.3.3.2.3.	Reactor de lecho empacado	21
2.3.4.	Funciones de un reactor químico	22
2.3.5.	Reactores de flujo tapón (PFR)	22
2.3.6.	Consideraciones entre un reactor de flujo continuo (PFR)	23
2.3.7.	Definiciones adicionales	24
2.3.7.1.	Espacio-tiempo.....	25
2.3.7.2.	Velocidad espacial	25
2.3.7.3.	Conversión	26
2.3.8.	Constante de velocidad de reacción	27
2.4.	Estequiometría de un reactor continuo de flujo tapón (PFR)....	29
2.5.	Efector de calor en un PFR	30
2.5.1.	Deducción del balance de energía para un PFR.....	31
2.5.2.	Balance para el fluido calentador	32
2.5.2.1.	Caso a flujo co-corriente.....	33
2.6.	Tipos de flujo.....	33
2.6.1.	Turbulencia.....	33
2.6.2.	Número de Reynolds.....	34
2.7.	Transferencia de calor.....	35
2.7.1.	Convección.....	35

2.7.2.	Fundamentos de la transferencia de calor.....	36
2.7.3.	Coeficientes de transferencia de calor.....	37
2.7.3.1.	Coeficiente de película	37
2.7.3.2.	Coeficiente global de transferencia de calor	38
2.7.4.	Velocidad de transmisión de calor	38
2.7.4.1.	Densidad de flujo de calor	38
2.7.4.2.	Temperatura media de la corriente de fluido	39
2.7.5.	Factores de ensuciamiento.....	39
2.7.6.	Diseño general del equipo para transferencia de calor	40
2.7.7.	Regímenes de transferencia de calor en fluidos.....	41
2.7.7.1.	Capa límite térmica.....	42
2.7.8.	Transferencia de calor por convección forzada en flujo turbulento	44
2.7.9.	Efecto de la rugosidad	44
2.8.	Conductimetría	45
2.8.1.	Definición	45
2.8.2.	Conductividad electrolítica.....	45
2.8.3.	Electrolitos débiles.....	47
2.8.4.	Electrolitos fuertes	47
2.8.5.	Determinación de las conductividades iónicas	47
2.8.5.1.	Variación de la conductancia con la concentración: Ley de Kohlrausch.....	48
2.8.5.2.	Ley de la migración independiente de los iones.....	49
2.8.6.	Estudio conductimétrico de la cinética de la hidrólisis de los ésteres en medio básico	49

2.9.	Análisis de grados de libertad	52
2.10.	Concentración	52
2.10.1.	Solubilidad.....	53
2.11.	Acetato de sodio	53
2.11.1.	Propiedades físicas y termodinámicas	54
2.11.2.	Propiedades químicas.....	54
2.11.3.	Síntesis.....	54
2.11.4.	Mecanismos de reacción.....	54
2.11.5.	Aplicaciones del acetato de sodio	55
2.12.	Hidróxido de sodio.....	56
2.12.1.	Propiedades físicas y termodinámicas	56
2.12.2.	Propiedades químicas.....	56
2.13.	Acetato de etilo	57
2.13.1.	Propiedades físicas y termodinámicas	57
2.13.2.	Propiedades químicas.....	57
2.14.	Soldadura.....	58
2.14.1.	Clasificación de los procesos de soldeo.....	59
2.14.1.1.	Proceso de soldeo por fusión	59
2.14.1.2.	Proceso de soldeo en estado sólido.....	59
2.14.1.3.	Procesos de soldeo fuerte y blando	59
2.14.2.	Fundamentos de electricidad y el magnetismo de la soldadura.....	60
2.14.2.1.	Naturaleza de la electricidad	60
2.14.2.2.	Corriente eléctrica	61
2.14.2.3.	Tensión, intensidad y resistencia	62
2.14.2.4.	Ley de Ohm.....	63
2.14.2.5.	Corriente continua y corriente alterna ..	63
2.14.2.5.1.	Corriente continua.....	64
2.14.2.5.2.	Corriente alterna	64

2.14.2.6.	Energía y potencia eléctrica.....	65
2.14.2.7.	Efecto calorífico de la corriente eléctrica efecto Joule	67
2.14.3.	Arco eléctrico	68
2.14.3.1.	La columna de plasma.....	68
2.14.3.2.	Zonas características del arco de soldeo	69
2.14.3.3.	Influencia del tipo de corriente	70
2.14.3.3.1.	Efecto de la polaridad...	71
2.14.4.	Soldeo por arco con electrodos revestidos.....	71
2.14.4.1.	Aplicaciones.....	73
2.14.4.2.	Selección del tipo de corriente.....	74
2.14.5.	Soldeo TIG.....	76
2.14.5.1.	Aplicaciones.....	78
2.14.5.2.	Selección de tipo de corriente.....	78
2.14.5.2.1.	Arco con corriente continua.....	79
2.14.5.2.2.	Arco con corriente alterna	79
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	81
3.1.	Variables.....	81
3.1.1.	Variables de diseño	81
3.1.1.1.	Variables independientes	82
3.1.1.2.	Variables dependientes	82
3.2.	Delimitación de campo de estudio	83
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	83
3.4.	Recursos materiales disponibles	84
3.4.1.	Reactivos	84

3.4.2.	Materiales e insumos	84
3.4.3.	Herramientas y equipos auxiliares	90
3.4.4.	Cristalería	93
3.4.5.	Recursos generales	93
3.5.	Técnica cuantitativa.....	95
3.5.1.	Técnicas cuantitativas de la fase de diseño del reactor	95
3.5.1.1.	Dimensionamiento del reactor.....	95
3.5.1.1.1.	Escalamiento.....	96
3.5.1.1.2.	Volumen de reactor	105
3.5.1.1.3.	Longitud, configuración espacial y materiales.....	105
3.5.1.2.	Determinación de parámetros de operación.....	114
3.5.1.2.1.	Selección de flujos de operación y diseño térmico	114
3.5.1.2.2.	Parámetros de reacción.....	137
3.5.1.3.	Selección de equipos auxiliares	145
3.5.1.3.1.	Selección de accesorios y válvulas. .	145
3.5.1.3.2.	Selección de fuente de energía para sistema de calentamiento.....	156
3.5.1.3.3.	Diseño del sistema de bombas	159

	3.5.1.3.4.	Diseño del sistema eléctrico	178
	3.5.1.3.5.	Dimensionamiento de tanques.....	178
	3.5.1.3.6.	Selección de medidor de conductividad.....	181
	3.5.1.4.	Diseño espacial del equipo conjunto .	183
3.5.2.		Técnicas cualitativas de la fase de construcción ..	183
	3.5.2.1.	Metalmecánica.....	183
	3.5.2.2.	Soldadura TIG	184
	3.5.2.3.	Soldadura MMA con arco eléctrico	185
	3.5.2.4.	Construcción de tablero eléctrico.....	186
	3.5.2.5.	Corte y ensamblaje de tubería de PVC y CPVC.....	187
	3.5.2.6.	Aplicación de pintura, revestimientos y resinas epóxicas	187
	3.5.2.7.	Armado de circuitos eléctricos en tablero.....	188
	3.5.2.8.	Ensamblaje de soportes y estructura metálica	189
	3.5.2.9.	Instalación de bombas y equipos auxiliares.....	189
	3.5.2.10.	Montaje de accesorios y ensamblaje final	190
	3.5.2.11.	Prueba de fugas	191
3.5.3.		Técnicas cuantitativas de la fase de validación	192
	3.5.3.1.	Calibración de bombas de corriente directa.....	192

	3.5.3.1.1.	Calibración de bomba de solución de hidróxido de sodio	192
	3.5.3.1.2.	Calibración de bomba de solución de acetato de etilo.....	193
	3.5.3.2.	Calibración de bomba de corriente alterna	194
	3.5.3.3.	Técnica conductimétrica.....	194
	3.5.3.4.	Simulación por computadora.....	195
3.6.		Recolección y ordenamiento de la información	195
3.7.		Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	198
4.		RESULTADOS.....	199
4.1.		Diseño del reactor	199
4.2.		Construcción del reactor	237
	4.2.1.	Reactor construido	237
	4.2.2.	Fotografía de componentes del reactor.....	240
4.3.		Validación del reactor.....	243
4.4.		Propuesta de práctica de laboratorio	251
	4.4.1.	Título de práctica de laboratorio	251
	4.4.2.	Objetivos	251
	4.4.2.1.	General.....	251
	4.4.2.2.	Específicos	251
	4.4.3.	Material y equipo	252
	4.4.4.	Equipo de protección personal.....	252
	4.4.5.	Reactivos e insumos	253
	4.4.6.	Procedimiento	253

4.4.6.1.	Calibración de bombas de reactivos..	253
4.4.6.2.	Calibración de bomba de agua	254
4.4.6.3.	Prueba de reactor	255
4.4.7.	Cálculos	256
4.5.	Manual de operación y mantenimiento	257
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	259
	CONCLUSIONES	267
	RECOMENDACIONES	269
	BIBLIOGRAFÍA	271
	APÉNDICES	279
	ANEXOS	337

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Balance en el volumen del sistema	16
2.	Reactor simple intermitente homogéneo	19
3.	Esquema de un reactor CSTR.	20
4.	Reactor longitudinal de lecho empacado	21
5.	Reactor PFR.....	22
6.	Balance de moles para la especie j en el volumen δv	24
7.	Tabla estequiométrica para un sistema de flujo	29
8.	Variables de reactor de flujo	30
9.	PFR con ganancia o pérdida de calor	30
10.	Transferencia de calor en fluidos	32
11.	Perfiles de temperatura del fluido en la transferencia de calor	33
12.	Capa límite térmica e hidrodinámica sobre una lámina (a) toda la placa está caliente; (b) longitud no calentada = x_0	42
13.	Mecanismo de reacción de saponificación del acetato de etilo	55
14.	Átomo y sus partes.....	61
15.	Corriente continua electrodo negativo	70
16.	Descripción del proceso TIG	76
17.	Reactor para poliestireno expansible	110
18.	Reactor PFR helicoidal.....	111
19.	Reactor PFR zigzag	112
20.	Reactor PFR tubos cruzados	113
21.	Perfil longitudinal de temperatura de flujos en contracorriente	117
22.	Perfil longitudinal de temperatura de flujos paralelos	118

23.	Diagrama del anulo del intercambiador de calor	121
24.	Cálculo de conversión usando Polymath 5.1	143
25.	Resultados de diseño de reactor Polymath 5.1.....	144
26.	Esquema 3D preliminar 1 del diseño del reactor	145
27.	Esquema 3D preliminar 2 del diseño del reactor	146
28.	Codo 90° clamp ½ pulg SS304.....	147
29.	Abrazadera clamp ½ pulg SS304	147
30.	Ferrula clamp ½ pulg SS304.....	147
31.	Reductor concéntrico soldable 1 x ½ pulg SS304.....	148
32.	Tee soldable 1 pulg SS304.....	148
33.	Empaque clamp ½ pulg	148
34.	Codo roscado NPT ¼ pulg SS304	149
35.	Cople roscado NPT ¼ pulg SS304	149
36.	Tapón roscado NPT ¼ pulg SS304	149
37.	Reductor campana roscado NPT ½ a ¼ pulg SS304.....	150
38.	Niple roscado NPT ¼ x 3 pulg SS304.....	150
39.	Niple roscado NPT ¼ x 1 ½ pulg SS304.....	150
40.	Tee roscada NPT ¼ pulg SS304	151
41.	Unión universal roscada NPT ¼ pulg. SS304	151
42.	Niple roscado NPT ¼ x 1 pulg SS304.....	151
43.	Terminal para manguera roscado NPT ½ x 3/8 pulg.....	152
44.	Válvula de cheque horizontal roscada NPT ½ pulg	152
45.	Valvula de bola CPVC ½ pulg.....	152
46.	Válvula de bola CPVC negra roscada NPT ½ pulg.....	153
47.	Unión universal negra PVC 1 pulg cedula 80.....	153
48.	Unión universal CPVC ½ pulg.....	153
49.	Reductor bushing PVC 1 a ¾ pulg.....	154
50.	Reductor bushing PVC ¾ a ½ pulg roscado NPT	154
51.	Adaptador macho CPVC rosca NPT ½ pulg	154

52.	Adaptador macho PVC rosca NPT 1 pulg	155
53.	Codo 90° CPVC ½ pulg.....	155
54.	Codo 90° PVC 1 pulg	155
55.	Calentador titan N 120 SCR 2	159
56.	Plano de tanque de almacenamiento Dynalon Baritainer Jerry Can 10 L	180
57.	Tanque Dynalon Baritainer Jerry Can 10 L	181
58.	Conductividad eléctrica vs concentración de hidróxido de sodio.....	182
59.	Vista 3D perspectiva frontal.....	208
60.	Vista 3D perspectiva trasera	209
61.	Vista 3D perspectiva lateral 1.....	210
62.	Vista 3D perspectiva lateral 2.....	211
63.	Vista 3D perspectiva planta.....	212
64.	Vista 2D frontal (elevación 1)	213
65.	Vista 2D trasera (elevación 2)	214
66.	Vista 2D lateral (elevación 3).....	215
67.	Vista 2D lateral (elevación 4).....	216
68.	Vista 2D planta	217
69.	Plano frontal (elevación 1) acotado	218
70.	Plano trasero (elevación 2) acotado	219
71.	Plano lateral (elevación 3) acotado	220
72.	Plano lateral (elevación 4) acotado	221
73.	Plano de planta	222
74.	Plano estructural del reactor frontal.....	223
75.	Plano estructural del reactor trasero	224
76.	Plano estructural del reactor lateral 1.....	225
77.	Plano estructural del reactor lateral 2.....	226
78.	Plano estructural del reactor planta.....	227
79.	Plano estructural de soporte del reactor.....	228

80.	Plano estructural de soporte de bombas.....	229
81.	Plano estructural de soporte de tanques.....	230
82.	Reducidor concéntrico y codo clamp SS304.....	231
83.	Abrazadera clamp y tee soldable SS304	232
84.	Férrula clamp ½ pulg SS304.....	233
85.	Plano eléctrico del reactor.....	236
86.	Fotografía frontal del reactor construido	237
87.	Fotografía trasera del reactor construido	238
88.	Fotografía lateral del reactor construido.....	239
89.	Fotografía de bomba de agua.....	240
90.	Bomba AEO WP-501210	240
91.	Fuente de poder de 24 V DC	241
92.	Manómetro de acero inoxidable	241
93.	Termómetro de acero inoxidable	242
94.	Medidor de conductividad eléctrica.....	242
95.	Conversiones promedio de pruebas	250

TABLAS

I.	Comparación entre corriente continua y corriente alterna.....	75
II.	Valores fijos en el proceso de diseño.....	81
III.	Variables independientes de la investigación	82
IV.	Variables dependientes de la investigación	82
V.	Reactivos	84
VI.	Materiales.....	84
VII.	Componentes electrónicos.....	88
VIII.	Insumos.....	89
IX.	Equipo auxiliares.....	90
X.	Herramientas.....	92
XI.	Cristalería y equipo de laboratorio	93
XII.	Recursos generales	94
XIII.	Recursos tecnológicos	95
XIV.	Matriz de evaluación de tuberías	106
XV.	Parámetros de selección de fuente de energía.....	156
XVI.	Matriz de ponderación para selección de calentador	157
XVII.	Calentadores eléctricos de paso	158
XVIII.	Accesorios de tubería del enchaquetamiento	163
XIX.	Rugosidad absoluta de materiales	164
XX.	Número de reynolds para cada tramo de tubería.....	165
XXI.	Factor de fricción para cada tramo de tubería.....	165
XXII.	Pérdidas por fricción y forma de accesorios.....	166
XXIII.	Pérdidas por fricción en sistema de agua	167
XXV.	Número de reynolds para cada tramo de tubería.....	174
XXVI.	Factor de fricción para cada tramo de tubería.....	174
XXVII.	Pérdidas por fricción y forma de accesorios.....	175
XXVIII.	Pérdidas por fricción en tubería del reactor	176

XXIX.	Dimensiones de tanque Dynalon Baritainer Jerry Can 10 L	180
XXX.	Recolección de información de pruebas conversión del reactor.....	196
XXXI.	Calibración de bomba de hidróxido de sodio	196
XXXII.	Calibración de bomba de acetato de etilo.....	197
XXXIII.	Calibración de bomba de agua	197
XXXIV.	Ordenamiento de pruebas	198
XXXV.	Codificación de componentes del reactor	199
XXXVI.	Codificación de componentes eléctricos.....	234
XXXVII.	Calibración de bomba de hidróxido de sodio	243
XXXVIII.	Calibración de bomba de acetato de etilo.....	244
XXXIX.	Calibración de bomba de agua	245
XL.	Resultados de prueba No. 1	245
XLI.	Errores absolutos de prueba No. 1	246
XLII.	Error y conversión promedio de prueba No. 1	246
XLIII.	Resultados de prueba No.2	246
XLIV.	Errores absolutos de prueba No. 2	247
XLV.	Error y conversión promedio de prueba No. 2	247
XLVI.	Resultados de prueba No. 3	247
XLVII.	Errores absolutos de prueba No. 3	248
XLVIII.	Error y conversión promedio de prueba No. 3	248
XLIX.	Error y conversión del reactor	248
L.	Conversión al infinito promedio de las pruebas del reactor	249
LI.	Errores de la conversión al infinito.....	249

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$^{\circ}C$	Grados Celsius de temperatura
A	Área
A	Amperios
a	Área de intercambio de calor por unidad de volumen del reactor.
Am	Área en mojada o en contacto con agua de calentamiento en el enchaquetamiento del reactor.
C_{Ao}	Concentración inicial de hidróxido de sodio en la reacción.
C_{Bo}	Concentración inicial de acetato de etilo en la reacción.
C_A	Concentración de hidróxido de sodio
C_B	Concentración de acetato de etilo
C_C	Concentración de acetato de sodio
C_D	Concentración de etanol
cm	Centímetro, indica longitud
Cp	Capacidad calorífica a presión constante
Cp_A	Capacidad calorífica a presión constante del hidróxido de sodio puro en solución acuosa.
Cp_{ABW}	Capacidad calorífica de la mezcla reactante de hidróxido de sodio y acetato de etilo en medio acuoso.

Cp_{AW}	Capacidad calorífica a presión constante de una solución de hidróxido de sodio acuosa.
Cp_B	Capacidad calorífica a presión constante del acetato de etilo puro.
Cp_{BW}	Capacidad calorífica a presión constante de una solución de acetato de etilo acuosa.
Cp_W	Capacidad calorífica a presión constante del agua.
D	Diámetro
Deq	Diámetro equivalente de una sección transversal de una tubería con figura geométrica diferente de un círculo.
dT	Diferencial de temperatura
dV	Diferencial de volumen
dX	Diferencial de conversión
e	Espesor de pared de un tubo
F_A	Flujo molar de una solución de hidróxido de sodio
F	Faradios, indica capacitancia
F_B	Flujo molar de una solución de acetato de etilo
fd	Factor de fricción de Darcy
g	Aceleración de la fuerza de gravedad
g	Gramos, indica la cantidad de masa
h	Entalpía
h_A	Cabeza de bomba
h_{H_2O}	Coeficiente individual de película del agua de calentamiento en el enchaquetamiento del reactor.
h_L	Sumatoria de pérdidas por fricción y forma
h_o	Coeficiente individual de película de la mezcla reactante.
h_R	Perdida de energía por trabajo generado por el fluido

H_z	Hercio, indica la frecuencia de oscilación del fluido eléctrico.
J	Joule, indica cantidad de energía
K	Grados Kelvin, indica de temperatura
Ke	Longitud equivalente en diámetros de conducto, de un accesorio de tubería.
k	Conductividad térmica
k_A	Conductividad térmica de hidróxido de sodio en solución acuosa.
k_{AW}	Conductividad térmica de la solución de hidróxido de sodio acuosa.
k_{ABW}	Conductividad térmica de la mezcla reactante de hidróxido de sodio y acetato de etilo en medio acuoso.
k_B	Conductividad térmica de acetato de etilo puro
k_{BW}	Conductividad térmica de la solución de acetato de etilo acuosa.
K_c	Constante de equilibrio químico
kg	Kilogramo, indica cantidad de materia
kJ	Kilojulio, indica cantidad de energía
kW	Kilowatt, indica potencia
k_x	Constante de velocidad de reacción
$k\Omega$	Kilo ohmio, indica la resistencia eléctrica de un componente electrónico.
L	Longitud
l	Litro, indica el volumen o cantidad de espacio
Le	Longitud equivalente
Log_{10}	Logaritmo en base 10
m	Metros, indica longitud

M	Molaridad, indica concentración de un soluto en una solución acuosa.
$\dot{m}_{AW}$	Flujo másico de una solución de hidróxido de sodio acuoso (g/min).
$\dot{m}_{BW}$	Flujo másico de una solución de acetato de etilo acuoso (g/min).
$\dot{m}_C$	Flujo molar de agua caliente en el enchaquetamiento del reactor.
min	Minutos, indica cantidad de tiempo
ml	Mililitros, indica volumen
mm	Milímetros, indica longitud
mol	Moles, indica cantidad de materia
$\dot{m}_T$	Suma de los flujos másicos de las soluciones de hidróxido de sodio y acetato de etilo.
Nu	Número de Nusselt
$\dot{n}$	Flujo másico (mol/min)
n_{AW}	Flujo molar de una solución de hidróxido de sodio acuoso.
n_{BW}	Flujo molar de una solución de acetato de etilo acuoso.
$\dot{n}_{H_2O}$	Flujo másico de agua (mol/min)
nm	Nanómetros, indica longitud
$\dot{n}_T$	Flujo molar total de reactivos (mol/min)
P	Presión de un fluido
Pa	Pascal, indica presión
Pm	Perímetro mojado o en contacto con agua de calentamiento en el en el enchaquetamiento del reactor.

Pr	Número de Prandlt. Indica la relación entre la capa límite térmica y la capa límite viscosa.
$\dot{Q}$	Flujo de calor
r_A	Velocidad de reacción del hidróxido de sodio
R_{cond}	Resistencia a la conducción
Rd	Factor de ensuciamiento
Re	Número de Reynolds. Indica el régimen de flujo: turbulento, transición o laminar.
rh	Radio hidráulico
s	Segundo, indica cantidad de tiempo
S	Siemens, unidad de conductancia, admitancia y susceptancia del sistema internacional de unidad, equivalente a la inversa de 1 ohmio.
t	Tiempo
Ta	Temperatura del enchaquetamiento del reactor
Te	Temperatura de ingreso de un fluido al reactor o enchaquetamiento.
T_R	Temperatura de referencia (298.15 K)
Ts	Temperatura de salida de un fluido al reactor o enchaquetamiento.
u	Unidad, indica cantidad de objetos o accesorios
U	Coeficiente global de transferencia de calor
V	Volumen
$\dot{V}$	Flujo volumétrico en (m^3/s) , (l/min) o (ml/min)
W	Watt, unidad de medida de la potencia en el sistema internacional de unidades.
X	Conversión de la reacción, indica el consumo de reactivos.

x_A	Fracción molar de hidróxido de sodio en una solución acuosa.
x_{AW}	Fracción molar de una solución acuosa de hidróxido de sodio en una mezcla con otra solución.
x_B	Fracción molar de acetato de etilo en una solución acuosa.
x_{BW}	Fracción molar de una solución acuosa de acetato de etilo en una mezcla con otra solución.
x_W	Fracción molar de agua en una solución
Z	Cabeza de altura en el balance de momentum para dimensionamiento de bombas.
ΔC_p	Cambio total en capacidad calorífica por mol de hidróxido de sodio que reacciona.
ΔH_{RX}	Calor de reacción a una temperatura específica
ΔH_{RX}^0	Calor de reacción a una temperatura de referencia
ΔTC	Diferencia de temperaturas pequeña en el perfil longitudinal de temperaturas del reactor.
ΔTG	Diferencia de temperaturas grande en el perfil longitudinal de temperaturas del reactor.
ΔTLM	Diferencia de temperatura media logarítmica del perfil longitudinal de temperaturas del reactor.
ε	Rugosidad absoluta de un material
μ	Viscosidad dinámica de un fluido
μ_{AW}	Viscosidad dinámica de la solución acuosa de hidróxido de sodio.
μ_{ABW}	Viscosidad dinámica de la mezcla reactante de hidróxido de sodio y acetato de etilo en medio acuoso.
μ_B	Viscosidad dinámica del acetato de etilo puro

μ_{BW}	Viscosidad dinámica de la solución acuosa de acetato de etilo.
μ_W	Viscosidad dinámica del agua
μm	Micrómetro, indica longitud
μS	Micro siemens, indica conductividad eléctrica
v	Velocidad (m/s)
π	Es la constante entre la longitud de una circunferencia y su diámetro en geometría euclidiana. Corresponde al valor 3.1415192...
ρ	Densidad, es la magnitud escalar que indica la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia.
ρ_{AW}	Densidad de la solución acuosa de hidróxido de sodio.
ρ_{ABW}	Densidad de la mezcla reactante de hidróxido de sodio y acetato de etilo en medio acuosos.
ρ_B	Densidad del acetato de etilo puro
ρ_{BW}	Densidad de la solución acuosa de acetato de etilo.
ρ_W	Densidad del agua.
τ	Espacio-tiempo, es el tiempo de residencia o tiempo que tarda una partícula en cruzar el cuerpo del reactor.
θ	Theta, parámetro utilizado para factorizar el número de moles inicial de un reactivo en cada una de las expresiones de concentración.
Ω	Ohmio, unidad de la resistencia eléctrica en el sistema internacional de unidades.
$[NaOH]_f$	Concentración de hidróxido de sodio al final de la reacción

[NaOH]₀

Concentración de hidróxido de sodio al inicio de la reacción.

[NaOH] $t \rightarrow \infty$

Concentración de hidróxido de sodio cuando de reacción es muy grande, por lo tanto, tiende al infinito.

GLOSARIO

AC	Alternating current (corriente alterna).
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero).
Anulo	Palabra utilizada en el argot de transferencia de calor para referirse al tubo exterior de un conjunto de tubos concéntricos.
API	American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo).
ASME	American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).
AWS	American Welding Society (Sociedad de Soldadura Americana).
Correlación de Gnielinski	Correlación empírica utilizada para calcular el número de Nusselt en conductos internos bajo flujo turbulento.

CPVC	Es un homopolímero de PVC que ha sido sometido a una reacción de cloración. Típicamente, el cloro y el PVC reaccionan de acuerdo con un mecanismo básico de radicales libres, que puede lograrse mediante diversos enfoques que utilizan energía térmica y/o UV.
DC	Direct Current (corriente directa).
Enchaquetamiento	Palabra utilizada en el argot de transferencia de calor para referirse a la parte externa de un intercambiador de calor por donde circula un fluido. En este trabajo de graduación corresponde al espacio entre el tubo del anulo y el tubo del reactor. Su propósito es contener al fluido de intercambio de calor y crear un área de contacto térmico.
Ferrula	Es un accesorio mecánico utilizado en tuberías para unión, fijación y sellado de tubos. Son anillos angostos circulares que generalmente se sueldan a los tubos, luego son fijados mediante una abrazadera y se sellan con empaques.
Gritt	Palabra utilizada en la industria del acero inoxidable para describir el acabado, pulido y tipo de superficie en aceros inoxidables desde los de tipo decorativo a los aceros inoxidables tipo sanitario.

Joule	Es una unidad derivada del sistema internacional para medir energía, trabajo y calor.
Mecanismo de reacción	Es un postulado teórico que trata de explicar los pasos lógicos mediante los cuales una serie de reacciones elementales, intermediarios, complejos activados, entre otros, permiten explicar las características cualitativas y cuantitativas de una reacción. Los mecanismos de reacción son la base para describir la velocidad de reacción.
MMA	Manual Metal Arc (Soldadura Manual de Arco de Metal). Es el tipo de soldadura más común, la característica más importante es que el arco eléctrico se produce entre la pieza y un electrodo metálico recubierto. El recubrimiento protege el interior del electrodo hasta el momento de la fusión.
PBR	Packed Bed Reactor (Reactor de Lecho Empacado), es un tipo de reactor químico que utiliza una membrana o una serie de elementos que distorsionan el flujo de la reacción con el fin de controlar, aumentar el área de contacto y acelerar una reacción. Al conjunto de elementos utilizados se le denomina empaque.

Perfil longitudinal de temperaturas

Es un diagrama utilizado en el diseño y control de intercambiadores calor para analizar las temperaturas de entrada y salida del equipo. Este diagrama sirve para calcular la diferencia de temperatura media logarítmica.

PFR

Plug Flow Reactor (Reactor de Flujo Tapón), es un tipo de reactor químico cuya característica principal es que este modelo supone un flujo ideal de pistón, y la conversión es en función de la posición. En este tipo de reactor la composición del fluido varía de un punto a otro a través de la dirección del flujo, esto implica que el balance para un componente dado de la reacción química implicada debe realizarse en un elemento diferencial de volumen. Por lo que su análisis requiere de conocimientos de termodinámica, cinética química, transferencia de masa y energía, mecánica de fluidos y matemática diferencial.

Picnómetro

Es un instrumento que sirve para determinar la densidad. Consta de un envase con un volumen calibrado y dispone de un tapón provisto de un finísimo capilar, de tal manera que puede obtenerse un volumen con gran precisión. Esto permite medir la densidad de un fluido.

PVC	Policloruro de vinilo es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo. En la industria existen dos tipos de PVC: flexible y rígido. Este último es el utilizado en tuberías para transporte de fluidos.
Reacción endotérmica	Se le llama así a cualquier reacción química que no se da de forma espontánea y que necesita de energía externa para iniciar la reacción, esta energía externa se conoce como energía de activación.
Reacción exotérmica	Se le llama así a cualquier reacción química que se da de forma espontánea dado que el cambio de energía libre de Gibbs es negativo. Este tipo de reacciones son violentas y liberan energía en forma de calor.
Reactor	Se le llama así a cualquier equipo utilizado para monitorear, controlar y agilizar una reacción química, diseñado para maximizar la conversión y la selectividad de esa reacción con el menor costo posible, haciendo el proceso rentable desde el punto de vista económico.
SS	Stainless Steel (Acero Inoxidable).
TDC	Transferencia de calor.

TEMA

Tubular Exchanger Manufactures Association (Asociación de Fabricantes de Intercambiadores Tubulares). Es la asociación comercial de los principales fabricantes de intercambiadores de calor de carcasa y tubos, que han sido pioneros en la investigación y el desarrollo de intercambiadores de calor.

TIG

Tungsten Inert Gas (Gas inerte de tungsteno), Es la sigla del tipo de soldadura que se caracteriza por el empleo de un electrodo permanente de tungsteno, y que utiliza gas de protección, que puede ser argón, helio o una mezcla de ambos. La gran ventaja de este método de soldadura es la obtención de cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión. Por este motivo es el método de soldadura más empleado en la industria del acero inoxidable.

RESUMEN

El presente informe de graduación se realizó con el objetivo de brindar a los estudiantes del curso de Cinética de Procesos Químicos de la carrera de Ingeniería Química, un equipo para el estudio de reacciones químicas y el efecto de calor en las mismas.

Se diseñó y construyó un reactor de flujo tapón (PFR), con tubería de acero inoxidable ATSM A270 304. El equipo cuenta con un intercambiador de calor de tubos concéntricos y un sistema de calentamiento para controlar la temperatura de la reacción.

Se validó utilizando la reacción de saponificación de acetato de etilo, con temperatura de alimentación de reactivos de 25 °C y temperatura de salida de productos de 43 °C, a una concentración equimolar de 0,3 M.

Los reactivos fueron bombeados al reactor por medio de bombas centrífugas de corriente directa, variando el voltaje se pudieron calibrar por medio de un circuito de regulación. La conversión de la reacción se monitoreó con una técnica conductimétrica, utilizando valores empíricos de conductividad en función de la concentración de hidróxido de sodio.

Se determinó que el reactor PFR es apto para estudiar la reacción de saponificación de acetato de etilo a temperatura de alimentación de reactivos de 25 °C, temperatura de salida de productos de 43 °C y concentración equimolar de 0,3 M.

OBJETIVOS

General

Diseñar un reactor continuo de flujo tapón (PFR) a escala laboratorio, para uso docente en el Área de Fisicoquímica de Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Específicos

1. Diseñar un reactor continuo de flujo tapón para la síntesis de acetato de sodio en fase líquida a escala laboratorio, usando programas de simulación computarizada.
2. Construir un reactor continuo de flujo tapón, con un sistema de bombeo centrífugo para los reactantes y con un sistema de monitoreo de las condiciones de reacción.
3. Validar el funcionamiento del reactor continuo de flujo tapón por medio del análisis de la conversión en la síntesis de acetato de sodio, al variar la temperatura de la reacción y las concentraciones de los reactivos en proporciones no estequiométrica.
4. Desarrollar una práctica de laboratorio donde se estudie la síntesis del acetato de sodio por medio del reactor continuo de flujo tapón, para el curso de Cinética de Procesos Químicos.

5. Redactar un manual de operación del reactor continuo de flujo tapón.

INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala no cuenta con un reactor PFR para estudio de reacciones químicas. Aunque se han realizado investigaciones para diseñar y construir reactores a lo largo de más de dos décadas, los mismos han dejado de funcionar y actualmente son obsoletos.

Se busca diseñar, construir y validar el funcionamiento de un reactor PFR a escala laboratorio, con el fin de utilizarlo posteriormente para el estudio de velocidad, conversión y selectividad de diferentes reacciones a distintas temperaturas de operación, además de estudiar el efecto de calor en las reacciones. El diseño del reactor tendrá bases teóricas de flujo de fluidos, transferencia de masa y energía, transferencia de calor, cinética de química, matemática diferencial, balances de masas y energía. También se recurre a modelos empíricos para el cálculo del número de Nusselt, coeficiente de fricción de Darcy, constante de velocidad de reacción y constante de equilibrio de reacción.

El diseño se limita a la escala laboratorio. Se dimensionará el reactor, se realizará el dimensionamiento del intercambiador de calor. Se realizará un análisis para determinar los materiales de construcción.

Se construirá el reactor empleando las técnicas de mecanizado, corte, soldadura MMA, soldadura TIG, caracterizando el equipo por medio de planos del reactor, planos de soportes, planos de cuerpo del reactor, plano eléctrico,

fotografías. Además, se creará un manual de operación y mantenimiento del reactor, donde se establecerán procedimientos estándares de operación.

La reacción estudiada es la saponificación del acetato de etilo. Para validar el funcionamiento del equipo diseñado y construido, se utilizará una técnica conductimétrica para determinar la conversión a la salida del reactor. Los valores obtenidos se compararán con el valor teórico de diseño.

Se incluye una propuesta de práctica de laboratorio para implementar el uso del reactor en el curso Cinética de Procesos Químicos de la carrera de Ingeniería Química.

1. ANTECEDENTES

En 2016, el estudiante de ingeniería química, Guillermo Nieva García-Villaraco, de la Universidad Politécnica de Madrid, España, realizó un estudio titulado “Chem. Reactor Simulator: Herramienta de simulación de CSTR como apoyo a la docencia”. En este trabajo se elaboró una herramienta virtual a través de una interfaz gráfica (MATLAB, “GUI”), para simular un reactor químico CSTR en el que se llevaba a cabo la reacción de saponificación de Acetato de Etilo con Hidróxido de Sodio, esta simulación está compuesta por un reactor CSTR, un depósito con sistema de agitación, y un enchaquetamiento que permitía controlar la temperatura del proceso.

En 2014, los estudiantes de ingeniería química, Jorge Aldás y Gabriel Vivar, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, realizaron un estudio titulado “Diseño y construcción de un reactor semicontinuo para la obtención de acetato de sodio”. En esta investigación se construyó un reactor de acero inoxidable grado alimenticio de 2 mm de espesor, una altura de 30 cm, diámetro de 20 cm y volumen de 9,40 l, un sistema de agitación de tipo paleta accionado por un motor de 0,24 hp y un sistema de calefacción para temperatura constante. La operación del reactor consistía en cargar el hidróxido de sodio seguido del encendido del motor de agitación y del sistema de calefacción, al alcanzar una temperatura constante, se inicia la alimentación de acetato de etilo mediante la válvula de empaques, la misma que regulaba la entrada. Para realizar la evaluación del equipo se realizó una prueba, la cual inició con un volumen de 400 ml de Hidróxido de Sodio y un volumen consumido de Acetato de Etilo de 1 340 ml dando un volumen final de 1 740 ml de Acetato de Sodio y Etanol con una concentración del reactivo limitante

CNaOH = 0,00332385 M y una conversión del 86 %, que representaba la transformación de los reactivos en productos.

En 2012, los estudiantes de ingeniería química, Sandra Heredia e Iván Huacho, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, realizaron un estudio titulado “Diseño y construcción de un reactor de flujo pistón”. En dicho estudio diseñaron y construyeron un reactor de flujo pistón a escala laboratorio, para uso docente de reacciones químicas que se usaría posteriormente por estudiantes. El equipo fue construido de acero inoxidable 304 debido a las propiedades anticorrosivas, el cuerpo del reactor fue dispuesto de forma helicoidal con manguera de PVC transparente que permitía observar la reacción a lo largo del reactor, los reactivos eran impulsados hacia el reactor utilizando una bomba centrífuga de corriente directa, poseía accesorios de bronce para evitar pérdidas durante el funcionamiento y constaba de envases plásticos de 2 l resistentes a los reactivos utilizados. Para demostrar el funcionamiento realizaron la síntesis de acetato de sodio y etanol utilizando la reacción de hidróxido de sodio 0,038 M y acetato de etilo 0,038 M. Por medio de análisis de parámetros entre la literatura y los determinados experimentalmente se concluyó que las condiciones ideales de operación eran: 21 °C, un flujo de alimentación de $7,32 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ de cada reactivo, y un tiempo de residencia de 47,57 s. En este estudio se obtuvo una conversión de 21 % y una concentración final de 0,029 M.

En 2012, los estudiantes de ingeniería electrónica, Remberto Cuadrado y Teddy Cañavera, de la Universidad Tecnológica de Bolívar, realizaron un estudio titulado “Simulación con MATLAB y SCILAB de un reactor tipo tanque agitado (CSTR)”. En el realizaron la simulación de un reactor CSTR utilizando dos herramientas informáticas, analizaron los errores experimentales de los datos de conversión respecto los datos teóricos, también analizaron los tiempos

de cálculo y versatilidad de los programas para calcular los tiempos de residencia, concentraciones, calor transferido, entre otros.

Otra investigación bajo la temática de simulación se realizó en 2011, por Oscar Núñez y Carlos Cabrera, cuya investigación titulada “Comportamiento dinámico de la saponificación del Acetato de Etilo en un reactor de tanque con reacción continua” estudian la creación de un programa para simular el comportamiento dinámico de un reactor de tanque con reacción continua (CSTR), en la construcción del programa se emplea el software MATLAB y Simulink. Para la simulación de la reacción de saponificación se introdujeron las concentraciones iniciales del Acetato de Etilo y el Hidróxido de Sodio, así como la temperatura constante del sistema de enchaquetado del reactor CSTR. Seguidamente, a consideración del usuario, se cambian los datos de las variables enunciadas para simular y observar, mediante gráficas, las concentraciones del acetato de etilo, el Hidróxido de Sodio, el Acetato de Sodio y el Alcohol etílico en función del tiempo del progreso, así como otras reacciones similares cuyas constantes cinéticas son conocidas.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala, se han realizado diversas investigaciones de reactores por medio de trabajos de graduación de estudiantes de pregrado, las cuales han abarcado partes del proceso del diseño de un reactor, dichas investigaciones se muestran a continuación.

El estudio de investigación más reciente en el tema de diseño de reactores en la Universidad San Carlos de Guatemala se realizó en 2009, por el estudiante de ingeniería química, Diego Bernardo Lainfiesta López, en cuyo trabajo de graduación “Diseño, construcción y evaluación de un reactor flujo pistón de forma helicoidal escala laboratorio” realiza un estudio para proveer

una herramienta docente a la Escuela de Ingeniería Química. El reactor fue diseñado para evaluarse con la reacción de hidrólisis alcalina del acetato de etilo, esta reacción es fácil de estudiar y controlar. La reacción es casi isotérmica.

El reactor tubular contaba con un volumen de 0,825 l y una longitud de 26,05 m dispuesta helicoidalmente, estaba diseñado para un flujo volumétrico total de $20,73 \text{ cm}^3/\text{s}$ en régimen turbulento y poseía seis muestreadores a distancias equidistantes a lo largo del reactor. Casi la totalidad de la estructura del reactor era translúcida, lo cual permitía observar el flujo de reactivos y productos a través de él. Tenía una capacidad de almacenamiento de reactivos de 2 l por reactivos y un colector de productos de 5 l. El flujo volumétrico era variable gracias a reóstatos conectados a las bombas centrífugas. Para la detección de la fracción de conversión, se utilizó un conductímetro Hanna HI 9813. Este poseía un rango de lectura de 0 hasta 4 mS/cm . Debido a esta característica se utilizó tres concentraciones de iniciales de reactivos 0,038 M, 0,03 M y 0,025 M respectivamente, las cuales arrojaban conversiones dentro de la capacidad de detección del instrumento.

Las soluciones de hidróxido de sodio y acetato de etilo se bombearon a una tasa de flujo igual a $10,365 \text{ cm}^3/\text{s}$ esto implicaba un flujo total de reactivos de $20,73 \text{ cm}^3/\text{s}$, para ello se realizaron calibraciones de las bombas centrífugas a diferentes voltajes. Hasta que se determinó un voltaje de operación igual a 3,96 V para la bomba 1 y 3,67 V para la bomba 2.

En 2009, el estudiante de ingeniería química, Sergio Fernando Hernández Ávila, realizó un estudio titulado “Evaluación de la cinética de hidrólisis del sistema $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7\text{-HCl}$, monitoreado por espectrofotometría (VIS), utilizando un reactor discontinuo –CSTR–, para diferentes condiciones de operación, a nivel

de laboratorio”. Este trabajo de graduación se realizó, la evaluación de la cinética de hidrólisis ácida del Pirofosfato Sódico a Ortofosfato, mediante el estudio de la evolución de la reacción en función de diferentes concentraciones molares de reactante y reactivo, y bajo diferentes temperaturas de reacción.

En lo que respecta a investigaciones realizadas por científicos de diversos centros de investigaciones se puede mencionar el estudio de Eliana Peña T, et al. Realizado en 2008 “Modelado de un reactor químico tipo CSTR y evaluación del control predictivo aplicando Matlab-Simulink”. En él se estudia un reactor tipo tanque continuamente agitado (CSTR), a partir de su modelo matemático en variables de espacio de estado. Se utilizó un modelo no lineal para realizar pruebas de lazo abierto del sistema y por último se diseña un control predictivo por modelo (MPC), este se compara con una estrategia de control proporcional.

En 2007, el estudiante de ingeniería química, Zaid Jacobo Lou Díaz, realizó un estudio titulado “Validación del uso de un reactor modificado de tipo discontinuo para la hidrólisis alcalina del acetato de etilo monitoreada por conductimetría para ser utilizado en estudios de cinética química”. En donde se realizó la evaluación de una técnica conductimétrica para determinar experimentalmente los valores del orden de reacción, velocidad específica de reacción y energía de activación, los cuales comparó con valores teóricos de diferentes fuentes. El objetivo principal del estudio era poner en funcionamiento un reactor NBSC que estaba abandonado y demostrar que era apto para estudios de cinética química. El método de monitoreo utilizado fue el conductimétrico, lo que permitió obtener valores de concentración instantánea a partir de curvas de calibración. Además, se desarrolló una animación por computadora en tres dimensiones para poder entender el mecanismo de reacción con el programa Flash MX. También se elaboró los planos del reactor y el manual de uso del reactor y su equipo auxiliar.

El único trabajo de reactores continuos bajo temática de investigación realizado en la Universidad Rafael Landívar. En 2007, el estudiante Víctor Demetrio Marroquín Aguilar, realizó una investigación titulada “Diseño de la práctica “Hidrolisis alcalina del Acetato de Etilo” para el reactor computarizado continuo del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad Rafael Landívar”. En esta investigación se diseñó una práctica de laboratorio para estudiantes, que consistía en determinar la velocidad de reacción de la Hidrólisis alcalina del Acetato de Sodio, utilizando para ello un reactor computarizado continuo Reca1/EV, la primera fase del estudio consistió en complementar la instalación del equipo implementando un baño termostático al tanque del reactor. En la segunda fase se realizaron las consultas sobre la teoría de la conductividad eléctrica en soluciones como técnica de valoración de sustancias, debido a que el equipo utilizado operaba bajo dicho principio.

En lo que respecta a reactores diseñados por profesionales de la Facultad de Ingeniería se puede mencionar el aporte hecho por el Ing. Cesar García Guerra, luego de haber participado en un seminario sobre “La enseñanza de la ingeniería química” en 1982. Fue realizado en la Universidad de Puebla, México, y en consecuencia efectuó la implementación y diseño de un reactor tubular a escala laboratorio. Con esto diversos estudiantes pregrado realizaron posteriormente estudios de investigación hasta que el reactor fue desmontado en el año. Dicho reactor fue construido con vidrio pírex, constaba de ocho condensadores recortados en ambos extremos y soldados, fragmentados de varilla de vidrio del mismo diámetro que el conducto interno del condensador (0,009 m diámetro interno y 0,011 m diámetro externo), con longitud de 0,455 m.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cinética de reacción

La cinética química es el estudio de las velocidades de reacciones químicas y los mecanismos de reacción. En el estudio de la ingeniería de las reacciones químicas, se combina el estudio de la cinética química con los reactores en los cuales se llevan a cabo dichos procesos. El diseño de reactores y la cinética química constituyen la base de la producción de casi todos los productos químicos industriales, tales como la manufactura del anhídrido ftálico, que es usado en la producción de colorantes industriales.

Son principalmente el conocimiento de la cinética química y el diseño de reactores los elementos que diferencian al ingeniero químico de otros ingenieros. En la industria, los reactores son el pilar manufacturero de diversos productos de venta común, en la producción de cementos se utiliza un reactor tubular para el calentamiento de la molienda cruda y llevar a cabo la clinkerización aunque en el argot de los ingenieros cementeros es llamado horno rotatorio.

La selección de un sistema de reacción que opere de la forma más segura y eficiente puede ser la clave para el éxito o el fracaso económico de una planta química. Por ejemplo, si un sistema de reacción produce una gran cantidad de producto indeseable, la purificación y separación subsecuentes del producto deseado ocasionarían que todo el proceso fuera no factible desde el punto de vista económico.

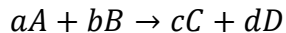
2.1.1. Teoría de colisiones

La teoría de colisiones ofrece la explicación cuantitativa más simple de las velocidades de reacción, aunque sólo se puede utilizar para la discusión de reacciones entre especies sencillas en fase gas. Las reacciones en disolución se pueden clasificar en dos tipos: las controladas por difusión, cuya velocidad se puede cuantificar utilizando la ecuación de difusión, y las controladas por activación. En la teoría del complejo activado se supone que las moléculas de reactivo forman un complejo que se puede estudiar analizando la población de sus niveles energéticos. Esta teoría proporciona una aproximación termodinámica a las velocidades de reacción que permite expresar la constante de velocidad en función de parámetros termodinámicos, hecho que resulta útil para parametrizar las velocidades de las reacciones en disolución. El nivel más alto de sofisticación se obtiene utilizando las superficies de energía potencial y analizando el movimiento de las moléculas a través de estas superficies. Este análisis proporciona una descripción detallada de las distintas etapas por las que transcurre una reacción.

2.1.2. Velocidad de reacción

La velocidad de reacción es la variación que experimenta la concentración de uno de los reactivos o de los productos de la reacción en la unidad de tiempo. La forma habitual de expresar la concentración es la molaridad.

La velocidad de reacción se expresa siempre con referencia a una de las sustancias que intervienen en la reacción. Hay que considerar una reacción general, del tipo:



La velocidad respecto a “A” es:

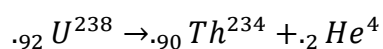
$$r_A = -\frac{d[A]}{d[t]}$$

El signo menos se pone para obtener velocidades positivas, pues las concentraciones de A y B disminuyen con el tiempo. Los corchetes indican concentraciones molares.

2.1.3. Ley de velocidad

Una reacción homogénea es aquella que se realiza en una sola fase. Una reacción heterogénea incluye más de una fase, cuya reacción usualmente ocurre en la interfaz entre las fases. Una reacción irreversible es la que procede únicamente en una dirección y continúa en ese sentido hasta que los reactivos se agotan. Una reacción reversible puede proceder en cualquier sentido, dependiendo de las concentraciones de reactivos y productos en relación con las concentraciones correspondientes en el equilibrio. Una reacción irreversible se comporta como si no hubiera condiciones de equilibrio. En términos estrictos, ninguna reacción química es totalmente irreversible. No obstante, en muchas reacciones el punto de equilibrio se encuentra tan lejos hacia el lado de los productos que dichas reacciones se tratan como irreversibles¹.

La molecularidad de una reacción es el número de átomos, iones o moléculas que participan (efectúan colisiones) en un paso de la reacción. Los términos; unimolecular, bimolecular y termolecular se refieren, respectivamente, a reacciones que incluyen; uno, dos o tres átomos (o moléculas) que interaccionan o chocan en algún paso de reacción. El ejemplo más común de reacción unimolecular es la desintegración radiactiva; por ejemplo, la emisión espontánea de una partícula alfa de uranio-238 para dar torio y helio:

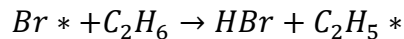


¹ FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 80.

La velocidad de desaparición del uranio (U) es descrita por la ley de velocidad:

$$-r_U = kC_U$$

Las reacciones biomoleculares verdaderas que existen son reacciones que incluyen radicales libres como los siguientes:

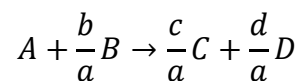


Con la velocidad de desaparición del bromo es dada por la ley de velocidad:

$$-r_{Br^*} = KC_{Br^*}C_{C_2H_6}$$

2.1.3.1. Velocidad de reacción relativa

Las velocidades de reacción relativas de las diversas especies involucradas en una reacción pueden obtenerse por la relación de sus coeficientes estequiométricos. Por ejemplo, para la reacción:



Se observa que por cada mol de A que se consume, aparecen c/a moles de C. En otras palabras:

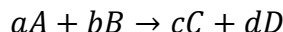
$$\text{Velocidad de formación de C} = \frac{c}{a}(\text{velocidad de desaparición de A})$$

$$r_C = \frac{c}{a}(-r_A) = -\frac{c}{a}r_A$$

De manera similar, la relación entre las velocidades de formación de C y D es:

$$r_C = \frac{c}{d}r_D$$

La relación puede expresarse directamente por la estequiometría de la reacción:



Para la cual:

$$-\frac{r_A}{a} = -\frac{r_B}{b} = \frac{r_C}{c} = \frac{r_D}{d}$$

2.1.3.2. El orden de reacción y la ley de velocidad

En las reacciones químicas que se consideren en los siguientes párrafos, se tomarán como base de cálculo la especie A, que es uno de los reactivos que están desapareciendo como resultado de la reacción. El reactivo limitante suele escogerse como base de cálculo. La velocidad de desaparición de A $-r_A$, depende de la temperatura y la composición. Para muchas reacciones, puede escribirse como el producto de una constante de velocidad de reacción k_A y una función de las concentraciones (actividades) de las diversas especies que participan en la reacción:

$$-r_A = [k_A(T)][f_n(C_A, C_B, \dots)]$$

La ecuación algebraica que relaciona $-r_A$ con las concentraciones de las especies se llama expresión cinética o ley de velocidad. La velocidad de reacción específica (también llamada constante de velocidad), k_A , igual que la velocidad de reacción $-r_A$, siempre se refiere a una especie particular en la reacción y normalmente debe llevar el subíndice correspondiente a esa especie. Sin embargo, para reacciones en las cuales el coeficiente estequiométrico es 1 para todas las especies que intervienen en la reacción, se puede omitir el subíndice de la velocidad de reacción específica.

2.1.3.2.1. Modelos de ley de potencia y leyes de velocidad elementales

La dependencia de la velocidad de reacción, $-r_A$ en las concentraciones de las especies presentes, $f(C_j)$, casi sin excepción es determinada por observación experimental. Aunque la dependencia funcional sobre la concentración puede postularse a partir de la teoría, se requieren experimentos para confirmar la forma propuesta. Una de las formas generales más comunes de esta dependencia es el modelo de ley de potencia².

Aquí, la ley de velocidad es el producto de las concentraciones de las especies individuales reaccionantes, cada una de ellas elevada a una potencia, por ejemplo:

$$-r_A = k_A C_A^\alpha C_B^\beta$$

Los exponentes de las concentraciones en la ecuación (3 -3) conducen al concepto de orden de reacción. El orden de una reacción se refiere a las potencias a las cuales se elevan las concentraciones en la ley de velocidad cinética. En la ecuación anterior, la reacción es de orden α , con respecto al

² FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 82.

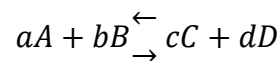
reactivo A, y de orden β , con respecto al reactivo B. El orden global de la reacción, n , es

$$n = \alpha + \beta$$

Las unidades de $-r_A$ siempre se dan en términos de concentración por unidad de tiempo, mientras que las unidades de la velocidad de reacción específica k_A , varían con el orden de la reacción.

2.1.3.2.2. Reacciones reversibles

Todas las leyes de velocidad de reacciones reversibles deben reducirse a la relación termodinámica que relaciona las concentraciones de las especies en el equilibrio. En el equilibrio, la velocidad de reacción es idéntica a cero para todas las especies (es decir, $-r_A = 0$). O sea, para la reacción general:



Las concentraciones en el equilibrio están relacionadas por la relación termodinámica para la constante de equilibrio K_C :

$$K_C = \frac{C_{Ce}^c C_{De}^d}{C_{Ae}^a C_{Be}^b}$$

La relación de la constante de ley de velocidad hacia la izquierda y hacia la derecha por la constante de equilibrio, se obtiene:

$$-r_A = K_A \left(C_A^a C_B^b - \frac{C_C^c C_D^d}{K_C} \right)$$

Cuando no hay cambio en el número total de moles y el término de capacidad calorífica $\Delta C_p = 0$, la dependencia de la temperatura de la constante de concentración en el equilibrio es:

$$K_c(T) = K_c(T_1) \exp \left[\frac{\Delta H_{Rx}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

Por lo tanto, si se conoce la constante de equilibrio a una temperatura T_1 y el calor de reacción ΔH_{Rx} , se puede calcular la constante de equilibrio a cualquier otra temperatura T .

2.2. Reacciones químicas

Una reacción química es la manifestación de un cambio químico, mediante el cual una sustancia o varias sustancias, denominadas reactivos, originan o se transforman en otras distintas, llamadas productos de la reacción.

En un cambio químico unas sustancias puras se transforman en otras diferentes. Para ello, tiene lugar una reordenación de los átomos de las distintas sustancias puras que intervienen y, por tanto, hay una modificación de los enlaces químicos entre las mismas.

En el lenguaje químico, la expresión de una reacción química se llama ecuación química y muestra lo que sucede en la transformación. En una ecuación química correctamente expresada, el número total de átomos de cada elemento químico es igual en los reactivos y en los productos, por lo que cada fórmula está acompañada de su coeficiente estequiométrico, para mostrar así las cantidades de las distintas sustancias que interviene en la reacción química. Se dice entonces que la ecuación química está ajustada. Si no hay coeficiente

estequiométrico delante de la fórmula de una sustancia se entiende que el coeficiente tiene el valor de la unidad.

2.2.1. Clasificación de las reacciones

Existen diversos criterios para clasificar las reacciones químicas.

2.2.1.1. Desde el punto de vista estructural

- Reacciones de síntesis o de combinación, donde unos reactivos se combinan entre sí para originar un producto diferente. De forma general se expresan mediante la ecuación: $A + B \rightarrow C$.
- Reacciones de descomposición, que pueden ser de dos tipos:
 - Reacción de descomposición simple, que es la reacción inversa a la de síntesis, donde $A \rightarrow B + C$.
 - Reacción de descomposición mediante un reactivo, representada por: $AB + C \rightarrow AC + BC$, donde el compuesto químico AB reacciona con el reactivo C para originar los compuestos químicos AC y BC .
- Reacciones de sustitución o desplazamiento, representadas por la ecuación: $AB + C \rightarrow AC + B$, donde el compuesto químico AB reacciona con el reactivo C para formar el compuesto químico AC y liberar B . Mediante este tipo de reacciones químicas, los elementos químicos más reactivos toman el puesto de los que son menos reactivos.
- Reacciones de doble sustitución con un intercambio entre los elementos químicos o grupos de elementos de las sustancias que intervienen en la reacción química y se representan mediante: $AB + CD \rightarrow AC + BD$.

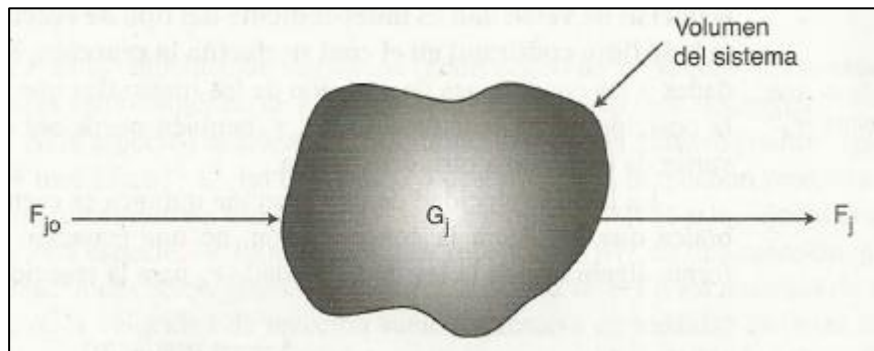
2.3. Reactores químicos

Un reactor químico es un equipo en cuyo interior tiene lugar una reacción química, estando este diseñado para maximizar la conversión y selectividad de esta con el menor coste posible.

2.3.1. Balance general de masa

Para realizar un balance de moles en cualquier sistema, primero hay que especificar las fronteras del sistema. El volumen encerrado por dichas fronteras se conoce como volumen del sistema. Un balance de moles para la especie j en un volumen del sistema, donde j representa una especie química específica de interés; por ejemplo, agua o NaOH.

Figura 1. Balance en el volumen del sistema



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 8.

La velocidad de generación ΔG_{j1} , en términos de r_{j1} y el subvolumen ΔV_1 , es:

$$\Delta G_{j1} = r_{j1} \Delta V_1$$

Se puede escribir expresiones similares para ΔG_{j2} y los otros subvolúmenes del sistema ΔV_i . La velocidad total de generación dentro del volumen del sistema es la suma de todas las velocidades de generación en cada uno de los subvolúmenes. Si el volumen total del sistema se divide en M subvolúmenes, la velocidad total de generación es:

$$G_j = \sum_{i=1}^M \Delta g_{j1} = \sum_{i=1}^M r_{ji} \Delta V_i$$

Tomando los límites adecuados y usando la definición de una integral, es posible escribir la ecuación anterior en la forma:

$$G_j = \int_V r_j dV$$

En esta ecuación se ve que r_j será una función indirecta de la posición, porque las propiedades de los materiales que reaccionan y las condiciones de reacción pueden tener diferentes valores en distintos puntos dentro del reactor.

Ahora se sustituye G_j en la ecuación siguiente:

$$F_{j0} + F_j + G_j = \frac{dN_j}{dt}$$

Por su forma integral para obtener una forma de la ecuación general del balance de moles para cualquier especie química j que esté entrando, saliendo, reaccionando o acumulándose dentro de cualquier volumen del sistema V .

$$F_{j0} + F_j + \int_V r_j dV = \frac{dN_j}{dt}$$

A partir de esta ecuación general de balances de moles se puede desarrollar las ecuaciones de diseño para diversos tipos de reactores industriales: discontinuo, semicontinuo y de flujo continuo. Al evaluar tales ecuaciones es posible determinar el tiempo o el volumen de reactor necesarios para convertir una cantidad específica de reactivos en productos.

2.3.2. Reactores ideales

Se denomina reactor ideal al cual está diseñado bajo condiciones teóricas que no se consideran factores externos como la variación de la temperatura ambiental o picos de presión en los reactores, lo que puede desplazar el equilibrio de una reacción y así modificar la conversión teórica calculada.

2.3.3. Clasificación de los reactores

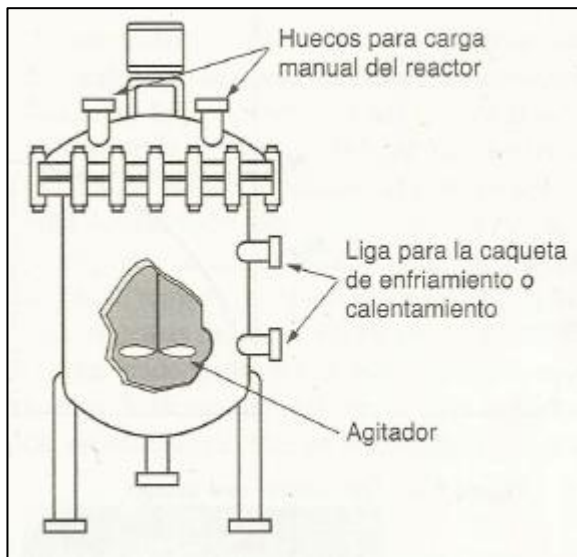
A continuación, se muestran los tipos más comunes de reactores.

2.3.3.1. Reactores intermitentes (batch)

Un reactor intermitente se emplea para operaciones a pequeña escala para probar nuevos procesos que aún no se han desarrollado en su totalidad, para fabricar productos costosos y para procesos difíciles de convertir en operaciones continuas. El reactor se carga (es decir, se llena) por los huecos de la parte superior. El reactor intermitente tiene la ventaja de permitir una alta conversión, que puede obtenerse dejando el reactivo dentro del reactor por periodos prolongados, pero también cuenta con la desventaja del alto costo de

mano de obra por lote, la variabilidad del producto de un lote a otro y la dificultad para producción a gran escala.

Figura 2. Reactor simple intermitente homogéneo



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 11.

2.3.3.2. Reactores de flujo continuo

Los reactores de flujo continuo casi siempre se operan en estado estacionario. Dentro de esta categoría hay tres tipos principales: el reactor continuo de mezcla perfecta (CSTR), el reactor de flujo tapón (PFR) que se trata en el inciso 2.3.5 y el reactor empacado (PBR).

2.3.3.2.1. Reactor tubular (PFR)

Es un reactor de uso común en la industria. Consta de un tubo cilíndrico y normalmente opera en estado estacionario, igual que el CSTR. Los reactores tubulares se emplean con mayor frecuencia para reacciones en fase gas.

En el reactor tubular los materiales que reaccionan se consumen de manera continua a medida que fluyen a lo largo del reactor. Al modelar el reactor tubular se asume que la concentración varía continuamente en la dirección axial a todo lo largo del reactor. Por consiguiente, la velocidad de reacción, que es una función de la concentración para todas las reacciones, excepto la de orden cero, también variará axialmente.

2.3.3.2.2. Reactor CSTR

Figura 3. **Esquema de un reactor CSTR.**



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 18.

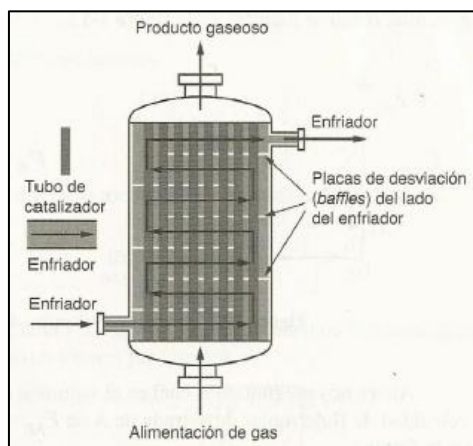
Un reactor de uso común en procesos industriales es el reactor continuo de mezcla perfecta.

Se llama reactor continuo de mezcla perfecta (CSTR), o reactor de retromezcla (backmix), y se emplea sobre todo para reacciones en fase líquida. Normalmente se opera en estado estacionario y se asumen que produce una mezcla perfecta. No hay dependencia del tiempo o de la posición en la temperatura, la concentración o de la velocidad de reacción del reactor. Es decir, todas las variables son iguales en todos los puntos del interior del reactor. Como la temperatura y la concentración son también idénticas en todo el interior del recipiente de reacción, son las mismas en el punto de salida. Por lo tanto, la temperatura y la concentración de la corriente de salida se toman en el modelo como si fueran iguales a aquéllas en el interior del reactor. Para sistemas donde el mezclado es altamente no ideal, este modelo de mezcla perfecta resulta inadecuado, por lo que debemos recurrir a técnicas de modelaje, como distribución de tiempo de residencia, para obtener resultados significativos³.

2.3.3.2.3. Reactor de lecho empacado

La principal diferencia entre los cálculos de diseño de reactores en los que intervienen reacciones homogéneas y aquellos en los cuales se realizan reacciones heterogéneas, fluido-sólido, es que en el segundo caso la reacción tiene lugar sobre la superficie del catalizador. Por consiguiente, la velocidad de reacción se basa en la masa de catalizador sólido W , y no el volumen de reactor V .

Figura 4. Reactor longitudinal de lecho empacado



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 18.

³FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 18.

Todos los reactores descritos anteriormente se consideran ideales.

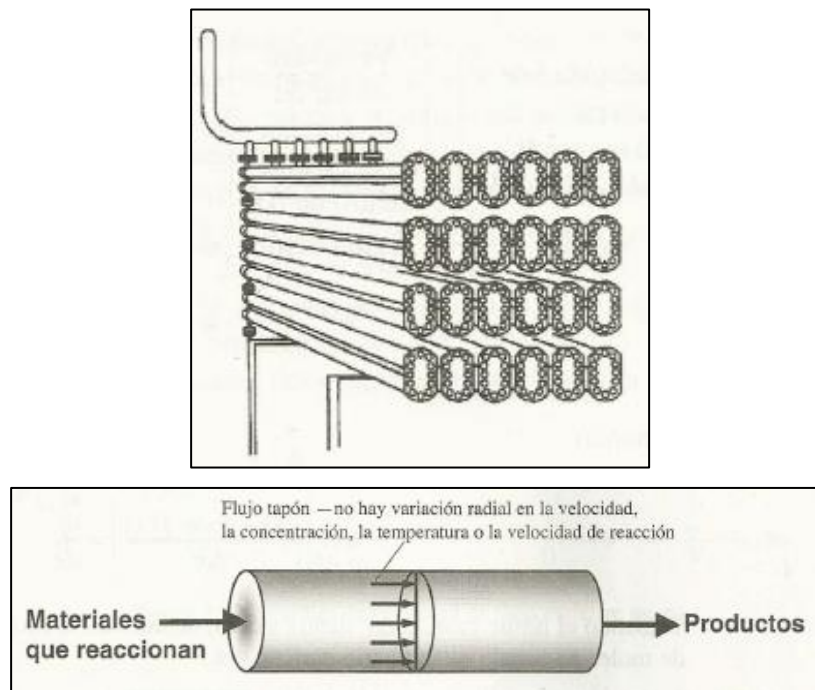
2.3.4. Funciones de un reactor químico

La función principal de un reactor químico es proporcionar un buen contacto de los reactivos para reducir el tiempo de reacción al mínimo, logrando al mismo tiempo una conversión adecuada y económicamente rentable para un proceso.

En algunos casos el reactor cuenta con sistemas auxiliares que sirven para monitorear la reacción, además de sistemas de control de flujos, entre otros.

2.3.5. Reactores de flujo tapón (PFR)

Figura 5. Reactor PFR



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 11.

2.3.6. Consideraciones entre un reactor de flujo continuo (PFR)

Cuando la ecuación general de balance de moles:

$$F_{j0} + F_j + \int_V r_j dV = \frac{dN_j}{dt}$$

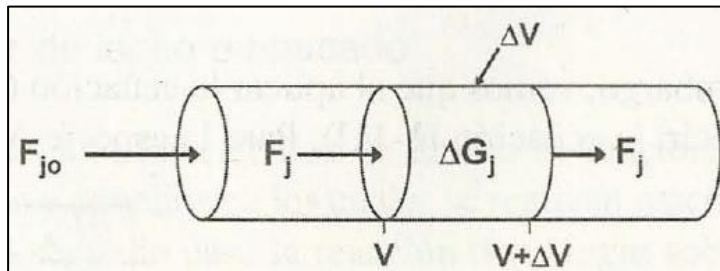
Se aplica a un CSTR que opera en estado estacionario (es decir, las condiciones no cambian con el tiempo),

$$\frac{dN_j}{dt} = 0$$

La ecuación que se emplea para diseñar reactores tubulares en estado estacionario puede desarrollarse de dos modos: (1) directamente a partir de la ecuación del balance general de moles, diferenciando con respecto al volumen V , o (2) a partir de un balance molar para la especie j en un segmento diferencial del volumen del reactor ΔV . Realizando el segundo método para llegar a la forma diferencial del balance de moles del PFR. El volumen diferencial ΔV , que se muestra en la siguiente figura, se elegirá de manera que sea suficientemente pequeño para que no haya variaciones espaciales en la velocidad de reacción dentro de este volumen. Por lo tanto, el término de generación ΔG_j , es:

$$\Delta G_j = \int^{\Delta V} r_j dV = r_j \Delta V$$

Figura 6. **Balance de moles para la especie j en el volumen ΔV**



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 15.

Dividiendo entre ΔV y reordenando:

$$\left[\frac{F_j|_{V+\Delta V} - F_j|_V}{\Delta V} \right] = r_j$$

El término entre corchetes se asemeja a la definición de la derivada:

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left[\frac{F_j|_{V+\Delta V} - F_j|_V}{\Delta V} \right] = \frac{dF_j}{dV}$$

Tomando el límite cuando ΔV tiende a cero, se obtiene la forma diferencial del balance de moles en estado estacionario para un PFR:

$$\frac{dF_j}{dV} = r_j$$

2.3.7. Definiciones adicionales

Es necesario definir algunos términos y ecuaciones de uso común en ingeniería de reacciones químicas.

2.3.7.1. Espacio-tiempo

También conocido como tiempo de residencia τ , se obtiene dividiendo el volumen del reactor entre la velocidad de flujo volumétrico que entra al reactor:

$$\tau = \frac{V}{v_0}$$

“El espacio-tiempo es el tiempo necesario para procesar un volumen de reactor de líquido basado en las condiciones de entrada”⁴.

2.3.7.2. Velocidad espacial

La velocidad espacial (sv), que se define como sigue:

$$SV = \frac{v_0}{V}$$

Aunque algunos la definen de la siguiente manera:

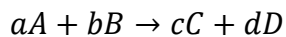
$$SV = \frac{1}{\tau}$$

Podría considerarse a primera vista como el recíproco del espacio-tiempo. Sin embargo, llega a haber una diferencia en las definiciones de ambas cantidades. En el espacio-tiempo, la velocidad de flujo volumétrico entrante se mide en las condiciones de entrada, pero en la velocidad espacial a menudo se emplean otras condiciones.

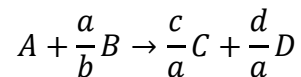
⁴ FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 66.

2.3.7.3. Conversión

Para definir la conversión, se debe elegir uno de los materiales que reaccionan como base de cálculo y después se relacionarán las otras especies que participan en la reacción con esta base. Prácticamente en todos los casos es mejor elegir el reactivo limitante como base de cálculo. Se desarrollarán las relaciones estequiométricas y las ecuaciones de diseño considerando la reacción general.



Las letras mayúsculas representan especies químicas y las minúsculas, coeficientes estequiométricos. Tomando la especie A como base de cálculo, se divide la expresión de la reacción entre el coeficiente estequiométrico de la especie A, para expresarla como sigue:



Con la finalidad de tener todas las cantidades “por mol de A”, este es el reactivo limitante.

Ahora se pregunta: “¿Cómo se podría cuantificar el grado de avance de una reacción?”⁵. Una forma conveniente de responder a esto es definiendo el parámetro llamado conversión. La conversión X_A es el número de moles de A que reaccionan por mol de A alimentada al sistema:

$$X_A = \frac{\text{Moles de A que reaccionan}}{\text{Moles de A alimentadas}}$$

⁵ FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 38.

2.3.8. Constante de velocidad de reacción

La constante de velocidad de reacción k no es verdaderamente una constante, es sólo independiente de las concentraciones de las especies que interactúan en la reacción. La cantidad k es referida velocidad de reacción específica o constante de velocidad. Casi siempre depende fuertemente de la temperatura Y de que esté presente un catalizador o no, y en reacciones en fase gas puede estar en función de la presión total. En sistemas líquidos también llega a estar en función de parámetros como la fuerza iónica y la elección de disolvente. Estas otras variables normalmente exhiben un efecto mucho menor sobre la velocidad de reacción específica que la temperatura, con excepción de los disolventes supercríticos, como el agua supercrítica⁶.

Por consiguiente, para los objetivos del material aquí presentado, se asumirá que k_A solo depende de la temperatura. Esta suposición es válida en la mayoría de las reacciones de laboratorio e industriales, y parece funcionar bastante bien.

Fue el gran químico sueco Arrhenius quien primero sugirió que la dependencia de la velocidad de reacción específica k_A respecto de la temperatura, podría correlacionarse por una ecuación del tipo:

$$k_x(T) = Ae^{-\frac{E}{RT}}$$

Donde:

A = Factor preexponencial o factor de frecuencia

E = Energía de activación, J/mol o cal/mol

R = Constante de los gases ideales = 8.314 J/mol*K

T = Temperatura absoluta, K

La ecuación anterior, conocida como la ecuación de Arrhenius, ha sido verificada empíricamente para dar el comportamiento de la mayoría de las

⁶ FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 91.

constantes de velocidad de reacción con exactitud experimental en intervalos amplios de temperatura.

¿Por qué hay una energía de activación? Si los reactivos son radicales libres que esencialmente reaccionan de inmediato al chocar, hay usualmente energía de activación. Sin embargo, para la mayoría de los átomos y las moléculas que experimentan una reacción, hay una energía de activación. Dos razones son las siguientes, para reaccionar:

- Las moléculas requieren energía para distorsionar o estirar sus enlaces de modo que puedan romperse para formar otros nuevos.
- Las fuerzas de repulsión estérica y electrónica deben ser vencidas para que las moléculas reaccionantes se acerquen.

La energía de activación puede considerarse como una barrera para la transferencia de energía (de energía cinética a energía potencial) entre moléculas reactivas y debe ser vencida. Una manera de considerar tal barrera para las reacciones es a través del uso de coordenadas de reacción. Dichas coordenadas denotan la energía potencial del sistema en función del progreso a lo largo de la trayectoria de reacción, al ir desde reactivos hasta un producto intermedio y después hacia el producto final.

Un comentario final sobre la ecuación de Arrhenius es que puede expresarse en forma más útil encontrando la velocidad de reacción específica a temperatura T_0 , esto es:

$$k_x(T) = K(T_0)e^{\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)}$$

Esta ecuación dice que si se conoce la velocidad de reacción específica $k(T_0)$ a la temperatura T_0 , y se conoce la energía de activación E , se encuentra la velocidad de reacción específica $k(T)$ a cualquier otra temperatura T para esa reacción.

2.4. Estequiometría de un reactor continuo de flujo tapón (PFR)

La forma de la tabla estequiométrica para un sistema de flujo continuo es virtualmente idéntica a aquella para un sistema intermitente, con excepción de que se reemplaza N_{fj} por F_{fj} y por F_j . Tomando A como base, se divide la ecuación de reacción entre el coeficiente estequiométrico de A para obtener:

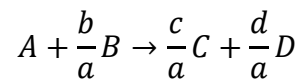


Figura 7. **Tabla estequiométrica para un sistema de flujo**

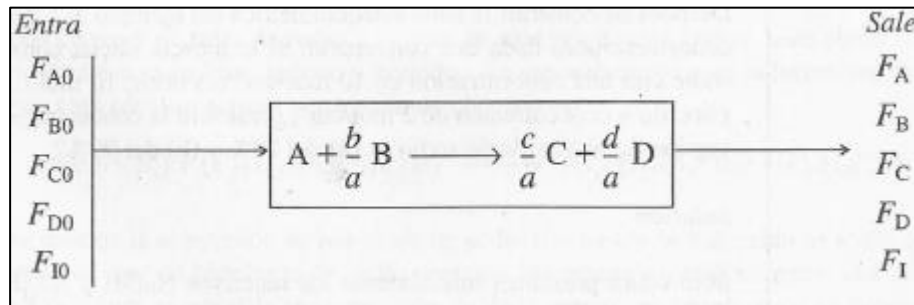
Especie	Velocidad de alimentación al reactor (mol/tiempo)	Cambio dentro del reactor (mol/tiempo)	Velocidad del efluente del reactor (mol/tiempo)
A	F_{A0}	$-F_{A0}X$	$F_A = F_{A0}(1 - X)$
B	$F_{B0} = \Theta_B F_{A0}$	$-\frac{b}{a} F_{A0}X$	$F_B = F_{A0} \left(\Theta_B - \frac{b}{a} X \right)$
C	$F_{C0} = \Theta_C F_{A0}$	$\frac{c}{a} F_{A0}X$	$F_C = F_{A0} \left(\Theta_C + \frac{c}{a} X \right)$
D	$F_{D0} = \Theta_D F_{A0}$	$\frac{d}{a} F_{A0}X$	$F_D = F_{A0} \left(\Theta_D + \frac{d}{a} X \right)$
I	$F_{I0} = \Theta_I F_{A0}$	—	$F_I = F_{A0} \Theta_I$
	F_{T0}		$F_T = F_{T0} + \left(\frac{d}{a} + \frac{c}{a} - \frac{b}{a} - 1 \right) F_{A0}X$
			$F_T = F_{T0} + \delta F_{A0}X$

Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 107.

Donde:

$$\theta_B = \frac{F_{B0}}{F_{A0}} = \frac{C_{B0}v_0}{C_{A0}v_0} = \frac{C_{B0}}{C_{A0}} = \frac{y_{B0}}{y_{A0}}$$

Figura 8. **Variables de reactor de flujo**

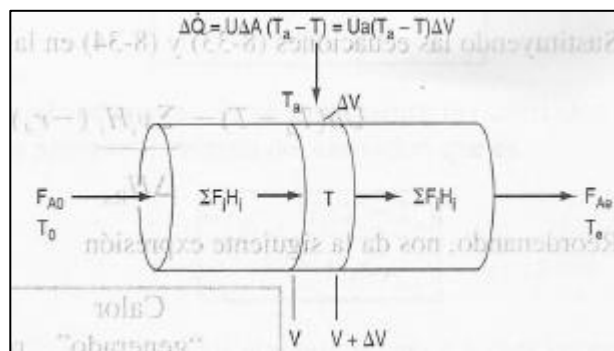


Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 106.

2.5. Efecto de calor en un PFR

Para elaborar un modelo de reactor de un PFR en el cual el calor se agrega o retira a través de las paredes cilíndricas del mismo, se asumirá que no hay gradientes radiales en el mismo y que el flujo de calor a través de la pared por volumen unitario del reactor es como se indica en la figura siguiente.

Figura 9. **PFR con ganancia o pérdida de calor**



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 495.

2.5.1. Deducción del balance de energía para un PFR

El balance de energía para el volumen ΔV con $\dot{W}_s=0$. La ecuación que se obtienen es:

$$\Delta\dot{Q} + \sum F_i H_i|_V - \sum F_i H_i|_{V+\Delta V} = 0$$

El flujo de calor al reactor $\dot{Q}$ se da en términos del coeficiente total de transferencia de calor U ; el área de intercambio de calor A , y la diferencia entre la temperatura ambiente, T_a y la temperatura del reactor T .

$$\dot{Q} = UA(T_a - T) = Ua\Delta V(T_a - T)$$

Donde a es el área de intercambio de calor por unidad de volumen del reactor para el PFR.

$$a = \frac{A}{V} = \frac{\pi DL}{\frac{\pi D^2 L}{4}} = \frac{4}{D}$$

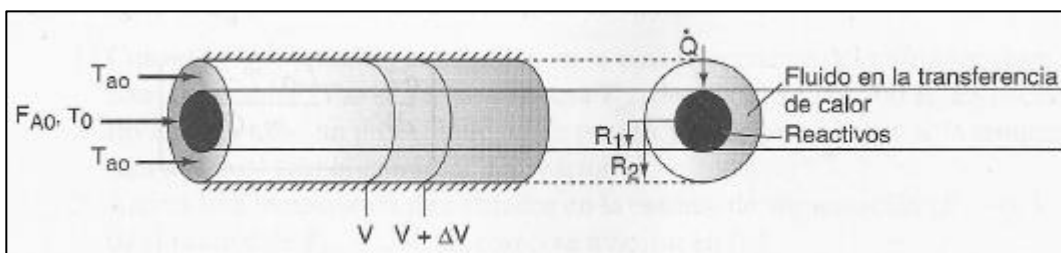
De una serie de deducciones se obtiene la ecuación para el balance de energía en un PFR.

$$\frac{dT}{dV} = \frac{Ua(T_a - T) + (r_A)(\Delta H_{RX})}{F_{AO}(\sum \Theta_i C_{p_i} + \Delta C_p X)}$$

2.5.2. Balance para el fluido calentador

“El fluido en la transferencia de calor será un enfriador para reacciones exotérmicas y un medio de calentamiento para reacciones endotérmicas. Si el flujo del fluido en la transferencia de calor es suficientemente alta con respecto al calor liberado (o absorbido) por la mezcla de reacción, entonces la temperatura del fluido en la transferencia de calor será constante a lo largo del reactor”⁷.

Figura 10. Transferencia de calor en fluidos



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 499.

A continuación, se desarrollarán ecuaciones básicas para un enfriador utilizado para retirar calor de reacciones exotérmicas; sin embargo, tales ecuaciones serán aplicables a reacciones endotérmicas en las cuales se emplea un medio de calentamiento para suministrar calor.

Por convención, $\dot{Q}$ es el calor agregado al sistema. A continuación, se realizará el balance para el enfriador en la sección anular entre R_1 y R_2 y entre V y $V + \Delta V$. El flujo de masa del enfriador es $\dot{m}_c$. Hay que considerar el caso en el que el radio externo del canal enfriador R_2 está aislado.

⁷ FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 499.

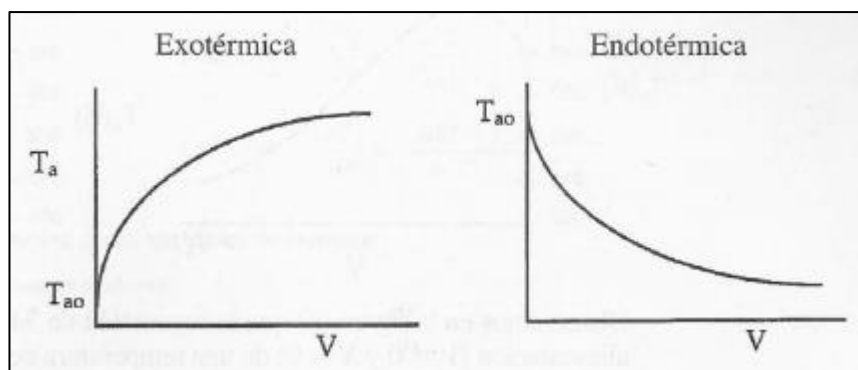
2.5.2.1. Caso a flujo co-corriente

El reactivo y el enfriador fluyen en la misma dirección, la variación de temperatura del enfriador T_a a lo largo del reactor es:

$$\frac{dT_a}{dV} = \frac{Ua(T - T_a)}{m_c \dot{C}_{Pc}}$$

A continuación, se muestran los perfiles de temperatura del fluido en la transferencia de calor típicos para reacciones exotérmicas y endotérmicas:

Figura 11. **Perfiles de temperatura del fluido en la transferencia de calor**



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 501.

2.6. Tipos de flujo

2.6.1. Turbulencia

La forma en la que un fluido fluye a lo largo de una tubería puede dividirse en flujo laminar y flujo turbulento. En la primera las partículas fluyen de manera ordenada mientras que en la segunda se crean cambios bruscos de presión y velocidad que tienen por consecuencia el apareamiento de vórtices de

diferentes escalas. Uno de los principales requerimientos del reactor CSTR es que opere en la región turbulenta, esto es decir a números de Reynolds iguales o por encima de 4 000. El número de Reynolds es una comparación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos. Aunque también existe una denominada de transición en la que el flujo pasa del estado laminar al turbulento de una manera completamente aleatoria, por esto no es posible predecir el comportamiento.

2.6.2. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un módulo adimensional, que dicta el régimen de flujo, de un fluido que fluye en contacto con una superficie o en una tubería. El número de Reynolds depende de las características del fluido y de la aspereza superficial y por lo tanto, está íntimamente relacionado con la capa límite.

Para la transferencia de calor Reynolds se calcula:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{vL_c}{\nu}$$

Donde:

Re= Número de Reynolds

ν = Velocidad del fluido

ν = Viscosidad cinemática del fluido

2.7. Transferencia de calor

Prácticamente en todas las operaciones que realiza el ingeniero químico interviene la producción o absorción de energía en forma de calor. Por lo tanto, las leyes que rigen la transferencia de calor y el tipo de aparatos, cuyo fin principal es el control del flujo de calor, tienen una gran importancia.

Cuando dos objetos que están a temperaturas diferentes se ponen en contacto térmico, el calor fluye desde el objeto de temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja. El flujo neto se produce siempre en el sentido de la temperatura decreciente. Los mecanismos por los que fluye el calor son tres: conducción, convección y radiación.

2.7.1. Convección

La convección se refiere al flujo de calor asociado con el movimiento de un fluido, tal como cuando el aire caliente de un horno entra a una habitación, o a la transferencia de calor de una superficie caliente a un fluido en movimiento. El segundo significado es más importante para las operaciones unitarias, de forma que incluye la transferencia de calor a partir de paredes metálicas, partículas sólidas y superficies líquidas.

Por lo general, el flujo convectivo por unidad de área es proporcional a la diferencia entre la temperatura de la superficie y la temperatura del fluido, como se establece en la ley de Newton de enfriamiento:

$$\frac{Q}{A} = h(T_s - T_f)$$

Convección natural y forzada. Cuando las corrientes en un fluido son consecuencia de las fuerzas de flotación generadas por diferencias de densidad, que a su vez se originan por gradientes de temperatura en la masa del fluido, la acción recibe el nombre de convección natural. Cuando las corrientes se deben a un dispositivo mecánico, tal como una bomba o un agitador, el flujo es independiente de las diferencias de densidad y recibe el nombre de convección forzada. Las fuerzas de flotación también existen en la convección forzada, pero por lo general solo tienen un pequeño efecto.

2.7.2. Fundamentos de la transferencia de calor

La transferencia de calor desde un fluido más caliente a uno más frío, generalmente a través de una pared sólida que separa los dos fluidos, es un caso que se encuentra con frecuencia en la práctica de la ingeniería química. El calor transferido puede ser calor latente, que va acompañado de un cambio de fase tal como la condensación o evaporación, o bien tratarse de calor sensible procedente del aumento o disminución de la temperatura de un fluido sin cambio de fase. Ejemplos típicos son la disminución de temperatura de un fluido por transferencia de calor sensible hacia un fluido más frío, cuya temperatura aumenta por este hecho; condensación de vapor de agua utilizando agua de enfriamiento, y evaporación de agua a partir de una disolución a una determinada presión mediante condensación de vapor a una presión más alta. Todos estos casos implican transferencia de calor por conducción y convección.

Los cálculos de transferencia de calor se basan en el área de la superficie de calentamiento y se expresan en Watt por metro cuadrado o Btu por hora por pie cuadrado de la superficie a través de esta fluye el calor. La velocidad de transferencia de calor por unidad de área recibe el nombre de flujo de calor (flux de calor). En muchos tipos de equipos de transferencia de calor, las superficies

de transferencia se construyen con tubos o tuberías. Los flujos de calor podrán entonces estar basados en cualquiera de las dos superficies, interior o exterior de los tubos. Aunque la elección es arbitraria, es preciso especificarla con claridad, dado que el valor numérico de los flujos de calor no es el mismo para ambos casos.

Cuando un fluido se calienta o se enfría, la temperatura variará a lo largo de la sección transversal de la corriente. Si el fluido se calienta, su temperatura es máxima en la pared de la superficie de calentamiento y disminuye hacia el centro de la corriente. Si el fluido se está enfriando, la temperatura es mínima en la pared y aumenta hacia el centro. Debido a estos gradientes de temperatura en la sección transversal de la corriente, es necesario concretar qué es lo que se entiende por temperatura de la corriente. Se ha convenido que sea la temperatura que se alcanzaría si toda la corriente del fluido que circula a través de la sección en cuestión se retirase y se mezclase adiabáticamente hasta una temperatura uniforme. La temperatura así definida recibe el nombre de temperatura media o temperatura de corriente mezclada.

2.7.3. Coeficientes de transferencia de calor

2.7.3.1. Coeficiente de película

El coeficiente de película es una medida de la facilidad de la transferencia de calor en un medio fluido, a diferencia de la conductividad, el coeficiente h , no es una propiedad del medio sino una característica experimental del conjunto de cualidades y condiciones de proceso de ese medio en particular. En general, h depende de la viscosidad, de la conductividad térmica, de la densidad, del calor específico, la configuración del medio, y la aspereza de la superficie de contacto, además del régimen de fluido, por lo que la determinación h , para un sistema en particular, es la parte más álgida de la transferencia de calor⁸.

⁸ DE LEÓN, Otto Raúl y ASANOSKI, Levent. *Guía para el estudio de la transferencia de calor. Documento consolidado-transferencia de calor (IQ-3)*. p. 54.

Para la determinación de h existen diversas correlaciones del número de Nusselt en función del número de Reynolds y Prandtl.

2.7.3.2. Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor en un intercambiador de calor es determinado para su uso en la ecuación para la determinación del calor total transferido, en un intercambiador:

$$Q = UA[\Delta TLM]$$

“El coeficiente global de transferencia de calor, está definido como el inverso de la sumatorio de las resistencias térmicas del sistema”⁹:

$$U = \frac{1}{\sum R}$$

Donde R representa al inverso de los coeficientes de película, a la conductividad y espesor de un sólido o bien a los factores de ensuciamiento.

2.7.4. Velocidad de transmisión de calor

2.7.4.1. Densidad de flujo de calor

Los cálculos de transferencia de calor se basan en el área de las superficies de calentamiento y se expresan en Btu por hora y pie cuadrado (o en vatios por metro cuadrado) de superficie a través de esta fluye el calor. La velocidad de transferencia de calor por unidad de área recibe el nombre de

⁹ DE LEÓN, Otto Raúl y ASANOSKI, Levent. *Guía para el estudio de la transferencia de calor. Documento consolidado-transferencia de calor (IQ-3)*. p.117.

densidad de flujo de calor. En muchos tipos de equipo de transferencia de calor las superficies de transferencia se construyen con tubos o tuberías. “Las densidades de flujo de calor pueden entonces estar basadas en cualquiera de las dos superficies interior o exterior de los tubos. Aunque la elección es arbitraria, es preciso especificarla claramente, pues el valor numérico de las densidades de flujo de calor no será igual en ambos casos”¹⁰.

2.7.4.2. Temperatura media de la corriente de fluido

Cuando un fluido se calienta o se enfría, la temperatura variará a lo largo de la sección transversal de la corriente. Si el fluido se calienta, su temperatura es máxima en la pared de la superficie de calentamiento y disminuye hacia el centro de la corriente- si el fluido se está enfriando, la temperatura es mínima en la pared y aumenta hacia el centro. Debido a estos gradientes de temperatura en la sección transversal de la corriente, es necesario concretar qué es lo que se entiende por temperatura media de la corriente. “Se ha convenido que sea la temperatura que se alcanzaría si toda la corriente de fluido que circula a través de la sección en cuestión se retirase y se mezclase adiabáticamente hasta temperatura uniforme. La temperatura así definida recibe el nombre de temperatura media o de mezcla en taza de la corriente”¹¹.

2.7.5. Factores de ensuciamiento

Durante el normal funcionamiento, las superficies de transferencia de calor no permanecen limpias. A uno o ambos lados de los tubos se forman costras, se deposita suciedad y otros materiales sólidos que provocan la aparición de resistencias adicionales al flujo de calor y reducen el coeficiente global. El

¹⁰ MCCABE, John, Et al. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. p. 327.

¹¹ *Ibíd.*

efecto de tales depósitos se tiene en cuenta adicionando un término h_d en el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

Se recomiendan valores numéricos para factores de ensuciamiento correspondientes a un funcionamiento satisfactorio durante la operación normal, con un razonable tiempo de servicio entre las limpiezas. Cubren un intervalo aproximado de 100 a 2 000 Btu/pie²-h-°F. Los factores de ensuciamiento para los líquidos industriales ordinarios están comprendidos en el intervalo de 300 a 1 000 Btu/pie²-h-°F. “Normalmente los factores de ensuciamiento se toman como valores que proporcionan también un factor de seguridad para el diseño”¹².

2.7.6. Diseño general del equipo para transferencia de calor

Tanto el diseño como el ensayo del equipo práctico de intercambio de calor se basan en los principios generales anteriormente expuestos. En primer lugar, se plantean balances de materia y energía, a partir de los cuales se calcula el área que se requiere para la transferencia de calor. Las magnitudes que es preciso calcular son el coeficiente global de transferencia de calor, el incremento medio de temperaturas y, en el caso de equipos que operan por ciclos, la duración de cada ciclo. En sistemas sencillos estas magnitudes se pueden evaluar fácilmente y con una exactitud considerable, pero en las unidades complejas la evaluación puede resultar difícil y estar sometida a una considerable incertidumbre. “El diseño final es casi siempre un compromiso, basado en el criterio de ingeniería, que trata de conseguir la mejor operación global teniendo en cuenta los requerimientos del servicio”¹³.

¹² MCCABE, John, Et al. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. p. 337.

¹³ *Ibíd.* p. 445.

Algunas veces el diseño está condicionado por consideraciones que tienen poco que ver con la transferencia de calor, como puede ser el espacio disponible para la instalación del equipo o la caída de presión tolerable en las corrientes de los fluidos. Los cambiadores tubulares se diseñan de acuerdo con diversas normas y códigos, tales como los estándares de la Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA) y el ASME-API Unfired Pressure Vessel Code.

2.7.7. Regímenes de transferencia de calor en fluidos

Un fluido que se calienta o se enfría puede circular con flujo laminar, flujo turbulento, o en el intervalo de transición comprendido entre el flujo laminar y el turbulento. Por otra parte, el fluido puede moverse por convección natural o forzada. En algunos casos puede encontrarse en la misma corriente más de un tipo de flujo. Así por ejemplo, en el flujo laminar a bajas velocidades a través de tubos de gran diámetro puede existir convección natural superpuesta sobre flujo laminar forzado¹⁴.

La dirección de flujo del fluido puede ser paralela a la superficie de calentamiento, en cuyo caso no se produce separación de la capa límite, perpendicular, o bien formar un cierto ángulo de forma que dicha separación tenga lugar.

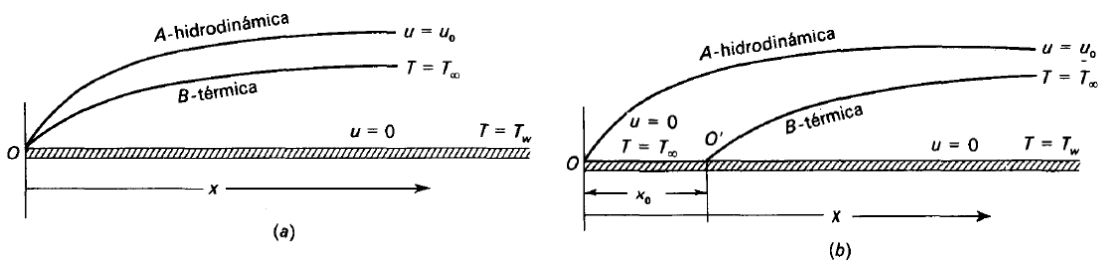
A las velocidades ordinarias, el calor que se genera debido a la fricción del fluido es despreciable en comparación con el que se transmite entre los fluidos. Sin embargo, a velocidades elevadas tales como las correspondientes a números de Match superiores a algunas décimas, el calor generado por fricción es considerable y no se puede adquirir una importancia controlante.

¹⁴ MCCABE, John, et al. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. p. 343.

2.7.7.1. Capa límite térmica

Considérese una placa o lámina plana sumergida en una corriente de fluido que circula en flujo estacionario y orientado paralelamente a la lámina, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 12. **Capa límite térmica e hidrodinámica sobre una lámina (a) toda la placa está caliente; (b) longitud no calentada = x_0 .**



Fuente: MCCABE, John, et. al. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. p. 345.

Supóngase que la corriente que se acerca a la lámina lo hace con una velocidad u_0 y una temperatura T_∞ , y que la superficie de la lámina se mantenga a una temperatura constante T_w . Supóngase que T_w es mayor que T_∞ , de forma que la lámina calienta al fluido. Se desarrolla una capa límite, dentro de esta la velocidad varía desde $u = 0$ en la pared hasta $u = u_0$ en el borde exterior de la capa. Esta capa límite, llamada capa límite fluidodinámica, se representa en la figura anterior mediante la línea OB . En la figura se observa que las líneas OA y OB indican que la capa límite térmica es más delgada que la capa fluidodinámica para todos los valores de x , siendo x la distancia desde el borde de ataque de la lámina.

La relación entre el espesor de las dos capas límite para un punto dado a lo largo de la lámina depende del número adimensional de Prandtl, definido como:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

Que aparece en el análisis dimensional de transferencia de calor.

Cuando el número de Prandtl es superior a la unidad, lo que ocurre para la mayoría de los líquidos, la capa térmica es más delgada que la capa hidrodinámica, tal como muestra la figura anterior.

La mayoría de los líquidos tienen números de Prandtl mayores que los de los gases debido a que su viscosidad es dos o más órdenes de magnitud superior a la de éstos, y ello compensa con creces la mayor conductividad calorífica de los líquidos. En un fluido de viscosidad elevada la capa límite fluidodinámica se extiende más allá de la superficie de la lámina, esto puede comprenderse intuitivamente. Imaginen una lámina plana moviéndose a través de un líquido muy viscoso tal como glicerina: el fluido se pondrá en movimiento a bastante distancia de lámina, lo que pone de manifiesto la existencia de una gruesa capa límite.

El espesor de la capa límite térmica aumenta con la conductividad térmica, puesto que una conductividad elevada da lugar a una mayor densidad de flujo de calor y a gradientes de temperatura más amplios en el fluido. La muy elevada conductividad de los metales líquidos hace que los gradientes de temperatura se extiendan más allá de la capa límite fluidodinámica¹⁵.

¹⁵ MCCABE, John, et al. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. p. 345.

2.7.8. Transferencia de calor por convección forzada en flujo turbulento

«Uno de los casos más importantes de transferencia de calor es el flujo de calor hacia o desde una corriente de fluido que circula con flujo turbulento por una conducción cerrada, especialmente tubos. La turbulencia se presenta para números de Reynolds superiores a aproximadamente 10000 y, como la velocidad de transferencia de calor es mayor para flujo turbulento que para flujo laminar, la mayoría de los aparatos operan en el intervalo turbulento.

Los primeros estudios sobre este caso estaban basados en correlaciones empíricas de datos, tomando como guía el análisis dimensional. Las ecuaciones así obtenidas todavía se utilizan mucho en el diseño. Con posterioridad se ha estudiado teóricamente el problema, obteniéndose un conocimiento más profundo del mecanismo de la transferencia de calor con flujo turbulento, a la vez que se han mejorado las ecuaciones aplicables a intervalos de condiciones más amplios. En esta sección se considera primeramente el método empírico-dimensional y después se analizan brevemente los resultados más teóricos»¹⁶.

2.7.9. Efecto de la rugosidad

Para igualdad de los números de Reynolds, el coeficiente de transferencia de calor para flujo turbulento es algo mayor en un tubo rugoso que en un tubo liso. El efecto de la rugosidad sobre la transmisión de calor es mucho menor que sobre la fricción y, desde el punto de vista económico, es más importante utilizar tubos lisos para minimizar las pérdidas por fricción que un tubo rugoso para obtener un mayor coeficiente de transferencia de calor. En los cálculos prácticos se desprecia el efecto de la rugosidad sobre h_i ¹⁷.

¹⁶ MCCABE, John, et al. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. p. 354.

¹⁷ *Ibíd.* p. 361.

2.8. Conductimetría

En esta sección se definirá el concepto conductimetría y se explicará su importancia para el estudio de reactores PFR.

2.8.1. Definición

“La conductimetría es un método que se utiliza para medir la conductividad de una disolución, determinada por su carga iónica, o salina, de gran movilidad entre dos puntos de diferente potencial. La conductividad eléctrica es un fenómeno de transporte en el cual la carga eléctrica (en forma de electrones o iones) se mueve a través de un sistema”¹⁸.

2.8.2. Conductividad electrolítica

Según la ley de Ohm la resistencia eléctrica de un trozo material es igual a la diferencia de potencial dividida entre la corriente eléctrica y se refiere a la resistencia que opone el trozo de material al flujo de electrones a través de sí.

El recíproco de la resistencia es la conductancia eléctrica cuya unidad es el siemens (S) en el sistema internacional. Se debe de tomar en cuenta que esta variable está definida en función del área transversal por la que se da el flujo de electrones, la longitud del material que se atraviesa y una constante de proporcionalidad (conocida como conductividad) de la siguiente forma:

$$C_o = \frac{kA}{L}$$

¹⁸ LOU DÍAZ, Zaid Jacobo. *Validación del uso de un reactor modificado de tipo discontinuo para la hidrólisis alcalina del acetato de etilo monitoreada por conductimetría para ser utilizado en estudios de Cinética Química*. p. 221.

Donde:

k = Conductividad

A = Área transversal de paso

L = Longitud de la materia

Para estudios conductimétricos se utiliza la variable conductividad en vez de la conductancia y así se deja a un lado el efecto de las variables área y longitud. La conductividad se puede definir de mejor forma como la conductancia a través de un cubo unitario donde el área y la longitud son equivalentes a la unidad en cada variable. En el caso particular donde se trabaja con soluciones electrolíticas la conductividad se conoce como conductividad electrolítica cuya unidad en el SI es siemens partido metro, sin embargo, por razones prácticas se suele utilizar la unidad siemens partido centímetro (S/cm).

“La conductividad electrolítica se puede ver afectada por dos factores principalmente: La concentración de la solución y el carácter (débil o fuerte) de electrolito en sí. Para cuantificar el efecto de la concentración se definió una nueva variable conocida como conductividad molar (Λ). Esta variable está definida como la conductividad eléctrica dividida entre la concentración”¹⁹. Es decir:

$$\Lambda = \frac{k}{c}$$

Donde:

Λ = Conductividad molar

k = Conductividad electrolítica

c = Concentración de la solución electrolítica

¹⁹ LAINFIESTA LOPEZ, Diego Bernardo. *Diseño, construcción y evaluación de un reactor flujo pistón de forma helicoidal escala laboratorio*. p. 27.

2.8.3. Electrolitos débiles

Un electrolito débil se disocia muy poco, de manera que no se produce una suficiente concentración de iones, por lo que no puede haber flujo de corriente eléctrica.

2.8.4. Electrolitos fuertes

Un electrolito será el que al disociarse da origen a una gran concentración de iones, hecho que permite mayor conductividad eléctrica. Se considera en la práctica que un electrolito fuerte se descompone en un 100 %, lo que impide equilibrios entre sus iones y la molécula correspondiente. Debido a ello se puede determinar la conductividad molar a dilución infinita teórica a partir de las conductividades iónicas de cada ion. Por lo que:

$$\Lambda^0 = \Lambda_+^0 + \Lambda_-^0$$

Donde:

Λ^0 = Conductividad molar a dilución infinita

Λ_+^0 = Conductividad molar del catión a dilución infinita

Λ_-^0 = Conductividad molar del anión a dilución infinita

2.8.5. Determinación de las conductividades iónicas

La conductancia molar depende de la concentración del electrolito. Sería independiente de la misma si la conductividad fuese directamente proporcional a la concentración, pero esto no es así debido a que la interacción entre los iones es disociativa a concentraciones bajas y asociativas a concentraciones altas.

2.8.5.1. Variación de la conductancia con la concentración: Ley de Kohlrausch

Las medidas realizadas por F.W. Kohlrausch en 1894 de conductancia molar para diferentes electrolitos mostraron dos tipos de comportamiento. Por un lado, los electrolitos verdaderos (fuertes), como el KCl, el HCl, etc., muestran una disminución lineal de la conductancia molar con la raíz cuadrada de la concentración. Por otro lado, los electrolitos potenciales (débiles), como el ácido acético, sulfato de níquel, el agua, etc., muestran valores máximos de conductancia molar cuando $C \rightarrow 0$ (dilución infinita), pero disminuyen rápidamente a valores bajos cuando aumenta la concentración²⁰.

Los electrolitos verdaderos son sustancias que están completamente ionizadas en disolución, por lo que la concentración de iones dispuestos para la conducción es proporcional a la concentración del electrolito. Sin embargo, existe cierta relatividad en la denominación “verdadero” y “potencial” puesto que la ionización depende fuertemente de la naturaleza del disolvente y de la temperatura.

Para los electrolitos verdaderos, Kohlrausch demostró que:

$$\Lambda = \Lambda_0 - AC^{1/2} \text{ (Ley de Kohlrausch)}$$

Donde:

Λ_0 = Conductividad molar límite

A = Coeficiente que depende de la naturaleza del electrolito, del disolvente y de la temperatura.

²⁰ Universidad Tecnológica Nacional. *Conductividad de electrolitos*.
<http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/fiquimica/conductividad>. Consulta: 27 de junio de 2018.

2.8.5.2. Ley de la migración independiente de los iones

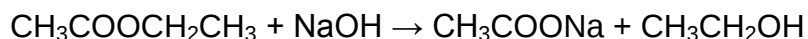
Kohlrausch también demostró que Λ_0 , para cualquier electrolito, se puede expresar como la suma de las contribuciones de las conductancias iónicas de cada una de las especies constituyentes. Llamado λ_+ y λ_- a las conductancias molares de los cationes y los aniones respectivamente, la expresión matemática de la Ley de las migraciones Independientes de los iones es:

$$\Lambda_0 = z_+ \lambda_+^0 + z_- \lambda_-^0$$

“Donde z_+ y z_- es el número de oxidación de los cationes y aniones respectivamente. Los valores de λ_+^0 y λ_-^0 para algunos iones se encuentran tabulados en tablas”²¹.

2.8.6. Estudio conductimétrico de la cinética de la hidrólisis de los ésteres en medio básico

Siguiendo el curso de la reacción de saponificación del acetato de sodio:



Se puede conocer las concentraciones existentes de productos y reactivos.

La conductividad del sistema disminuirá con el tiempo, pues van desapareciendo iones OH^- y formándose iones acetato de menor movilidad iónica, los iones Na^+ no intervienen en la variación de la conductividad debido a

²¹ Universidad Tecnológica Nacional. *Conductividad de electrolitos*.
<http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/fiquimica/conductividad>. Consulta: 27 de junio de 2018.

que se trata de iones espectadores pues por cada molécula de NaOH que desaparece se forma una de acetato de sodio.

Según la ley de Kohlrausch de la migración independiente de iones, la conductividad específica k de una solución, de “ i ” especies iónicas distintas es la suma de las conductividades específicas k_i de dichas especies iónicas, y porque la conductividad específica es el producto de la conductividad equivalente Λ_i por la concentración C_i .

Se tiene:

$$k = \sum_i k_i = \sum_i \Lambda_i C_i$$

La conductancia específica del proceso será debida solo a la base utilizada:

$$k_{t=0} = (\lambda_{Na^+} + \lambda_{OH^-})C_{B0}$$

La conductancia específica de la solución, a la salida del reactor en un tiempo “ t ” será:

$$k_{t=t} = (\lambda_{Na^+}C_{B0} + \lambda_{OH^-}(C_{B0} - C_{AC}) + \lambda_{R^-}C_{AC})$$

En las dos ecuaciones anteriores λ_{OH^-} y λ_{Na^+} son las conductividades iónicas de las especies OH⁻ y Na⁺, C_{B0} la concentración inicial de sosa, C_{AC} la concentración acetato de etilo a tiempo “ t ”.

Despejando de las dos últimas ecuaciones:

$$C_{AC} = \frac{k_{t=0} - k_{t=t}}{\lambda_{OH^-} - \lambda_{R^-}}$$

Es decir, determinando la conductividad específica de la solución en el tiempo $t=0$, en el tanque de almacenamiento de reactivos del reactor al tiempo $t=t$ y determinando las conductividades iónicas λ_{OH^-} y λ_{R^-} pueden hallarse las respectivas concentraciones de reactivos y productos.

Las conductividades iónicas λ_{OH^-} y λ_{R^-} se puede determinar de la siguiente manera:

- Se preparan disoluciones de NaOH y Acetato de sodio 0.01M, se mide con un conductímetro las conductividades de cada una de las soluciones:

$$k_{NaOH} = (\lambda_{Na^+} + \lambda_{OH^-})C_{A0}$$

$$k_{CH_3COONa} = (\lambda_{Na^+} + \lambda_{R^-})C_{B0}$$

Es importante que las concentraciones iniciales de ambas sean las mismas para poder despejar ($C_{A0} = C_{B0} = C_0$):

$$\lambda_{OH^-} - \lambda_{R^-} = \frac{k_{NaOH} - k_{CH_3COONa}}{C_0}$$

Donde C_0 es la concentración inicial del hidróxido de sodio o el acetato de sodio (que deben ser iguales).

2.9. Análisis de grados de libertad

Los grados de libertad, es una expresión introducida por Ronald Fisher, dice que, de un conjunto de observaciones, los grados de libertad están dados por el número de valores que pueden ser asignados de forma arbitraria, antes de que el resto de las variables tomen un valor automáticamente, producto de establecerse las que son libres, esto, con el fin de compensar e igualar un resultado el que se ha conocido previamente. Se encuentran mediante la fórmula $n-r$, donde n =número de sujetos en la muestra que pueden tomar un valor y r es el número de sujetos cuyo valor dependerá del que tomen los miembros de la muestra que son libres. También pueden ser representados por $k-r$, donde k =número de grupos, esto, cuando se realizan operaciones con grupos y no con sujetos individuales.

Cuando se trata de eliminar los estadísticos con un conjunto de datos, los residuos expresados en forma de vector se encuentran habitualmente en un espacio de menor dimensión que aquel en el que se encontraban los datos originales. Los grados de libertad del error los determina, precisamente, el valor de esta menor dimensión.

2.10. Concentración

La concentración de una solución es la proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolución o de disolvente, donde el soluto es la sustancia que se disuelve, el disolvente es la sustancia que disuelve al soluto, y la disolución es el resultado de la mezcla homogénea de las dos anteriores. A menor proporción de soluto disuelto en el solvente, menos concentrada está la solución, y a mayor proporción más concentrada está. Una

disolución (solución) es una mezcla homogénea, a nivel molecular, de dos o más sustancias.

2.10.1. Solubilidad

Cada sustancia tiene una solubilidad para un solvente determinado. La solubilidad es la cantidad máxima de soluto que puede mantenerse disuelto en una solución, y depende de condiciones como la temperatura, presión, y otras sustancias disueltas o en suspensión.

Cuando se alcanza la máxima cantidad de soluto en una solución se dice que la solución está saturada, y ya no se admitirá más soluto disuelto en ella. Si se agrega un poco de sal común a un vaso de agua, por ejemplo, y se agita con una cucharita, la sal se disolverá. Si se continúa agregando sal, habrá cada vez más concentración de ésta hasta que el agua ya no pueda disolver más sal por mucho que se agite. Entonces, la disolución estará saturada, y la sal que se le agregue, en vez de disolverse se precipitará al fondo del vaso. Si se calienta el agua, está podrá disolver más sal (aumentará la solubilidad de la sal en el agua), y si se enfría, el agua tendrá menos capacidad para retener disuelta la sal, y el exceso se precipitará.

2.11. Acetato de sodio

El acetato de sodio, (también llamado etanoato de sodio), es la sal de sodio del ácido acético. Es un producto químico económico producido en cantidades industriales para una amplia gama de uso.

2.11.1. Propiedades físicas y termodinámicas

Apariencia: Sólido de incoloro a blanco en polvo cristalino

Olor: Es inodoro

Punto de fusión: 324 °C

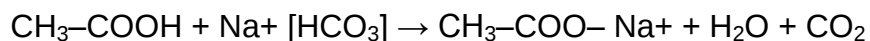
2.11.2. Propiedades químicas

pH=11

Solubilidad: Fácilmente soluble en agua fría y agua caliente.

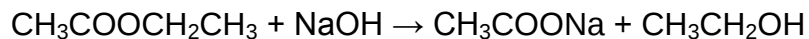
2.11.3. Síntesis

El acetato de sodio es muy económico, y es comúnmente comprado a los distribuidores de productos químicos, en vez de ser sintetizado en el laboratorio. Es algunas veces producido en el laboratorio experimentalmente por la reacción del ácido acético con Carbonato de sodio, Bicarbonato de sodio, o Hidróxido de sodio para nombrar unas pocas bases que contienen Sodio.



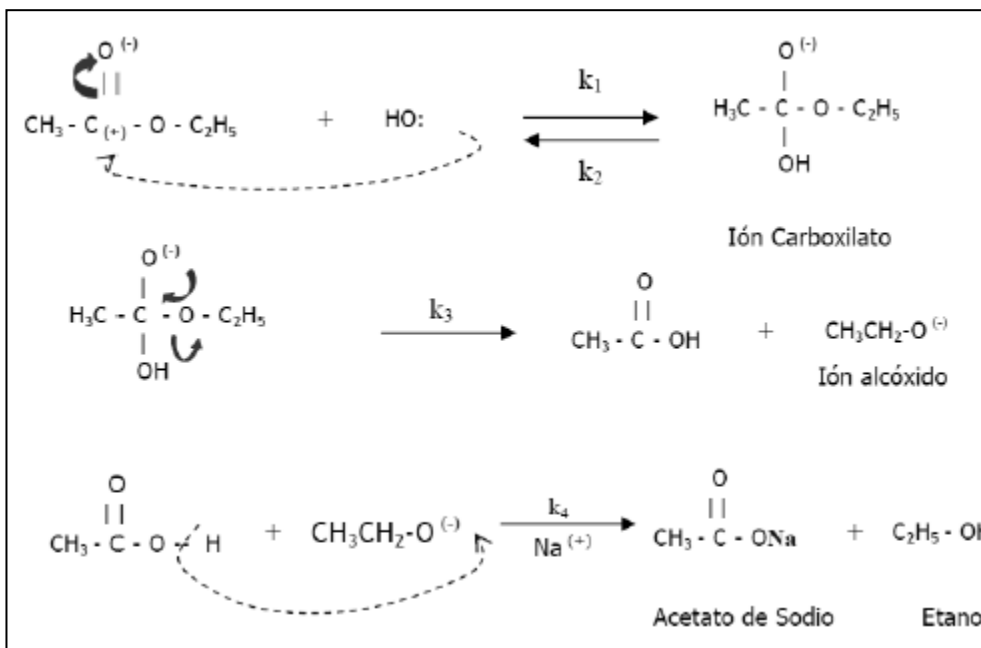
2.11.4. Mecanismos de reacción

La saponificación del Acetato de Etilo en medio alcalino. Esta se realiza en fase homogénea (líquida), y a temperatura y volumen constante. La estequiometría de la reacción es:



Un mecanismo propuesto para esta reacción es:

Figura 13. **Mecanismo de reacción de saponificación del acetato de etilo**



Fuente: HUACHO, Iván y HEREDIA, Sandra. *Diseño y construcción de un reactor de flujo en pistón*. p. 31.

2.11.5. Aplicaciones del acetato de sodio

El acetato de sodio es utilizado en la industria textil para neutralizar las corrientes residuales de ácido sulfúrico, y como foto resistente cuando se usan colorantes de anilina. También se usa como agente de encurtido en el curtido con cromo, ayuda a retardar la vulcanización del cloropreno en la producción sintética de caucho.

Es el compuesto químico que da sabor a las patatas fritas. Se suele añadir a los alimentos como conservante; en este caso se nombra como diacetato de sodio y se etiqueta como E262.

Como base conjugada de un ácido débil, una disolución de acetato de sodio y ácido acético puede actuar como disolución tampón para mantener relativamente constante el pH. Esto es especialmente útil en bioquímica, donde las reacciones dependen del pH.

2.12. Hidróxido de sodio

Su fórmula química es (NaOH), también conocido como sosa cáustica es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe humedad del aire papel, tejidos, y detergente (higroscópico). El hidróxido de sodio es muy corrosivo, generalmente se usa en forma sólida o como una solución de 50 %. Es usado en la industria (principalmente como una base química) en la fabricación de papel, tejidos y detergente.

2.12.1. Propiedades físicas y termodinámicas

A temperatura ambiente, el hidróxido de sodio es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe humedad del aire (higroscópico). Es una sustancia manufacturada. Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor que puede ser suficiente como para encender materiales combustibles. El hidróxido de sodio es muy corrosivo. Generalmente se usa en forma sólida o como una solución de 50 %.

2.12.2. Propiedades químicas

Es un hidróxido altamente corrosivo, y al mezclarse con agua es exotérmico.

2.13. Acetato de etilo

El acetato de etilo es un líquido incoloro con olor a frutas, inflamable, menos denso que el agua y ligeramente miscible con ella. Sus vapores son más densos que el aire. Se obtiene por destilación lenta de una mezcla de ácido acético, alcohol etílico y ácido sulfúrico, o bien, a partir de acetaldehído anhidro en presencia de etóxido de aluminio. Se usa en esencias artificiales de frutas, como disolvente de nitrocelulosa, barnices y lacas, en la manufactura de piel artificial, películas, placas fotográficas, seda artificial, perfumes y limpiadores de telas, entre otros.

2.13.1. Propiedades físicas y termodinámicas

Punto de ebullición: 77 °C

Punto de fusión: -83 °C

Densidad: 0,902 g/ml (20 °C respecto al agua a 4 °C)

2.13.2. Propiedades químicas

Productos de descomposición: monóxido y dióxido de carbono. En general es incompatible con agentes oxidantes, bases, ácidos y humedad. Reacciona vigorosamente con ácido clorosulfónico, dihidroaluminato de litio y clorometilfurano y oleum. Se ha informado de reacciones muy violentas con tetraaluminato de litio, hidruro de litio y aluminio y terbutóxido de potasio.

2.14. Soldadura

“El soldeo o soldar es el proceso de unión por el que se establece la continuidad entre las partes a unir con o sin calentamiento, con o sin aplicación de presión y con o sin aportación de material”²².

Se denominará metal base al material que va a ser sometido a cualquier operación de soldeo o corte y metal de aportación al material que se aporta en cualquier operación o proceso de soldeo.

La distinción entre los términos soldeo y soldadura es la siguiente: “solder” se aplica a la serie de acciones conducentes a obtener uniones soldadas o “soldaduras”, dicho de otra forma: se hablará de “soldadura”, cuando se refieran a la unión obtenida como resultado de diferentes acciones de “solder”, como procesos de soldeo, parámetros de soldeo, secuencias de soldeo, equipos de soldeo, entre otros.

Una soldadura puede ser homogénea o heterogénea. Como ejemplo de soldadura homogénea se puede citar la obtenida al realizar el soldeo de dos piezas de acero de composición similar sin utilizar metal de aporte, o utilizando un metal de aporte de la misma naturaleza que la de las piezas a unir. Como ejemplo de soldadura heterogénea, se puede citar la obtenida al realizar el soldeo de dos piezas de fundición utilizando como metal de aporte una aleación de níquel, o bien realizar el soldeo entre dos piezas de distinto material utilizando como aporte otro material diferente.

²² HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 8.

2.14.1. Clasificación de los procesos de soldeo

De acuerdo con la AWS, los diferentes métodos de unión de materiales se dividen en tres grandes grupos:

- Soldeo por fusión
- Soldeo en estado sólido
- Soldeo fuerte y blando

2.14.1.1. Proceso de soldeo por fusión

“Son aquéllos en los que siempre se produce la fusión del metal base y la del de aportación cuando éste se emplea. Es decir, siempre que existe una fase líquida formada sólo por metal base, o por metal base y de aportación”²³.

2.14.1.2. Proceso de soldeo en estado sólido

“Son aquellos en los que nunca se produce la fusión del metal base, ni la del de aportación cuando éste se emplea. Es decir, nunca existe una fase líquida”²⁴.

2.14.1.3. Procesos de soldeo fuerte y blando

“Son aquellos en los que siempre se produce la fusión del metal de aportación, pero no la del metal base. Es decir, siempre existe una fase líquida formada sólo por el metal de aportación”²⁵.

²³ HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 10.

²⁴ *Ibíd.* p. 11.

²⁵ *Ibíd.*

2.14.2. Fundamentos de electricidad y el magnetismo de la soldadura

La electricidad es una de las fuentes de energía más utilizada en la tecnología del soldeo.

En el soldeo por fusión se emplea fundamentalmente para producir el arco eléctrico y para generar, por efecto Joule, el calar necesario en los procesos de soldeo por resistencia.

El empleo de la electricidad es también muy diverso en los procesos de soldeo en estado sólido y en los de soldeo fuerte y blando. Lo anterior justifica que se traten, desde el principio, los fundamentos de este fenómeno, así como sus consecuencias.

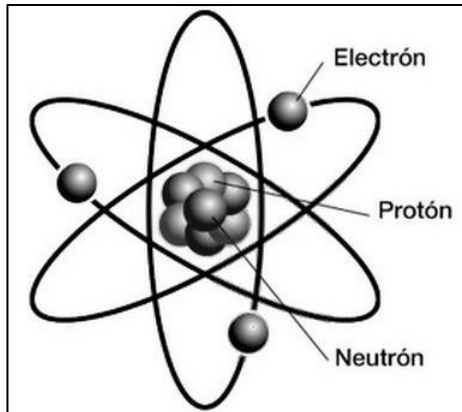
2.14.2.1. Naturaleza de la electricidad

Todos los cuerpos están formados por elementos químicos o sustancias elementales, y cada uno de ellos está constituido por partículas elementales o átomos.

Cada átomo tiene un núcleo central y alrededor de él giran a gran velocidad unas partículas (electrones) cargadas negativamente, ver figura 2.1. Dentro del núcleo hay un número igual de partículas positivas (protones) que anulan a las negativas de los electrones, compensándose el número de cargas positivas del núcleo con el número de cargas negativas que giran a su alrededor, resultando un átomo neutro. También se encuentran en el núcleo unas partículas sin carga eléctrica denominadas neutrones.

Los electrones giran en órbitas distintas alrededor del núcleo.

Figura 14. **Átomo y sus partes**



Fuente: Enciclopedia Encuentra todas las respuestas. Biblioteca en línea.
<http://queesela.net/atomo-partes-como-esta-formado/>. Consulta: 28 de junio de 2018.

La materia en estado normal es eléctricamente neutra, los átomos pueden ceder o ganar electrones, quedándose cargados positiva o negativamente.

Un cuerpo estará cargado positivamente si gana un determinado número de electrones. Un cuerpo quedará cargado negativamente si gana un determinado número de electrones.

2.14.2.2. Corriente eléctrica

“En algunas sustancias, especialmente los metales y bajo ciertas condiciones, los electrones son libres de moverse de un átomo a otro originando un flujo de electrones a través del material. Este flujo de electrones se conoce como corriente eléctrica”²⁶.

²⁶ HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 15.

2.14.2.3. Tensión, intensidad y resistencia

La intensidad de corriente es la cantidad de electrones que atraviesan una sección de conducto por unidad de tiempo. La unidad de corriente, o de la intensidad de corriente, en el sistema internacional de unidades (SI), es el amperio.

Para que los electrones circulen se necesita de una diferencia de potencial o tensión eléctrica que la crea un generador. La diferencia de potencial, o tensión eléctrica, se representa normalmente por la letra U o V.

Por tanto, la tensión es la diferencia de potencial entre dos puntos considerados, siendo incorrecto hablar de potencial en un punto si hacer referencia a otro.

Los conductores eléctricos ofrecen una resistencia al paso de los electrones, tanto mayor cuanto:

- Más largo sea el conductor
- Más pequeño sea su diámetro
- La naturaleza del material constituyente del conductor se preste menos al movimiento de los electrones.

La resistencia eléctrica se representa por la letra R y se mide en ohmios, cuyo símbolo abreviado es Ω ²⁷.

²⁷ HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 17.

2.14.2.4. Ley de Ohm

La ley de Ohm explica la relación que existe entre la tensión, resistencia e intensidad de corriente eléctrica.

Su enunciado dice: “La diferencia de potencial entre los extremos de un conductor eléctrico es directamente proporcional a la intensidad que circula por él, siendo la constante de proporcionalidad la resistencia del propio conductor”²⁸.

$$V = R * I$$

Donde:

V = Diferencia de potencial (V)

I = Intensidad de corriente (A)

R = Resistencia del conductor (Ω)

2.14.2.5. Corriente continua y corriente alterna

Si el sentido y valor de la intensidad de corriente permanecen constante a lo largo del tiempo, la corriente se denominará continua.

Si el sentido de la intensidad varía periódicamente, es decir, cambia de signo de unos instantes a otros, la corriente se denominará alterna²⁹.

²⁸ HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 20.

²⁹ *Ibíd.* p. 21.

2.14.2.5.1. Corriente continua

Corriente continua se caracteriza por no haber variación de su valor por unidad de tiempo. Se abrevia c.c. o d.c.

Características de la corriente continua:

- Se produce en las pilas y en los dinamos
- Las máquinas de soldeo que suministran este tipo de corriente son los rectificadores y los grupos motor-dinamo (convertidores o generadores).
- La corriente circula en un sentido determinado de forma constante. Hay un terminal positivo y un terminal negativo.

2.14.2.5.2. Corriente alterna

Las tensiones e intensidades de las corrientes que circulan por la mayoría de los circuitos prácticos no son estacionarias, sino que varían con el tiempo.

La más sencilla de las corrientes variables con el tiempo, cambia periódicamente su sentido y recibe el nombre de corriente alterna, representándose abreviadamente por c.a. o a.c.³⁰

La forma de onda de la corriente alterna más sencilla es la sinusoidal de tensión o de intensidad, que varía sinusoidalmente con el tiempo.

A una onda completa se le da el nombre de ciclo y el intervalo de tiempo que se invierte en un ciclo recibe el nombre de período (T). El número de ciclos por segundo es la frecuencia (f), siendo por tanto $f=1/T$. La frecuencia se mide

³⁰ HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 22.

en Hertzios (Hz) o ciclos por segundo. La amplitud es el máximo valor de la onda.

La corriente alterna que normalmente se emplea es trifásica, esto quiere decir que está integrada por tres corrientes alternas monofásicas. Para el transporte de las tres corrientes monofásicas por las compañías eléctricas hasta un receptor, se precisarían en teoría seis conductores, es decir 2 por cada corriente monofásica. Sin embargo, en la práctica se unen en un solo conductor el retorno de las tres fases, con lo que se precisan sólo cuatro conductores, el cable de retorno se denomina neutro.

Cuando se suministra la corriente a 380 V y se realiza una conexión entre una fase y el neutro, se obtiene tensión de 220 V.

Características de la corriente alterna:

- Es la forma en que suministra la energía las compañías eléctricas. La corriente eléctrica industrial se suministra a 380 V o 440 V trifásica, o a 220 V monofásica.
- Se produce en los alternadores.
- Los equipos de soldeo que suministran corriente alterna son los transformadores.
- No tiene sentido hablar de polaridad (está cambiando continuamente).

2.14.2.6. Energía y potencia eléctrica

La electricidad es una forma más de energía que se obtiene por transformación de otras energías como la química, la mecánica, entre otros.

Por ejemplo, la energía eléctrica que suministra una pila electroquímica se obtiene por transformación de la energía química de las reacciones que tienen lugar en el interior de la pila cuando esta funciona. De igual modo, la energía eléctrica que suministra una central hidroeléctrica proviene de la energía potencial (mecánica) del agua almacenada en una presa.

“La energía es la capacidad de los cuerpos para producir trabajo. La energía eléctrica es una de las formas de energía más utilizadas y encuentra numerosas aplicaciones para el alumbrado, calefacción máquinas eléctricas, aparatos electrodomésticos, etc.”³¹

La energía es el trabajo realizado por los electrones al desplazarse a lo largo de un conductor, debido a la diferencia de potencial entre sus extremos.

La unidad de energía eléctrica en el sistema internacional es el Joule y se representa con la letra J.

La energía eléctrica que aporta un generador es función del tiempo durante que el circuito está conectado. A veces, resulta conveniente hablar de energía que aporta el generador por unidad de tiempo, para lo que introduce el concepto de potencia eléctrica.

La potencia es el trabajo realizado por unidad de tiempo.

En los aparatos eléctricos se obtiene multiplicando la tensión en Voltios (V), por la intensidad de corriente en amperios (A), y se expresa en Vatios (W).

³¹ HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 24.

2.14.2.7. Efecto calorífico de la corriente eléctrica efecto Joule

El calentamiento de un conductor por efecto Joule depende de la intensidad de corriente que circula por el conductor, del tiempo durante el que circula la corriente y de la resistencia del conductor, de forma que el calor aumenta cuando aumenta cualquiera de los factores antes indicados: intensidad, resistencia y tiempo.

Se establecen los siguientes principios del efecto Joule:

- Que el calor desprendido es proporcional al tiempo
- Que el calor desprendido es proporcional a la resistencia
- Que el calor desprendido es proporcional al cuadrado de la intensidad que circula por la resistencia.

De ahí que la ley de Joule se expresa como:

$$Q = R * I^2 * t$$

Donde:

Q = Calor (J)

R = Resistencia (Ω)

I = Corriente (A)

t = tiempo (s)

2.14.3. Arco eléctrico

El arco eléctrico es una descarga continuada entre dos conductores separados ligeramente, por donde pasa la corriente, al hacerse conductor el aire o gas comprendido entre los mismos. Se manifiesta con gran desprendimiento de luz y calor. El arco, por otra parte, es la fuente de calor que utilizan muchos de los procesos de soldeo por dos razones fundamentales: proporciona altas intensidades de calor, y es fácilmente controlable a través de medios eléctricos.

“Para generar el arco se necesita de dos conductores, llamados electrodos y un gas conductor al que denominaremos plasma”³².

2.14.3.1. La columna de plasma

Para la formación del arco eléctrico hay que conseguir la separación atómica del gas conductor en iones y electrones, este procesos se denomina ionización. La ionización se consigue por el choque de los electrones que salen de uno de los electrodos con el gas. Un gas ionizado o parcialmente ionizado se denomina plasma.

“El procedimiento más simple para aportar la energía necesaria es el electrodo a una temperatura muy elevada”³³. Por ello el método corriente para cebar un arco es establecer un cortocircuito entre pieza y electrodo, debido a que se produce un calentamiento muy fuerte en la punta del electrodo negativo al pasar una corriente elevada, separando ahora el electrodo. Una vez iniciado

³² HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 32.

³³ *Ibíd.* p. 34.

el arco, los electrones que salen del cátodo ionizan el gas al chocar con sus átomos.

Los electrones siguen su camino hacia el ánodo (terminal positivo) y los iones del plasma se dirigen hacia el cátodo, al que ceden su energía cinética que se transforma en calor, manteniendo así la temperatura del cátodo que sigue emitiendo electrones.

2.14.3.2. Zonas características del arco de soldeo

El arco de soldeo se divide en tres zonas:

- Cátodo
- Columna de plasma
- Ánodo

En el cátodo (terminal negativo), se produce la emisión de electrones, que ionizan el gas convirtiéndose en plasma. Los iones que proceden de la columna de plasma bombardean el cátodo, calentándolo y permitiendo que se mantenga la emisión de electrones.

En el cátodo la energía se emplea en mantenerlo caliente y en arrancar los electrones, por lo que la temperatura del cátodo es más baja que la del ánodo, en donde toda la energía se emplea en su calentamiento.

El cátodo, además, presenta propiedades autodecapantes (de autolimpieza) debido a la acción mecánica del bombardeo de iones.

Al ánodo (terminal positivo) se dirigen los electrones atraídos por la carga positiva del ánodo.

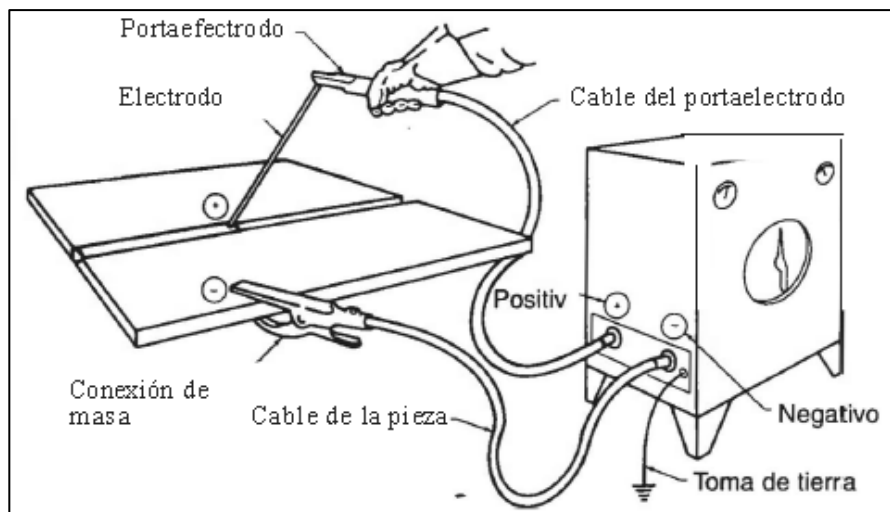
2.14.3.3. Influencia del tipo de corriente

Se puede emplear corriente continua o corriente alterna para establecer un arco eléctrico entre un electrodo y la pieza a soldar. Si se utiliza corriente continua se puede diferenciar entre conectar el electrodo al terminal negativo y la pieza al positivo o bien conectar el electrodo al terminal positivo y la pieza al negativo, de esta forma aparece el concepto de polaridad, que solo existe en el caso de corriente continua.

Si se conecta el electrodo en el terminal negativo y la pieza a soldar en el positivo, se dirá que se está soldando con polaridad directa.

Si se conecta el electrodo al terminal positivo y la pieza a soldar en el negativo se dirá que se está soldando con polaridad inversa.

Figura 15. **Corriente continua electrodo negativo**



Fuente: HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 37.

2.14.3.3.1. Efecto de la polaridad

Cuando se suelda con polaridad inversa la energía del arco se concentra fundamentalmente sobre el electrodo y por tanto la zona más caliente es el electrodo.

En general al soldar con polaridad inversa se obtiene un baño relativamente ancho, con poca penetración. También ocurre excesiva acumulación de calor en el electrodo, que puede provocar su sobrecalentamiento y rápido deterioro incluso a bajas intensidades de corriente.

Si se conecta el electrodo en el negativo y las piezas a soldar en el positivo, serán las piezas las que se calientan más intensamente. Las características de la polaridad directa son:

- Se obtiene cordones estrechos con gran penetración
- El electrodo soportará intensidades del orden de ocho veces mayores que si estuviese conectado al polo positivo, porque se calienta menos.

2.14.4. Soldeo por arco con electrodos revestidos

El soldeo por arco con electrodo revestido es un proceso en el que la fusión del metal se produce gracias al calor generado por un arco eléctrico establecido entre el extremo de un electrodo revestido y el metal base de una unión a soldar³⁴.

El material de aportación se obtiene por la fusión del electrodo en forma de pequeñas gotas. La protección se obtiene por la descomposición del

³⁴ HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 193.

revestimiento en forma de gases y en forma de escoria líquida que flota sobre el baño de fusión y posteriormente se solidifica.

Al soldeo por arco con electrodo revestido se le conoce por las siguientes denominaciones:

- SMAW. Shielded metal-arc welding (ANSI/AWS A3.0)
- Soldeo metálico por arco con electrodo revestido
- MMAW, Manual metal-arc welding

Ventajas:

- El equipo es relativamente sencillo, no muy caro y portátil
- El metal de aportación y los medios para su protección durante el soldeo proceden del propio electrodo revestido. No es necesaria protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares.
- Es menos sensible al viento y a las corrientes de aire que los procesos por arco con protección gaseosa. No obstante, el proceso debe emplearse siempre protegido del viento, lluvia y nieve.
- Se puede emplear en cualquier posición, en locales abiertos y en locales cerrados, incluso con restricciones de espacio.
- No requiere conducciones de agua de refrigeración, ni tuberías o botellas de gases de protección, por lo que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.
- Es aplicable para una gran variedad de espesores, en general. Mayores de 2 mm.
- Es aplicable a la mayoría de los metales y aleaciones.

Limitaciones:

- Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición y por la necesidad de retirar la escoria, por lo que en determinadas aplicaciones ha sido desplazado por otros procesos.
- No es aplicable a metales de bajo punto de fusión como plomo, estaño cinc y sus aleaciones, debido a que el intenso calor del arco es excesivo para ellos.
- No es aplicable a metales de alta sensibilidad a la oxidación como el titanio, circonio, tántalo y niobio, pues la protección que proporciona es insuficiente para evitar la contaminación por oxígeno de la soldadura.
- No es aplicable a espesores inferiores a 1.5-2 mm.
- La tasa de deposición es inferior a la obtenida por los procesos que utilizan electrodo continuo. Esto se debe a que el electrodo solo puede consumirse hasta una longitud mínima (unos 5 cm), cuando se llega a dicha longitud el soldador tiene que retirar la colilla del electrodo no consumida e insertar un nuevo electrodo.
- Aunque en teoría se puede soldar cualquier espesor por encima de 1.5 mm, el proceso no resulta productivo para espesores mayores de 38 mm.

2.14.4.1. Aplicaciones

El soldeo por arco con electrodos revestidos es uno de los procesos de mayor utilización, especialmente en soldaduras de producción cortas, trabajos de mantenimiento y reparación, así como en construcciones en campo.

La mayor parte de las aplicaciones del soldeo por arco con electrodos revestidos se dan con espesores comprendidos entre 3 y 38 mm. El proceso es

aplicable a aceros al carbono, aceros aleados, inoxidables, fundiciones y metales no férreos como aluminio, cobre, níquel y sus aleaciones.

Los sectores de mayor aplicación son la construcción naval, de máquinas, estructuras, tanques y esferas de almacenamiento, puentes, recipientes a presión y calderas, refinerías de petróleo, oleoductos y gaseoductos y en cualquier otro tipo de trabajo similar.

2.14.4.2. Selección del tipo de corriente

El soldeo por arco con electrodos revestidos se puede realizar tanto con corriente alterna como con corriente continua, la elección dependerá del tipo de fuente de energía disponible, del electrodo a utilizar y del material base. En la Tabla I se indica la corriente más adecuada en función de una serie de parámetros.

En cuanto a la polaridad utilizada con corriente continua depende del material a soldar y del electrodo empleado, sin embargo, se recuerda que se obtiene mayor penetración con polaridad directa.

Tabla I. **Comparación entre corriente continua y corriente alterna**

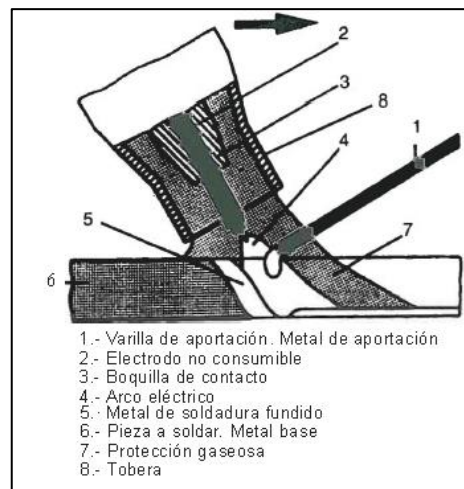
Parámetros	Corriente continua	Corriente alterna
Soldeo con electrodos de pequeño diámetro que requiere bajas intensidades.	La operación resulta más fácil.	Si no se actúa con gran precaución, se puede deteriorar el material debido a la dificultad de encendido de arco.
Cebado del arco	Resulta más fácil	Más difícil en especial cuando se emplean electrodos de pequeño diámetro.
Mantenimiento del arco.	Más fácil por la mayor estabilidad.	Más difícil, excepto cuando se emplean electrodos de gran rendimiento.
Posiciones de soldeo.	Se prefiere en el soldeo en posiciones vertical y bajo techo.	Si se utilizan los electrodos adecuados, se pueden realizar soldaduras en cualquier posición.
Tipo de electrodo	Se puede emplear con cualquier tipo de electrodo.	No se puede utilizar con todos los electrodos. El revestimiento debe contener sustancias que reestablezcan el arco.
Espesar de la pieza.	Se prefiere para espesores delgados.	Se prefiere para espesores gruesos porque se puede utilizar un electrodo de mayor diámetro y mayor intensidad, con lo que se consiguen mayores rendimientos.

Fuente: HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 196.

2.14.5. Soldeo TIG

El procedimiento de soldeo por arco bajo gas protector con electrodo no consumible también llamado TIG (Tungsten Inert Gas), utiliza como fuente de energía el arco eléctrico que se establece entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión. El material de aportación, cuando se utiliza, se aplica por medio de varillas³⁵.

Figura 16. Descripción del proceso TIG



Fuente: HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 245.

Hay que recordar que el wolframio y tungsteno son dos denominaciones para el mismo metal cuyo símbolo en la tabla periódica es W.

El proceso de soldeo TIG también recibe las denominaciones de:

- GTAW, Gas Tungsten Arc Welding
- Soldeo por arco con electrodo de wolframio y gas inerte
- Soldeo por arco con electrodo de wolframio

³⁵ HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. p. 245.

- Gas-Shielded Tungsten-Arc Welding

Ventajas:

- Proceso adecuado para unir la mayoría de los metales
- Arco estable y concentrado
- Aunque se trata de un proceso esencialmente manual, se ha automatizado para algunas fabricaciones en serie, como tubería de pequeño espesor soldada longitudinal o helicoidalmente y para la fijación de tubos a placas en intercambiadores de calor.
- No se producen proyecciones.
- No se produce escoria.
- Produce soldaduras lisas y regulares.
- Se puede utilizar con o sin metal de aporte, en función de la aplicación.
- Puede emplearse en todo tipo de uniones y posiciones.
- Alta velocidad de soldeo en espesores por debajo de 4 mm.
- Se puede conseguir soldaduras de gran calidad.
- Permite un control excelente de la penetración en la pasada de raíz.
- No requiere el empleo de fuente de energía excesivamente caras.
- Permite el control independiente de la fuente de energía y del metal de aportación.

Limitaciones:

- La tasa de deposición es menor que la que se puede conseguir con otros procesos de soldeo por arco.
- Su aplicación manual exige, en general, gran habilidad por parte del soldador.
- No resulta económico para espesores mayores de 10 mm.

- En presencia de corrientes de aire puede resultar difícil conseguir una protección adecuada de la zona de soldadura.

2.14.5.1. Aplicaciones

El proceso TIG se puede utilizar para el soldeo de todos los materiales, incluidos el aluminio y el magnesio y los materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio y sus aleaciones.

Puesto que el proceso posee las virtudes necesarias para conseguir soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas de defectos y buen acabado superficial, es ideal para soldaduras de responsabilidad en la industria del petróleo, química, petroquímica, alimentación, generación de energía, nuclear y aeroespacial.

Como su tasa de deposición es baja, no resulta económico para soldar materiales con espesores mayores de 8 mm. En estos casos el TIG se utiliza para efectuar la pasada de raíz, empleándose otros procesos de mayor productividad para el resto de las pasadas de relleno.

También se puede utilizar para realizar soldaduras por puntos y por costuras.

2.14.5.2. Selección de tipo de corriente

El proceso TIG puede utilizarse tanto con corriente continua como con corriente alterna. La elección de la clase de corriente y polaridad se hará en función del material a soldar. Con el fin de realizar esta elección correctamente, se va a destacar algunos aspectos diferenciales de ambas alternativas.

2.14.5.2.1. Arco con corriente continua

La polaridad recomendada en corriente continua es la directa, ya que si se suelda con polaridad inversa se tienen que utilizar intensidades tan bajas para que no se sobrecaliente el electrodo que resulta impracticable el soldar.

2.14.5.2.2. Arco con corriente alterna

La corriente alterna, aunque reducidas, las ventajas de las dos polaridades, el buen comportamiento durante el semiciclo de polaridad directa y el efecto decapante del baño durante el semiciclo de polaridad inversa, por lo que suele emplearse en el soldeo de aleaciones ligeras, tales como las de aluminio y magnesio.

Como principales inconvenientes presenta dificultades de cebado y de estabilidad del arco, lo que obliga a incorporar al equipo un generador de alta frecuencia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se describen las variables utilizadas en la fase de diseño y validación del reactor.

3.1.1. Variables de diseño

Las variables utilizadas en los métodos de dimensionamiento del reactor se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla II. Valores fijos en el proceso de diseño

No.	Valor	Unidad	Descripción
1	Temperatura	°C	Se refiere a la temperatura de alimentación de reactivos.
2	Flujo volumétrico	m ³ /s	Se refiere a la velocidad de alimentación del fluido calentador.
3	Volumen	m ³	Se refiere al tamaño del reactor.
4	Temperatura de salida de reactivos	°C	Depende de la concentración de alimentación de reactivos, conversión, el volumen del reactor, el coeficiente global de transferencia de calor y temperatura de alimentación del fluido calentador.

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.1. Variables independientes

En la siguiente tabla se muestran las variables independientes de diseño.

Tabla III. Variables independientes de la investigación

No.	Variable	Unidad	Descripción
1	Temperatura	m ³ /s	Se refiere a la alimentación del fluido calentador.
2	Concentración inicial	mol/m ³	Se refiere a la concentración de alimentación de los reactivos.
3	Flujo volumétrico	m ³ /s	Se refiere a la velocidad de alimentación de los reactivos.

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.2. Variables dependientes

En la siguiente tabla se presentan las variables dependientes del diseño.

Tabla IV. Variables dependientes de la investigación

No.	Variable	Unidad	Descripción
1	Conversión	%	Depende de la temperatura, concentración inicial, flujo volumétrico y volumen del reactor.
2	Espacio-tiempo.	s	Depende del flujo de alimentación de reactivos y el volumen del reactor.
3	Temperatura de salida del fluido calentador.	°C	Depende del volumen del reactor, el flujo de alimentación, la capacidad calorífica del fluido calentador y el coeficiente global de transferencia de calor.

Fuente: elaboración propia.

*Nota: La presión del sistema no se considera constante, hay una pérdida significativa de presión debido al diseño que se puede ver apartados posteriores. Sin embargo, no genera un efecto significativo en el sistema reactante, debido a que los reactivos se encuentran en estado líquido (fluidos incompresibles), por lo que no se afecta la concentración de los reactivos.

3.2. Delimitación de campo de estudio

La presente investigación se limita al diseño de reactores PFR a escala laboratorio tomando como base las operaciones unitarias de transferencia de masa, calor y reacciones, el reactor consta de bombas centrifugas de voltaje directo. Se trabajó con una temperatura de alimentación de reactivos de 25 °C y una temperatura de alimentación del fluido de calentamiento (agua) entre 25 °C a 50 °C, los flujos son a contracorriente. El caudal de las bombas del fluido de calentamiento y los reactivos estarán en el rango de 250 l/h a 600 l/h. El volumen propuesto para el reactor es de 1,7 l. El sistema eléctrico es regulado por una fuente de poder de voltaje variable en un rango de 5 V a 24 V.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Carlos Rodrigo Hernández Pérez
- Investigador asesor: Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio

3.4. Recursos materiales disponibles

Son bienes tangibles disponibles y empleados por los investigadores.

3.4.1. Reactivos

Son sustancias empleadas para llevar a cabo la reacción de esterificación.

Tabla V. **Reactivos**

Reactivos	Agua
	Agua desmineralizada
	Acetato de etilo
	Hidróxido de sodio

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Materiales e insumos

A continuación, se detallan todos los materiales y equipos que se utilizaron en el proceso de diseño, construcción y validación del reactor, cabe destacar que algunos son insumos consumibles.

Tabla VI. **Materiales**

Descripción	Dimensiones	Cantidad
Tubo pulido ASTM A 270 SS304 240 Gritt.	D= ½ pulg., s=0,065 pulg, L= 6 m	3 u
Codo clamp corto SS316L 90°	D= ½ pulg.	30 u
Tee soldable SS304	D= 1 pulg.	32 u
Reductor concéntrico pulido SS316L.	D1= 1 pulg. D2= ½ pulg.	32 u

Continuación de tabla VI.

Descripción	Dimensiones	Cantidad
Varilla de aporte STG-316 TIG	D= 1.6 mm	3 lb
Ferrula corta soldable SS316, tipo 3 ^a , 14WMP.	D= ½ pulg.	128 u
Empaque clamp para ferrula	D= ½ pulg.	76 u
Abrazadera clamp en acero inoxidable, SS304, tipo 3 ^a	D= ½ pulg.	76 u
Tubo redondo sanitario en acero inoxidable serie 304, pulido interior y exterior 180 Gritt.	D= 1 pulg, s= 1.2 mm, L= 6 m	3 u
Botón de paro de emergencia tipo Hongo para tablero, Uxcella15010500ux657 ITH Locking SPST.	V= 600 v, A= 10 amp	1 u
Cable THHN10 30 A Negro		6 m
Cable THHN10 30 A Blanco		6 m
Cable THHN10 30 A Rojo		6 m
Clavija-espiga plástica Voltech, con tierra.	V= 120 v	1 u
Deposito plástico Dynalon Baritainer.	V= 10 l	3 u
Bolsa plástica 100 cintas plásticas de seguridad.		1 u
Unión universal SS304 acero inoxidable, tipo industrial.	Rosca NPT D= ¼ pulg.	3 u

Continuación de tabla VI.

Descripción	Dimensiones	Cantidad
Niple acero inoxidable SS304 tipo industrial.	D= ¼ pulg. Rosca NPT, L= 1 pulg.	18 u
Niple acero inoxidable SS304 tipo industrial.	D= ¼ pulg. Rosca NPT, L=2 pulg	4 u
Niple acero inoxidables SS304 tipo industrial.	D= ¼ pulg. Rosca NPT, L= 3 ½ pulg	4 u
Codo acero inoxidable SS304 tipo industrial	D= ¼ pulg. Rosca NPT 90°	14 u
Tee acero inoxidable SS304 tipo industrial.	D= ¼ pulg. Rosca NPT 90°	10 u
Reductor tipo campana acero inoxidable SS304 tipo industrial.	D1= ½ pulg. Rosca NPT, D2= ¼ pulg	5 u
Copla-anillo acero inoxidable SS 304 tipo industrial.	D= ¼ pulg. L= 1pulg. Rosca NPT	8 u
Tapón macho acero inoxidable SS304 tipo industrial.	D= ½ pulg.	1 u
Cable THHN 8 rojo		4 m
Cable THHN 8 blanco		4 m
Cable THHN 8 negro		4 m
Espiga 220 V, 50 Amp.		1 u
Espiga 120 V, 20 Amp., polarizada.		1 u
Tubo PVC	D= 1 pulg. L= 6 m	1 u
Adaptador macho PVC	D= 1 pulg. Rosca NPT	12 u
Codo PVC	D= 1 pulg. Rosca NPT	2 u

Continuación de tabla VI.

Descripción	Dimensiones	Cantidad
Unión Universal PVC	D= 1 pulg. Rosca NPT	2 u
Tubo CPVC	D= ½ pulg. L= 6 m	1 u
Adaptador macho CPVC	D= ½ pulg. Rosca NPT	8 u
Codo CPVC	D= ½ pulg. Rosca NPT	6 u
Unión Universal CPVC	D= ½ pulg. Rosca NPT	3 u
Adaptador hembra CPVC	D= ½ pulg. Rosca NPT	1 u
Válvula de Bola CPVC	D= ½ pulg. Rosca NPT	2 u
Reductor Liso PVC	D1= 1 pulg. D2= ¾ pulg.	1 u
Adaptador hembra PVC	D= ½ pulg. Rosca NPT	6 u
Válvula de cheque horizontal Bronce.	D= ½ pulg. Rosca NPT	2 u
Reductor bronce	D1= ½ pulg. D2= 3/8 pulg	2 u
Terminal bronce para manguera.	D1= ½ pulg. Manguera, D2= 3/8 pulg. Rosca NPT	2 u
Manguera plástica transparente	D= ¾ pulg	5 m
Abrazadera metálica de tornillo	D= ½ pulg	6 u
Hierro negro angular	Ancho= 1 pulg. L= 6m	1 u

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Componentes electrónicos

Descripción	Cantidad
Regulador de voltaje Lm 317T	2 u
Potenciómetro de 2 k Ω	2 u
Capacitor de cerámico o poliéster 0.47 μ F	2 u
Resistencia de 560 Ω	2 u
Capacitor electrolítico 1 μ F 100 V	2 u
Disipador de calor	2 u
Pasta térmica	3 g
Placa PCI	1 u
Cable rojo calibre No. 16	5 m
Cable negro calibre No. 16	5 m
Cable amarillo calibre No. 16	1 m
Cable azul calibre No. 16	3 m
Cable blanco calibre No. 16	2 m
Interruptor 0-120 V AC-DC 10 Amp	3 u
Interruptor 0-120 V AC-DC 15 Amp con luz piloto	2 u
Luz piloto verde para tablero V=120 V AC	1 u
Luz piloto verde para tablero V=220 V AC	1 u
Perilla para potenciómetro	2 u

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Insumos**

Descripción	Dimensiones	Cantidad
Disco de corte EHT 115-1,0 A60 R SG-INOX.	D= 4 ½ pulg.	20 u
Bote de GENOX PICKLING PASTE.		1,25 kg
Thinner		2 galón
Pegamento para CPVC 50 ml Tangit.		5 u
Teflón	Ancho= ¾ pulg L= 260 cm	7 rollo
Pegamento epóxido multiusos transparente.	V= 25 ml	1 u
Silicón gris Permatex Ultra Grey	V= 70 ml	5 u
Wippe blanco	12 onzas	3 bolas
Electrodo 6013 punto verde	D= 3/32 pulg	5 lb
Estaño para soldadura electrónica	D= 1 mm	10 m
Electrodo 6013 punto café	D= 1/8 pulg	1 lb
Pintura epóxica verde John Deer, marca Axalta, UltraRapido 2.		1 galón
Pintura anticorrosiva Rustmaster Gris marca Paleta.		1 galón
Sellador silicón negro 3 GP		1 u
Cinta de aislar amarilla		1 u
Cinta de aislar verde		1 u
Cinta de aislar roja		1 u
Tanque de Argón para soldadura TIG.	V= 220 pie ³	1 u

Fuente: elaboración propia.

3.4.3. Herramientas y equipos auxiliares

Por equipo auxiliar se entiende a un equipo asociado a otro, su función es ayudar en cierta función y se caracteriza por no ser fabricado junto al equipo principal. Se caracterizan porque junto con el equipo principal brindaran el producto final a fabricar.

Tabla IX. Equipos auxiliares

Descripción	Dimensiones	Cantidad
Medidor de flujo Bue Pro K24 Turbina Digital Diésel para químicos, agua, etc.	D= 1 pulg. Rosca NPT	1 u
Bombas centrifugas de agua sin escobillas de corriente directa.	D= ½ pulg. Rosca NPT V= 410 gph Voltaje= 12 - 24 DC	2 u
Ventilador	Voltaje= 12 DC Ancho= 4 cm L= 4 cm	3 u
Medidor de conductividad eléctrica y termómetro digital Pancellent.	K= 0-9999 uS/cm	1 u
Voltímetro digital DC Rojo	V= 3 - 50 DC	2 u
Calentador de agua de paso 11.8 kW.	V= 220 AC, A= 50 Amp.	1 u
Bomba periférica Pretul	Potencia: ½ HP, Tensión= 120 V AC, Frecuencia: 60 Hz, Velocidad= 3450 rpm, Altura máxima= 40 m.	1 u

Continuación de tabla IX.

Descripción	Dimensiones	Cantidad
Balanza de bolsillo	m= 500 g Incerteza= 0.05 g	1 u
Termómetro bimetálico sanitario.	Caratula 2 pulg. Rango de medición= -20 a 120 °C. Vástago= 2 ½ pulg. Conexión= ¼ Rosca NPT.	4 u
Manómetro PFQZR con estabilizador sanitario acero inoxidable.	Caratula= 2 ½ pulg. Rango de medición= 0-100 PSI posición vertical. Conexión ¼ pulg. Rosca NPT.	4 u
Fuente regulador de voltaje	Tensión de entrada= 120 V AC. Tensión de salida= 24 V DC. Cantidad de salidas positivas= 3 Cantidad de salidas negativas= 3	1 u
Fuente de alimentación de PC de 560 W.	Tensión de entrada= 120 V AC. Tensiones de salida= 12 V, 5 V, 3 V, DC.	1 u

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Herramientas**

Descripción	Cantidad
Careta para soldar con levante lente	1 u
Careta para soldar electrónica con sensor de arco eléctrico	1 u
Vidrio claro para careta 51 x 108 mm	2 u
Vidrio rectangular para soldar 51 x 108 mm No. 10	1 u
Prensa para taladro 4 pulgadas	1 u
Manguera para aire comprimido D= ¼ rosca NPT L= 10 pie	1 u
Pistola para pintura, aplicación con aire comprimido	1 u
Destornilladores de cruz	3 u
Destornilladores planos	2 u
Pinza de eléctrico	1 u
Prisionero Allen métrico 4 x 20 m	1 u
Broca para metal HSS con espiga D= ½ pulg	1 u
Broca para metal HSS D= 3/8 pulg	1 u
Broca para metal HSS D= ¼ pulg	1 u
Broca para metal HSS D= 1/8 pulg	1 u
Broca para metal HSS D= 5/16 pulg	1 u
Brocha para pintar PLUS 3 pulg	1 u
Cepillo de alambre	1 u
Llave ajustable de 6" Cangrejo	1 u
Soldadora convencional DC MMA	1 u
Soldadora TIG Marca Stayer, Modelo: Plus 120BGE	1 u
Esmeriladora angula (Pulidora) D= 4 ½ pulg.	1 u
Barreno con mandril para broca de espiga de D= ½ pulg.	1 u
Cautín 40 W	1 u
Juego de prensar para soldar	1 u
Multímetro Digital	1 u

Fuente: elaboración propia.

3.4.4. Cristalería

Se utilizará cristalería en la fase de validación del reactor.

Tabla XI. **Cristalería y equipo de laboratorio**

Descripción	Cantidad
Balanza analítica	1
Termómetro de alcohol	1
Balón aforado de 50 ml	1
Buretas de 25 ml	1
Probeta de 50 ml	1
Probeta de 100 ml	1
Pipeta de polietileno	1
Erlenmeyer de 100 ml	1
Soporte universal	1

Fuente: elaboración propia.

3.4.5. Recursos generales

Se entiende por recurso general a todos aquellos usados con el fin de documentar, limpiar, organizar y demás actividades que no son de carácter técnico científico.

Tabla XII. **Recursos generales**

Útiles de oficina	Papel bond
	Lapiceros
	Cuaderno de bitácora
	Tinta
	Grapas
Artículos de limpieza	Jabón para manos
	Jabón en gel para limpieza de cristalería
	Papel mayordomo
	Lava pchas
	Alcohol
Aparatos electrónicos	Impresora
	Cámara fotográfica
	Cámara de video
	Computadora
Equipo de protección personal	Bata
	Mascarilla
	Overol para laboratorio
	Guantes de neopreno
	Casco
	Mascara de gases orgánicos
	Lentes de protección
	Zapatos industriales punta de acero
	Guantes antiestáticos
	Guantes de látex

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Recursos tecnológicos**

Software	Microsoft Word 2013
	Microsoft Excel 2013
	Wólffram Matemática 10
	Polymath 5.1
	QtiPlot
	AutoCad 2017
	SketchUp 2016

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cuantitativa

Para el presente estudio de investigación se utilizaron varias técnicas cuantitativas, mediante las cuales se dimensionó el reactor, se estimó la capacidad y el tamaño adecuado de las bombas centrífugas. Luego por medio de otra técnica se evaluó el funcionamiento del reactor por medio de la conversión de los reactivos y el tiempo de residencia.

3.5.1. Técnicas cuantitativas de la fase de diseño del reactor

Corresponde al dimensionamiento del reactor y cálculo de la capacidad de los equipos auxiliares:

3.5.1.1. Dimensionamiento del reactor

Para el dimensionamiento del reactor, se tomaron algunos valores siguiendo la lógica del factor de escalada de equipos o escalamiento.

3.5.1.1.1. Escalamiento

El escalamiento es una herramienta indispensable para la ingeniería química, con ella se pueden reducir errores en diseño directos, debido a correlaciones inexactas o a la falta de información.

El concepto de escalamiento parte de la propia definición de medición, medir es asignar números a las propiedades de los objetos u operaciones, de acuerdo con ciertos criterios y reglas. El escalamiento es el proceso mediante el que se desarrollan los criterios y reglas de asignación numérica que determinan las unidades de medida significativas para llevar de un tamaño dado a otro tamaño mayor o menor a una operación u objeto.

Escalar un proceso o equipo es convertirlo desde su escala de industrial a escala laboratorio o piloto, o viceversa. En el caso de esta investigación se requiere la primera opción, debido que para realizar investigaciones se requiere explicar el principio del funcionamiento de los equipos. Es necesario observarlo en un ambiente controlado con un alto nivel de idealidad o afinidad con los conceptos teóricos. Es por ello que para esta investigación se seleccionó trabajar a un nivel laboratorio.

- Alcance pedagógico

¿Cuál es la finalidad de usar laboratorios y plantas piloto en la enseñanza de ingeniería química? Cuando se experimenta algún proceso a nivel de escala se permite llevar a cabo prácticas interdisciplinarias que para su desarrollo propician la interactividad de los alumnos y maestros con el proceso. Esta interacción (simulación de trabajo) provoca cambios positivos en los usuarios, esto, les permite desarrollar habilidades tales como:

- Toma de decisiones
- Trabajo en equipo
- Manejo y manipulación de variables
- Comprensión de procesos
- Resolución de problemas
- Proactividad
- Control de tiempos
- Interdisciplinariedad
- Creatividad

Esto significa que se tendrá una actividad que motivará a los alumnos a aprender. Serán alumnos que, una vez integrados al campo de trabajo profesional, estarán familiarizados con los equipos y se interesarán en el desarrollo de nuevas formas de producción y de tecnologías novedosas, así como la interacción de las instituciones de educación superior con la industria.

- Alcances técnicos

La experimentación a nivel laboratorio es una pieza fundamental en el desarrollo de nuevas tecnologías pues al realizar estudios en ella se generan nuevos conocimientos y criterios técnicos que permiten dar pasos hacia delante en la optimización, control, alcance, seguridad, rentabilidad, entre otros, de procesos, equipos y energías productivas.

- Proceso de escalamiento

El paso fundamental en el escalamiento es transmitir los datos obtenidos de una escala industrial a un modelo que puede ser:

- Fenomenológico: fundamentado en algunos razonamientos teóricos, pero de tipo microscópico. No involucra consideraciones moleculares y permite hacer predicción en rangos o intervalos de operación no estudiados experimentalmente.
- Empírico: que se postula sin bases teóricas y se espera solamente que ajuste la interacción entre los datos en el rango o intervalo de experimentación.
- De similitud: obtenido a partir de un análisis de similitud con respecto a analogías físicas de tipo térmico, mecánico, geométrico, químico, entre otros.

- Principios de similitud

El principio de similitud hace referencia a la relación que existe entre sistemas físicos y el tamaño de estos, siendo básico en el escalonamiento de procesos físicos y químicos. Los sistemas físicos se caracterizan en general por tres cualidades: tamaño, forma y composición. Las tres variables son independientes; por ejemplo, dos objetos pueden ser diferentes en tamaño, pero tener la misma forma y composición.

El principio de similitud está relacionado con el concepto de forma a partir del hecho de que esta es independiente del tamaño y la composición. En términos más precisos, este principio establece lo siguiente: “La configuración espacial y temporal de un sistema físico está determinada por las relaciones de las magnitudes dentro del propio sistema y no dependen del tamaño ni de la naturaleza de las unidades en las cuales se miden esas magnitudes”. El ingeniero químico está relacionado con sistemas complejos compuestos por cuerpos sólidos y fluidos, en donde se llevan a cabo transferencias de materia y

energía, al igual que transformaciones químicas. El concepto de forma aplicado en estos sistemas no envuelve únicamente a las proporciones geométricas de sus componentes, sino también deben anexarse cuestiones como son: patrones de flujo en fluidos, gradientes de temperatura, perfiles de concentración con respecto al tiempo, entre otros. Dentro de la ingeniería química son de interés cuatro tipos de similitudes:

- Similitud geométrica
- Similitud mecánica
- Similitud térmica
- Similitud química

Estrictamente, cada tipo de similitud es necesario para realizar el escalamiento de cualquier sistema.

- Similitud geométrica

La similitud geométrica define con mayor precisión en términos de correspondencia. Considerando dos cuerpos sólidos, cada uno provisto de tres ejes imaginarios en el espacio que los intersectan a fin de ser descritos de igual forma en todos sus puntos en un mismo sistema de coordenadas. Un punto en el primer cuerpo está dado por las coordenadas (x,y,z) mientras que en el segundo cuerpo un punto correspondiente está dado por las coordenadas (X,Y,Z). Ambos grupos de coordenadas están relacionados por la ecuación:

$$\frac{X}{x} = \frac{Y}{y} = \frac{Z}{z} = L$$

Donde la relación de escalamiento lineal L es constante. Estos dos puntos y todos los demás pares de coordenadas espaciales que están relacionados en términos de L son conocidos como puntos correspondientes. Con esto se define que: “Dos cuerpos son geoméricamente similares cuando para todo punto en el primer cuerpo existe un punto en el segundo”.

- Similitud mecánica

La similitud mecánica comprende en su área a las similitudes estática, cinemática y dinámica. Cada una de estas puede considerarse como una extensión del concepto de similitud geométrica en sistemas fijos o en movimiento sujetos a fuerzas externas o internas.

- ✓ Similitud estática

La similitud estática se presenta en los cuerpos sólidos sujetos a esfuerzos constantes y se define de la siguiente manera: “Cuerpos geoméricamente similares, son también estáticamente similares cuando al estar sujetos a esfuerzos constantes sus deformaciones relativas son tales que permanecen geoméricamente similares”. La relación de los desplazamientos correspondientes será entonces igual a la relación de escala. En el caso de deformación elástica la condición para igualdad en las deformaciones en cada cuerpo es que los esfuerzos correspondientes estén en relación con los módulos elásticos. La relación de las fuerzas netas F que actúan en puntos correspondientes en sistemas con similitud elástica está dada por:

$$F = \frac{E^*}{L^2}$$

Donde:

$$E^* = E'/E$$

Es la relación de los módulos de elasticidad entre el modelo y el prototipo. Este modelo de similitud es interesante en el campo de la ingeniería mecánica para medir deformaciones elásticas y plásticas en cuerpos con miembros y estructuras de forma compleja. En el caso de las deformaciones plásticas la condición de igualdad en fuerzas correspondientes se define por la ecuación:

$$F = \frac{Y^*}{L^2}$$

Donde:

$$Y^* = Y'/Y$$

Es la relación de los puntos de deformación del prototipo y el modelo.

✓ Similitud cinemática

Esta concepción tiene aplicación para sólidos o fluidos en movimiento. Como similitud geométrica, se implican las tres coordenadas espaciales, pero, además, se introduce en este caso la dimensión tiempo. Los tiempos se miden desde un criterio arbitrario para cada sistema y los tiempos correspondientes se definen como a aquellos para los cuales t es constante y se define como la relación de escala del tiempo:

$$t = t'/t_0.$$

Los sistemas en movimiento con similitud geométrica están en similitud cinemática cuando partículas correspondientes trazan trayectorias geométricas correspondientes en intervalos de tiempo también correspondientes. Para propósitos de ingeniería es más conveniente realizar escalamientos con base en la similitud cinemática utilizando el concepto de correspondencia de velocidades pues cada partícula corresponde a una velocidad determinada en un tiempo determinado. La relación entre las velocidades correspondientes es:

$$\frac{v'}{v} = V = \frac{L}{t}$$

En el caso de similitud geométrica distorsionada, la relación de velocidades correspondientes puede variar para direcciones diferentes. La similitud cinemática es de especial interés en ingeniería química pues si dos fluidos geoméricamente similares son también cinemáticamente similares entonces los patrones de flujo son geoméricamente similares y las velocidades de transferencia de calor y masa entre dos sistemas se encuentran en una relación simple.

✓ Similitud dinámica

La similitud dinámica está relacionada con las fuerzas que aceleran o retardan el movimiento de las masas dentro de sistemas dinámicos. Las fuerzas del mismo tipo (por ejemplo, gravitacionales) que actúan sobre determinadas partículas en tiempos determinados se llaman fuerzas correspondientes. Esta similitud puede definirse de la manera siguiente: “Sistemas en movimiento con similitud geométrica son dinámicamente similares cuando las relaciones de todas las fuerzas correspondientes son iguales. Si las fuerzas que actúan en un

punto dado son n tipos diferentes ($F_1, F_2, F_3 \dots F_n$) y se repite que, de acuerdo con la ecuación:

$$\frac{F'_1}{F_1} = \frac{F'_2}{F_2} = \dots \frac{F'_n}{F_n} = cte.$$

La similitud dinámica es de gran importancia en sistema de flujo de fluidos para predecir caídas de presión o consumos de potencia. En las transferencias de calor y masa, así como en las reacciones químicas es importante para establecer indirectamente relaciones de similitud cinemática.

- Similitud térmica

Esta similitud involucra a los sistemas en los cuales se presenta flujo de calor por lo que se introduce la dimensión temperatura además de la longitud, fuerza y tiempo. El calor puede fluir por convección, conducción y radiación y la diferencia de temperaturas a tiempos correspondientes entre un par de puntos de un sistema y entre el par de puntos de otro se definen como temperaturas correspondientes. Los sistemas que presentan similitud geométrica son térmicamente similares cuando la diferencia de temperatura conserva una relación constante entre ellos y cuando los sistemas, si están en movimiento, son cinéticamente similares.

La similitud térmica requiere que los flujos correspondientes de calor guarden una relación constante en cada sistema. Si H_r , H_c y H_v representan cantidades de calor transferido por segundo por radiación, conducción y convección, respectivamente, para tener similitud se requiere que: $H'_r/H_r = H'_c/H_c = H'_v/H_v = cte$.

Alternativamente en términos de relaciones intrínsecas se tiene que, de acuerdo con:

$$\frac{Hr'}{Hc'} = \frac{Hr}{Hc} \quad y \quad \frac{Hr'}{Hv'} = \frac{Hr}{Hv}$$

En general, no es posible mantener las tres relaciones simultáneamente en todos los puntos y la similitud térmica puede sólo establecerse si son despreciables la conducción y la convección o radiación.

- Similitud química

Esta similitud está relacionada con sistemas que presentan reacciones químicas donde la composición varía de un punto a otro, ya sea en procesos intermitentes o continuos, en diferentes instantes. No se introduce ninguna nueva dimensión, no es necesario que las composiciones químicas de ambos sistemas sean las mismas, sino solamente existe una relación fija entre las concentraciones puntuales de algunos componentes de las cuales se realiza la comparación. Cuando un sistema tiene un componente A y otro B y se quiere establecer la similitud entre A y B, estas sustancias serán constituyentes correspondientes.

Los sistemas con similitud geométrica y térmica están en similitud química cuando las diferencias correspondientes de concentración mantienen una relación constante entre uno y otro; y cuando los sistemas, si están en movimiento, son cinéticamente similares.

3.5.1.1.2. Volumen de reactor

A nivel industrial el volumen de un reactor PFR de saponificación de acetato de sodio varía dependiendo del nivel de producción que se desea obtener. Es por ello que de acuerdo a la necesidad del laboratorio donde se instaló el reactor, se tomó arbitrariamente un volumen lógico desde el punto de vista espacial, y económico.

$$V = 1,70 \text{ l}$$

El volumen de 1,70 l es el volumen teórico esperado en la fase de construcción, cabe destacar que puede variar, debido a limitaciones operacionales de construcción. Por lo que más adelante se especificaran el volumen real del reactor luego del proceso de construcción.

3.5.1.1.3. Longitud, configuración espacial y materiales

Para determinar la longitud del reactor, primero se realizó un proceso de evaluación de criterios, para determinar las características del reactor.

- Material del reactor e intercambiador de calor

Primero se evaluaron distintos tipos de materiales para la tubería del reactor PFR, para ello se utilizó una matriz donde se ponderan diversas propiedades de los materiales; resistencia a la temperatura, presión de trabajo, maleabilidad, entre otros, en una escala del 1 muy baja a 5 para muy alta. A continuación, se muestra la matriz de ponderación utilizada.

Tabla XIV. Matriz de evaluación de tuberías

Propiedades	Físicas			Químicas			Mecánicas					Tecnológicas				Precio económico	Total
Materiales	Transparencia	Conductividad térmica	Punto de fusión	Resistencia a la corrosión	No es inflamable	Reactividad	Dureza	Ductilidad	Fragilidad	Resistencia a la tensión	Resistencia a la fatiga	Soldabilidad	Fusibilidad	Colabilidad	Facilidad de mecanizado		
1. Tubería común																	
Bronce	1	4	3	2	5	2	4	3	3	3	4	3	3	4	4	4	52,0
Cobre	1	4	3	1	5	1	2	3	3	3	4	3	3	4	4	3,9	47,9
PVC	1	2	2	4	2	4	1	2	2	1	2	1	3	2	1	5	35,0
Vinilo	5	2	1	3	1	3	1	5	5	4	5	1	2	2	1	5	46,0
Hierro negro	1	3	5	1	5	1	5	1	3	3	3	5	5	4	5	4	54,0
Hierro galvanizado	1	3	5	2	5	2	5	1	3	3	3	4	2	4	5	3,9	51,9
2. Aceros Inoxidables																	
AISI 201	1	4	4	2,9	5	3	3	3	4	4	4	4	2	3	5	4	55,9
AISI 304	1	5	4	3	5	3,5	4	4	4	4	4	4	3	3	5	3,5	60,0
AISI 304L	1	5	4	4	5	3,7	4	4	4	5	4	4	3	3	5	3	61,7
AISI 316	1	5	4	4	5	4	4	5	4	4	4	4	3	3	5	2,9	61,9
AISI 316L	1	5	4	4	5	4,2	4	5	4	5	4	4	3	3	5	2,8	63,0
AISI 413	1	4	4	4,5	5	4	4	4,5	4	4	4	4	2	3	5	2,6	59,6
3. Filamento embobinado																	
Green Thread	1	2	1	4,7	3	4	3	1,5	3	3	5	1	1	1	1	1	36,2
Red Thread	1	2	1	4,6	3	4,2	3	1,5	3	3	5	1	1	1	1	1	36,3
4. Fundición centrífuga																	
4.1 Fibra de vidrio con resina epoxica																	
Z-core	1	1	2	5	2	5	3	1	3	3	5	1	1	1	1	1	36,0
Centricast Plus RB-2530	1	1	1	4	2	4,1	3	1	3	3	5	1	1	1	1	1	33,1
Centricast RB-1520	1	1	1	4,3	2	4,2	3	1	3	3	5	1	1	1	1	1	33,5
Green Thread	1	1	1	4,8	2	4,7	3	1	3	3	5	1	1	1	1	1	34,5
Red Thread II	1	1	1	4,9	2	4,9	3	1	3	3	5	1	1	1	1	1	34,8
4.2 Fibra de vidrio con resina viniléster																	
F-Chem	1	1	1	4,6	2	4,5	3	2	3	5	3	1	1	1	1	1	35,1
Centricast Plus CL-2030	1	1	1	4	2	4,3	3	2	3	3	5	1	1	1	1	2	35,3
Centricast CL-1520	1	1	2	4,6	2	4,5	3	2	3	3	5	1	1	1	1	2	37,1
Tubería Teflonada	1	1	1	4,9	2	4,8	3	2	3	3	4	1	1	1	1	1,2	34,9

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se puede observar que los materiales más recomendados para la elaboración de un reactor PFR con intercambiador de calor son los aceros inoxidable, debido a que soportan la corrosión y son poco reactivos. Respecto al precio, es costoso sin embargo es el material más barato que soporta los ataques químicos y la temperatura al mismo tiempo, además de que es un buen transmisor de calor.

De los aceros inoxidable se decidió utilizar acero inoxidable AISI 304 debido a que por su disponibilidad en el mercado guatemalteco es el más fácil de comprar.

Material = Acero inoxidable AISI 304

- Diámetro del reactor

Luego de determinar el material a utilizar se realizó una evaluación del diámetro del reactor. Las ecuaciones teóricas para el cálculo de reactor en la literatura se limitan a definir el volumen del reactor, sin embargo, en la práctica es indispensable conocer a detalle las dimensiones del reactor. La longitud es un parámetro que puede ser determinado sin mayor complicación, dado que existen diversas formas de acoplar, soldar o unir tuberías de forma longitudinal, sin embargo, aumentar el diámetro de una tubería es inviable, por lo que el diámetro no es una variable que pueda controlarse desde el punto de vista de diseño. Esto debido a que no es viable mandar a fabricar un tubo de un diámetro específico debido al factor económico, además es difícil manufacturarlo debido a los procesos de conformado de los tubos.

Por ello, se decidió definir arbitrariamente el diámetro del reactor utilizando el tubo de menor diámetro que se encuentra disponible en el mercado

guatemalteco, para ello se consultó con diversos proveedores de tubería de acero inoxidable en Guatemala de esto se determinó que el diámetro de ½ pulgada es el más pequeño que se distribuye en el mercado guatemalteco.

$$D_{ext} = \frac{1}{2} \text{ pulgada}$$

$$D_{in} = 1,03 \text{ cm}$$

- Longitud

Una vez determinado el volumen y diámetro del reactor se procedió a calcular la longitud del reactor, utilizando deducciones geométricas.

Una tubería geoméricamente se define como un cilindro hueco, donde el volumen es definido por dos variables: Área transversal y longitud. La ecuación del volumen de un cilindro es:

$$V = A * L$$

Desarrollando el área como un círculo se obtiene:

$$V = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) * L$$

Despejando la longitud:

$$L = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Sustituyendo el valor del volumen y el diámetro:

$$L = \frac{4 * 1\,600\text{cm}^3}{\pi * (1,03\text{ cm})^2}$$

$$L = 1\,920,24\text{ cm} = 19,20\text{ m}$$

- Configuración espacial

Una vez que se conocen las dimensiones esenciales del reactor se debe considerar el lugar donde será instalado el equipo. Esto es indispensable para distribuir espacialmente el equipo, las características que se requiere de una buena distribución espacial son: tiempo recorrido, accesibilidad, maniobrabilidad, acceso a fuentes de energía, factor económico y seguridad operacional.

En el campo de reactores PFR existen diversas configuraciones geométricas que se utilizan para el diseño de la disposición espacial, todas queriendo aprovechar al máximo el espacio disponible. A continuación, se muestran unos ejemplos de configuraciones geométricas.

- Longitudinal

Esta configuración se utiliza cuando se requieren tiempos de residencia largos y se quiere mantener el perfil de flujo a lo largo del reactor. Es poco usada debido a que se debe de disponer de un espacio grande debido a que los reactores PFR son por lo general muy largos.

Un ejemplo son los reactores para polimerización como el que se observa a continuación.

Figura 17. **Reactor para poliéstireno expansible**



Fuente: SULZER CHEMTECH LTD. *Polymers production technology*. https://www.sulzer.com/-/media/files/products/process-technology/processes-and-applications/brochures/polymer_production.ashx. Consulta: 28 de julio de 2018.

- Helicoidal

Es la forma más común de reactores PFR a escala laboratorio, su ventaja radica en el aprovechamiento del espacio, pues en pequeños espacios es capaz de construirse reactores muy largos, su operatoria radica en el control térmico dado que es poco conveniente construir un intercambiador de calor para este tipo de configuración se opta por utilizar baños térmicos para el control de la temperatura.

A continuación, se muestra un ejemplo de un modelo fabricado por la empresa GUNT HAMBURG.

Figura 18. **Reactor PFR Helicoidal**



Fuente: G.U.N.T Gerätebau GmbH. *CE 310.02 Reactor tubular.*

https://www.gunt.de/images/datasheet/35/CE-310.02-Reactor-tubular-gunt-35-pdf_1_es-ES.pdf.

Consulta: 28 de julio de 2018.

- Zigzag montado en plataforma

Es el más utilizado a escala industrial ligera y mediana, su configuración se basa en disposición típica de un reactor de flujo de pistón mezclador estático de tiempo de residencia pequeño y largo montado en una plataforma.

En los sistemas de reacción química rápida, como cuando $a + b > c$, sin reacciones secundarias posibles, a menudo se usan reactores simples de tubería vacía. Cuando las viscosidades del fluido son similares al agua, los reactores de tubería vacíos que operan en un flujo turbulento profundo a menudo funcionan bien. Con el aumento de la viscosidad que da como resultado condiciones de operación de flujo laminar en el reactor de tubería,

será necesario instalar elementos de mezcla estáticos en la tubería para asegurar una buena mezcla de los materiales de reacción.

Figura 19. **Reactor PFR Zigzag**



Fuente: StaMixCo LLC. *Plug Flow Reactor Static Mixer*. <http://www.stamixco-usa.com/plug-flow-reactors>. Consulta: 28 de julio de 2018.

- Tubos cruzados

Es configuración es más usada cuando se produce a gran escala y se necesita de tiempos de residencia largos, además de utilizar intercambiadores de calor tipo concha-tubos y similares para el sistema térmico. A continuación se muestra un intercambiador estático de alto rendimiento de tipo tubo cruzado, inserciones de intercambiador de calor utilizadas en reactores de flujo de tapón de diámetro medio y grande.

Figura 20. **Reactor PFR tubos cruzados**



Fuente:

StaMixCo LLC. *Plug Flow Reactor Static Mixer*. <http://www.stamixco-usa.com/plug-flow-reactors>.

Consulta: 28 de julio de 2018.

- Selección de configuración espacial

De las opciones anteriores se decidió utilizar la configuración de zigzag montado en plataforma, por los siguientes aspectos:

- El espacio físico donde se instalará el reactor tiene un límite de $1\text{ m} \times 2\text{ m} = 2\text{ m}^2$ de espacio disponible para el reactor.
- Se requiere un tiempo de residencia pequeño.
- El intercambiador de calor debe ser fácil, pequeño, y se debe considerar que no existe línea de vapor u otro medio de una fuente de energía térmica para el sistema de calefacción.
- Debido a que el espacio es reducido tanto en área superficial como en altura disponible, se debe considerar una configuración intermedia que aproveche al máximo = diseño cubico.

- El diseño de sistema térmico para un reactor zigzag es fácil y puede limitarse a un intercambiador de calor de tubos concéntricos.

3.5.1.2. Determinación de parámetros de operación

En esta sección se calculan los parámetros de diseño del reactor.

3.5.1.2.1. Selección de flujos de operación y diseño térmico

A continuación, se muestra el procedimiento de cálculo de los flujos de operación y diseño del intercambiador de calor de tubos concéntricos:

- Identificar el fluido que se desea calentar, por lo que se deben conocer las siguientes variables:

- Flujo másico:

$$F_A = 0,3 \frac{\text{mol NaOH}}{\text{min}}, \quad F_B = 0,3 \frac{\text{mol CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5}{\text{min}}$$

- Temperatura de entrada y salida (T_e y T_s) respectivamente.

$$T_e = 25^\circ\text{C}, \quad T_s = 43^\circ\text{C}$$

- Hacer el balance de calor de la mezcla reactante.

$$\dot{Q} = \dot{n}_T C_p (T_s - T_e)$$

$$\dot{Q} = \dot{n}_{AW} C_{p_{AW}} (T_s - T_e) + \dot{n}_{BW} C_{p_{BW}} (T_s - T_e)$$

Donde $\dot{m}_T$ corresponde a la suma de flujos molares de las soluciones de hidróxido de sodio ($\dot{m}_{AW}$) y acetato de etilo ($\dot{m}_{BW}$)

$$\dot{n}_T = \dot{n}_{AW} + \dot{n}_{BW}$$

$$\dot{n}_{AW} = 0,3 \frac{\text{mol NaOH}}{\text{min}} + \frac{55,5099 \text{ mol H}_2\text{O}}{\text{min}}$$

$$\dot{n}_{AW} = 55,809 \frac{\text{mol NaOH} - \text{H}_2\text{O}}{\text{min}}$$

$$\dot{n}_{BW} = 0,3 \frac{\text{mol CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5}{\text{min}} + 50,6916 \frac{\text{mol H}_2\text{O}}{\text{min}}$$

$$\dot{n}_{BW} = 50,9916 \frac{\text{mol CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 - \text{H}_2\text{O}}{\text{min}}$$

Para el cálculo de la capacidad calorífica de las soluciones de hidróxido de sodio y acetato de etilo se recurrió a uso de la teoría de soluciones diluidas ideales. Por lo que el cálculo de la capacidad calorífica se reduce a:

$$C_{p_{AW}} = x_A C_{p_A} + x_W C_{p_W}$$

$$x_A = \frac{0,3 \text{ mol NaOH}}{55,809 \text{ mol NaOH} - \text{H}_2\text{O}} = 0,005375$$

$$x_W = \frac{55,509 \text{ mol H}_2\text{O}}{55,809 \text{ mol NaOH} - \text{H}_2\text{O}} = 0,994625$$

$$Cp_{AW} = 0,005375 \left(59,1953 \frac{J}{mol\ K} \right) + 0,994625 \left(75,327 \frac{J}{mol\ K} \right)$$

$$Cp_{A*W} = 75,2403 \frac{J}{mol\ K}$$

Calculando la capacidad calorífica de la solución de acetato de etilo:

$$Cp_{BW} = x_B Cp_B + x_W Cp_W$$

$$x_B = \frac{0,3\ mol\ CH_3COOC_2H_5}{50,9916\ mol\ CH_3COOC_2H_5 - H_2O} = 0,005883$$

$$x_W = \frac{50,6916\ mol\ H_2O}{50,9916\ mol\ CH_3COOC_2H_5 - H_2O} = 0,994117$$

$$Cp_{BW} = 0,005883 \left(170,64 \frac{J}{mol\ K} \right) + 0,994117 \left(75,327 \frac{J}{mol\ K} \right)$$

$$Cp_{BW} = 75,8877 \frac{J}{mol\ K}$$

Cálculo del flujo de calor de la mezcla reactante:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= 55,809 \frac{mol}{min} \left(75,2403 \frac{J}{molK} \right) (316,15\ K - 298,15\ K) \\ &+ 50,9916 \frac{mol}{min} \left(75,8877 \frac{J}{mol\ K} \right) (316,15\ K - 298,15\ K) \end{aligned}$$

$$\dot{Q} = 145\ 237,98 \frac{J}{min} = 145,24 \frac{kJ}{min}$$

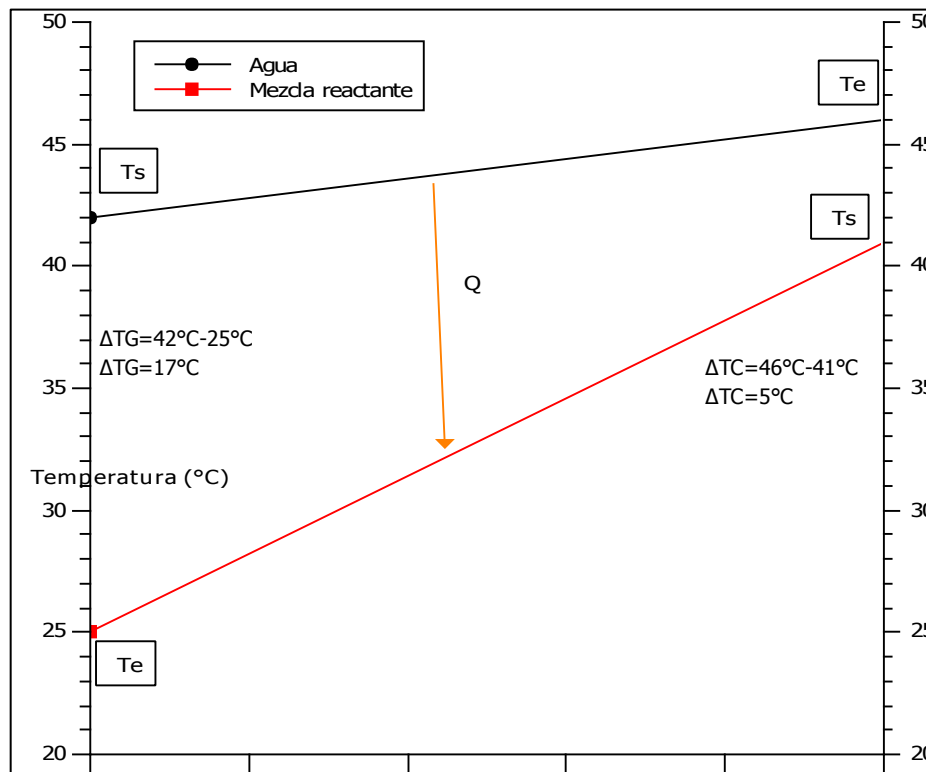
- Identificar el fluido de transferencia de calor (agua), la temperatura de entrada y salida y flujo molar.

$$\dot{n}_{H_2O} = 390 \frac{mol}{min}$$

$$T_e = 46^\circ C, \quad T_s = 42^\circ C$$

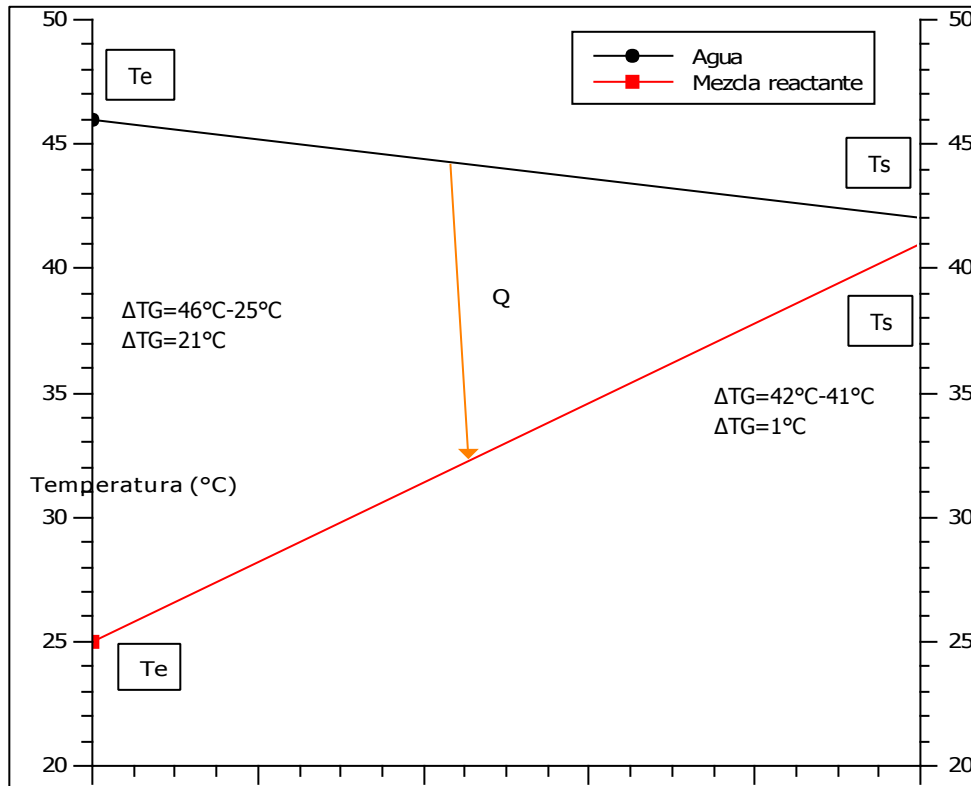
- Realizar el perfil longitudinal de temperatura:

Figura 21. **Perfil longitudinal de temperatura de flujos en contracorriente**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

Figura 22. Perfil longitudinal de temperatura de flujos paralelos



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

Se selecciona el flujo paralelo en el mismo sentido dado que representa una mayor operatividad.

- Cálculo de la temperatura media logarítmica para el flujo paralelo:

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_G - \Delta T_C}{\ln\left(\frac{\Delta T_G}{\Delta T_C}\right)}$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{21^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{21^\circ\text{C}}{1^\circ\text{C}}\right)} = 6,57^\circ\text{C}$$

- Se calculan los flujos volumétricos de la mezcla reactante y el agua:

Flujo volumétrico de la mezcla reactante:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_{AW}}{\rho_{AW}} + \frac{\dot{m}_{BW}}{\rho_{BW}}$$

$$\dot{m}_{AW} = \frac{0,3 \text{ mol NaOH}}{\text{min}} * \frac{39,997 \text{ g}}{1 \text{ mol NaOH}} + \frac{55,509 \text{ mol H}_2\text{O}}{\text{min}} * \frac{18,0148 \text{ g}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}}$$

$$\dot{m}_{AW} = \frac{1\,011,98 \text{ g sol NaOH}}{\text{min}}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{BW} = & \frac{0,3 \text{ mol CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5}{\text{min}} * \frac{88,11 \text{ g}}{1 \text{ mol CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5} \\ & + \frac{50,6916 \text{ mol H}_2\text{O}}{\text{min}} * \frac{18,0148 \text{ g}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} \end{aligned}$$

$$\dot{m}_{BW} = \frac{1\,177,53 \text{ g sol CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5}{\text{min}}$$

Las densidades de las soluciones fueron calculadas de forma empírica con un picnómetro.

$$\dot{V} = \frac{1\,011,98 \frac{\text{g sol NaOH}}{\text{min}}}{1,012 \frac{\text{g sol NaOH}}{\text{ml sol NaOH}}} + \frac{1\,177,53 \frac{\text{g sol CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5}{\text{min}}}{0,9372 \frac{\text{g sol CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5}{\text{ml sol CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5}}$$

$$\dot{V} = 2\,256,41 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \text{ de mezcla reactante} = 2,25641 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Flujo volumétrico del agua:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{390 \text{ mol } H_2O}{\text{min}} * \frac{18,0148 \text{ g}}{1 \text{ mol } H_2O} = 7\,025,77 \frac{\text{g } H_2O}{\text{min}}$$

$$\dot{V} = \frac{7\,025,77 \frac{\text{g } H_2O}{\text{min}}}{0,997 \frac{\text{g } H_2O}{\text{ml}}}$$

$$\dot{V} = 7\,046,91 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \text{ de agua} = 7,04691 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

- A un flujo volumétrico en el reactor y velocidad lineal, determinar el diámetro del tubo del anulo del intercambiador de calor y determinar la velocidad de diseño del reactor:

$$v = \frac{\dot{V}}{A(\text{reactor})}$$

$$\dot{V} = \frac{2,25641 \text{ l}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1\,000 \text{ l}} * \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} = 3,76069 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

De acuerdo con el proveedor de tubo de acero inoxidable de ½ pulgada el diámetro real interior es de 1,03 cm.

$$D = 1,03 \text{ cm} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,0103 \text{ m}$$

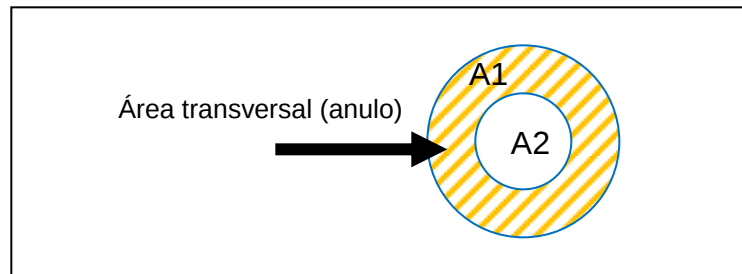
$$A(reactor) = \frac{\pi}{4} * D^2 = \pi * \frac{(0,0103m)^2}{4}$$

$$A(reactor) = 0,000083 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{3,76069 * 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{0,000083 \text{ m}^2} = 0,451365 \text{ m/s}$$

Para comprender la geometría del anulo del intercambiador de calor se presenta la siguiente imagen:

Figura 23. **Diagrama del anulo del intercambiador de calor**



Fuente: elaboración propia.

$$A(anulo) = A1 - A2,$$

$$A(anulo) = \pi * \frac{D_1^2}{4} - 8,33228 * 10^{-5} m^2$$

De acuerdo con proveedor el tubo más grande próximo a la medida de ½ pulgada del tubo del reactor, es el tubo de 1 pulgada con un diámetro real interno de 2,26 cm.

$$A(anulo) = \pi * \frac{(0,0226 \text{ m})^2}{4} - \pi * \frac{(0,014 \text{ m})^2}{4}$$

$$A(anulo) = 0,000247 m^2$$

$$\dot{V} = \frac{7,04691 \text{ l}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1\,000 \text{ l}} * \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} = 0,000117 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v = \frac{1,17448 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,000247 \text{ m}^2} = 0,4755 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Cálculo del diámetro real equivalente:

$$D_{eq} = D_{anulo} - D_{real}$$

$$D_{eq} = 2,26 \text{ cm} - 1,4 \text{ cm} = 0,86 \text{ cm}$$

- Cálculo de la conductividad térmica, densidad, capacidad calorífica, viscosidad, número de Prandtl y número de Reynolds, para la mezcla reactante y el agua a la temperatura promedio para ambos fluidos (mezcla reactante y agua).

Para el caso de la mezcla reactante dado que son concentraciones muy bajas puede considerarse como una mezcla diluida ideal, por lo que la densidad (ρ), viscosidad dinámica (μ) y conductividad térmica (k) se pueden calcular de igual forma que como se calculó la capacidad calorífica en el paso 2, en el caso del agua solamente se buscó la información en fuente bibliográficas.

$$T_{H_2O} = \frac{(46 \text{ }^\circ\text{C} + 42 \text{ }^\circ\text{C})}{2} = 44 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{ABW} = \frac{(41 \text{ }^\circ\text{C} + 25 \text{ }^\circ\text{C})}{2} = 33 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k = x_{AW}k_{AW} + x_{BW}k_{BW}$$

Los números de Prandtl y Reynolds se calculan de la siguiente forma:

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

$$Pr = \frac{Cp}{k}$$

Cálculo de las fracciones molares de las soluciones:

$$x_{AW} = \frac{n_{AW}}{n_T} = \frac{n_{AW}}{n_{AW} + n_{BW}}$$

$$x_{AW} = \frac{55,809 \frac{\text{mol NaOH} - \text{H}_2\text{O}}{\text{min}}}{50,9916 \frac{\text{mol CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 - \text{H}_2\text{O}}{\text{min}} + 55,809 \frac{\text{mol NaOH} - \text{H}_2\text{O}}{\text{min}}}$$

$$x_{AW} = 0,522$$

$$x_{BW} = 1 - 0,522 = 0,478$$

Cálculo de la densidad de la mezcla reactante:

$$\rho_{ABW} = x_{AW}\rho_{AW} + x_{BW}\rho_{BW}$$

$$\rho_{AW} = x_A\rho_A + x_W\rho_W$$

La densidad de la solución de hidróxido de sodio se encuentra en literatura³⁶ y corresponde a:

$$\rho_{AW} = 1,018 \frac{g}{cm^3}$$

A una temperatura de 33°C y una presión de 1 atm.

Para la solución de acetato de etilo se calculó:

$$\rho_{BW} = x_B \rho_B + x_W \rho_W$$

$$\rho_{BW} = 0,0055883 \left(0,839 \frac{g}{ml} \right) + 0,994117 \left(0,9947 \frac{g}{ml} \right)$$

$$\rho_{BW} = 0,9938 \frac{g}{ml}$$

$$\rho_{ABW} = 0,522 \left(1,018 \frac{g}{ml} \right) + 0,478 \left(0,9938 \frac{g}{ml} \right)$$

$$\rho_{ABW} = 1,00643 \frac{g}{ml}$$

Cálculo de la viscosidad de la mezcla reactante:

$$\mu_{ABW} = x_{AW} \mu_{AW} + x_{BW} \mu_{BW}$$

$$\mu_{AW} = x_A \mu_A + x_W \mu_W$$

³⁶ DOW CHEMICAL COMPANY. *Manual De Solución De Soda Caustica*.
https://www.academia.edu/8169598/Manual_De_Soluci%C3%B3n_De_Soda_C%C3%A1ustica
 _Contenidos Consulta: 18 de febrero de 2018.

De la literatura³⁷:

$$\mu_{AW} = 0,0007 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Calculando la viscosidad de la solución muy diluida de acetato de etilo:

$$\mu_{BW} = x_B \mu_B + x_W \mu_W$$

La viscosidad del acetato de etilo³⁸ puro a una temperatura de 33°C es:

$$\mu_B = 0,00022315 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_{BW} = 0,005883(0,00022315 \text{ Pa} \cdot \text{s}) + 0,994117(0,000749 \text{ Pa} \cdot \text{s})$$

$$\mu_{BW} = 0,000746 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_{ABW} = 0,522(0,0007 \text{ Pa} \cdot \text{s}) + 0,478(0,000746 \text{ Pa} \cdot \text{s})$$

$$\mu_{ABW} = 0,000722 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Cálculo de la conductividad térmica:

$$k_{ABW} = x_{AW} k_{AW} + x_{BW} k_{BW}$$

$$k_{AW} = x_A k_A + x_W k_W$$

³⁷ DOW CHEMICAL COMPANY. *Manual De Solución De Soda Caustica*.
https://www.academia.edu/8169598/Manual_De_Soluci%C3%B3n_De_Soda_C%C3%A1ustica.
Contenidos Consulta: 18 de febrero de 2018.

³⁸ KADZHAROV V.T. *Investigación experimental de la viscosidad dinámica del acetato de etilo a diferentes temperaturas y presiones*. <http://www.ddbst.de/free-software.html#Downloads>
Consulta: 10 de agosto de 2018.

$$k_{AW} = 0,005883 \left(0,137531 \frac{W}{m \ K} \right) + 0,994117 \left(0,6187 \frac{W}{m \ K} \right)$$

$$k_{AW} = 0,616114 \frac{W}{m \ K}$$

$$k_{BW} = x_B k_B + x_W k_W$$

$$k_{BW} = 0,005375 \left(0,140 \frac{W}{m \ K} \right) + 0,994625 \left(0,6187 \frac{W}{m \ K} \right)$$

$$k_{BW} = 0,616127 \frac{W}{m \ K}$$

$$k_{ABW} = 0,522 \left(0,616114 \frac{W}{m \ K} \right) + 0,478 \left(0,616127 \frac{W}{m \ K} \right)$$

$$k_{ABW} = 0,61612 \frac{W}{m \ K}$$

Cálculo de la capacidad calorífica de la solución de hidróxido de sodio:

$$Cp_{AW} = x_A Cp_A + x_W Cp_W$$

$$Cp_{AW} = 0,005375 \left(59,1856 \frac{J}{mol \ K} \right) + 0,994625 \left(75,289 \frac{J}{mol \ K} \right)$$

$$Cp_{AW} = 75,2024 \frac{J}{mol \ K}$$

Cálculo la capacidad calorífica de la solución de acetato de etilo:

$$Cp_{BW} = x_B Cp_B + x_W Cp_W$$

$$Cp_{BW} = 0,005883 \left(172,379 \frac{J}{mol K} \right) + 0,994117 \left(75,289 \frac{J}{mol K} \right)$$

$$Cp_{BW} = 75,8602 \frac{J}{mol K}$$

Cálculo de la capacidad calorífica de la mezcla reactante:

$$Cp_{ABW} = 0,522 \left(75,2024 \frac{J}{mol K} \right) + 0,478 \left(75,8602 \frac{J}{mol K} \right)$$

$$Cp_{ABW} = 75,5168 \frac{J}{mol K} =$$

Cálculo de la capacidad calorífica de la solución de hidróxido de sodio por unidad másica:

$$Cp_{AW} = x_A Cp_A + x_W Cp_W$$

$$Cp_{AW} = 0,005375 \left(1\,479,75 \frac{J}{kg K} \right) + 0,994625 \left(4\,178,45 \frac{J}{kg K} \right)$$

$$Cp_{AW} = 4\,163,94 \frac{J}{kg K}$$

Cálculo la capacidad calorífica de la solución de acetato de etilo:

$$Cp_{BW} = x_B Cp_B + x_W Cp_W$$

$$Cp_{BW} = 0,005883 \left(1\,956,63 \frac{J}{kg\,K} \right) + 0,994117 \left(4\,178,45 \frac{J}{mol\,K} \right)$$

$$Cp_{BW} = 4\,165,38 \frac{J}{kg\,K}$$

Cálculo de la capacidad calorífica de la mezcla reactante:

$$Cp_{ABW} = 0,522 \left(4\,163,94 \frac{J}{kg\,K} \right) + 0,478 \left(4\,165,38 \frac{J}{kg\,K} \right)$$

$$Cp_{ABW} = 4\,164,63 \frac{J}{kg\,K}$$

Cálculo del número de Reynolds de la mezcla reactante:

$$Re = \frac{v_{ABW} * D_{ABW} * \rho_{ABW}}{\mu_{ABW}}$$

$$Re = \frac{\left(0,451365 \frac{m}{s} \right) (0,0103m) \left(1\,006,43 \frac{kg}{m^3} \right)}{0,000722\,Pa * s}$$

$$Re = 6\,480,54 \text{ régimen turbulento}$$

Cálculo del número de Prandtl para la mezcla reactante:

$$Pr = \frac{Cp_{ABW}\mu_{ABW}}{k_{ABW}}$$

$$Pr = \frac{(4\,164,63 \frac{J}{kg\,K})(0,000722\,Pa \cdot s)}{0,61612 \frac{W}{m\,K}}$$

$$Pr = 4,88032$$

Propiedades del agua a ($T = 44\,^{\circ}C$):

Dado que el agua no se encuentra como una mezcla, las propiedades de esta sustancia se pueden encontrar en la literatura:

$$\rho = 991,46 \frac{kg}{m^3}$$

$$Cp = 4\,178,92 \frac{J}{kg\,K}$$

$$\mu = 0,00050535\,Pa \cdot s$$

$$k = 0,6355 \frac{W}{m\,K}$$

Cálculo del radio hidráulico del anulo:

$$rh = \frac{Am}{Pm}$$

Donde:

A_m = Área mojada

P_m = Perímetro mojado

$$rh = \frac{A_m}{\pi * d_1 + \pi * d_2}$$

$$rh = \frac{0,000247 m^2}{\pi * 0,0226 m + \pi * 0,014}$$

$$rh = 0,002148 m$$

Cálculo del diámetro equivalente:

$$Deq = 4rh$$

$$Deq = 4 * 0,002148 m$$

$$Deq = 0,008593 m$$

Cálculo del número de Reynolds para el fluido del anulo (agua):

$$Re = \frac{v * Deq * \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{\left(0,4755 \frac{m}{s}\right) (0,008593 m) \left(991,46 \frac{kg}{m^3}\right)}{0,00050535 Pa * s}$$

$$Re = 7\,994,56 \text{ régimen turbulento}$$

Cálculo del número de Prandtl para el fluido del anulo (agua):

$$Pr = \frac{Cp * \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{\left(4\,178,92 \frac{J}{kg\,K}\right) (0,00050535\,Pa * s)}{0,6355 \frac{W}{m\,K}}$$

$$Pr = 3,32308$$

- Cálculo del coeficiente individual de película de transferencia de calor para la mezcla reactante. Para este caso se utiliza la correlación de Gnielinski (3% < Error < 5%, 1976) esta sirve para intercambiadores de calor circulares como es el caso del enchaquetamiento:

$$N_u = \frac{h_o D_{eq}}{K} = \frac{\left(\frac{f_d}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f_d}{8}\right)^{0.5} \left(P_r^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

Donde:

k = Conductividad térmica de la pared del tanque agitado

C_p = Capacidad calorífica de la mezcla acetato de etilo e hidroxido de sodio

n = velocidad de agitación del rodete

h_o = coeficiente individual de película de la mezcla reactante

N_u = número de Nusselt

μ_m = viscosidad dinámica de la mezcla reactante a la temperatura m de la pared del reactor

Pr = Número de Prandalt .

Re = número de Reynolds

Pr = número de Prandtl

ε = rugosidad de la pared del tubo donde se conducirá el fluido

f_d = Factor de fricción de Darcy, utilizando formula de Swamee – Jain

$$f_d = \frac{0,25}{\left(\log_{10} \left[\frac{\frac{\varepsilon}{D_{eq}}}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \right)^2}$$

La rugosidad del acero inoxidable AISI 304 pulido tipo espejo es en promedio:

$$\varepsilon = 0,000006 \text{ m}$$

$$f_d = \frac{0,25}{\left(\log_{10} \left[\frac{\frac{0,000006 \text{ m}}{0,0103 \text{ m}}}{3,7} + \frac{5,74}{6480,54^{0,9}} \right] \right)^2}$$

$$f_d = \frac{0,25}{(\log_{10}[0,002288])^2}$$

$$f_d = 0,035855$$

$$N_u = \frac{h_o(0,0103 \text{ m})}{0,61612 \frac{W}{m K}} = \frac{\left(\frac{0,035855}{8}\right) (6\,480,54 - 1\,000) * 4,88032}{1 + 12,7 \left(\frac{0,035855}{8}\right)^{0,5} \left((4,88032)^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

$$N_u = \frac{119,876}{2,59602} = 46,1768$$

$$\frac{h_o(0,0103 \text{ m})}{0,61612 \frac{W}{m K}} = 46,1768$$

$$h_o = 2\,762,18 \frac{W}{m^2 K}$$

- Cálculo del coeficiente individual de película del fluido del anulo (agua). Se determina el coeficiente individual de película para el fluido de calentamiento (agua), para este caso se utiliza la correlación de Gnielinski (3 % < Error < 5 %, 1976) que sirve para intercambiadores de calor circulares como es el caso del enchaquetamiento, y se le añade una corrección del factor de forma debido a que corresponde a un anulo que rodea al reactor:

$$N_u = \frac{h_{H_2O} D_{eq}}{k} = \frac{\left(\frac{f_d}{8}\right) (Re - 1\,000) P_r}{1 + 12,7 \left(\frac{f_d}{8}\right)^{0,5} \left(P_r^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

$$\varepsilon = 0,000006 \text{ m}$$

$$f_d = \frac{0,25}{\left(\log_{10} \left[\frac{\frac{0,000006 \text{ m}}{0,008593 \text{ m}}}{3,7} + \frac{5,74}{7\,994,56^{0,9}} \right] \right)^2}$$

$$f_d = \frac{0,25}{(\log_{10}[0,001952])^2}$$

$$f_d = 0,034055$$

$$N_u = \frac{h_{H_2O}(0,019341 \text{ m})}{0,6355 \frac{W}{m \text{ K}}} = \frac{\left(\frac{0,034055}{8} \right) (7\,994,56 - 1\,000) * 3,32308}{1 + 12,7 \left(\frac{0,034055}{8} \right)^{0,5} \left(3,32308^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}$$

$$N_u = \frac{98,94}{1,00028} = 98,94$$

$$\frac{h_{H_2O}(0,008593 \text{ m})}{0,6355 \frac{W}{m \text{ K}}} = 98,94$$

$$h_{H_2O} = 7\,317,164 \frac{W}{m^2 K}$$

Corrección por forma:

$$h_{H_2O} = 7\,317,164 \frac{W}{m^2 K} * \left(0,86 * \left(\frac{1,27}{2,54} \right)^{-0,16} \right)$$

$$h_{H_2O} = 7\,024,32 \frac{W}{m^2 K}$$

- Se determina el coeficiente global de transferencia de calor del enchaquetamiento:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + Rd (Anulo) + R_{cond} + Rd(Tubo) + \frac{1}{h_{H_2O}}}$$

Debido a que el diseño del reactor permitirá una buena limpieza del interior del reactor el factor de ensuciamiento Rd (tubo) y Rd (anulo) son despreciables.

La resistencia por conducción se puede calcular de la siguiente manera:

$$R_{cond} = \frac{e}{k}$$

Donde:

e = espesor de la pared del tubo del reactor

k = conductividad térmica del tubo de acero inoxidable AISI 304 del reactor

$$e = 0,00185 \text{ m}$$

$$k = 13,3 \frac{W}{m K}$$

$$R_{cond} = \frac{0,00185 \text{ m}}{12,839 \frac{W}{m K}}$$

$$R_{cond} = 0,00013909 \frac{m^2 K}{W}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{7\,024,32 \frac{W}{m^2K}} + 0 + 0,00013909 \frac{m^2K}{W} + 0 + \frac{1}{2\,762,18 \frac{W}{m^2K}}}$$

$$U = \frac{1}{0,000137 \frac{m^2K}{W} + 0,00014409 \frac{m^2K}{W} + 0,000362032 \frac{m^2K}{W}}$$

$$U = 1\,567,32 \frac{W}{m^2K}$$

- Cálculo del área de transferencia de calor:

De la ecuación de energía:

$$\dot{Q} = UA(TDC)\Delta TLM$$

El calor que se quiere agregar se calculó en el paso 2:

$$\dot{Q} = 145,24 \frac{kJ}{min} = 2\,420,66 \frac{J}{s} = 2\,420,66 W$$

Despejando A(TDC):

$$A(TDC) = \frac{\dot{Q}}{U * \Delta TLM}$$

$$A(TDC) = \frac{2\,420,66 W}{1\,567,32 \frac{W}{m^2K} * 6,57 K}$$

$$A(TDC) = 0,24 m^2 = 0,3 m^2$$

$$A(TDC) = \pi * d * L$$

La longitud es lo que se desea conocer:

$$L = \frac{A(TDC)}{\pi * d}$$

$$L = \frac{0,3 \text{ m}^2}{\pi * 0,0103 \text{ m}}$$

L = 9,3 m longitud correspondiente al intercambiador de calor

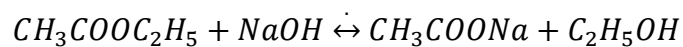
3.5.1.2.2. Parámetros de reacción

El parámetro que mide por excelencia la eficacia de un reactor es la conversión, para determinarla se debe realizar los cálculos y sistema de ecuaciones que a continuación se mostrarán, una vez determinados se introduce el sistema de ecuaciones en un software matemático especializado en diseño de reactores (Polymath 5.1).

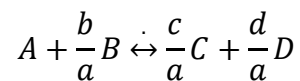
- Tamaño del reactor, este valor fue calculado en el apartado anterior:

$$V = 1,7 \text{ l} = 0,0017 \text{ m}^3$$

- Escribir la reacción y su simbología:



Escribiendo en notación:



- Se establecen las concentraciones iniciales y flujos másicos de los reactivos.

$$C_{Ao} = 0,3 \text{ M} = 300 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$C_{Bo} = 0,3 \text{ M}$$

$$F_{Ao} = 0,3 \frac{\text{Mol}}{\text{min}} = 0,005 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$F_{Bo} = 0,3 \frac{\text{Mol}}{\text{min}}$$

$$\dot{V} = 1 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

- Se establece el coeficiente global de transferencia de calor del enchaquetamiento.

$$U = 1\,567,32 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

- Se determina el área de intercambio de calor por unidad de volumen del reactor. Para el PRF dicha reacción se reduce a:

$$a = \frac{A}{V} = \frac{\pi d L}{\frac{\pi d^2 L}{4}} = \frac{4}{D}$$

Donde el diámetro (d) y longitud (L) son las dimensiones determinadas en los incisos anteriores:

$$a = \frac{4}{0,0103 \text{ m}} = 388,34 \text{ m}^{-1}$$

- Se determina la constante de velocidad de reacción:

$$k = 0,00039175 e^{\left[5472,7 \left(\frac{1}{273,15} - \frac{1}{T}\right)\right]}, \frac{\text{m}^3}{\text{mol} * \text{s}}$$

- Se determina la constante de equilibrio químico, dado que es una reacción reversible.

$$K_C = 10^{\frac{3885,44}{T}}$$

- Dado que hay transferencia de calor se calcula la entalpía de reacción:

$$\Delta H_{Rx}(T) = \Delta H_{Rx}^0(T_R) + \Delta C_P(T - T_R)$$

$$\Delta C_P = \frac{d}{a} C_{P_D} + \frac{c}{a} C_{P_C} - \frac{b}{a} C_{P_B} - C_{P_A}$$

$$\Delta H_{Rx}(T_R) = \frac{d}{a} H_D^0(T_R) + \frac{c}{a} H_C^0(T_R) - \frac{b}{a} H_B^0(T_R) - H_A^0(T_R)$$

Donde:

$C_{P_D}, C_{P_C}, C_{P_B}, C_{P_A}$ = capacidades caloríficas de las especies químicas.

$H_D^0, H_C^0, H_B^0, H_A^0$ = entalpías de formación de las especies químicas.

d, c, b, a = coeficientes estequiométricos de las especies químicas.

T_R = temperatura de referencia (298.15 K)

Dado que todos los coeficientes estequiométricos de la reacción tienen un valor de 1 las ecuaciones se pueden simplificar a:

$$\Delta H_{Rx}(T) = \Delta H_{Rx}^0(T_R) + \Delta C_P(T - T_R)$$

$$\Delta C_P = C_{P_D} + C_{P_C} - C_{P_B} - C_{P_A}$$

$$\Delta H_{Rx}^0(T_R) = H_D^0(T_R) + H_C^0(T_R) - H_B^0(T_R) - H_A^0(T_R)$$

$$\Delta C_P = 112,9 \frac{J}{mol\ K} + 100,83 \frac{J}{mol\ K} - 170,7 \frac{J}{mol\ K} - 102,1 \frac{J}{mol\ K}$$

$$\Delta C_P = 145,13 \frac{J}{mol\ K}$$

$$\Delta H_{Rx}^0(T_R) = -277,6 \frac{kJ}{mol} - 709,39 \frac{kJ}{mol} + 442,92 \frac{kJ}{mol} + 469,15 \frac{kJ}{mol}$$

$$\Delta H_{Rx}^0(T_R) = -74,92 \frac{kJ}{mol}$$

$$\Delta H_{Rx}(T) = -74\ 920 \frac{J}{mol} + 145,13 \frac{J}{mol\ K} * (T - 298,15K)$$

- Se escribe la ecuación de balance de masa de diseño del reactor PFR:

$$\frac{dV}{dX} = \frac{F_{AO}}{-r_A}$$

- Se escribe la ley de velocidad de reacción en términos de la concentración de las especies reaccionantes:

$$-r_A = k \left(C_A C_B - \frac{C_C C_D}{K_C} \right)$$

- Se emplea la estequiometria para expresar las concentraciones de los reactivos y productos en términos de la conversión.

$$C_A = \frac{F_{AO}(1-x)}{v}, \quad C_B = \frac{F_{AO} \left[\Theta_B - \left(\frac{b}{a} \right) X \right]}{v}, \quad C_C = \frac{F_{AO} \left[\Theta_C + \left(\frac{c}{a} \right) X \right]}{v},$$

$$C_D = \frac{F_{AO} \left[\Theta_D + \left(\frac{d}{a} \right) X \right]}{v}$$

La alimentación de reactivos es la misma de igual forma que los coeficientes estequiométricos, con esta información las expresiones anteriores pueden simplificarse:

$$C_A = C_{Ao}(1-X), \quad C_B = C_{Ao}(1-X), \quad C_C = C_{Ao}(1+X), \quad C_D = C_{Ao}(1+X)$$

- Se realizan los balances de energía:

Balance de reactivos:

$$\frac{dT}{dV} = \frac{Ua(Ta - T) + (r_A)(\Delta H_{RX}(T))}{F_{A0}[\sum \Theta_i C_{P_i} + \Delta C_P X]}$$

Donde:

$$\sum \Theta_i C_{P_i} = C_{p_A} + C_{p_B} + C_{p_C} + C_{p_D}$$

$$\sum \Theta_i C_{P_i} = 102,1 \frac{J}{mol K} + 170,7 \frac{J}{mol K} + 100,83 \frac{J}{mol K} + 112,9 \frac{J}{mol K}$$

$$\sum \Theta_i C_{P_i} 0 = 486,53 \frac{J}{mol K}$$

Balance del calentador:

$$\frac{dT_a}{dV} = \frac{Ua(T - T_a)}{\dot{m}_C C_{P_C}}$$

Donde $\dot{m}_C$ es el flujo molar (mol/s) del fluido de intercambio de calor que va a ceder energía y C_{P_C} es la capacidad calorífica (J/mol K):

$$\dot{m}_C = 6,5 \frac{mol}{s}$$

$$C_{P_C} = 75,2975 \frac{J}{mol K}$$

- Se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales utilizando Polymath 5.1 y se obtiene el valor de la conversión teórica esperada del reactor.

Figura 24. Cálculo de conversión usando Polymath 5.1

Indep Var

V

Initial Value

0



Solve with

RKF45

Final Value

0.0017

Table

Graph

Report

☒ Comments

Add DE

Add EE

Remove

Edit

?

↓

↑

	Differential equations / explicit equations	Initial value
1	$d(X)/d(V) = -r_a/F_{a0}$	0.0001
2	$d(T_a)/d(V) = (U \cdot a \cdot (T - T_a))/(mc \cdot C_{pc})$	319.15
3	$d(T)/d(V) = (H+J)/K$	298.15
4	$C_{a0} = 300$	n.a.
5	$F_{a0} = 0.005$	n.a.
6	$U = 1567.32$	n.a.
7	$a = 388.34$	n.a.
8	$K_c = 10^{(3885.44/T)}$	n.a.
9	$\Delta H = -74920 + (145.13 \cdot (T - 298.15))$	n.a.
10	$r_a = -k \cdot ([C_a \cdot C_b] - ([C_c \cdot C_d]/K_c))$	n.a.
11	$C_a = C_{a0} \cdot (1-X)$	n.a.
12	$C_b = C_{a0} \cdot (1-X)$	n.a.
13	$C_c = C_{a0} \cdot (1+X)$	n.a.
14	$C_d = C_{a0} \cdot (1+X)$	n.a.
15	$C_{pi} = 486.53$	n.a.
16	$mc = 6.5$	n.a.
17	$C_{pc} = 72.2975$	n.a.
18	$k = 0.00039175 \cdot 2.718281828^{(5472.7 \cdot ((1/273.15) - (1/T)))}$	n.a.
19	$\Delta C_p = 145.13$	n.a.
20	$H = U \cdot a \cdot (T_a - T)$	n.a.
21	$J = r_a + \Delta H$	n.a.
22	$K = F_{a0} \cdot (C_{pi} + (\Delta C_p \cdot X))$	n.a.

Fuente: elaboración propia, empleado Polymath 5.1.

A continuación, se muestra la tabla de resultados obtenidos utilizando el método RKF45:

Figura 25. Resultados de diseño de reactor Polymath 5.1

<u>Calculated values of the DEQ variables</u>				
<u>Variable</u>	<u>initial value</u>	<u>minimal value</u>	<u>maximal value</u>	<u>final value</u>
V	0	0	0.0017	0.0017
X	1.0E-04	1.0E-04	0.9952746	0.9952746
Ta	319.15	318.77799	319.15	318.77799
T	298.15	298.15	318.91034	318.66057
Cao	300	300	300	300
Fao	0.005	0.005	0.005	0.005
U	1567.32	1567.32	1567.32	1567.32
a	388.34	388.34	388.34	388.34
Kc	1.076E+13	1.526E+12	1.076E+13	1.56E+12
deltaH	-7.492E+04	-7.492E+04	-7.191E+04	-7.194E+04
k	0.0021019	0.0021019	0.0069433	0.0068504
Ca	299.97	1.4176348	299.97	1.4176348
Cb	299.97	1.4176348	299.97	1.4176348
Cc	300.03	300.03	598.58237	598.58237
Cd	300.03	300.03	598.58237	598.58237
Cpi	486.53	486.53	486.53	486.53
mc	6.5	6.5	6.5	6.5
Cpc	72.2975	72.2975	72.2975	72.2975
ra	-189.13559	-189.13559	-0.0137672	-0.0137672
delCp	145.13	145.13	145.13	145.13
H	1.278E+07	7.144E+04	1.278E+07	7.146E+04
J	-7.511E+04	-7.511E+04	-7.191E+04	-7.194E+04
K	2.4327226	2.4327226	3.154871	3.154871

Fuente: elaboración propia, empleando Polymath 5.1.

De lo anterior se observa que la conversión teórica esperada es:

$$X = 0,99527$$

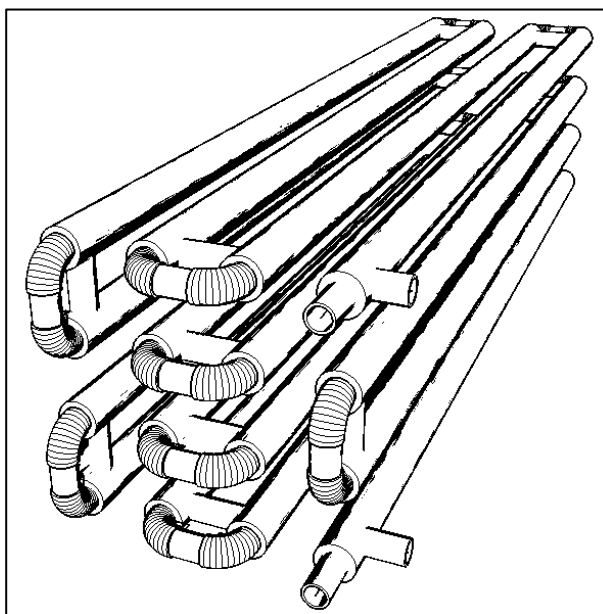
3.5.1.3. Selección de equipos auxiliares

En esta sección se explica las consideraciones y análisis realizados para la sección de equipos auxiliares.

3.5.1.3.1. Selección de accesorios y válvulas

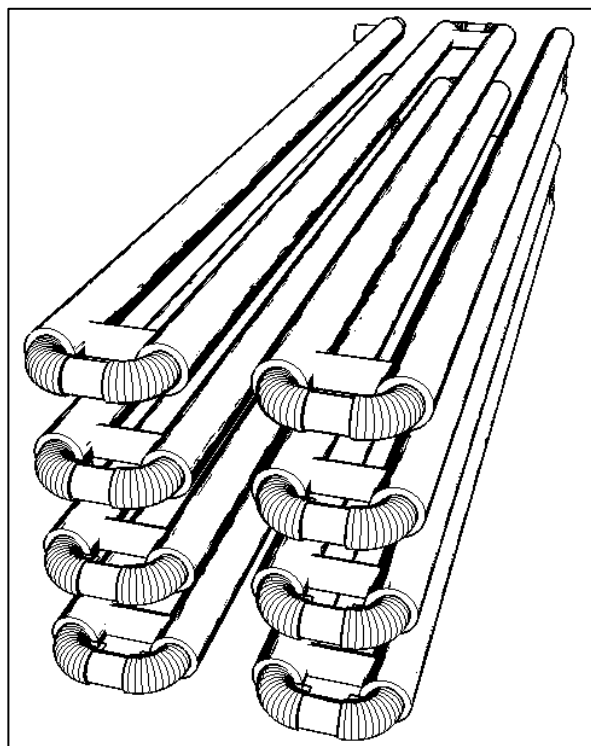
Para determinar la cantidad de accesorios a utilizar, primero se debe definir la geometría del reactor, considerar vueltas y cambios de dirección del flujo. Para ello se realizó un esquema 3D, que, si bien no tiene definidas las medidas exactas del reactor, da una base para seleccionar los accesorios a utilizar.

Figura 26. **Esquema 3D preliminar 1 del diseño del reactor**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp 2016.

Figura 27. **Esquema 3D preliminar 2 del diseño del reactor**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp 2016.

Analizando las imágenes anteriores se observa que son necesarios 30 codos a 90° de acero inoxidable AISI 304. También se necesitan 32 tee de 1 pulgada de diámetro para fabricar el enchaquetamiento.

De este modo también se decidió que la tubería de alimentación de reactivos y salida de productos fuera que un material más barato, dado que dicha tubería solo sirve para transporte del material. De esto se seleccionó tubería de CPVC, así mismo en las válvulas de paso para permitir el flujo de reactivos se decidió que fueran de este mismo material. A continuación, se muestra una serie de imágenes que detallan los accesorios y válvulas utilizadas en el proceso de construcción del reactor.

Figura 28. **Codo 90° clamp ½ pulg SS304**



Fuente: *Soluciones en Acero. Catálogo.* <https://www.enaceroinox.com/shop/product/codo-cortoa-90-grados-con-ferrula-en-extremos-ss316l-tipo-3a-937?category=51>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 29. **Abrazadera clamp ½ pulg SS304**



Fuente: *Aceros online. Catálogo.* <http://acerosonline.com/otros-productos-sanitarios/4-abrazadera-sanitaria-clamp-t304-1-2-y-3-4.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 30. **Ferrula clamp ½ pulg SS304**



Fuente: *Soluciones en Acero. Catálogo.* <https://www.enaceroinox.com/shop/product/ferrula-larga-soldable-en-ss316-848?category=53>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 31. **Reductor concéntrico soldable 1 x ½ pulg SS304**



Fuente: Soluciones en Acero. *Catálogo*. <https://www.enaceroinox.com/shop/product/reducidor-concentrico-soldable-en-acero-inoxidable-ss316-tipo-3a-914?category=54>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 32. **Tee soldable 1 pulg SS304**



Fuente: Soluciones en Acero. *Catálogo*. <https://www.enaceroinox.com/shop/product/tee-corta-soldable-en-acero-inoxidable-ss316l-tipo-3a-923?category=56>. Consultad: 22 de agosto de 2018.

Figura 33. **Empaque clamp ½ pulg**



Fuente: Soluciones en Acero. *Catálogo*. <https://www.enaceroinox.com/shop/product/empaque-para-ferrula-828?category=50&page=2>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 34. **Codo roscado NPT ¼ pulg SS304**



Fuente: Almacenes Vidrí El Salvador. *Catálogo*. <https://www.vidri.com.sv/producto/40248/Codo-de-acero-inoxidable-1-PULGADAS.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 35. **Cople roscado NPT ¼ pulg SS304**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/55465/ANILLO-ACERO-INOXIDABLE-1-PULG.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 36. **Tapón roscado NPT ¼ pulg SS304**



Fuente: Soluciones en Acero. *Catálogo*. <https://www.enaceroinox.com/shop/product/tapon-macho-con-base-cuadrada-en-acero-inoxidable-ss304-933?category=46>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 37. **Reducidor campana roscado NPT ½ a ¾ pulg SS304**



Fuente: Soluciones en Acero. *Catálogo*. <https://www.enaceroinox.com/shop/product/reducidor-campana-en-acero-inoxidable-ss304-clase-150-rosca-npt-1666?category=45>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 38. **Niple roscado NPT ¼ x 3 pulg SS304**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/48399/NIPLE-ACERO-INOXIDABLE-3-PULG.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 39. **Niple roscado NPT ¼ x 1 ½ pulg SS304**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/48396/NIPLE-ACERO-INOXIDABLE-1-1%7C2-PULG.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 40. **Tee roscada NPT ¼ pulg SS304**



Fuente: Soluciones en Acero. *Catálogo*. <https://www.enaceroinox.com/shop/product/tee-con-roscas-npt-en-acero-inoxidable-ss304-clase-150-925?category=47>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 41. **Unión universal roscada NPT ¼ pulg SS304**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/55466/UNI%C3%93N-UNIVERSAL-ACERO-INOX.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 42. **Niple roscado NPT ¼ x 1 pulg SS304**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/48395/Niple-todo-roscas-1%7C4.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 43. **Terminal para manguera roscado NPT ½ x 3/8 pulg**



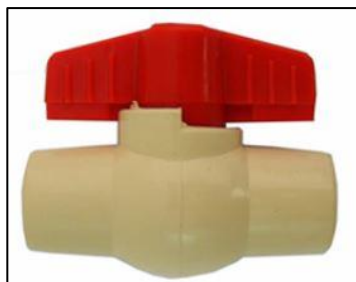
Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/15864/TERMINAL-PARA-MANGUERA-3%7C8.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 44. **Válvula de cheque horizontal roscada NPT ½ pulg**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/11748/CHEQUE-SWING-RW-1%7C2.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 45. **Válvula de bola CPVC ½ pulg**



Fuente: Impacto Ferretero. *Catálogo*. <https://www.impactoferretero.mx/valvula-de-bola-19-mm-34-cementar-cpvc-cvbola19>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 46. **Válvula de bola CPVC negra roscada NPT ½ pulg**



Fuente: Válvulas y Termoplásticos Industriales. *Catálogo*.

<http://www.vyt.com.mx/producto/0076/valvulas+de+CPVC+>.html. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 47. **Unión universal negra PVC 1 pulg cedula 80**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/11859/UNI%C3%93N-UNIVERSAL-PVC-1-1%7C4-Pulg.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 48. **Unión universal CPVC ½ pulg**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/62650/UNI%C3%93N-UNIVERSAL--CPVC--1%7C2-Pulg.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 49. **Reductor bushing PVC 1 a $\frac{3}{4}$ pulg**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/04999/BUSHING-PVC-CON-ROSCA-1-x-3%7C4.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 50. **Reductor bushing PVC $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$ pulg roscado NPT**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/12210/BUSHING-REDUCTOR--PVC-3%7C4X1%7C2.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 51. **Adaptador macho CPVC rosca NPT $\frac{1}{2}$ pulg**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/12083/ADAPTADOR-CPVC-MACHO-3%7C4-Pulg.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 52. **Adaptador macho PVC rosca NPT 1 pulg**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/12093/ADAPTADOR-PVC-MACHO-PSI160-1-Pulg.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 53. **Codo 90° CPVC ½ pulg**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/12113/CODO-CPVC-1%7C2-Pulg.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

Figura 54. **Codo 90° PVC 1 pulg**



Fuente: Novex. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/12130/CODO-PVC-PSI160-90X1-Pulg.html>. Consulta: 22 de agosto de 2018.

3.5.1.3.2. Selección de fuente de energía para sistema de calentamiento

Para la selección de la fuente de energía, se realizó una búsqueda de un sistema de calefacción de agua que permitiera operar el equipo con las características definidas en la sección 3.5.1.2. A continuación, se presentan los criterios para seleccionar el equipo de calentamiento.

Tabla XV. **Parámetros de selección de fuente de energía**

Flujo volumétrico	7 l/min
Temperatura máxima de operación	46 °C
Temperatura ambiente	20-25°C
Flujo de calor mínimo para operación.	2 420,66 W
Voltajes de operación	110-220 V
Tipo de unión de tubería	Roscado
Tipo de fluido	Líquido
Espacio disponible	0,4x0,6x0,6m
Tiempo de calentamiento	<20 minutos
Mantenimiento	Sencillos
Operación	Fácil
Costo	<Q 3 000,00 (económico)

Fuente: elaboración propia.

Con base en los datos anteriores, se comenzó la búsqueda un tipo de calentador adecuado, de esto se determinó cuatro posibles tipos de calentadores a utilizar:

- Calentador de agua con tanque de almacenamiento con fuente de energía eléctrica (resistencia eléctrica).
- Calentador de agua de paso eléctrico, sin tanque de almacenamiento.
- Calentador de agua a gas de paso, utilizando un quemador de gas propano, sin tanque de almacenamiento.
- Calentador de agua a gas con tanque de almacenamiento.

Con estas tres opciones se realizó una matriz de ponderación, para evaluar los datos técnicos de cada tipo de calentador, para ellos se realizó busque de información técnica de cada tipo de calentador. La ponderación de los criterios es: 5 muy bueno, 4 bueno, 3 regular, 2 malo y 1 muy malo:

Tabla XVI. **Matriz de ponderación para selección de calentador**

Tipo	Eléctrico con tanque	Eléctrico de paso	Gas con tanque	Gas de paso
Espacio disponible.	2	5	3	4
Tiempo requerido para calentar.	2	5	2	4
Cumple con la demanda de energía a transferir.	3	5	3	4
Puede calentar el flujo de agua de operación requerido.	4	4	4	4
Económico	3	5	3	4
Operación fácil.	3	4	3	4
Mantenimiento sencillo.	3	4	3	3
Total	20	32	21	23

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior se observa que el calentador eléctrico de paso es la mejor opción.

Una vez determinado el tipo de aparato a utilizar, se comenzó a realizar cotizaciones para escoger la opción más económica. A continuación, se muestra los distintos tipos de calentadores que se evaluaron.

Tabla XVII. **Calentadores eléctricos de paso**

Calentador	Voltaje (V)	Consumo de potencia máximo (kW)	Elevación de temperatura con flujo de 7 l/min (°C)	Temperatura de salida (°C) (Tref=23°C)	Corriente (A)	Costo (Q)
Bosch Tronic 3000 C 9.5 kW.	220	9,5	20,00	43,00	50	1 704,89
Bosch Tronic 3000 C 12.0 kW.	220	12,0	25,00	48,00	60	1 999,00
Bosch Tronic 4000 C.	220	12,0	25,00	48,00	60	1 999,00
Titan N 100 SCR2.	220	10,8	22,56	45,56	49	1 899,00
Titan N 120 SCR2.	220	11,8	24,55	47,56	54	1 899,00
Titan N 160 SCR3.	240	16,0	33,89	56,89	66	2 499,00
Ecosmar Eco 8.	240	8,0	16,94	39,94	40	1 760,00
Ecosmar Eco 11.	240	13,0	27,36	50,36	54	1 950,00

Fuente: elaboración propia.

De lo anterior se observa que el calentador Titan N 120 SCR2 es el más indicado puesto que cumple con las características requeridas, y es el más económico.

A continuación, se muestra una imagen del calentador seleccionado.

Figura 55. **Calentador Titan N 120 SCR 2**



Fuente: Titan Tankless Water Heater. *Catálogo*.

<https://www.titanheater.com/proddetail.php?prod=SCR2-N120>. Consulta: 10 de agosto de 2018.

3.5.1.3.3. Diseño del sistema de bombas

Para el diseño de sistema de bombeo, se tomaron como base los parámetros de flujo de operación determinados en los incisos anteriores, a partir de ello se calculó la potencia requerida para cada bomba.

- Cálculo de potencia de la bomba de agua de calentamiento

Para realizar el cálculo de la potencia requerida de la bomba se realiza un balance de momento para el fluido, de ello se obtiene la ecuación general de la energía mecánica para fluidos:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + h_A = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_R + h_L$$

Donde:

P_1, P_2 = Presión del fluido en la entrada y salida respectivamente (Pa)

ρ = Densidad del fluido

v_1, v_2 = Velocidad del fluido en los puntos en la entrada y salida respectivamente (m/s)

Z_1, Z_2 = Altura de los puntos a analizar en base al punto de referencia (m)

h_A = Suma de las cabezas de las bombas operando en paralelo (m)

h_R = Trabajo generado por el fluido (m)

h_L = Perdidas por fricción (m)

Los puntos analizar son: 1 el espejo de agua en el tanque de almacenamiento, 2 el fluido a la salida del intercambiador de calor al tanque de productos. Dado que en este caso no el fluido no es utilizado para realizar algún trabajo, se puede despreciar $h_R = 0$. Los puntos analizar están a presión atmosférica, por lo que es posible despreciar la cabeza de presión $\left(\frac{P_1}{\rho g}\right) = \left(\frac{P_2}{\rho g}\right)$.

Con estas consideraciones la ecuación se reduce a:

$$\frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + h_A = \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_L$$

Despejando h_A :

$$h_A = \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + Z_2 - Z_1 + h_L$$

La velocidad en el espejo de agua es:

$$v = \frac{\dot{V}}{A}$$

Donde el área del espejo de agua en el tanque almacenamiento es aproximadamente (para más detalles del tanque de almacenamiento consultar la sección 3.5.1.3.5):

$$A = (0,222 \text{ m})(0,184 \text{ m})$$

$$A = 0,040848 \text{ m}^2$$

$$\dot{V} = \frac{7 \text{ l}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1\,000 \text{ l}}$$

$$\dot{V} = 0,0001167 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v = \frac{0,0001167 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,040848 \text{ m}^2}$$

$$v_1 = 0,002856 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

En la salida del intercambiador de calor al tanque, se tiene una manguera de vinilo cuyo diámetro es:

$$D = 0,009525 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi(0,009525 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 0,00007125 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0,0001167 \frac{m^3}{s}}{0,00007125 m^2}$$

$$v_2 = 1,63 m/s$$

La diferencia en el nivel de altura ($Z_2 - Z_1$) es:

$$Z_2 - Z_1 = 0,1 m$$

Antes de calcular las pérdidas por fricción fue necesario definir las medidas exactas del reactor, incluyendo accesorios, válvulas, etc. Dichos detalles pueden observarse en los planos del reactor (ver capítulo 4).

$$h_L = \sum f_D \frac{L}{D} + \sum K \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

Ke = Longitud equivalente en diámetros de conducto, este valor se encuentra en tablas.

$$Ke = \frac{L_e}{D}$$

f_D = Factor de fricción de Darcy.

L = Longitud de tubería (m).

D = Diámetro de tubería (m).

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

A continuación, se describe la longitud de tramos de tuberías y cantidad de accesorios, que componen el intercambiador de calor (enchaquetamiento):

Tabla XVIII. Accesorios de tubería del enchaquetamiento

Componente	Can- tidad	Longitud equivalente en diámetros de conducto Le/D.	Coeficientes de pérdida K.
Codo PVC 1 pulg	3	30	
Reductor PVC bushing 1 a ¾ pulg.	1		0,5
Reductor PVC bushing ¾ a ½ pulg.	1		0,5
Adaptador PVC hembra ½ pulg. rosca NPT	1	10	
Calentador Titan N 120 SCR2	1	1 000	
Adaptador CPVC hembra ½ pulg. Rosca NPT.	1	10	
Codo CPVC ½ pulg	2	30	
Adaptador CPVC macho ½ pulg	1	10	
Reductor campana SS304 ½ a ¼ pulg. Rosca NPT.	2		0,38
Niple SS304 L=1 pulg., D= ¼ pulg. rosca NPT.	6	4	
Tee SS304 D=1/4 pulg. rosca NPT con flujo a través de un tramo.	4	20	
Terminal para manguera bronce rosca ½ pulg. NPT, manguera ½ pulg.	1		0,8
Perdida de entrada de depósito a tubería, conducto de proyección hacia adentro.	1		1
Reductor concéntrico (dilatación gradual) de ½ a 1 pulg. SS304.	15		0,1
Efecto por Venturi	30	280	
Reductor concéntrico (contracción gradual) de ½ a 1 pulg. SS304.	15		0,1
Unión universal 1/4 pulg, rosca NPT	1	10	
Copla D= ¼ pulg. L=1 pulg	1	10	
Tee soldable SS304 D=1 pulg, flujo a través de una rama.	30	60	
Efecto de ensanchamiento entre tee y reductor concéntrico.	30	150	
Uniones de accesorios clamp ½ pulg SS304.	8	10	

Fuente: elaboración propia.

Dado que no toda la tubería es del mismo material, ni del mismo diámetro, se debe calcular por separado el factor de fricción de Darcy.

$$f_d = \frac{0,25}{\left(\log_{10} \left[\frac{\frac{\varepsilon}{D_{eq}}}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \right)^2}$$

Las rugosidades de los materiales son:

Tabla XIX. **Rugosidad absoluta de materiales**

Material	Rugosidad (m)
PVC, CPVC, Manguera plástica	1,5x10-6
Acero inoxidable AISI 304 pulido tipo espejo.	6,0x10-6
Acero inoxidable AISI 304 acabo industrial.	4,6x10-5
Tubo de cobre (calentador TITAN)	1,5x10-6

Fuente: Fenómenos de transporte. *Rugosidad absoluta de los materiales*.

<https://ftransp.files.wordpress.com/2013/05/apendice-1-flujo-incompresible.pdf>. Consulta: 10 de junio de 2018.

El número de Reynolds se calculó para cada sección de tubería de los diferentes diámetros, el flujo volumétrico es el mismo ($\dot{V} = 7 \text{ l/min}$). En lo que respecta a la densidad ($991,46 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) y la viscosidad dinámica ($0,00050535 \text{ Pa} \cdot \text{s}$), se tomaron los valores promedio a la temperatura de 44 °C. También se incluye el número de Reynolds para el anulo del enchaquetamiento, en cual fue calculado en los parámetros de diseño.

Tabla XX. **Número de Reynolds para cada tramo de tubería**

Tramo	Re
Tubo PVC	10 192,40
Tubo CPC	22 736,89
Tubo de cobre en calentador	49 263,27
Accesorios SS 304 grado industrial	29 557,96
Tubo SS304 pulido tipo espejo	28 697,05
Manguera plástica	32 842,18
Enchaquetamiento (anulo)	8 076,55

Fuente: elaboración propia.

A partir del número de Reynolds y las rugosidades relativas se calculó el factor de fricción.

Tabla XXI. **Factor de fricción para cada tramo de tubería**

Tramo	Factor de fricción (fd)
Tubo PVC	0,0309
Tubo CPC	0,0427
Tubo de cobre en calentador	0,0218
Accesorios SS 304 grado industrial	0,0331
Tubo SS304 pulido tipo espejo	0,0253
Manguera plástica	0,0234
Enchaquetamiento (anulo)	0,0420

Fuente: elaboración propia.

Calculando las pérdidas por fricción y forma:

$$h_L = \sum f_D \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} + \sum K_e \frac{v^2}{2g}$$

Tabla XXII. **Pérdidas por fricción y forma de accesorios**

Componente	Cantidad	hL (m)
Codo PVC 1 pulg.	3	0,0045
Reductor PVC bushing 1 a ¾ pulg.	1	0,0008
Reductor PVC bushing ¾ a ½ pulg.	1	0,0008
Adaptador PVC hembra ½ pulg. rosca NPT	1	0,0005
Calentador Titan N 120 SCR2	1	19,4608
Adaptador CPVC hembra ½ pulg. Rosca NPT	1	0,3812
Codo CPVC ½ pulg.	2	0,1038
Adaptador CPVC macho ½ pulg.	1	0,0173
Reductor campana SS304 ½ a ¼ pulg. Rosca NPT	2	0,0534
Niple SS304 L=1 pulg., D= ¼ pulg. rosca NPT	6	0,0817
Tee SS304 D=1/4 pulg. rosca NPT con flujo a través de un tramo.	4	0,3064
Terminal para manguera bronce rosca ½ pulg. NPT, manguera ½ pulg.	1	0,0485
Perdida de entrada de depósito a tubería, conducto de proyección hacia adentro.	1	0,0016
Reductor concéntrico (dilatación gradual) de ½ a 1 pulg. SS304.	15	0,1542
Efecto por Venturi	15	10,9097
Reductor concéntrico (contracción gradual) de ½ a 1 pulg. SS304.	15	0,1542

Continuación de tabla XXII.

Componente	Cantidad	hL (m)
Unión universal 1/4 pulg, rosca NPT	1	0,0383
Copla D= ¼ pulg. L=1 pulg.	1	0,0383
Tee soldable SS304 D=1 pulg, flujo a través de una rama.	30	4,6715
Efecto de ensanchamiento entre tee y reductor concéntrico.	30	0,6680
Uniones de accesorios clamp ½ pulg SS304	8	0,2078
Total		37,304

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Pérdidas por fricción en sistema de agua

Tramo	hL (m)
Tubo PVC	0,00174
Tubo CPC	0,05988
Tubo de cobre en calentador	12,97390
Tubo SS304 pulido tipo espejo	2,82452
Manguera plástica	0,45861
Enchaquetamiento (anulo)	1,33067
Accesorios SS 304 grado industrial	0,22981
Total	17,87914

Fuente: elaboración propia.

Sumando los totales de las dos tablas anteriores, se obtiene el total de las pérdidas por fricción y forma:

$$h_L = 37,304 \text{ m} + 17,879 \text{ m}$$

$$h_L = 55,183 \text{ m}$$

Calculando la energía de la bomba requerida:

$$h_A = \frac{\left(1,86 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(0,002856 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} + 0,1 \text{ m} + 55,183 \text{ m}$$

$$h_A = 0,176 \text{ m} + 0,1 \text{ m} + 55,183 \text{ m}$$

$$h_A = 55,459 \text{ m}$$

Calculando la potencia de la bomba:

$$P = h_A * \rho * g * \dot{V}$$

$$P = 55,459 \text{ m} * 991,46 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,00011833 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$P = 63,81 \text{ W}$$

Dado que en el mercado cuesta conseguir una bomba de 63,81 W, se decide utilizar una bomba sobre dimensionada, y operarla a una eficiencia de cerca del 20%. Si se decide utilizar una bomba de 372 W= ½ HP.

$$ne = \frac{63,81 \text{ W}}{372 \text{ W}} = 0,1715$$

$$ne = 17,15\%$$

- Cálculo de potencia de las bombas de solución de hidróxido de sodio u solución de acetato de etilo.

Para realizar el cálculo de la potencia requerida de la bomba se realiza un balance de momento para el fluido, de ello se obtiene la ecuación general de la energía mecánica para fluidos:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + h_A = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_R + h_L$$

Donde:

P_1, P_2 = Presión del fluido en la entrada y salida respectivamente (Pa)

ρ = Densidad del fluido

v_1, v_2 = Velocidad del fluido en los puntos en la entrada y salida respectivamente (m/s)

Z_1, Z_2 = Altura de los puntos a analizar en base al punto de referencia (m)

h_A = Cabeza de la bomba (m)

h_R = Trabajo generado por el fluido (m)

h_L = Perdidas por fricción (m)

Los puntos analizar son: 1 el espejo de agua en los tanques de almacenamiento, 2 el fluido a la salida del reactor. Dado que en este caso no el fluido no es utilizado para realizar algún trabajo, se puede despreciar $h_R = 0$.

Los puntos analizar están a presión atmosférica, por lo que es posible despreciar la cabeza de presión $\left(\frac{P_1}{\rho g}\right) = \left(\frac{P_2}{\rho g}\right)$.

Con estas consideraciones la ecuación se reduce a:

$$\frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + h_A = \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_L$$

Despejando h_A :

$$h_A = \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + Z_2 - Z_1 + h_L$$

La velocidad en el espejo de reactivos es:

$$v = \frac{\dot{V}}{A}$$

Donde el área del espejo de agua en el tanque almacenamiento es aproximadamente (para más detalles del tanque de almacenamiento consultar la sección 3.5.1.3.5):

$$A = (0,222 \text{ m})(0,184 \text{ m})$$

$$A = 0,040848 \text{ m}^2$$

$$\dot{V} = \frac{1 \text{ l}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1\,000 \text{ l}}$$

$$\dot{V} = 0,00001666 \frac{m^3}{s}$$

$$v = \frac{0,00001666 \frac{m^3}{s}}{0,040848 m^2}$$

$$v_1 = 0,000408 \frac{m}{s}$$

En la salida del reactor, se tiene una manguera de vinilo cuyo diámetro es:

$$D = 0,009525 m$$

$$A = \frac{\pi(0,009525 m)^2}{4} = 0,00007125 m^2$$

$$v_2 = \frac{0,00003333 \frac{m^3}{s}}{0,00007125 m^2} = 0,467836 m/s$$

La diferencia en el nivel de altura ($Z_2 - Z_1$) es:

$$Z_2 - Z_1 = 0,1 m$$

Antes de calcular las perdidas por fricción fue necesario definir las medidas exactas del reactor, incluyendo accesorios, válvulas, entre otros. Dichos detalles pueden observarse en los planos del reactor (ver capítulo 4).

A continuación, se describe la longitud de tramos, de tuberías y cantidad de accesorios, que componen el reactor:

Tabla XXIV. **Accesorios de tubería del reactor**

Componente	Canti- dad	Longitud equivalente en diámetros de conducto Le/D	Coeficien- tes de pérdida K
Reductor PVC bushing 1 a $\frac{3}{4}$ pulg	4		0,5
Reductor PVC bushing $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$ pulg	4		0,5
Medidor de flujo	2	900	
Adaptador CPVC macho $\frac{1}{2}$ pulg. Rosca NPT.	12	15	
Codo CPVC $\frac{1}{2}$ pulg	6	30	
Unión universal 1/2 pulgada CPVC	2	10	
Reductor campana SS304 $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ pulg. Rosca NPT.	3		0,38
Válvula de cheque bronce 1/2 pulg	2	150	
Niple SS304 L=1 pulg., D= $\frac{1}{4}$ pulg. rosca NPT.	6	4	
Codo SS304 D=1/4 pulg. rosca NPT	2	35	
Tee SS304 D=1/4 pulg. rosca NPT con flujo a través de un tramo.	6	20	
Terminal para manguera bronce rosca $\frac{1}{2}$ pulg. NPT, manguera $\frac{1}{2}$ pulg.	1		0,8
Perdida de entrada de depósito a tubería, conducto de proyección hacia adentro.	1		1

Continuación de tabla XXIV.

Componente	Canti- dad	Longitud equivalente en diámetros de conducto Le/D	Coeficien- tes de pérdida K
Dilatación súbita en medidores de flujo	4		0,96
Codo SS304 90°	30	45	
Unión universal 1/4 pulg, rosca NPT	2	10	
Copla D= ¼ pulg. L=1 pulg	2	10	
Unión de flujos a 180°	1	4 000	
Válvula de bola CPVC 1/2 pulg	2	8	
Uniones soldadas SS304	62	10	
Perdida por vástago de termómetro	2	20	
Uniones roscadas.	33	15	
Uniones de accesorios clamp ½ pulg SS304.	60	10	

Fuente: elaboración propia.

El número de Reynolds se calculó para cada sección de tubería de los diferentes diámetros, el flujo volumétrico es mismo ($\dot{V} = 2 \text{ l/min}$). En lo que respecta a la densidad ($1\,000,76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) y la viscosidad dinámica ($0,000722 \text{ Pa} \cdot \text{s}$), se tomaron los valores promedio a la temperatura de 33 °C.

Tabla XXV. **Número de Reynolds para cada tramo de tubería**

Tramo	Re
Tubo PVC	1 019,98
Tubo CPC	5 378,10
Tubo de cobre en calentador	9 859,86
Accesorios SS 304 grado industrial	5 915,91
Tubo SS304 pulido tipo espejo	6 551,40
Manguera plástica	7 394,89
Enchaquetamiento (anulo)	1 616,49

Fuente: elaboración propia.

A partir del número de Reynolds y las rugosidades relativas se calculó el factor de fricción.

Tabla XXVI. **Factor de fricción para cada tramo de tubería**

Tramo	Factor de fricción (fd)
Tubo PVC	0,06586
Tubo CPC	0,05163
Tubo de cobre en calentador	0,03153
Accesorios SS 304 grado industrial	0,04168
Tubo SS304 pulido tipo espejo	0,03586
Manguera plástica	0,03400
Enchaquetamiento (anulo)	0,06063

Fuente: elaboración propia.

Calculando las pérdidas por fricción y forma:

Tabla XXVII. **Pérdidas por fricción y forma de accesorios**

Componente	Cantidad	hL (m)
Reductor PVC bushing 1 a $\frac{3}{4}$ pulg	4	0,0276
Reductor PVC bushing $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$ pulg	4	0,0276
Medidor de flujo	2	0,8427
Adaptador CPVC macho $\frac{1}{2}$ pulg. Rosca NPT	12	0,1283
Codo CPVC $\frac{1}{2}$ pulg	6	0,1283
Unión universal 1/2 pulgada CPVC	2	0,0065
Reductor campana SS304 $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ pulg. Rosca NPT	3	0,0105
Válvula de cheque bronce 1/2 pulg	2	0,0593
Niple SS304 L=1 pulg., D= $\frac{1}{4}$ pulg. rosca NPT	6	0,0138
Codo SS304 D=1/4 pulg. rosca NPT	2	0,0268
Tee SS304 D=1/4 pulg. rosca NPT con flujo a través de un tramo.	6	0,0459
Terminal para manguera bronce rosca $\frac{1}{2}$ pulg. NPT, manguera $\frac{1}{2}$ pulg.	1	0,1178
Perdida de entrada de depósito a tubería, conducto de proyección hacia adentro.	1	0,0000
Dilatación súbita en medidores de flujo	4	0,0241
Codo SS304 90°	30	0,4957
Unión universal 1/4 pulg, rosca NPT	2	0,0077
Copla D= $\frac{1}{4}$ pulg. L=1 pulg.	2	0,0077
Unión de flujos a 180°	1	2,3020
Válvula de bola CPVC 1/2 pulg.	2	0,0052
Uniones soldadas SS304	62	0,3424

Continuación de la tabla XXVII.

Componente	Cantidad	h _L (m)
Perdida por vástago de termómetro	2	0,0359
Uniones roscadas	33	0,1818
Uniones de accesorios clamp ½ pulg SS304	60	0,3314
Total		5,1690

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Pérdidas por fricción en tubería del reactor

Tramo	h _L (m)
Tubo CPVC	0,04709
Tubo SS304 pulido tipo espejo	1,57795
Manguera plástica	0,08965
Accesorios SS 304 grado industrial	0,02870
Total	1,74339

Fuente: elaboración propia.

Sumando los totales de las dos tablas anteriores, se obtiene el total de las pérdidas por fricción y forma:

$$h_L = 5,169 \text{ m} + 1,743 \text{ m}$$

$$h_L = 6,912 \text{ m} \sim 7,0 \text{ m}$$

Calculando la energía de la bomba requerida:

$$h_A = \frac{\left(0,4678 \frac{m}{s}\right)^2 - \left(0,000408 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} + 7,0 m$$

$$h_A = 0,011 m + 7,0 m = 7,011 m$$

Calculando la potencia de la bomba:

$$P = h_A * \rho * g * \dot{V}$$

$$P = 7,011 m * 1\,000,43 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 0,000033333 \frac{m^3}{s}$$

$$P = 2,3262 W$$

Las bombas de los reactivos operan el paralelo por lo que la eficiencia se reduce significativamente, asumiendo una eficiencia de operación de 55 %.

$$P = \frac{2,3262 W}{0,55} = 4,2294 W$$

Los cálculos anteriores corresponden al cálculo de una bomba operando sola, sin embargo, si se considera que dos bombas operaran el paralelo la potencia debe duplicarse.

$$P = 4,2294 W * 2 = 8,4588 W$$

Aplicando un factor de seguridad de 1,5, se obtiene la potencia requerida de las bombas:

$$P = 8,4588 \text{ W} * 1,5 = 12,6882 \text{ W}$$

3.5.1.3.4. Diseño del sistema eléctrico

Para el diseño del sistema eléctrico se elaboró un plano eléctrico, este puede observarse en la sección 4.1.

El plano eléctrico cuenta con dos circuitos eléctricos, uno con fuente de alimentación principal 120 V que corresponde al sistema de bombeo. El segundo es un circuito eléctrico de 240 V y corresponde al sistema de calentamiento de agua. Los circuitos eléctricos son independientes, por lo que son necesario dos fuentes principales de alimentación de energía. Una toma de corriente de 120 V x 20 A, y otra de toma de 240 V monofásica de: 2 x 120 V x 60 A. A continuación, se detallan los componentes de los circuitos eléctricos.

3.5.1.3.5. Dimensionamiento de tanques

Para dimensionar los tanques de reactivos de primero se debe conocer el flujo volumétrico, de cada reactivo. Esto fue determinado en incisos anteriores, por ello se sabe que el caudal de alimentación es de 1 l/min para reactivos y 7 l/min para el agua de calentamiento.

Otro parámetro necesario para dimensionar los tanques de almacenamiento es el tiempo de residencia.

$$\tau = \frac{1,7 \text{ l}}{2 \frac{\text{l}}{\text{min}}} = 0,85 \text{ min}$$

Debido a que al inicio de la operación del reactor es necesario esperar que el sistema se estabilice y alcance el estado estacionario, se recomienda esperar de cuatro a diez veces el tiempo de residencia para comenzar a realizar mediciones de conductividad en el reactor.

Por ello el tiempo mínimo para realizar mediciones es:

$$t = 4 * \tau$$

$$t = 4 * 0,85 \text{ min} = 3,4 \text{ min}$$

Con este valor se calculó el volumen de estabilización del sistema para cada reactivo:

$$V = 3,4 \text{ min} * 1 \frac{l}{\text{min}} = 3,4 \text{ l}$$

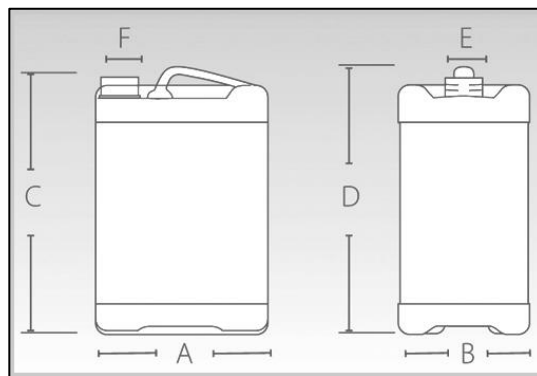
Es recomendable que el volumen del tanque de almacenamiento sea de por lo menos 4 veces el volumen de estabilización:

$$V = 3,4 \text{ l} * 4 = 13,6 \text{ l}$$

Una vez determinado el volumen del tanque de almacenamiento es necesario definir el nivel mínimo de operación de las bombas centrífugas de los reactivos. El nivel mínimo de operación de las bombas de 24 V de los reactivos es de 1,5 cm sobre la tubería de succión, en caso de una succión positiva. En el caso de la bomba de ½ hp un nivel de 25 cm es suficiente.

Con estos datos se buscaron los tanques de almacenamiento adecuados, de los cual se determinó que el siguiente modelo era el más apto, tanto en capacidad como en configuración geométrica.

Figura 56. **Plano de tanque de almacenamiento Dynalon Baritainer Jerry Can 10 L**



Fuente: Dynalon Labware. Catálogo. <https://www.dynalon.com/PublicStore/product/Baritainer-Jerry-Can,28.aspx>. Consulta: 7 de enero de 2018.

Tabla XXIX. **Dimensiones de tanque Dynalon Baritainer Jerry Can 10 L**

Peso (lb)	1,3
A-Longitud (cm)	22,2
B-Ancho (cm)	18,4
C-Alto (cm)	30,5
D-Alto con asa (cm)	31,8
F-Cuello de tanque (cm)	4,1
E-Tapón	DIN 50

Fuente: Dynalon Labware. Catálogo. <https://www.dynalon.com/PublicStore/product/Baritainer-Jerry-Can,28.aspx>. Consulta: 7 de enero de 2018.

A continuación, se muestra una imagen real del tanque seleccionado para almacenamiento de reactivos y productos.

Figura 57. **Tanque Dynalon Baritainer Jerry Can 10 L**



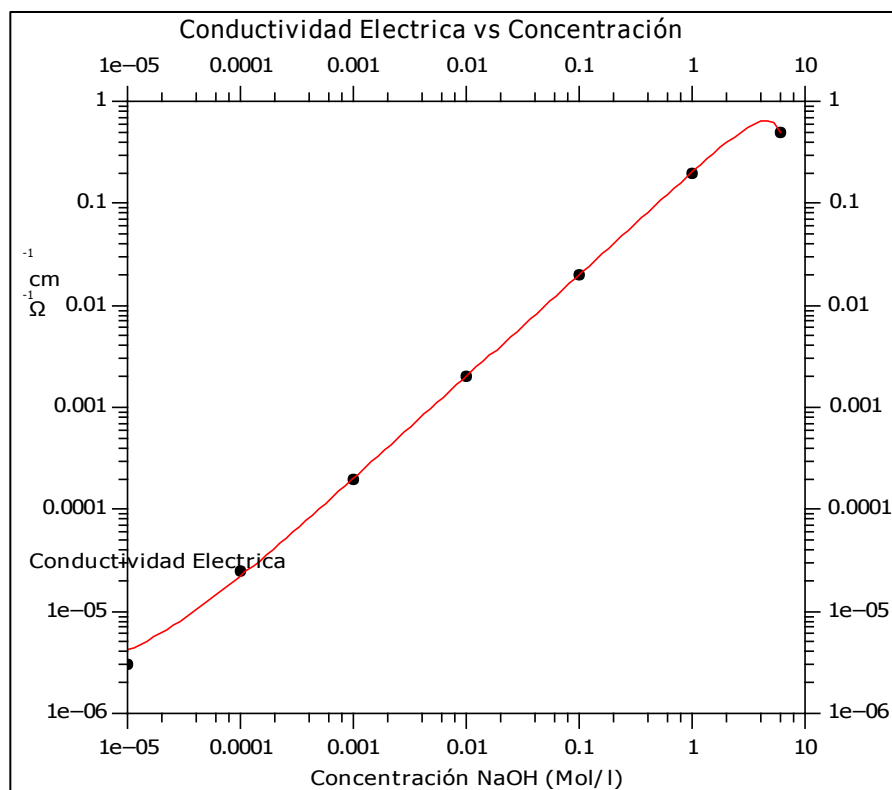
Fuente: Guatemala Digital. *Catálogo*.

<https://guatemaladigital.com/Laboratorio+y+cient%EDfico/Dynalon+Baritainer+405594-0002+HDPE%2FQUORAL+Jerry+Can%2C+Natural%2C+10L+Capacity/Producto.aspx?CodigoP=B00DWFWB2A>. Consulta: 3 de enero de 2018.

3.5.1.3.6. Selección de medidor de conductividad

Para la selección del medidor de conductividad, se realizó la búsqueda de información sobre curvas de conductividad eléctrica vs. concentración de soluciones de hidróxido de sodio. De esto se obtuvo la siguiente gráfica:

Figura 58. Conductividad eléctrica vs concentración de hidróxido de sodio



Color	Modelo matemático ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	R^2	Rango de validez (mol/l)	
			Mínimo	Máximo
	$CE = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$	0,9999	10^{-5}	6
Valor de coeficientes ($\Omega^{-1}m^{-1}$)				
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
$2,1 \times 10^{-6}$	$1,997 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^{-3}$	-2×10^{-3}	$-2,6 \times 10^{-4}$
Incerteza de coeficientes ($\Omega^{-1}m^{-1}$)				
2×10^{-7}	3×10^{-4}	4×10^{-4}	4×10^{-4}	6×10^{-5}

Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288 y datos de ARTEMOV, V. G. Et al. *Conductivity of aqueous HCL, NaOH and NaCl solutions: Is water just a substrate?* <http://iopscience.iop.org/article/10.1209/0295-5075/109/26002>. Consulta: 2 de diciembre de 2017.

3.5.1.4. Diseño espacial del equipo conjunto

Una vez determinados, los parámetros de operación, los accesorios, equipos auxiliares, dimensiones del reactor, dimensiones los tanques de almacenamiento, entre otros, se realizó un conjunto de planos 2D con vistas: elevación (cuatro lados), planta, plano de tuberías y plano de bastidores. De igual forma se realizó un esquema 3D del reactor. Estos planos se muestran en la sección 4 resultados. Sin embargo, cabe destacar que se realizaron en la fase de diseño del reactor.

3.5.2. Técnicas cualitativas de la fase de construcción

A continuación, se muestra la serie de pasos y procesos realizados en la fase de construcción del equipo. En los apéndices se puede encontrar una galería de imágenes del proceso de construcción.

3.5.2.1. Metalmecánica

- Se cortaron los tubos de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro en: 16 secciones de 91 cm de largo, del tubo de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, 2 secciones de 65 cm de largo, 4 secciones de 15 cm de largo, 15 secciones de 9.4 cm de largo.
- Se cortaron los tubos de 1 pulgada de diámetro en 16 secciones de 70 cm de largo.
- Se cortó la lámina metálica calibre 20 en secciones de las siguientes dimensiones: 1 rectángulo de 42 x 44 cm, 1 rectángulo de 39,5 x 44 cm, 1 rectángulo de 2,5 cm x 44 cm, 1 rectángulo de 15 cm x 164 cm.
- Se realizó un mecanizado a 32 ferrulas clamp de $\frac{1}{2}$ plug., se perforó mediante un tornó un agujero de $\frac{1}{2}$ pulg de diámetro a cada ferrula.

- Se cortó el hierro angular de 1/8 x 1 pulg. en: 4 secciones de 67 cm de largo, 3 secciones de 65 cm de largo, 2 secciones de 60 cm de largo, 6 secciones de 64 cm de largo y 2 secciones de 20 cm.
- Se limó los bordes de todas las secciones cortadas.
- Se limpió con desengrasante las partes a soldar.

3.5.2.2. Soldadura TIG

- Se colocó el equipo de protección personal: guantes, overol, bata de soldadura de cuero, careta con foto sensor para soldar.
- Se armó el equipo de soldadura TIG, conformado con por: una soldadora TIG invertir, un tanque de argón, una manguera de soldadura TIG, un juego de buzas cerámicas, un medidor de flujo de argón, un regulador de caudal de argón.
- Se conectó el equipo de soldadura TIG, a la alimentación de energía 240 V x 60 A.
- Se fijaron con prensas las piezas a soldar.
- Se conectó el cable de negativo a la pieza a soldar.
- Se encendió el equipo de soldadura.
- Se abrió la válvula de regulación de caudal, fijando el caudal de argón en 7 l/min.
- Se procedió a crear el arco eléctrico con la técnica de raspado.
- Se soldó las piezas.
- Se dio un tiempo de enfriamiento natural con aire de 15 minutos.
- Se procedió a cepillar la soldadura con pasta decapante, para limpiar las manchas de soldadura.
- Se lavó con agua y jabón las piezas soldadas.
- Se secó con un paño la pieza creada.

- Se repitieron los pasos 5 al 12, de acuerdo con la cantidad de piezas a soldar.

3.5.2.3. Soldadura MMA con arco eléctrico

- Se colocó el equipo de protección personal: guantes, overol, bata de soldadura de cuero, careta con foto sensor para soldar.
- Se armó el equipo de soldadura con electrodo revestido.
- Se conectó el equipo, a la alimentación de energía de 240 V x 60 A.
- Se fijaron con prensas las piezas a soldar.
- Se conectó el cable positivo a la pieza.
- Se colocó un electrodo 6013 punto verde en el porta-electrodo.
- Se encendió el equipo de soldadura.
- Se procedió a crear el arco eléctrico con la técnica de raspado.
- Se soldaron las piezas utilizando la técnica de avance zigzag.
- Se esperó a que el cordón de soldadura pasara de un color rojizo a color negro.
- Se golpeó ligeramente el cordón de soldadura, para romper la capa de escoria.
- Se limó con un cepillo de alambre el cordón de soldadura, para quitar los restos de escoria.
- Se esperó que la pieza se enfriara.
- Se desbastó el cordón de soldadura con una esmeriladora angular de 4 ¼ pulg.
- Se pulió el cordón de soldadura con un disco de lija de grano 120.
- Se limpió con waípe y thinner la pieza.
- Se repitieron los pasos 4 al 16 de acuerdo con la cantidad de piezas a soldar.

3.5.2.4. Construcción de tablero eléctrico

- Se tomaron las secciones de lámina cortadas en el inciso 3.5.2.1. y se lijaron ligeramente para quitar la grasa y suciedad.
- Se dobló por medio de una prensa y un martillo el rectángulo de 15 cm x 164 cm, en un cuadrado de 15 cm de fondo x 40 cm de ancho x 42 cm de alto.
- Se soldó el rectángulo de 42 x 44 cm con el cuadrado del paso 2, utilizando el procedimiento descrito en el inciso 3.5.2.3.
- Se marcó con una plantilla y marcador permanente, los agujeros de aspiración y ventilación del tablero eléctrico.
- Se perforó con un roto-martilló (barreno) y una broca de 1/8 pulg. los agujeros del paso 4.
- Se soldó el soporte de la fuente de poder de 24 V utilizando el procedimiento descrito en el inciso 3.5.2.3.
- Se soldó el rectángulo de 2,5 x 44 cm a la pieza creada en el paso 3.
- Se soldaron 4 bisagras de 1,5 x 1,5 pulg. a la pieza al rectángulo de 2,5 x 44 cm.
- Se soldó a las bisagras el rectángulo de 39.5 x 44 cm.
- Se realizaron: una perforación con una broca de 7/8 pulg. y dos perforaciones de 1/8 pulg. para colocar una chapa.
- Se realizaron varias perforaciones para los tornillos de sujeción de las fuentes de poder, cables eléctricos, y soportes de ventiladores de enfriamiento.
- Se realizaron perforaciones en la puerta del tablero eléctrico, para los accesorios que se instalaron en el inciso 3.5.2.7.
- Se aplicó silicón en las uniones, esquinas y juntas donde hay soldaduras, para sellar y proteger de la humedad el interior del tablero eléctrico.

3.5.2.5. Corte y ensamblaje de tubería de PVC y CPVC

- Se cortó un tubo de PVC en: 1 sección de 65 cm, 1 sección de 50 cm, 1 sección de 30 cm.
- Se cortó un tubo de CPVC en: 2 secciones 15 cm, 4 secciones de 4 cm, 1 sección de 20 cm, 1 sección de 10 cm, 1 sección de 5 cm.
- Se pegaron los codos, bushing reductores, adaptadores machos, etc. a las secciones de tubo PVC de 1 pulgada, utilizando pegamento para PVC.
- Se pegaron los codos, adaptadores macho, adaptadores hembra, coplas, a las secciones de tubo de CPVC de ½ pulg, utilizando pegamento para CPVC.

3.5.2.6. Aplicación de pintura, revestimientos y resinas epoxicas

- Se limpió con thinner las piezas a pintar
- Se preparó la pintura de aceite color acero, mezclando la pintura con thinner en una proporción de 50 % en volumen.
- Se preparó una mezcla de imprimación de pintura de color acero, mezclado la pintura en una proporción de 70 % de thinner en volumen.
- Se aplicó la mezcla imprimante al tablero eléctrico, utilizando una pistola de aspersión por aire comprimido y un compresor de aire.
- Se esperó 1 hora para que la mezcla imprimante secará.
- Se aplicaron 3 capas de pintura al 50 % utilizando la técnica de aspersión con aire comprimido, dejando 3 horas de secado entre cada capa.
- Se dejó secar la pintura por 2 días.

- Se preparó la pintura base anticorrosiva gris con solvente mineral en una proporción de 75 % de pintura en volumen.
- Se preparó la pintura anticorrosiva de secado ultra rápido Corrostyl color Verde John Deer, en una proporción de 80 % de pintura y 20 % de solvente en volumen.
- Se aplicó la pintura de base anticorrosiva con una brocha al soporte metálico del reactor (estructura de hierro angular de 1 pulgada)
- Se aplicó 3 capas de pintura Verde John Deer con una brocha, dejando 30 minutos de secado entre cada capa.
- Se dejó secar el soporte del reactor por un día.

3.5.2.7. Armado de circuitos eléctricos en tablero

- Se procedió a montar las fuentes de poder de 12 y 24 V DC en el tablero eléctrico.
- Se montó un ventilador (F1), en posición de tiro inducido (flujo hacia el exterior) en la esquina inferior izquierda del tablero eléctrico.
- Se montó un ventilador (F2), en posición de tiro forzado (flujo hacia el interior) en la esquina inferior derecha.
- Se armaron dos circuitos de regulación de voltaje de 1,2 a 26 V DC para más detalles ver Figura 56. Para ello se utilizó un caudín, estaño, y una placa PCB de circuitos electrónicos.
- Se colocaron: los interruptores (S2, S3, S4, S5, S6), el botón de paró de emergencia (S1), las luces piloto (D1, D2), los voltímetros de corriente directa (Pr1, Pr2), el voltímetro de corriente alterna (Pr3), los potenciómetros de 20 K (POT1, POT2), en las perforaciones realizadas en el inciso 3.5.2.4. en la puerta del tablero eléctrico.
- Se realizó el cableado de los circuitos eléctricos de regulación de voltaje desde la fuente de 24 V.

- Se realizó el cableado de los ventiladores de enfriamiento desde la fuente de 12 V.
- Se realizó el cableado de los componentes de la puerta del tablero eléctrico.
- Se realizó la conexión de las bombas de corriente directa (B1, B2).
- Se realizó la conexión de la bomba de corriente alterna (B3).
- Se colocó una espiga de 120 V polarizada, para alimentación de energía al circuito de bombeo.
- Se realizó el cableado de la luz piloto (D2) del calentador de agua.

3.5.2.8. Ensamblaje de soportes y estructura metálica

- Se tomó el soporte del reactor, y se montó el tablero eléctrico, utilizando tornillos de cabeza hexagonal de hierro negro de 3/8 pulg. y empaques plásticos verdes de 3/4 pulg.
- Se montó las base de los tanques de almacenamiento utilizando tornillos de 1/4 x 1 pulg.
- Se montó la base de las bombas, utilizando tornillos de 1/4 X 1 pulg.
- Se montó el calentador de agua eléctrico utilizando tornillos de 0,3 mm x 40mm.

3.5.2.9. Instalación de bombas y equipos auxiliares

- Se unieron las bombas a los tanques de almacenamiento
- Se colocaron los tanques junto con las bombas en los soportes respectivos.
- Se ajustó el soporte de los tanques de almacenamiento con abrazaderas metálicas de acero inoxidable.

- Se colocó un amortiguador de vibración en las bases de las bombas, para reducir el ruido.
- Se colocaron los tornillos de sujeción de la bomba de corriente alterna.
- Se realizó la instalación eléctrica de las bombas ver inciso 3.5.2.7.
- Se unieron los medidores de flujo con las secciones de tuberías correspondientes.

3.5.2.10. Montaje de accesorios y ensamblaje final

- Se montaron las secciones del reactor en el soporte del reactor.
- Se colocaron los codos, empaques, uniones y abrazaderas clamp.
- Se colocaron los codos, tee, reductores de campana, niples, coplas, de acero inoxidable SS304 ¼ pulg. con rosca NPT.
- Se colocaron los manómetros y termómetros.
- Se montaron las secciones de tubería de PVC y CPVC.
- Se colocaron las válvulas de CPVC.
- Se conectó el calentador de agua HT1 a la tubería de PVC proveniente de la bomba B3 y a la tubería de alimentación de agua al reactor de CPVC para las uniones roscada se utilizó teflón como empaque.
- Se conectó la tubería de alimentación de la solución de hidróxido de sodio al reactor PFR.
- Se conectó la tubería de alimentación de la solución de acetato de etilo al reactor PFR.
- Se instalaron los terminales para manguera a la salida del enchaquetamiento y reactor.
- Se instalaron dos secciones de manguera de vinil de 3/8 pulg. transparente, para el enchaquetamiento-retorno al tanque de almacenamiento de agua y toma de muestras-salida del reactor.

3.5.2.11. Prueba de fugas

- Se colocó 10 litros de agua en los tanques de almacenamiento de reactivos y productos.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía de 120 V.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía de 240 V.
- Se verificó que los interruptores S4, S5, S6 estuvieran en la posición de apagado.
- Se verifico que el botón de paro de emergencia (S1) no estuviera accionado.
- Se verifico que la válvula del sistema de bombeo de hidróxido de sodio estuviera abierta.
- Se verifico que la válvula del sistema de bombeo de acetato de etilo estuviera abierta.
- Se verifico que el interruptor S3, estuviera en la posición de encendido.
- Se accionaron el interruptor S2 encendiendo el tablero eléctrico del reactor.
- Se graduó el voltaje en 25.6 V para las bombas de reactivos B1 y B2.
- Se acciono el interruptor S4 y S5 encendiendo la bomba de hidróxido de sodio y acetato de etilo.
- Se realizó una inspección visual de las uniones, roscas y tubería del reactor para determinar fugas de líquido.
- Se apagaron las Bombas B1 y B2.
- Se accionó el interruptor S6 encendiendo la bomba de agua.
- Se realizó una inspección visual de las uniones, roscas y tubería del enchaquetamiento.

3.5.3. Técnicas cuantitativas de la fase de validación

En el siguiente apartado se describe el procedimiento de validación del reactor.

3.5.3.1. Calibración de bombas de corriente directa

A continuación, se detalla el procedimiento utilizado para la calibración de las bombas de alimentación de reactivos.

3.5.3.1.1. Calibración de bomba de solución de hidróxido de sodio

- Se preparó 10 litros de solución de hidróxido de sodio 0,3 M.
- Se colocó la solución de hidróxido de sodio en el tanque de almacenamiento.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía de 120 V.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía de 240 V.
- Se verificó que los interruptores S4, S5, S6 estuvieran en la posición de apagado.
- Se verificó que el botón de paro de emergencia (S1), no estuviera accionado.
- Se verificó que la válvula del sistema de bombeo de hidróxido de sodio estuviera abierta.
- Se verificó que el interruptor S3, estuviera en la posición de encendido.
- Se accionó el interruptor S2 encendiendo el tablero eléctrico del reactor.
- Se graduó el voltaje en 12, 16, 20 y 24 V respectivamente.

- Se accionó el interruptor S4 encendiendo la bomba de hidróxido de sodio. Al mismo tiempo se activó el cronometro para medir el tiempo.
- Se tomó una alícuota de 1 litro y se determinó el tiempo transcurrido.
- Se calculó el flujo volumétrico de la bomba centrífuga a cada voltaje.
- Se repitieron tres veces los pasos 1 a 13.

3.5.3.1.2. Calibración de bomba de solución de acetato de etilo

- Se preparó 10 litros de solución de acetato de etilo 0,3 M.
- Se colocó la solución de acetato de etilo en el tanque de almacenamiento.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía de 120 V.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía de 240 V.
- Se verificó que los interruptores S4, S5, S6 estuvieran en la posición de apagado.
- Se verificó que el botón de paro de emergencia (S1) no estuviera accionado.
- Se verificó que la válvula del sistema de bombeo de hidróxido de sodio estuviera abierta.
- Se verificó que el interruptor S3, estuviera en la posición de encendido.
- Se accionó el interruptor S2 encendiendo el tablero eléctrico del reactor.
- Se graduó el voltaje en 12, 16, 20 y 24 V respectivamente.
- Se accionó el interruptor S5 encendiendo la bomba de acetato de etilo. Al mismo tiempo se activó el cronometro para medir el tiempo.
- Se tomó una alícuota de 1 litro y se determinó el tiempo transcurrido.
- Se calculó el flujo volumétrico de la bomba centrífuga a cada voltaje.
- Se repitieron tres veces los pasos 1 a 13.

3.5.3.2. Calibración de bomba de corriente alterna

- Se tomaron 10 litros de agua desmineralizada.
- Se colocó el agua desmineralizada en el tanque de almacenamiento.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía de 120 V.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía de 240 V.
- Se verificó que los interruptores S4, S5, S6 estuvieran en la posición de apagado.
- Se verificó que el botón de paro de emergencia (S1) no estuviera accionado.
- Se verificó que la válvula del sistema de bombeo de agua estuviera abierta.
- Se verificó que el interruptor S3, estuviera en la posición de encendido.
- Se accionó el interruptor S2 encendiendo el tablero eléctrico del reactor.
- Se configuró el nivel del calentador en la posición 0, 1, 2 o 3 respectivamente
- Se accionó el interruptor S6 encendiendo la bomba de agua. Al mismo tiempo se activó el cronometro para medir el tiempo.
- Se tomó una alícuota de 4 litros y se determinó el tiempo transcurrido, también se midió la temperatura de salida del líquido.
- Se calculó el flujo volumétrico de la bomba centrifuga de agua a cada nivel del calentador.
- Se repitieron tres veces los pasos 1 a 13.

3.5.3.3. Técnica conductimétrica

Por otra parte, se realizarán los tratamientos de experimentación con el reactor construido.

- Se prepararon los reactivos y se colocaron en los tanques de almacenamiento de reactivos del reactor.
- Se calibraron las bombas centrífugas.
- Se verificó el funcionamiento de los termómetros y manómetros para el monitoreo.
- Se calibró un conductímetro.
- Se estableció el flujo volumétrico de los reactivos.
- Se estableció la temperatura de alimentación del fluido calentador en nivel 3 de calentador.
- Se encendieron las bombas centrífugas, se realizarán la reacción.
- Se sustrajeron una muestra de productos del tanque de almacenamiento de productos.
- Se determinaron las conductividades de las muestras.
- Con las conductividades se determinó la conversión experimental de los productos.
- Se repitió 4 veces los pasos 1 al 10 para cada nivel experimental.

3.5.3.4. Simulación por computadora

Para determinar datos a nivel teórico se realizó una simulación por computadora del reactor PFR, para ello se tomaron los datos de operación de las pruebas realizadas con el procedimiento de inciso 3.5.3.3. y utilizando el programa Polymath 5.1 se calculó la conversión teórica de la reacción. El valor de la conversión teórica se puede observar en la sección 3.5.1.2.2.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para la tabulación de la información obtenida de la fase de validación se crearon tablas para recolección de información:

Tabla XXX. **Recolección de información de pruebas conversión del reactor**

PRUEBA NO. DE 27																		
	Reactor												Enchaquetamiento					
	[AC] o (M)	[NaOH] o (M)	To (°C)	Po (PS l)	Tf (°C)	Pf (PS l)	K (uS/c m)	K∞ (uS/c m)	V NaO H	V A C	V NaO H (L/mi n)	V AC (L/mi n)	Nivel Heat er	To (°C)	Tf (°C)	V H ₂ O (L/mi n)	Po (PS l)	Pf (PS l)
R 1																		
R 2																		
R 3																		
R 4																		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Calibración de bomba de hidróxido de sodio**

Concentración hidróxido de sodio (mol/l):			
Voltaje (V)	Repetición	Flujo volumétrico (l/min)	Temperatura (°C)
12	1		
	2		
	3		
16	1		
	2		
	3		
20	1		
	2		
	3		
24	1		
	2		
	3		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Calibración de bomba de acetato de etilo**

Concentración acetato de etilo (mol/l):			
Voltaje (V)	Repetición	Flujo volumétrico (l/min)	Temperatura (°C)
12	1		
	2		
	3		
16	1		
	2		
	3		
20	1		
	2		
	3		
24	1		
	2		
	3		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Calibración de bomba de agua**

Sistema de bombeo de agua			
Nivel de calentador	Repetición	Temperatura (°C)	Flujo Volumétrico (l/min)
0	1		
	2		
	3		
1	1		
	2		
	3		
2	1		
	2		
	3		
3	1		
	2		
	3		

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para el ordenamiento de la información se separaron los resultados de acuerdo con el número de pruebas realizadas.

Tabla XXXIV. **Ordenamiento de pruebas**

Concentración de reactivos (mol/l):		
Nivel de temperatura de calentador eléctrico	Repetición	Tratamiento
P1	1	1
	2	2
	3	3
	4	4
P2	1	5
	2	6
	3	7
	4	8
P3	1	9
	2	10
	3	11
	4	12

Fuente: elaboración propia.

Cada en cada prueba se tabularon los datos siguiendo el formato establecido en la tabla XXVI. Después se tomaron los datos y de acuerdo con el procedimiento establecido en el inciso 3.5.3.3. se calculó la conversión experimental de la reacción.

4. RESULTADOS

4.1. Diseño del reactor

En esta sección se presentan los planos y codificación del reactor PFR, previo a fase de construcción.

Tabla XXXV. **Codificación de componentes del reactor**

Código	Descripción
S1	Botón de paro de emergencia (pulsador con enclavamiento)
S2	Interruptor 15 A, 600 V, simbología ON, OFF, de encendido general
S3	Interruptor 15 A, 600 V de sistema de enfriamiento
S4	Interruptor 10 A de bomba 1
S5	Interruptor 10 A de bomba 2
S6	Interruptor 10 A de bomba 3
POT1	Perilla de potenciómetro ajustable de 20 kohmio de bomba 1
POT2	Perilla de potenciómetro ajustable de 20 kohmio de bomba 2
Pr1	Voltímetro digital 0-40 V DC de bomba 1
Pr2	Voltímetro digital 0-40 V DC de bomba 2
Pr3	Voltímetro análogo 0-400 V AC de bomba 3
B1	Bomba 12-24 DC, 5-21.5 W
B2	Bomba 12-21 DC, 5-21.5 W
B3	Bomba 0.5 HP, 120 V AC
D1	Luz piloto 120 V AC de encendido general

Continuación de tabla XXXV.

Código	Descripción
D2	Luz piloto 240 V AC de calentador eléctrico
HT1	Calentador de agua de paso 120 V x 54 A, 11.8 kW
TB	Tablero eléctrico de control del reactor
FLOW1	Medidor de flujo de bomba 1
FLOW2	Medidor de flujo de bomba 2
FLOW3	Medidor de flujo de bomba 3
T1	Tanque de almacenamiento de reactivo 1
T2	Tanque de almacenamiento de reactivo 2
T3	Tanque de almacenamiento de agua de calentamiento
VALV1	Válvula de bola CPVC de bomba 1
VALV2	Válvula de bola CPVC de bomba 2
MAN1	Manómetro de flujo de ingreso del agua
MAN2	Manómetro de flujo de ingreso al reactor
MAN3	Manómetro de flujo de salida del agua
MAN4	Manómetro de flujo de salida del reactor
TEMP1	Termómetro de flujo de ingreso del agua
TEMP2	Termómetro de flujo de ingreso al reactor
TEMP3	Termómetro de flujo de salida del agua
TEMP4	Termómetro de flujo de salida del reactor
BAST1	Soporte frontal de los tanques de almacenamiento
BAST2	Soporte trasero de los tanques de almacenamiento
BAST3	Soporte de las bombas, estructura de hierro angular 1" y tubo de 1/2"
BAST4	Soporte del reactor, estructura de hierro angular de 1"
UNION1	Unión universal SS304 de 1/4" rosca NPT de ingreso de agua

Continuación de tabla XXXV.

Código	Descripción
UNION2	Unión universal SS304 de ¼" rosca NPT de ingreso al reactor
UNION3	Unión universal SS304 de ¼" rosca NPT de salida del reactor
UNION4	Unión universal PVC de 1" de tubería de succión de bomba 3
UNION5	Unión universal PVC de 1" de tubería de descarga de bomba 3
UNION6	Unión universal CPVC de ½" de salida del calentador HT1
UNION7	Unión universal CPVC de ½" de entrada al enchaquetamiento
UNION8	Unión universal CPVC de ½" de tubería de bomba 1
UNION9	Unión universal CPVC de ½" de tubería de bomba 2
BOT1	Botón de aumento de temperatura de calentador HT1
BOT2	Botón de reducción de temperatura de calentador HT2
TERM1	Terminal de manguera de 3/8" de bronce de salida de agua
TERM2	Terminal de manguera de ½" de bronce de salida del reactor
TUB1	Sección de tubería de ingreso de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 3 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 2 abrazaderas clamp de 1".
TUB2	Sección curva de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrulas clamp de ½".
TUB3	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".

Continuación de tabla XXXV.

Código	Descripción
TUB4	Sección curva de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB5	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB6	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB7	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB8	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB9	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".

Continuación tabla XXXV.

Código	Descripción
TUB10	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB11	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB12	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB13	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB14	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB15	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB16	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".

Continuación de tabla XXXV.

Código	Descripción
TUB17	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB18	Sección curva de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB19	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB20	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB21	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB22	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".

Continuación de tabla XXXV.

Código	Descripción
TUB23	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 Tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB24	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB25	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 Tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB26	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB27	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 Tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB28	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".

Continuación de tabla XXXV.

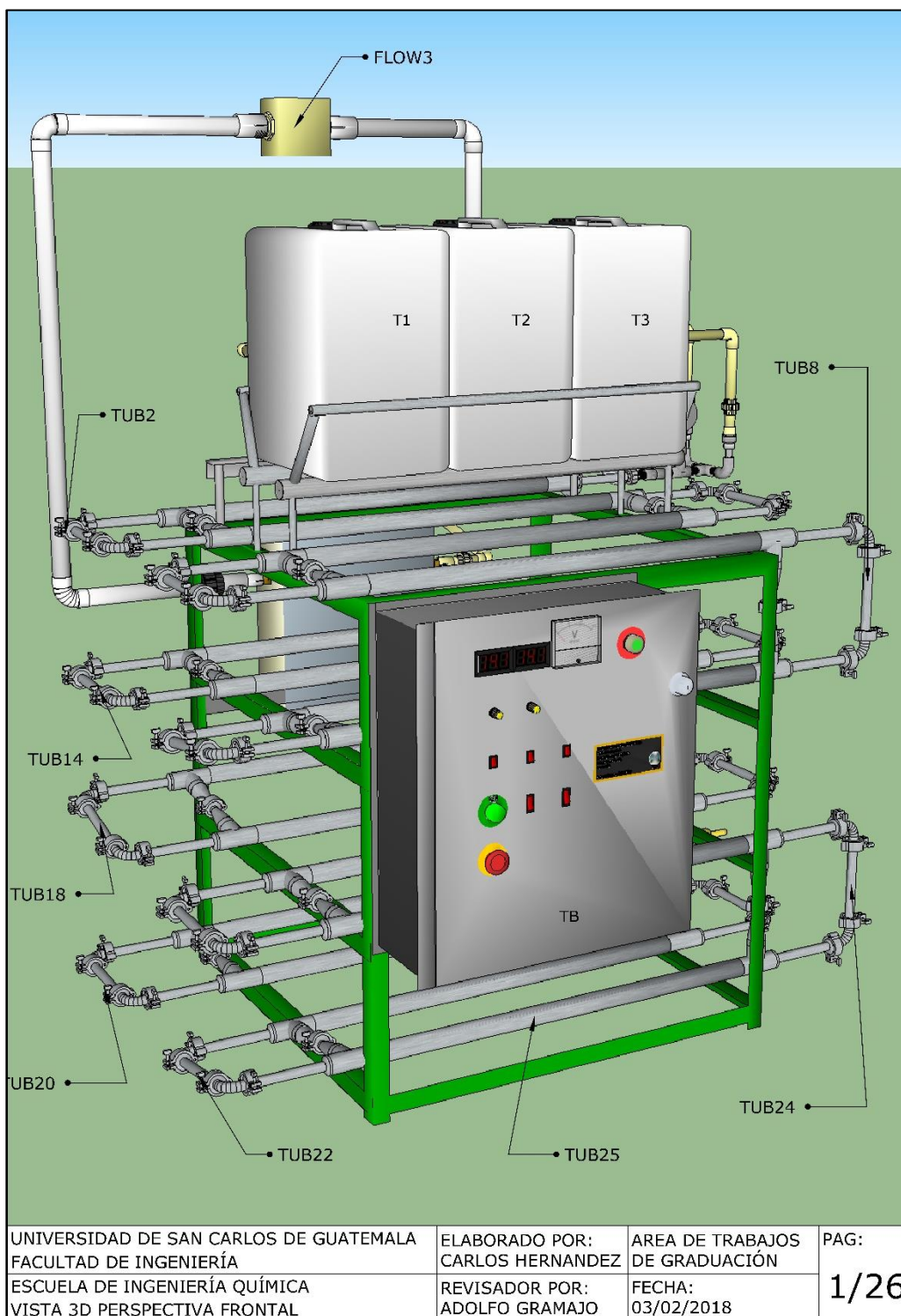
Código	Descripción
TUB29	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½" SS304, 2 tee soldables de 1" SS304, 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 3 abrazaderas clamp de 1".
TUB30	Sección de reactor, conformada por: 2 abrazaderas clamp de ½", tubo de ½" SS304 de 11,4 cm de longitud con 1 ferrula clamp de ½".
TUB31	Sección de tubería de agua y reactivos, conformada por: 2 reducidos concéntricos soldables de 1 a ½", 2 tee soldables de 1", 6 ferrulas clamp de ½" soldable, tubo de ½" por 90 cm de longitud, tubo de 1" de 57,32 cm longitud, 1 abrazaderas clamp de 1", y copla ¼" rosca NPT.
IN1	Sección de tubería de ingreso de agua al enchaquetamiento conformada por: 5 niples ¼ x 1" de longitud SS304 rosca NPT, 2 tee ¼" SS304 rosca NPT, 1 niple ¼ x 2 ½" de longitud SS304, 2 coplas de ¼" x 1" de longitud SS304, 1 reductor de campana de 1 a ½" SS304 rosca NPT.
IN2	Sección de tubería de ingreso de reactivos al reactor conformada por: 8 niples ¼ x 1" de longitud SS304 rosca NPT, 3 tee ¼" SS304 rosca NPT, 1 niple ¼ x 2 ½" de longitud SS304, 2 coplas de ¼" x 1" de longitud SS304, 2 reductor de campana de 1 a ½" SS304 rosca NPT, 2 codo 90° ¼" SS304 rosca NPT.

Continuación de tabla XXXV.

Código	Descripción
OUT1	Sección de tubería de salida de agua conformada por: 3 niples $\frac{1}{4}$ x 1" de longitud SS304 rosca NPT, 2 tee $\frac{1}{4}$ " SS304 rosca NPT, 1 niple $\frac{1}{4}$ x 2 $\frac{1}{2}$ " de longitud SS304, 2 coplas de $\frac{1}{4}$ " x 1" de longitud SS304, 1 reductor de campana de 1 a $\frac{1}{2}$ " SS304 rosca NPT.
OUT2	Sección de tubería de salida de reactivos, conformada por: 3 niples $\frac{1}{4}$ x 1" de longitud SS304 rosca NPT, 2 tee $\frac{1}{4}$ " SS304 rosca NPT, 1 niple $\frac{1}{4}$ x 2 $\frac{1}{2}$ " de longitud SS304, 2 coplas de $\frac{1}{4}$ " x 1" de longitud SS304, 1 reductor de campana de 1 a $\frac{1}{2}$ " SS304 rosca NPT.

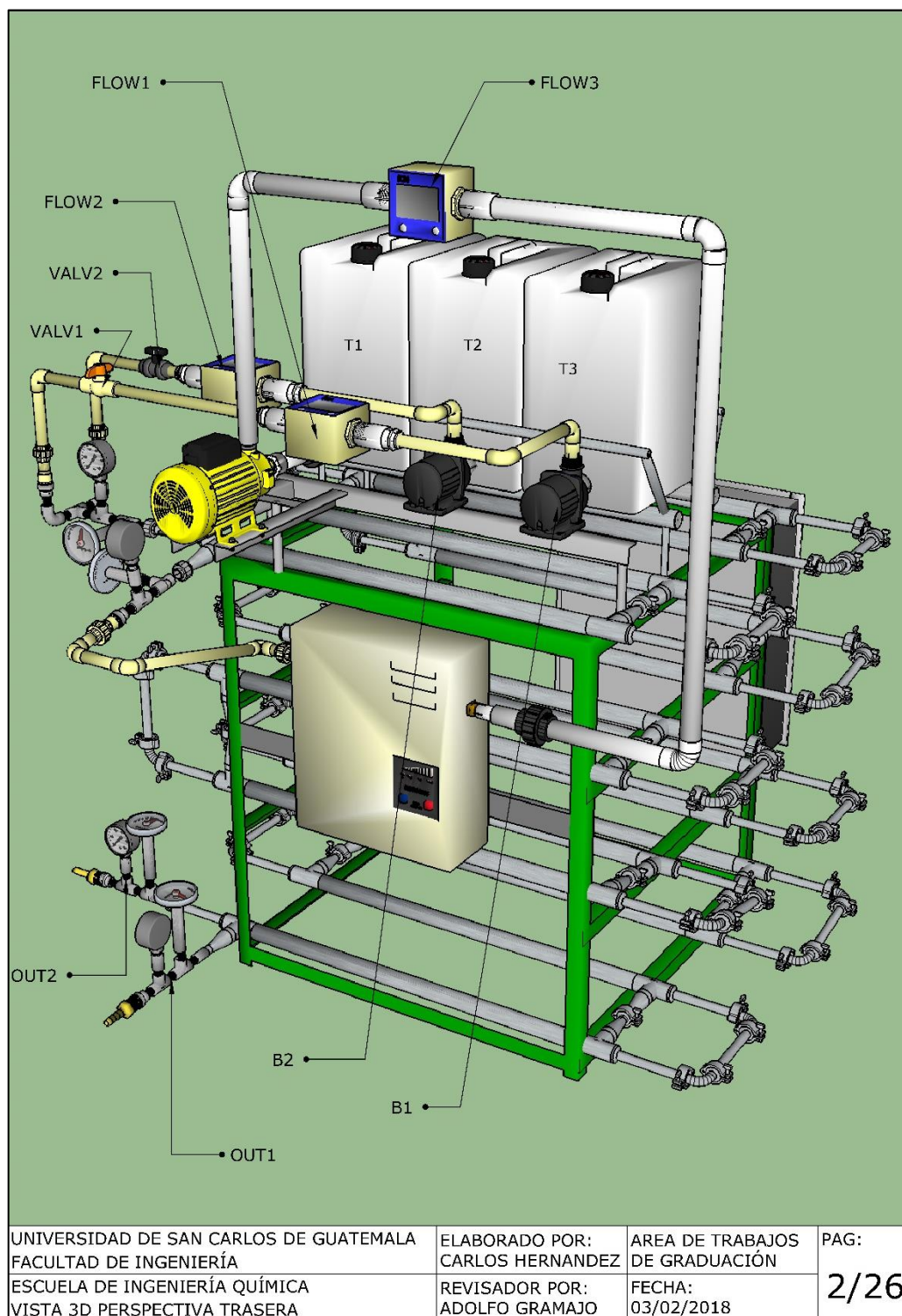
Fuente: elaboración propia.

Figura 59. Vista 3D perspectiva frontal



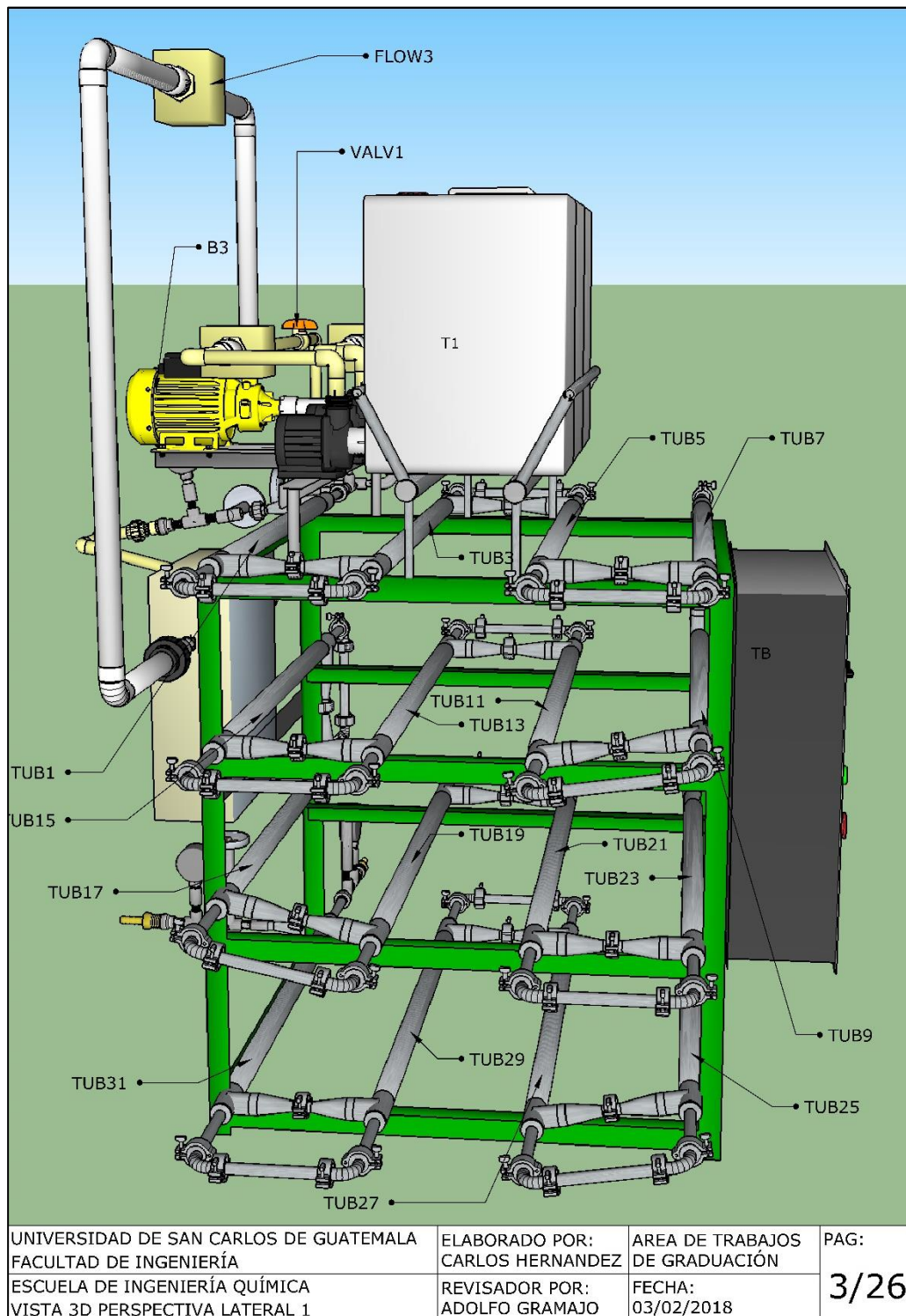
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 60. Vista 3D perspectiva trasera



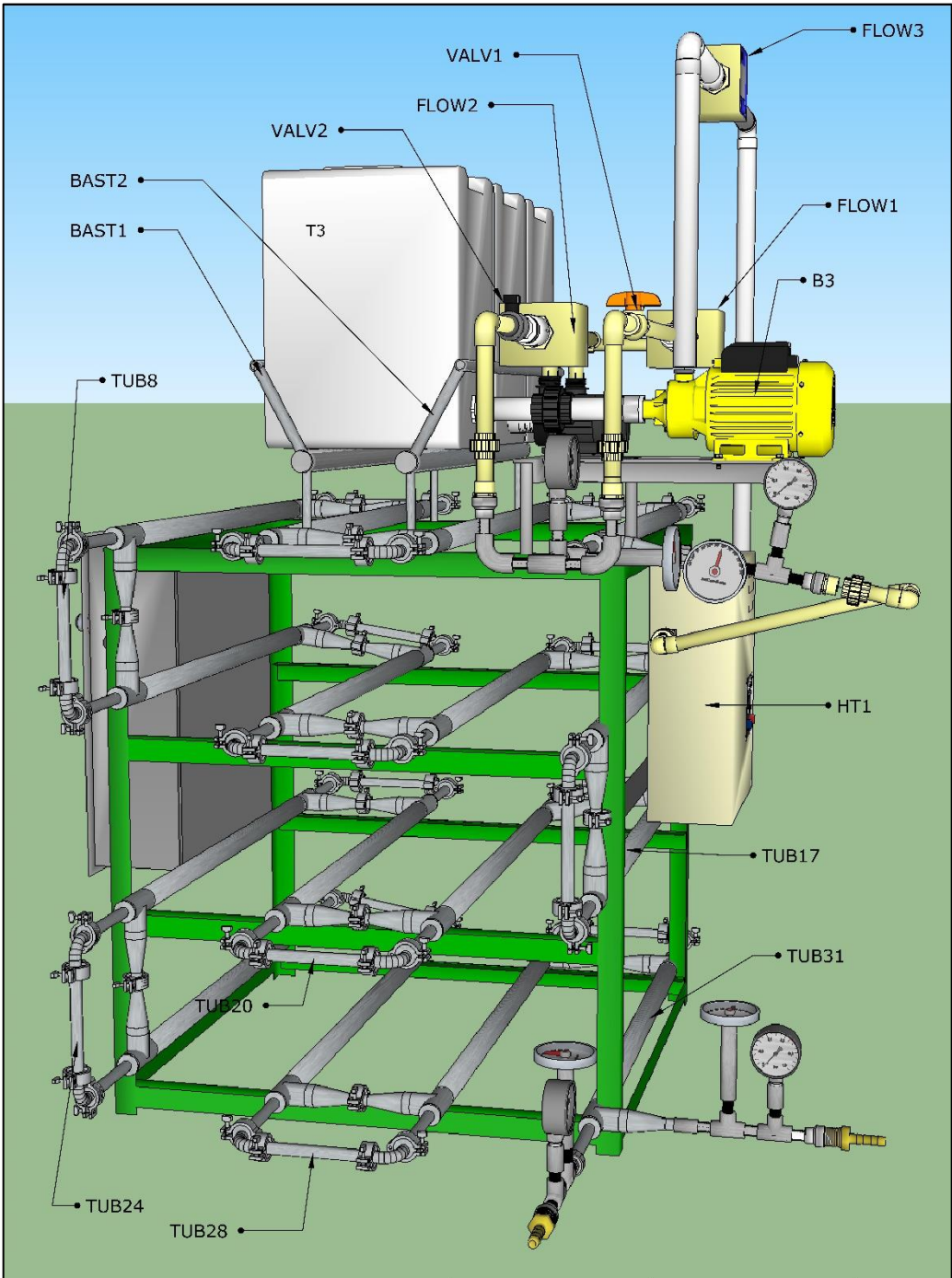
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 61. Vista 3D perspectiva lateral 1



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

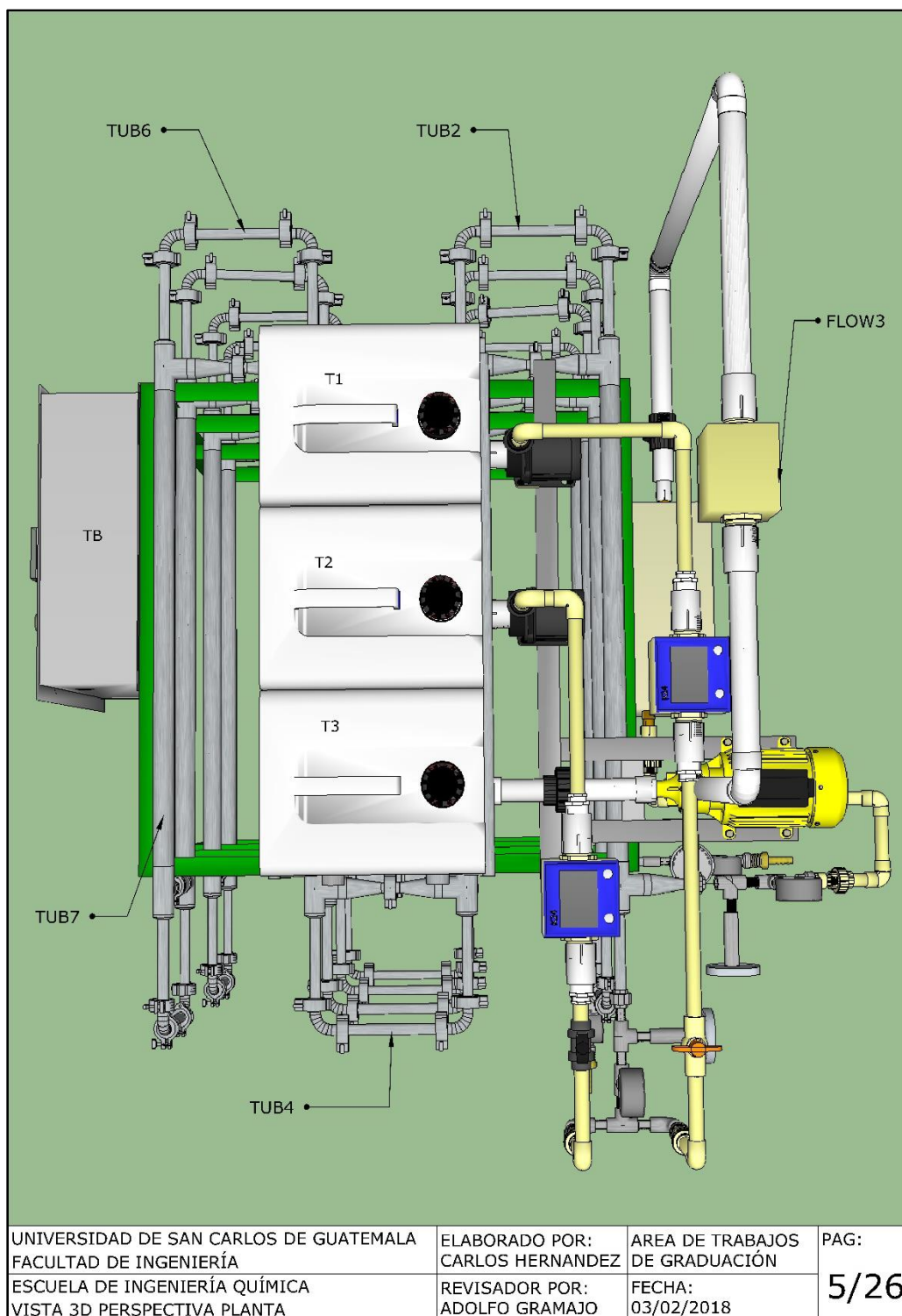
Figura 62. Vista 3D perspectiva lateral 2



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	ELABORADO POR:	AREA DE TRABAJOS	PAG: 4/26
FACULTAD DE INGENIERÍA	CARLOS HERNANDEZ	DE GRADUACIÓN	
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	REVISADOR POR:	FECHA:	
VISTA 3D PERSPECTIVA LATERAL 2	ADOLFO GRAMAJO	03/02/2018	

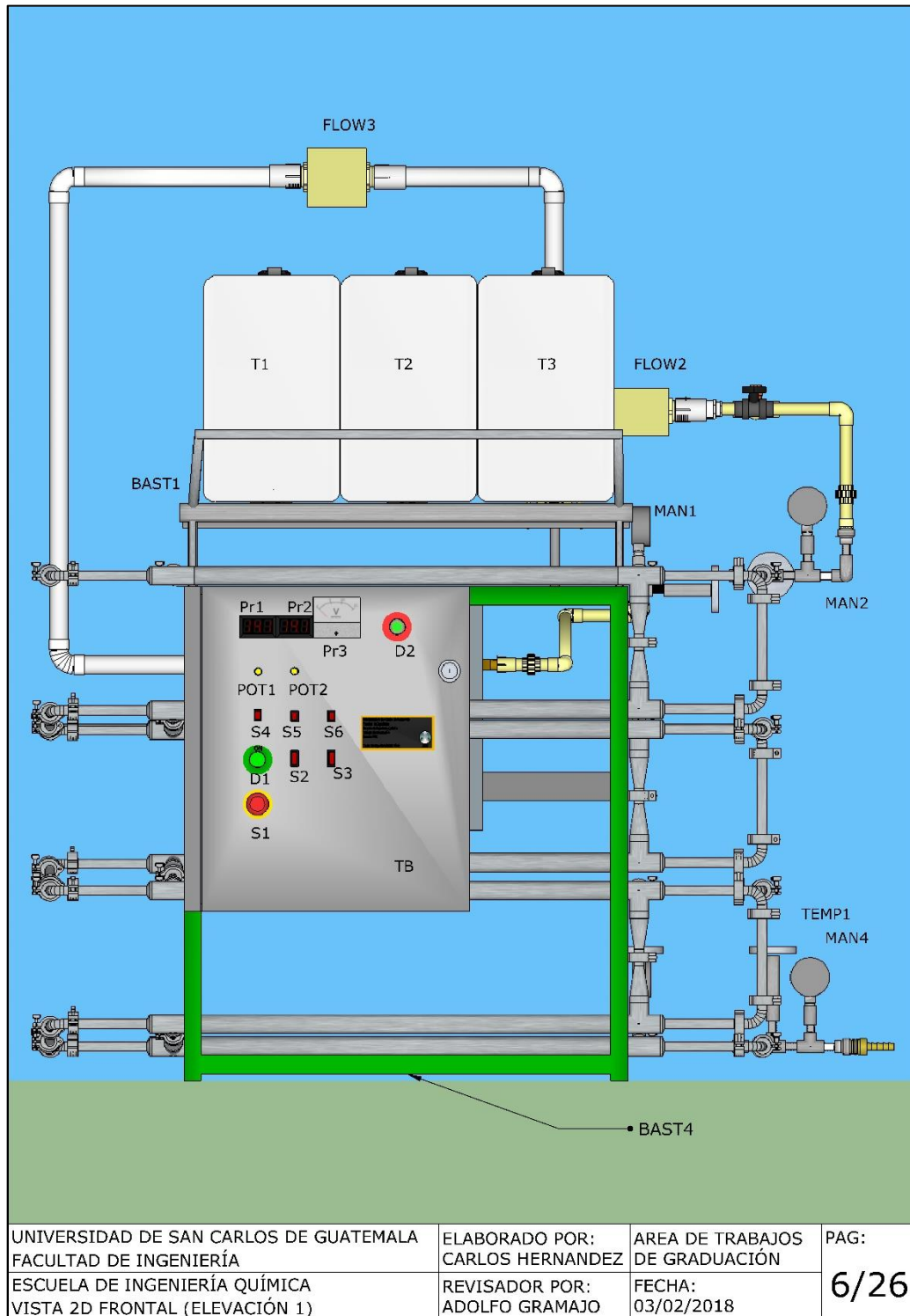
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 63. Vista 3D perspectiva planta



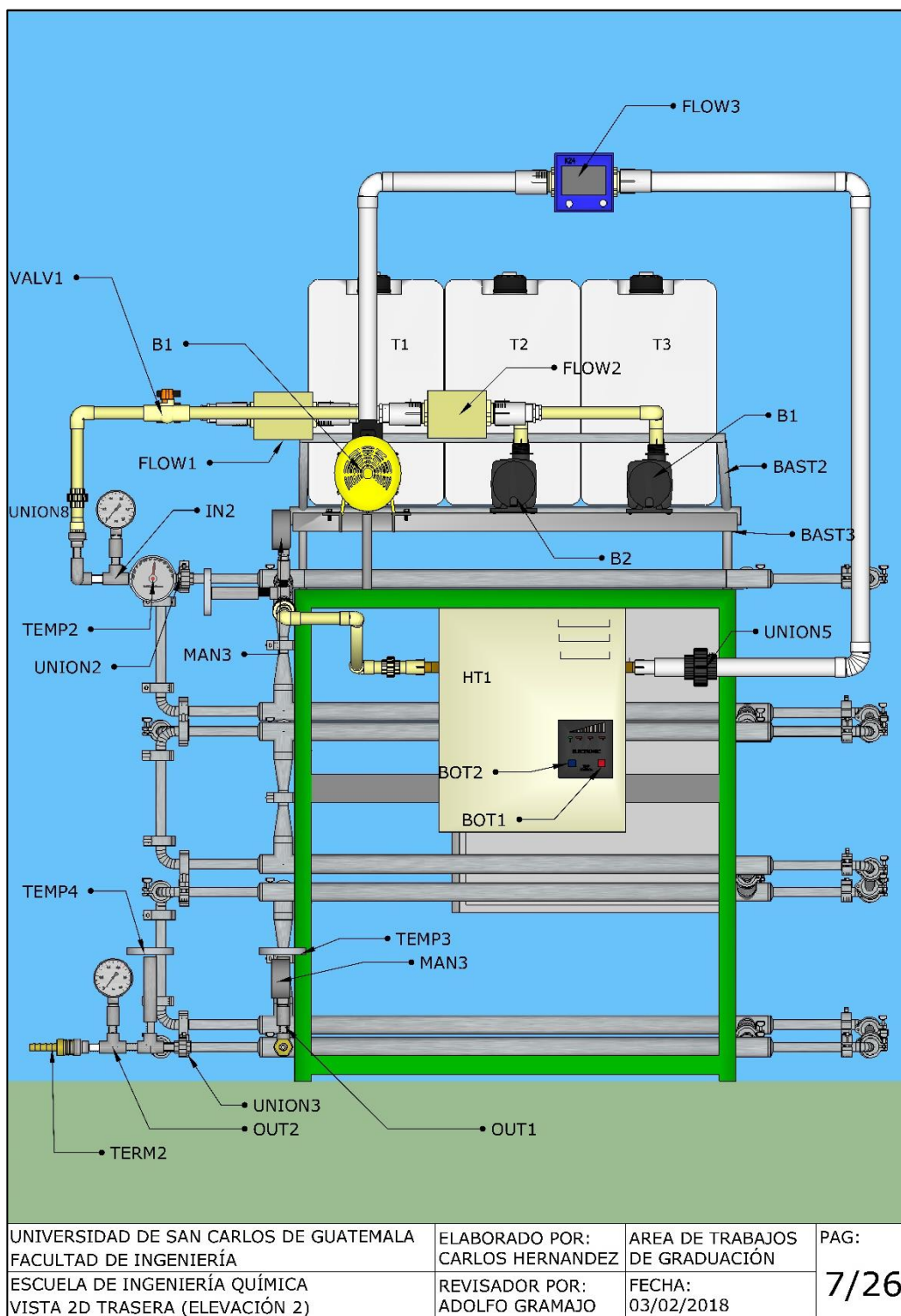
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 64. Vista 2D frontal (elevación 1)



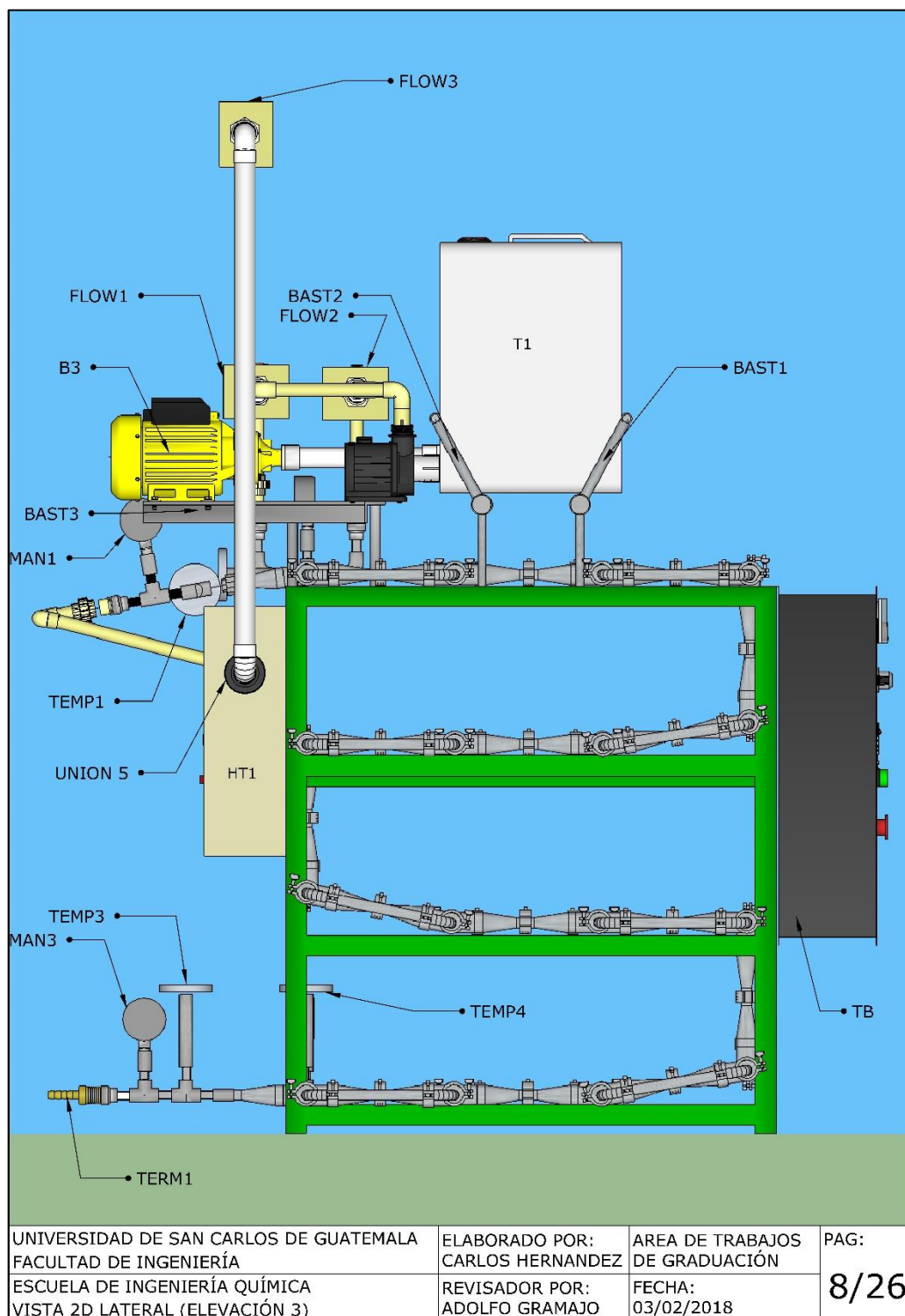
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 65. Vista 2D trasera (elevación 2)



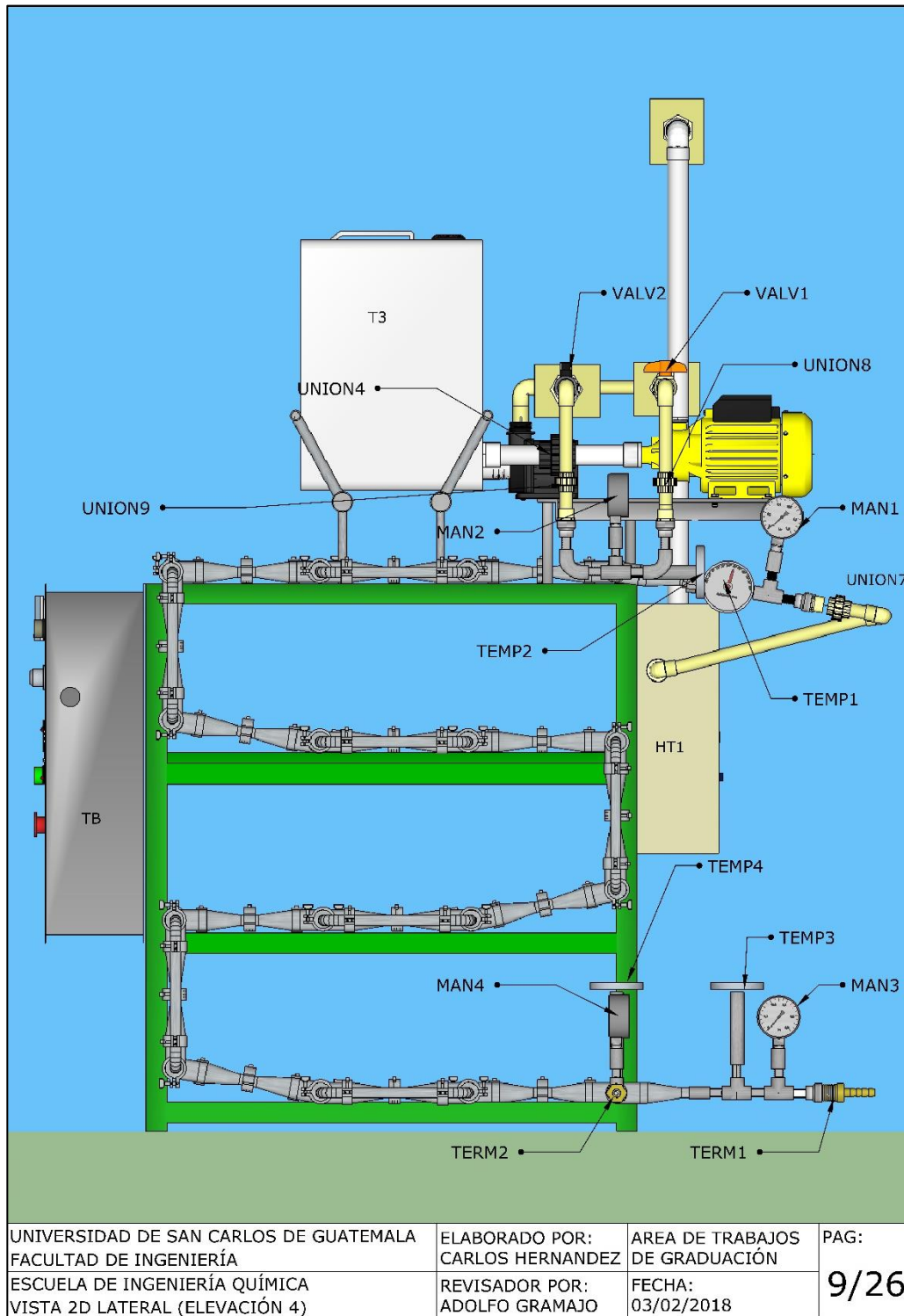
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 66. Vista 2D lateral (elevación 3)



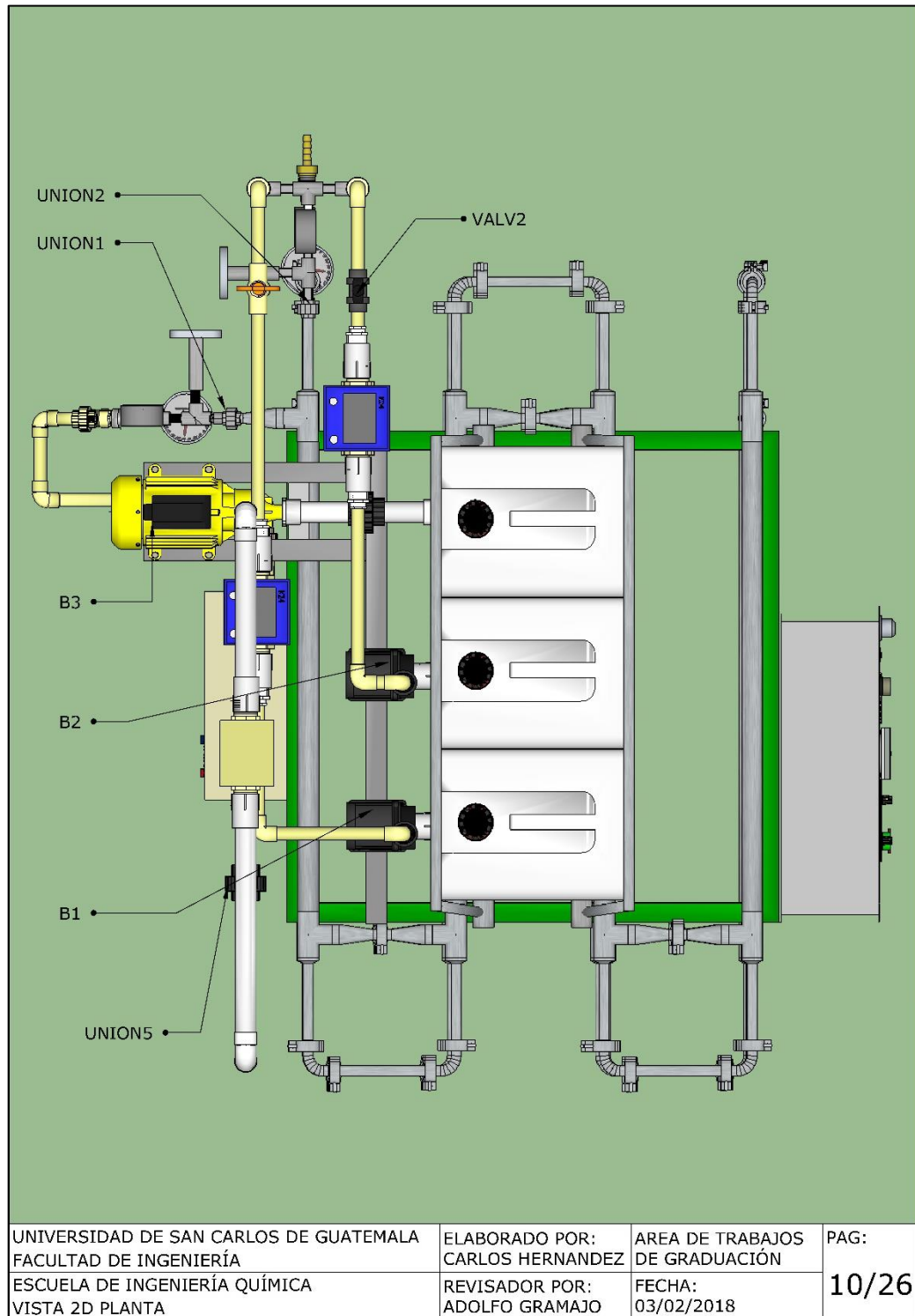
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 67. Vista 2D lateral (elevación 4)



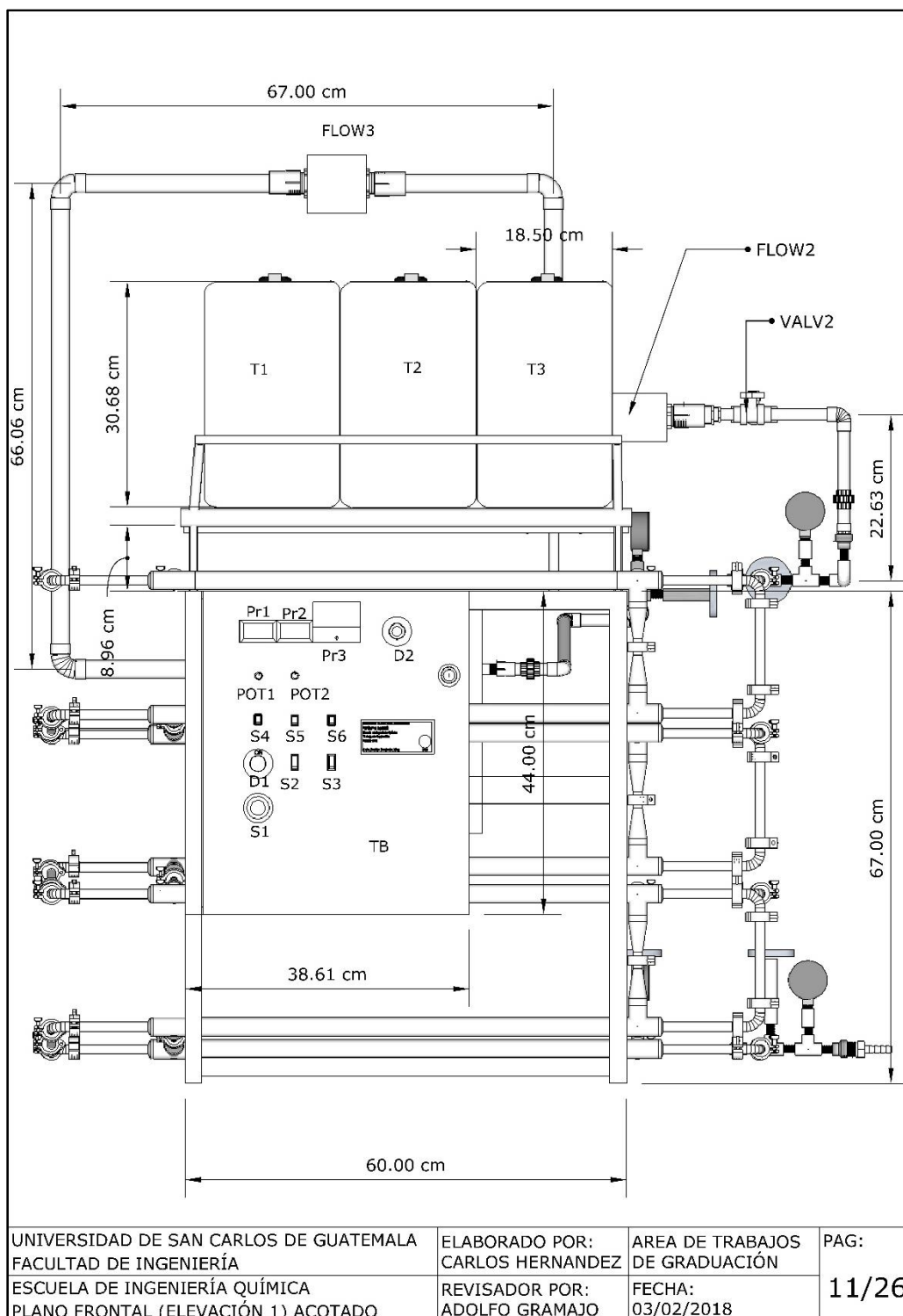
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 68. Vista 2D planta



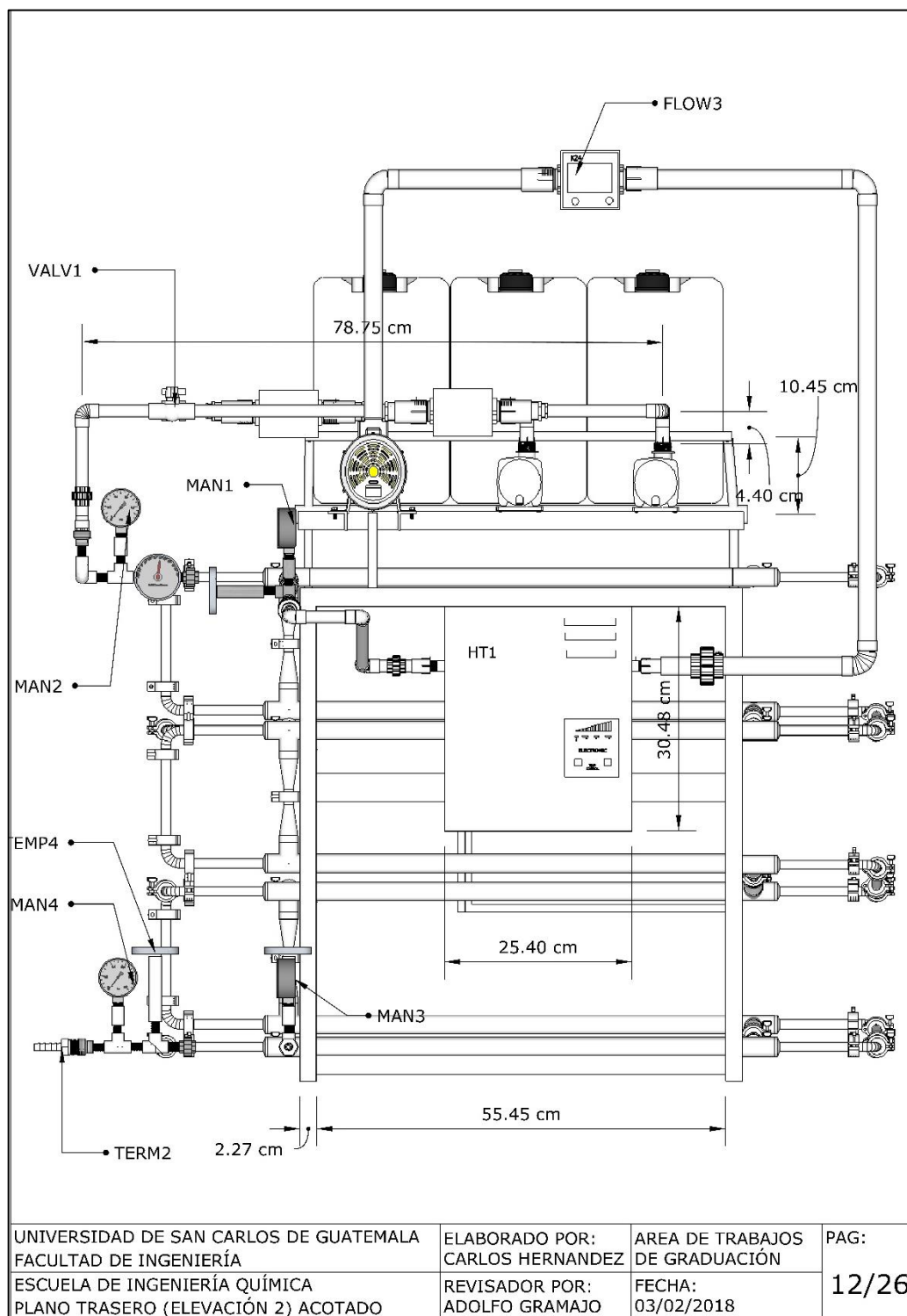
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 69. Plano frontal (elevación 1) acotado



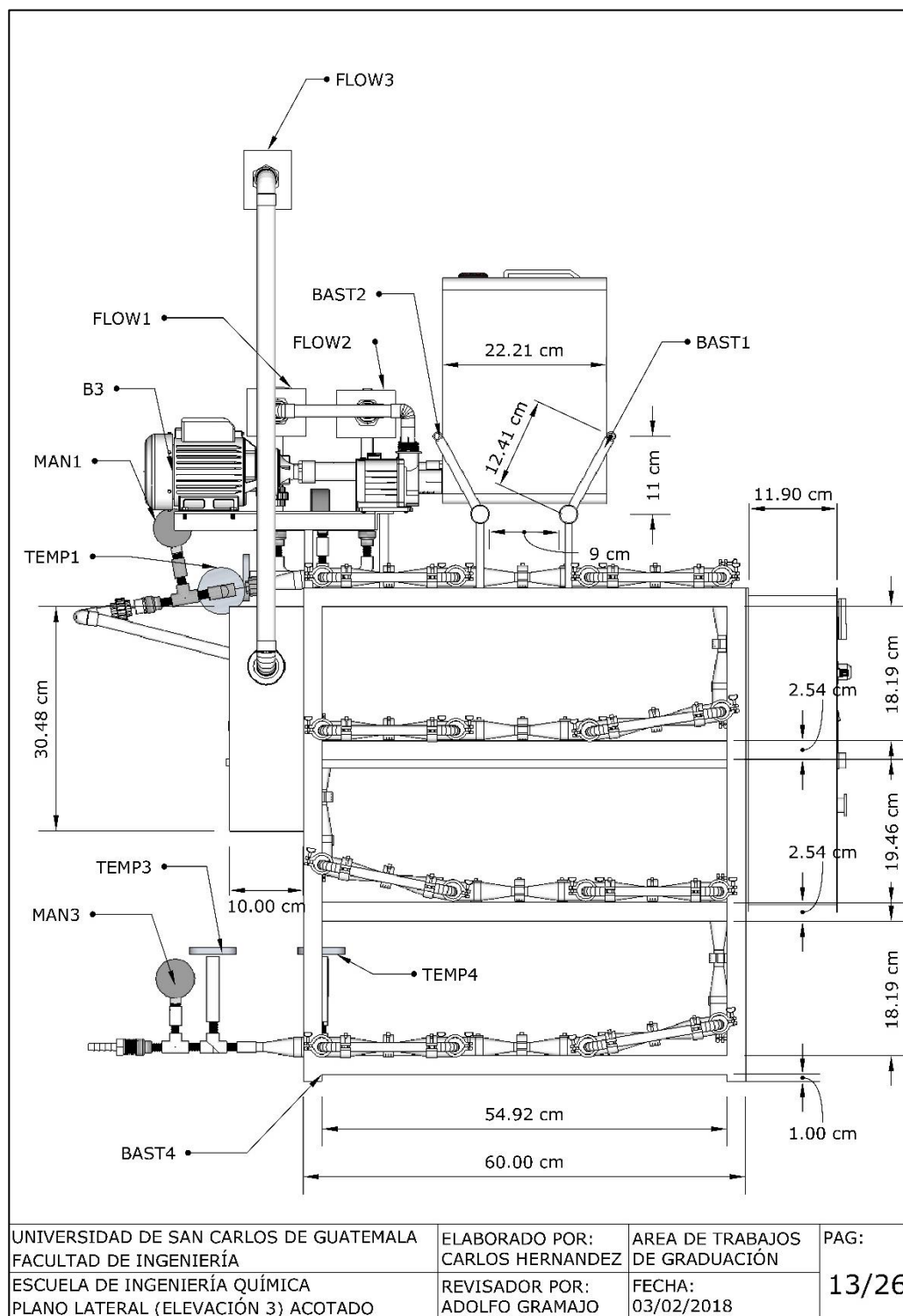
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 70. Plano trasero (elevación 2) acotado



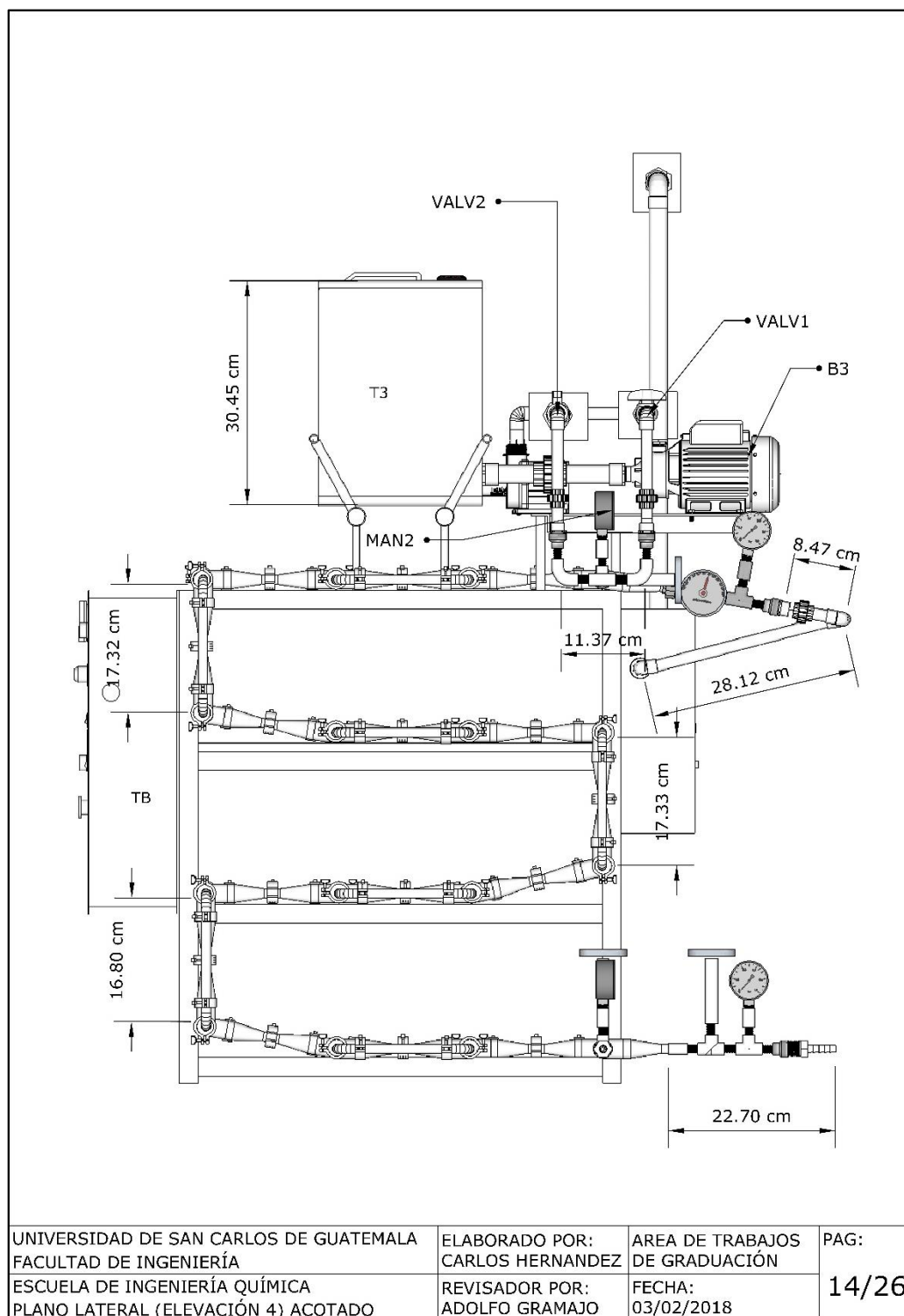
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 71. Plano lateral (elevación 3) acotado



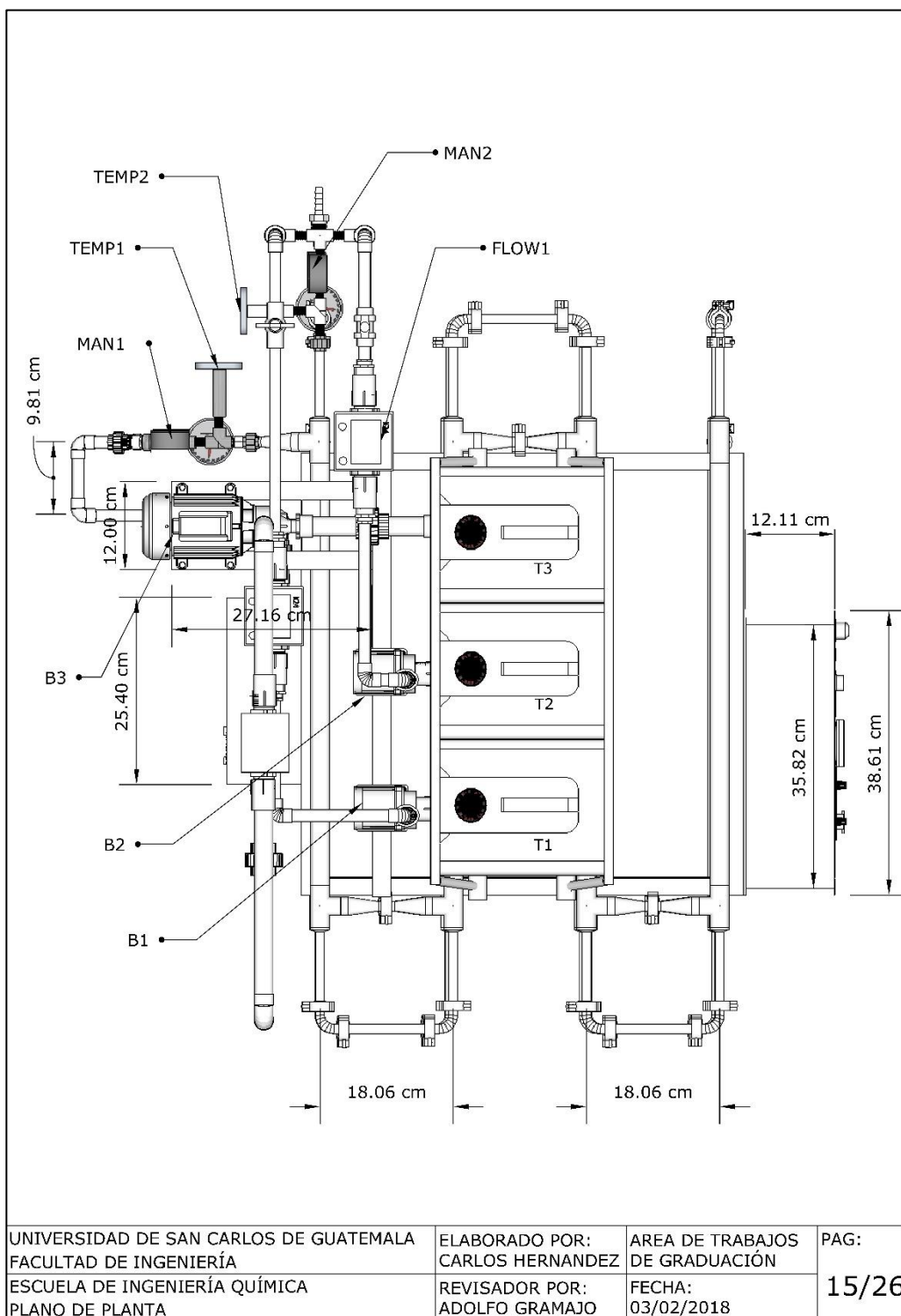
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 72. Plano lateral (elevación 4) acotado



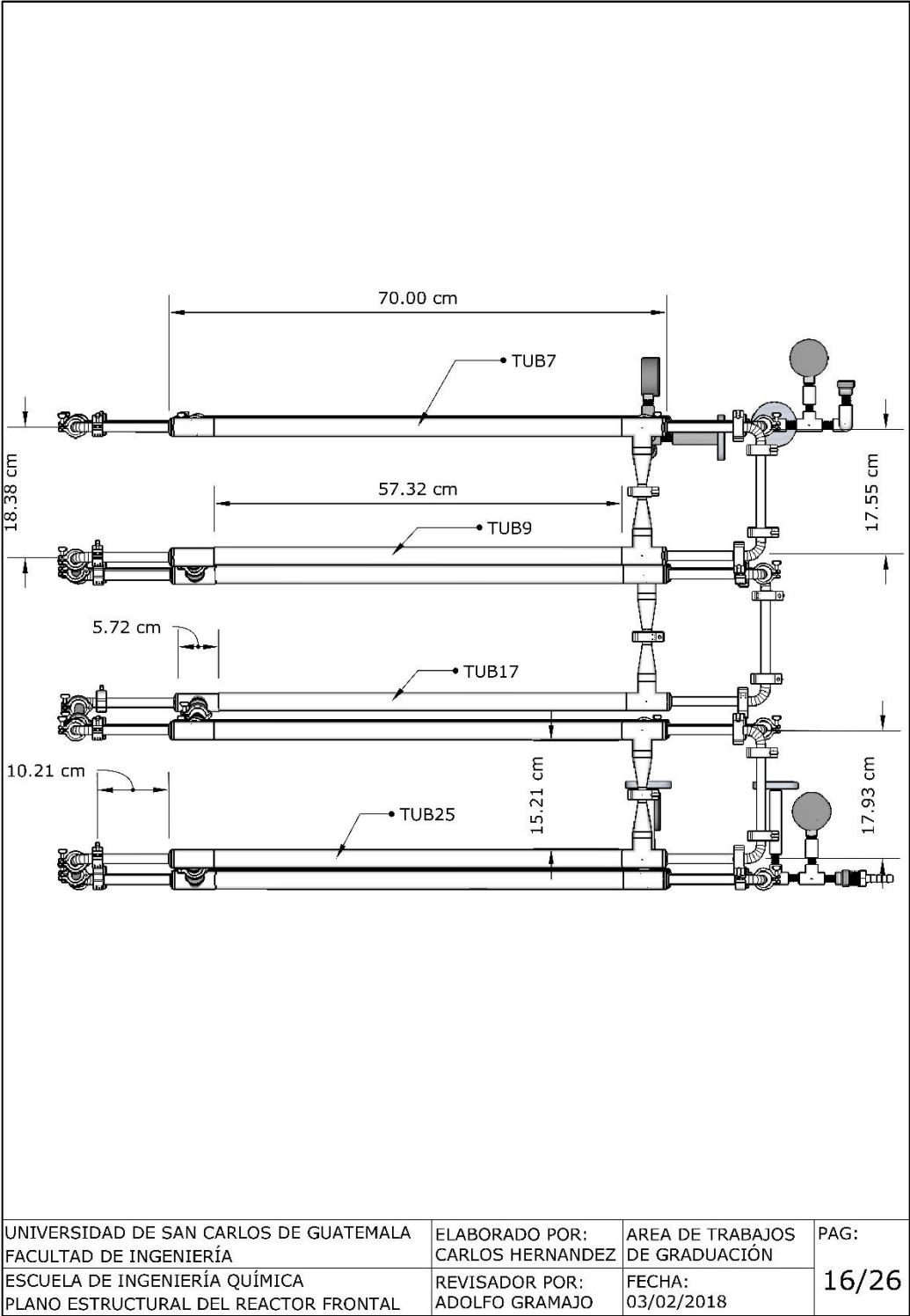
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 73. Plano de planta



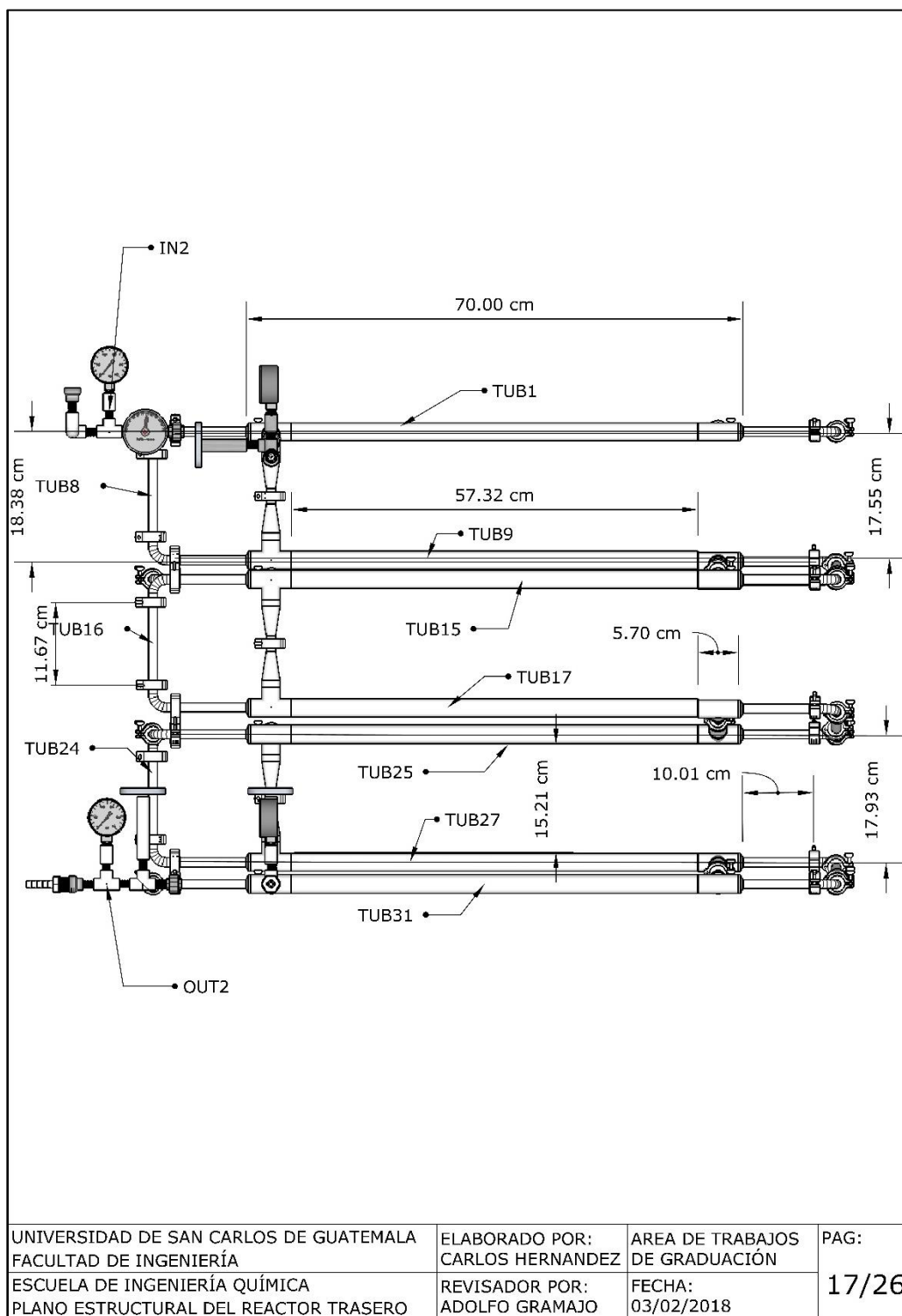
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 74. Plano estructural del reactor frontal



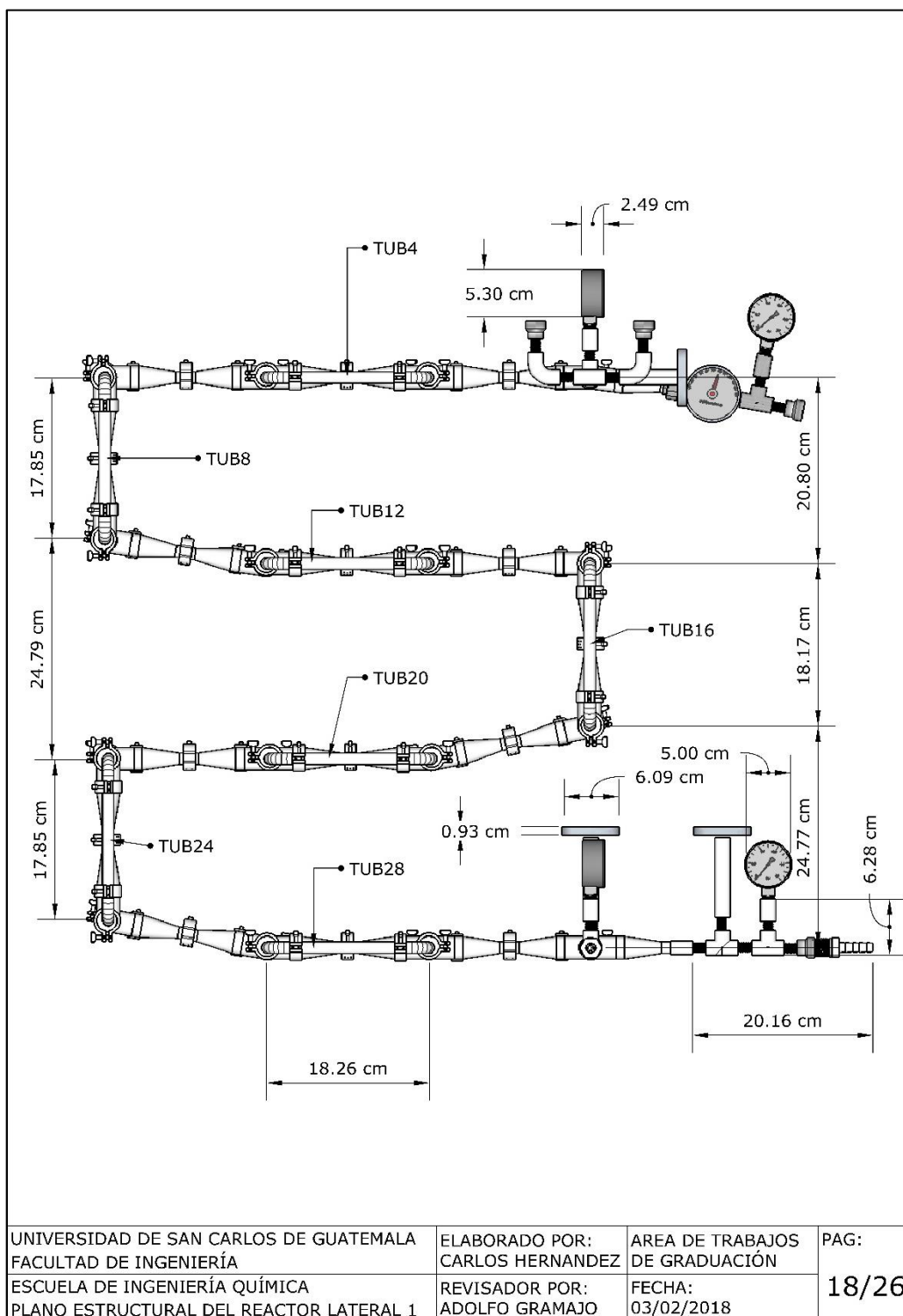
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 75. Plano estructural del reactor trasero



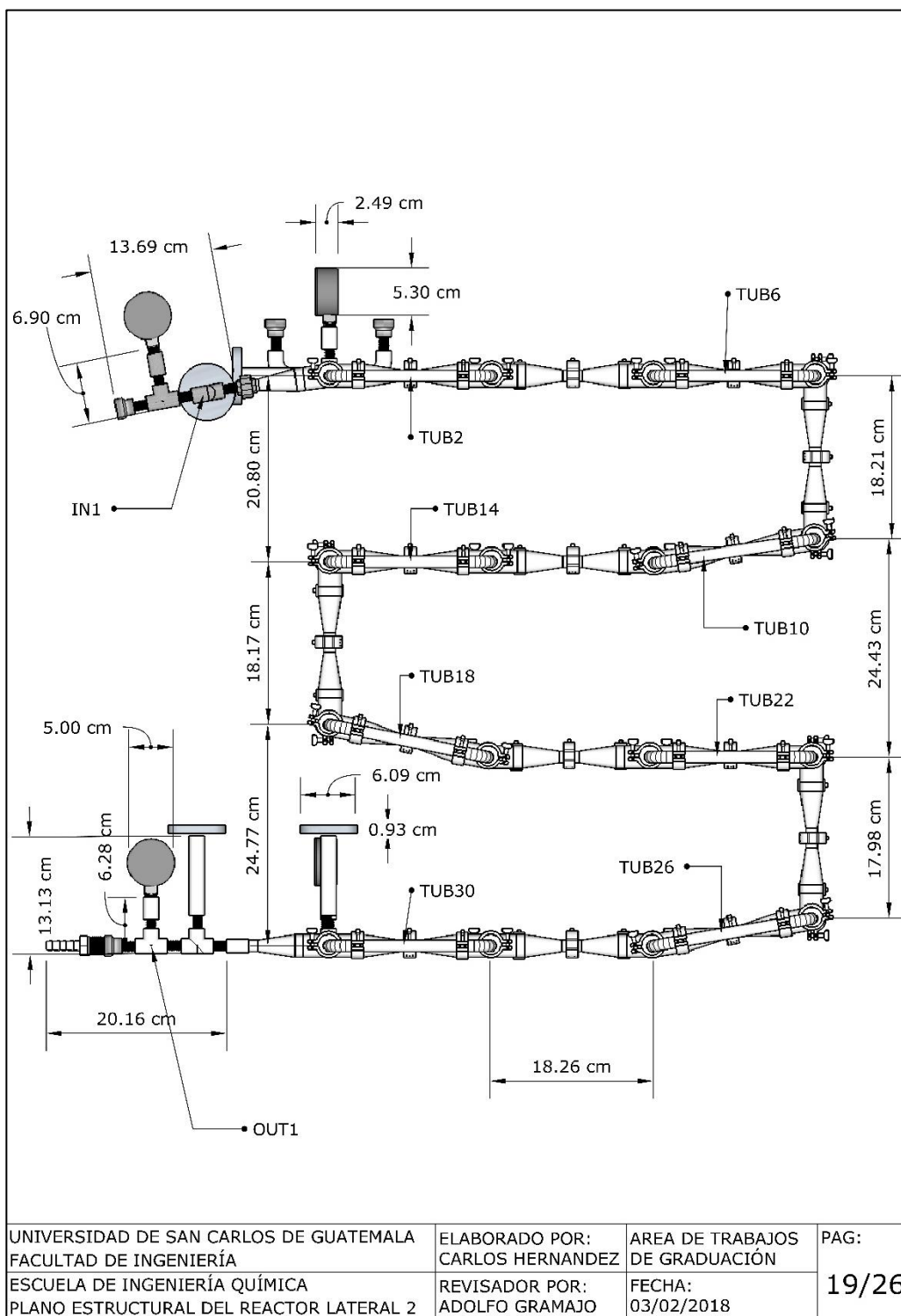
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 76. Plano estructural del reactor lateral 1



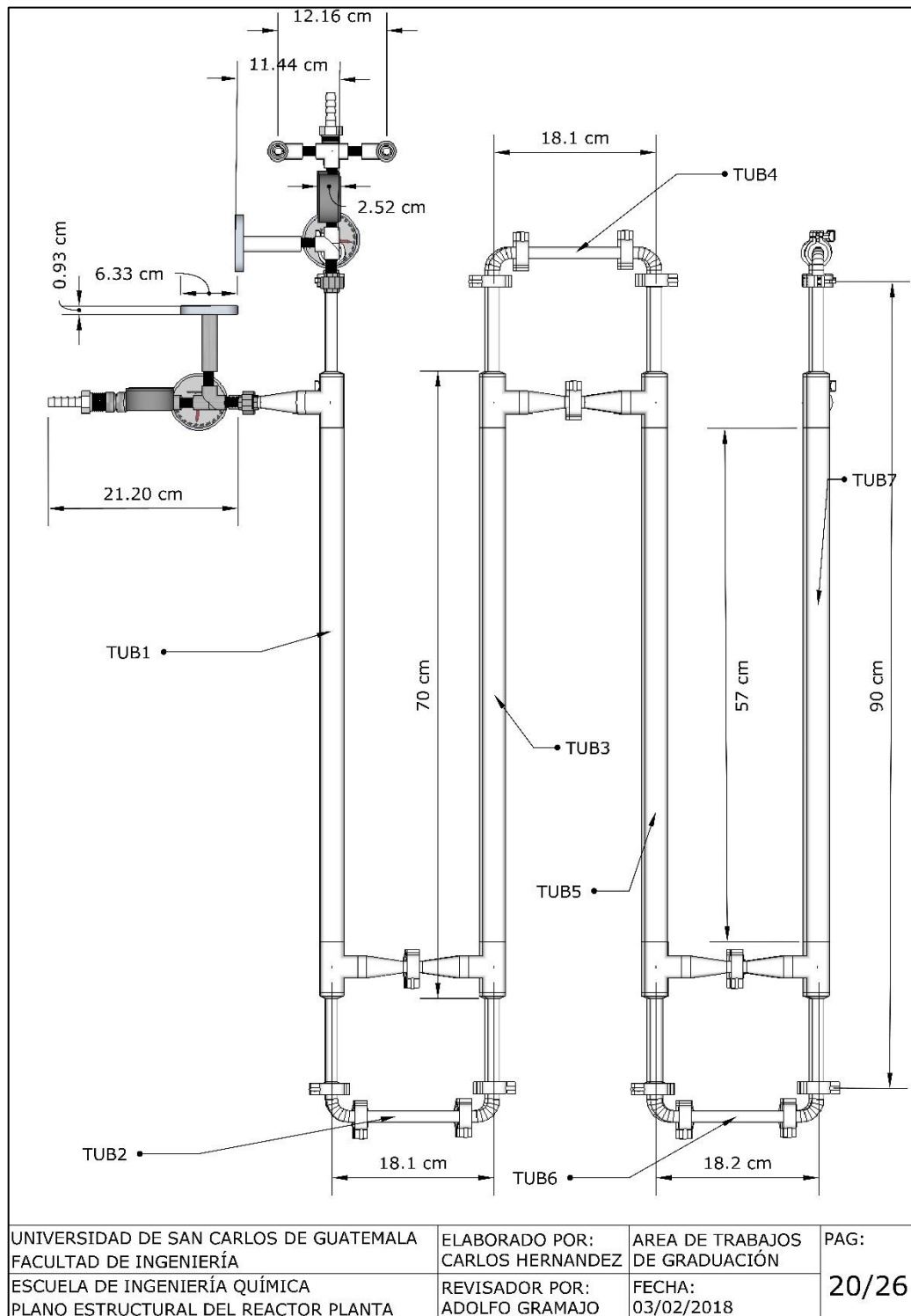
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 77. Plano estructural del reactor lateral 2



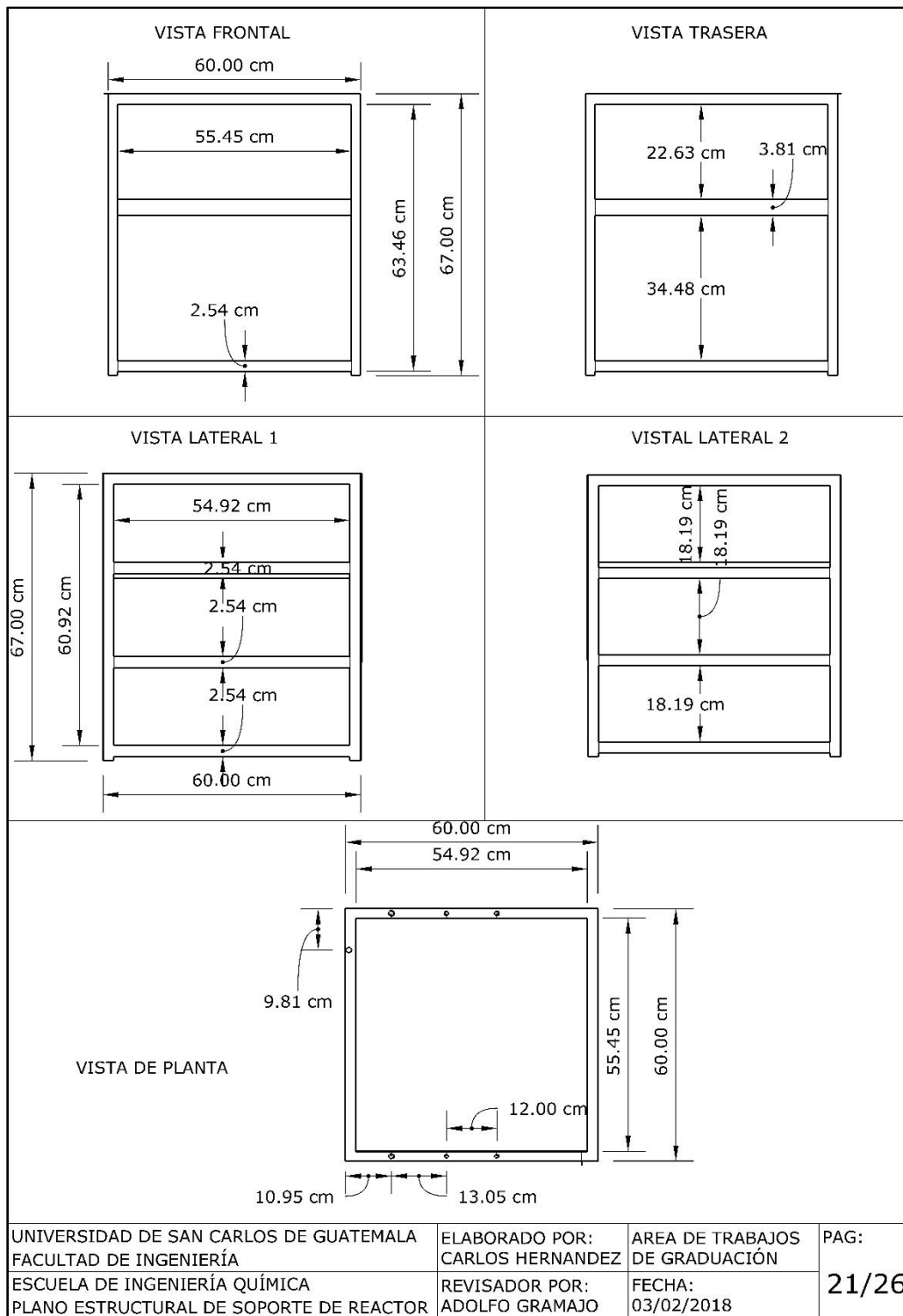
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 78. Plano estructural del reactor planta



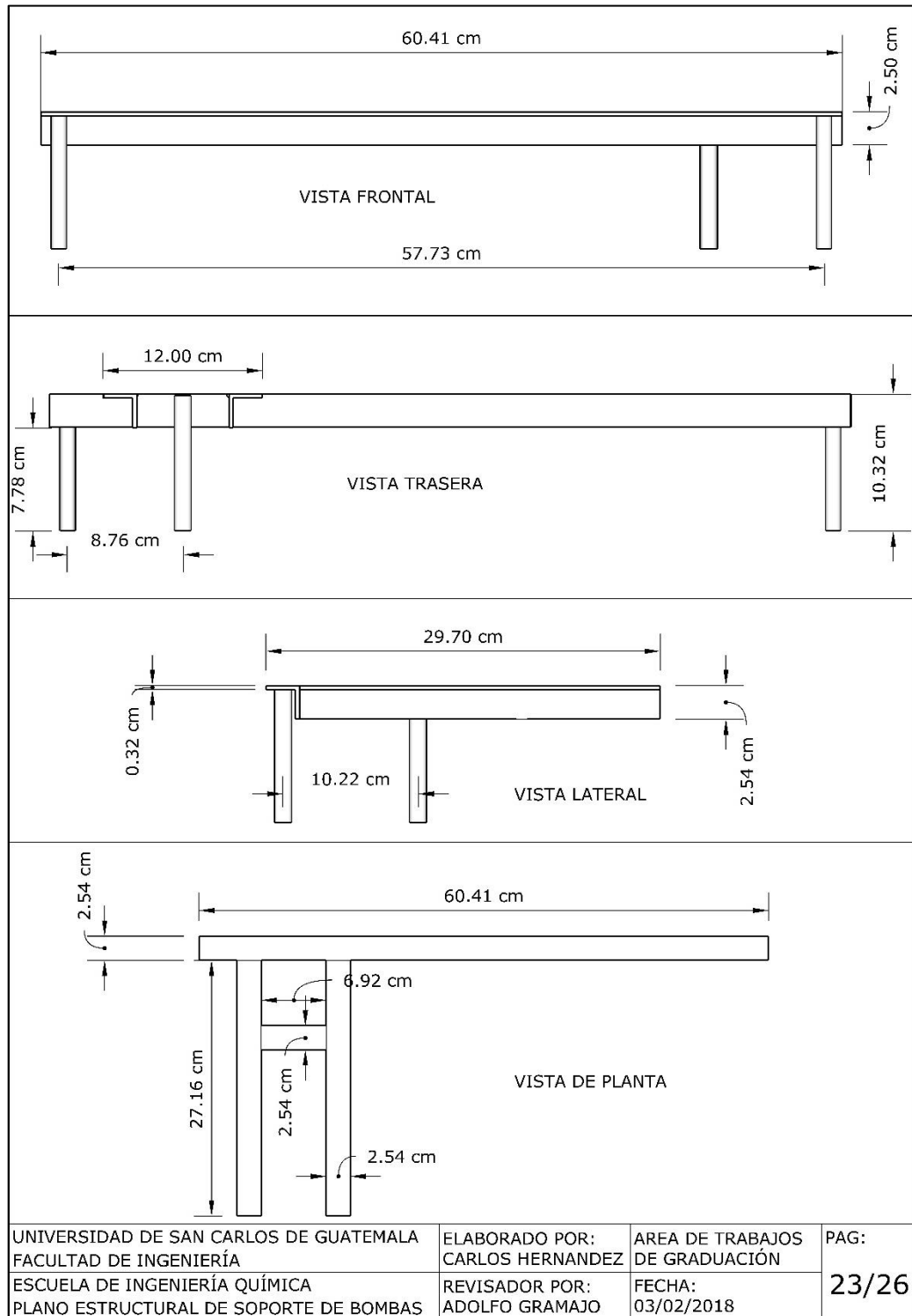
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 79. **Plano estructural de soporte del reactor**



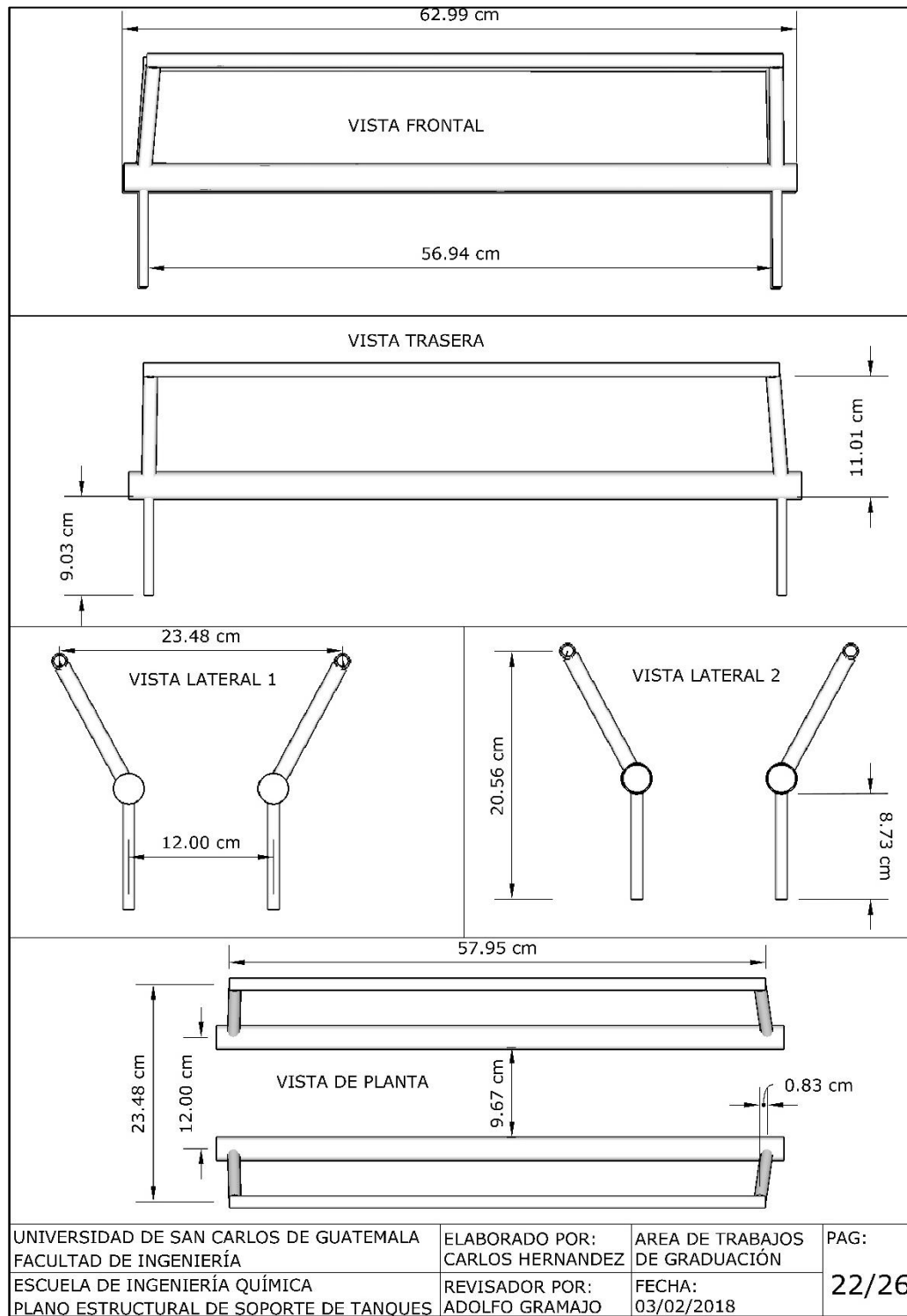
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 80. **Plano estructural de soporte de bombas**



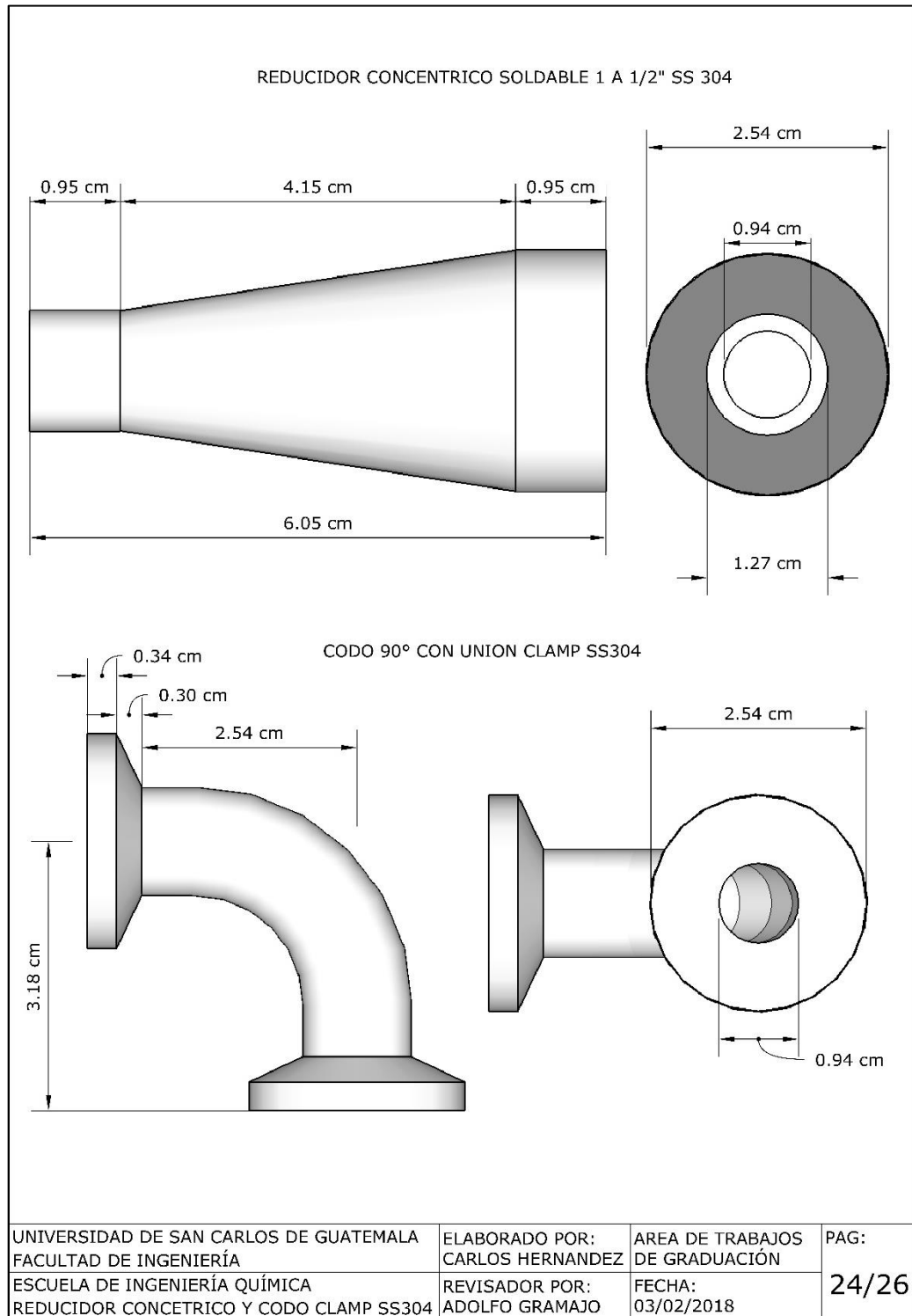
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 81. **Plano estructural de soporte de tanques**



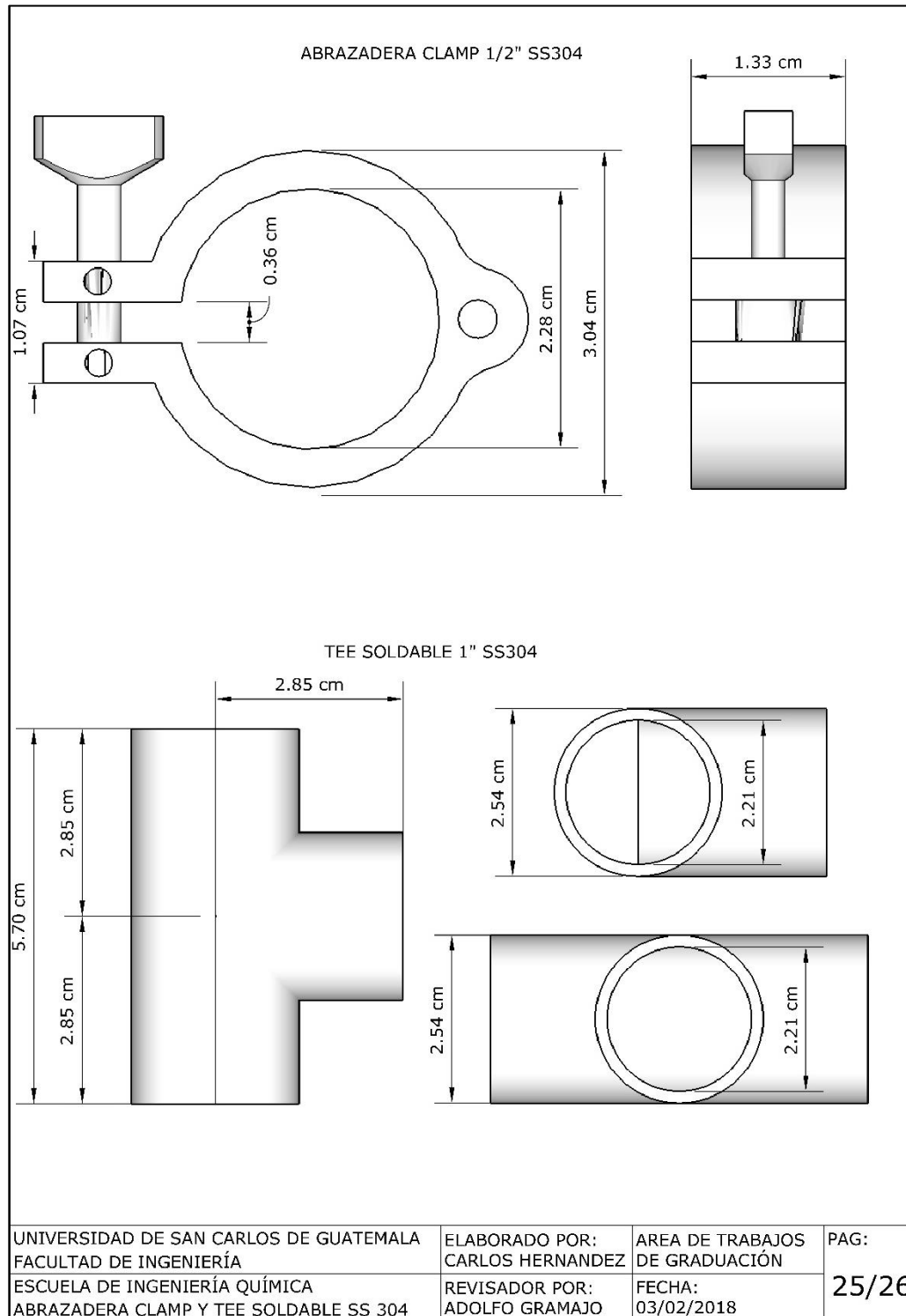
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 82. Reducidor concéntrico y codo clamp SS304



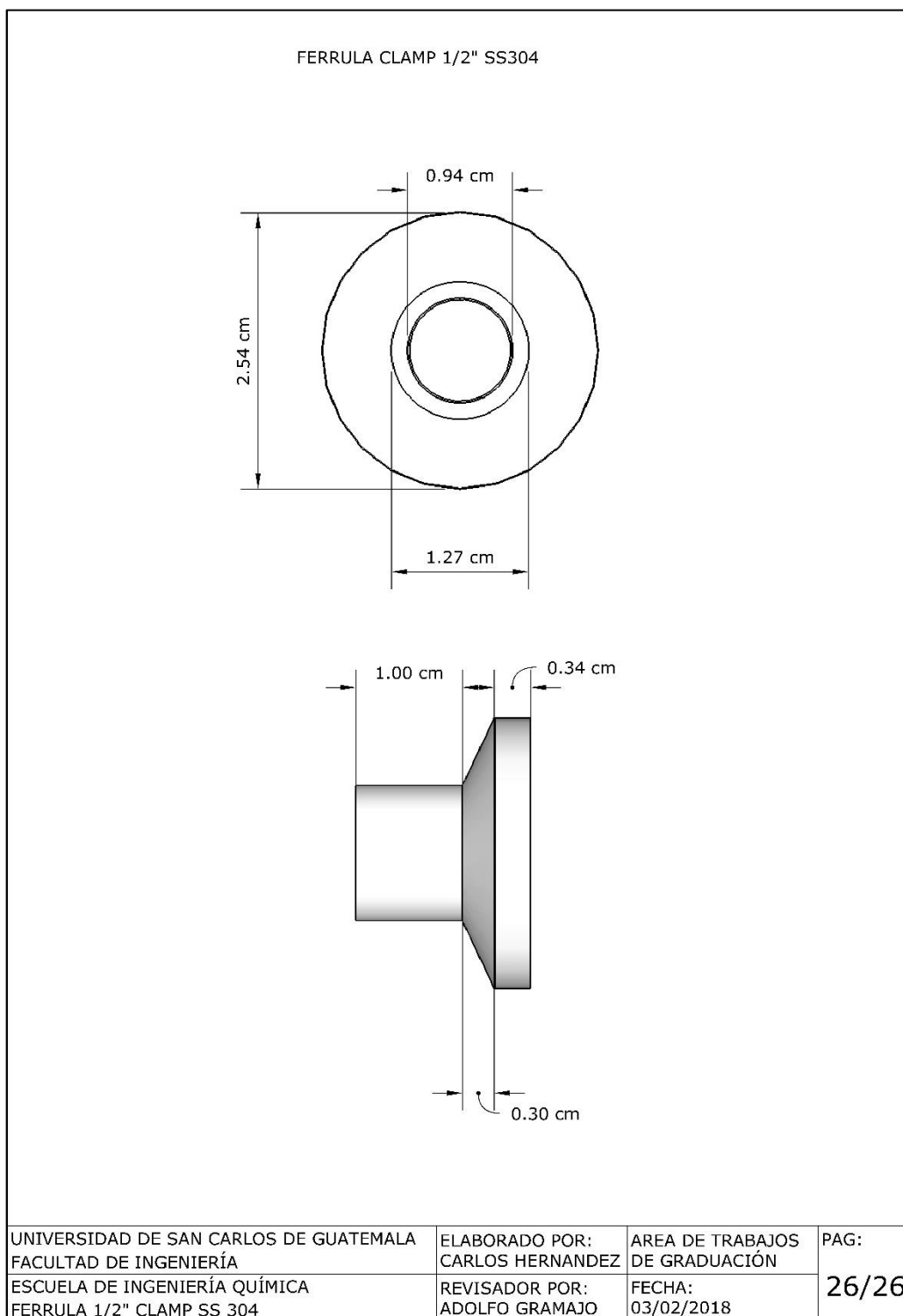
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 83. **Abrazadera clamp y tee soldable SS304**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

Figura 84. **Férrula clamp ½ pulg SS304**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

A continuación, se presenta la codificación de los componentes eléctricos y el plano eléctrico del reactor:

Tabla XXXVI. **Codificación de componentes eléctricos**

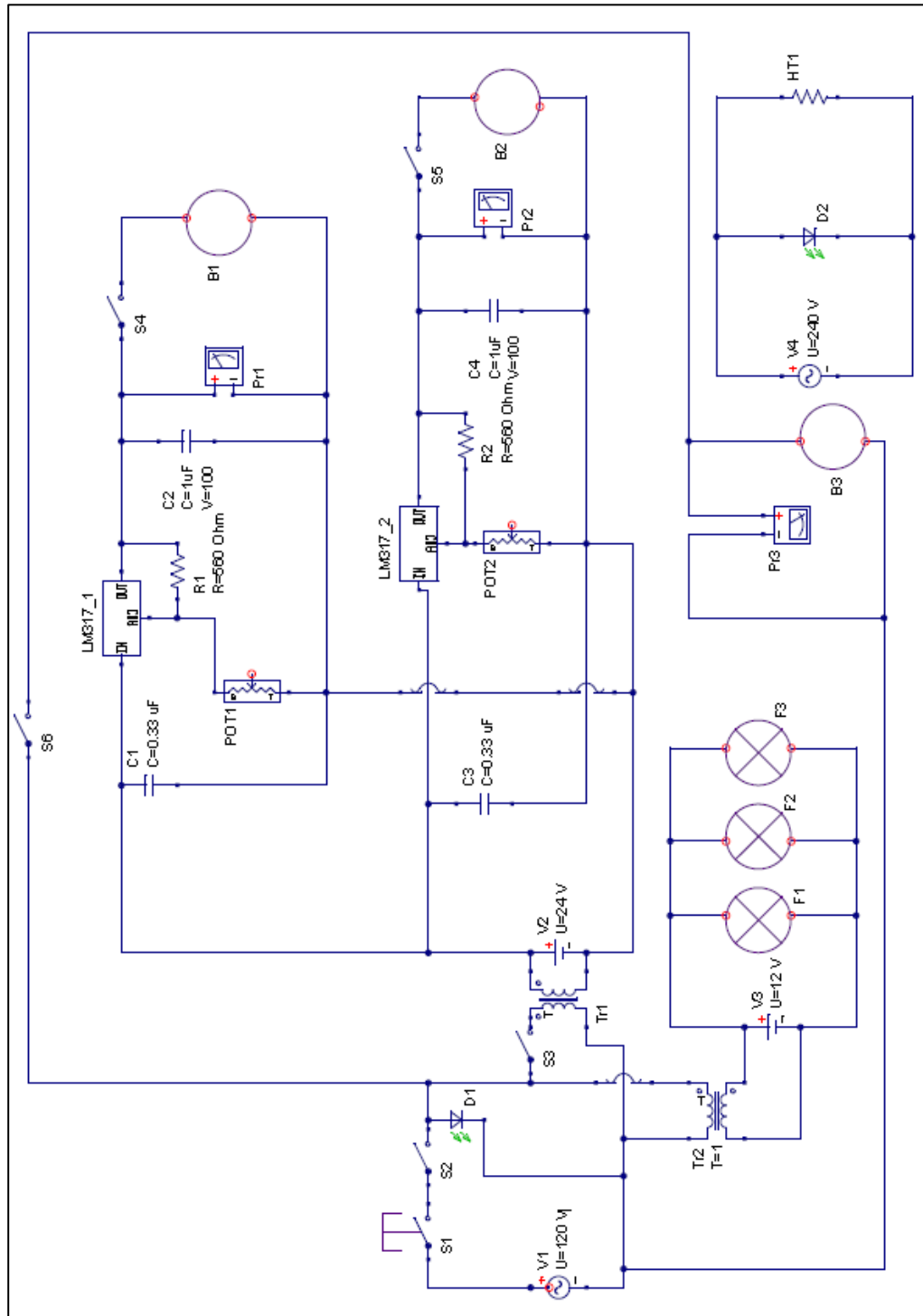
Código	Descripción
S1	Botón de paro de emergencia (pulsador con enclavamiento)
S2	Interruptor 15 A, 600 V, simbología ON, OFF
S3	Interruptor 15 A, 600 V
S4, S5, S6	Interruptor 10 A, 600 V
V1	Fuente de alimentación 120 V AC
V2	Fuente de alimentación 24 V DC
V3	Fuente de alimentación 12 V DC
V4	Fuente de alimentación 240 V AC
Tr1	Transformador 120 V AC – 24 V DC x 5 A acoplado a fuente de poder V2
Tr2	Transformador 120 V AC – 12 V DC, 500 W acoplado a fuente de poder V3
D1	Luz piloto 120 V AC
D2	Luz piloto 240 V AC
F1, F2, F3	Ventilador 12 V DC x 0.38 A, 3200 rpm
B1, B2	Bomba 12-24 V DC, 5-21.5 W
B3	Bomba 0.5 HP, 120 V AC
POT1, POT2	Potenciómetro ajustable de 20 kohmio
Pr1, Pr2	Voltímetro digital 0-40 V DC
Pr3	Voltímetro análogo 0-400 V AC
LM317_1, LM317_2	Regulador de voltaje variable 1.2-37 V x 1.5 A

Continuación de tabla XXXVI.

Código	Descripción
R1, R2	Resistencia 560 Ohm
C1, C3	Capacitor de poliéster de 0.33 μ F
C2, C4	Capacitor electrolítico de 1 μ F
HT1	Calentador de agua de paso 120 V x 54 A, 11.8 kW

Fuente: elaboración propia.

Figura 85. **Plano eléctrico del reactor**



Fuente: elaboración propia, empleando Quite Universal Circuit Simulator Qucs 0.016.

4.2. Construcción del reactor

En este apartado se muestran las imágenes del reactor construido y los equipos auxiliares del mismo, el proceso de construcción del reactor puede verse en el Apéndice 5.

4.2.1. Reactor construido

A continuación, se muestran las imágenes del reactor construido:

Figura 86. Fotografía frontal del reactor construido



Fuente: Laboratorio de Fisicoquímica, tercer nivel, T-5, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 87. **Fotografía trasera del reactor construido**



Fuente Laboratorio de Fisicoquímica, tercer nivel, T-5, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 88. **Fotografía lateral del reactor construido**



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica, tercer nivel, T-5, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.2.2. Fotografías de componentes del reactor

A continuación, se muestran las fotografías de los componentes eléctricos y equipos auxiliares del reactor.

Figura 89. **Fotografía de bomba de agua**



Fuente: CONSTRUACTIVO. *Catálogo*. <https://www.construactivo.com/bombas-perifericas/97-bomba-periferica-12-hp-pretul-7501206619995.html>. Consulta: 1 de enero de 2017.

Figura 90. **Bomba AEO WP-501210**



Fuente: Amazon. *Catálogo*. <https://www.amazon.com/AEO-12V-Brushless-Submersible-Fountain/dp/B01IAFCRF2>. Consulta: 3 de diciembre de 2017.

Figura 91. **Fuente de poder de 24 V DC**



Fuente: Guatemala Digital. *Catálogo*.

<https://www.guatemaladigital.com/Fuente+de+alimentaci%C3%B3n+New+DC+24V+15A+para+CCTV%2c+radio%2c+proyectos+de+computadora/Producto.aspx?Codigo=24826>. Consulta: 5 de noviembre de 2017.

Figura 92. **Manómetro de acero inoxidable**



Fuente: Winters. *Catálogo*. <http://winters.com/product/pfq-zr-stabilizr-stainless-steel-gauge/>.

Consulta: 17 de junio de 2017.

Figura 93. **Termómetro de acero inoxidable**



Fuente: Winters. *Catálogo*. <http://winters.com/product/tnr-food-beverage-bi-metal-thermometer/>.

Consulta: 18 de julio de 2017.

Figura 94. **Medidor de conductividad eléctrica**



Fuente: Amazon. *Catálogo*. [https://www.amazon.com/Water-Quality-Meter-Pancellent-Temperature/dp/B075J888J7/ref=sr_1_2?s=industrial&ie=UTF8&qid=1536809019&sr=1-](https://www.amazon.com/Water-Quality-Meter-Pancellent-Temperature/dp/B075J888J7/ref=sr_1_2?s=industrial&ie=UTF8&qid=1536809019&sr=1-2&refinements=p_89%3APancellent)

[2&refinements=p_89%3APancellent](https://www.amazon.com/Water-Quality-Meter-Pancellent-Temperature/dp/B075J888J7/ref=sr_1_2?s=industrial&ie=UTF8&qid=1536809019&sr=1-2&refinements=p_89%3APancellent). Consulta: 4 de febrero de 2018.

4.3. Validación del reactor

En esta sección se muestran los resultados de las pruebas realizadas con el reactor.

Tabla XXXVII. **Calibración de bomba de hidróxido de sodio**

Concentración de hidróxido de sodio (mol/l): 0,3				
Voltaje (V)	Repetición	Flujo volumétrico (l/min)	Temperatura (°C)	Promedio
12	1	0,6250	25	0,6144
	2	0,6122	25	
	3	0,6060	25	
16	1	0,8451	25	0,8491
	2	0,8571	25	
	3	0,8451	25	
20	1	1,0000	25	1,0230
	2	1,0345	25	
	3	1,0345	25	
24	1	1,1538	25	1,1464
	2	1,1320	25	
	3	1,1535	25	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Calibración de bomba de acetato de etilo**

Concentración acetato de etilo (mol/l): 0,3				
Voltaje (V)	Repetición	Flujo volumétrico (l/min)	Temperatura (°C)	Promedio
12	1	0,6316	25	0,6229
	2	0,6185	25	
	3	0,6185	25	
16	1	0,8823	25	0,8697
	2	0,8695	25	
	3	0,8572	25	
20	1	1,0169	25	1,0286
	2	1,0345	25	
	3	1,0345	25	
24	1	1,1538	25	1,1464
	2	1,1320	25	
	3	1,1535	25	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Calibración de bomba de agua**

Sistema de bombeo de agua				
Nivel de calentador	Repetición	Temperatura (°C)	Flujo Volumétrico (l/min)	Promedio
0	1	25	7,085	7,0863
	2	25	7,076	
	3	25	7,098	
1	1	37	7,074	7,0717
	2	37	7,070	
	3	37	7,071	
2	1	41	7,058	7,0680
	2	41	7,088	
	3	41	7,058	
3	1	46	7,058	7,0580
	2	46	7,058	
	3	46	7,058	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Resultados de prueba No. 1**

	[NaOH]o (M)	[NaOH]f (M)	X (%)
R1	0.3	0,0276504	90,783199
R2	0.3	0,0276204	90,793209
R3	0.3	0,0276504	90,783199
R4	0.3	0,0276504	90,783199

Fuente: tabla XI, datos calculados.

Tabla XLI. **Errores absolutos de prueba No. 1**

Repetición	Conversión experimental (%)	Conversión teórica (%)	Error absoluto (%)
1	90,7832	99,53	8,75
2	90,7932	99,53	8,74
3	90,7832	99,53	8,75
4	90,7832	99,53	8,75

Fuente: tabla XI, datos calculados.

Tabla XLII. **Error y conversión promedio de prueba No. 1**

Error absoluto promedio (%)	Conversión experimental promedio (%)
8,74	90,79

Fuente: tabla XI, datos calculados.

Tabla XLIII. **Resultados de prueba No.2**

	[NaOH] _o (M)	[NaOH] _f (M)	X (%)
R1	0,3	0,0275603	90,813229
R2	0,3	0,0275353	90,821571
R3	0,3	0,0275903	90,803219
R4	0,3	0,0275453	90,818234

Fuente: tabla XII, datos calculados.

Tabla XLIV. **Errores absolutos de prueba No. 2**

Repetición	Conversión experimental (%)	Conversión teórica (%)	Error absoluto (%)
1	90,8132	99,53	8,72
2	90,8216	99,53	8,71
3	90,8032	99,53	8,73
4	90,8182	99,53	8,71

Fuente: tabla XII, datos calculados.

Tabla XLV. **Error y conversión promedio de prueba No. 2**

Error absoluto promedio (%)	Conversión experimental promedio (%)
8,72	90,81

Fuente: tabla XII, datos calculados.

Tabla XLVI. **Resultados de prueba No. 3**

	[NaOH] _o (M)	[NaOH] _f (M)	X (%)
R1	0,3	0,0275603	90,813229
R2	0,3	0,0275253	90,824907
R3	0,3	0,0275303	90,823239
R4	0,3	0,0275103	90,829912

Fuente: tabla XIII, datos calculados.

Tabla XLVII. **Errores absolutos de prueba No. 3**

Repetición	Conversión experimental (%)	Conversión teórica (%)	Error absoluto (%)
1	90,8132	99,53	8,72
2	90,8249	99,53	8,71
3	90,8232	99,53	8,71
4	90,8299	99,53	8,70

Fuente: tabla XIII, datos calculados.

Tabla XLVIII. **Error y conversión promedio de prueba No. 3**

Error absoluto promedio (%)	Conversión experimental promedio (%)
8,71	90,82

Fuente: tabla XIII, datos calculados.

Tabla XLIX. **Error y conversión del reactor**

Conversión experimental promedio del reactor (%)	Error absoluto del reactor (%)
90,81	8,72

Fuente: elaboración propia, empleando tablas XI, XII, XII de datos calculados.

Para corroborar determinar la conversión al infinito se enviaron 9 muestras para análisis determinar la concentración de la reacción al infinito, al Laboratorio de

Producción de Medicamentos-LAPROMED, de la Universidad de San Carlos de Guatemala. A continuación, se muestran las conversiones obtenidas.

Tabla L. **Conversión al infinito promedio de las pruebas del reactor**

Prueba No.	Conversión promedio (%)	Conversión de la reacción al infinito (%)
1	94	92
2	88	
3	94	

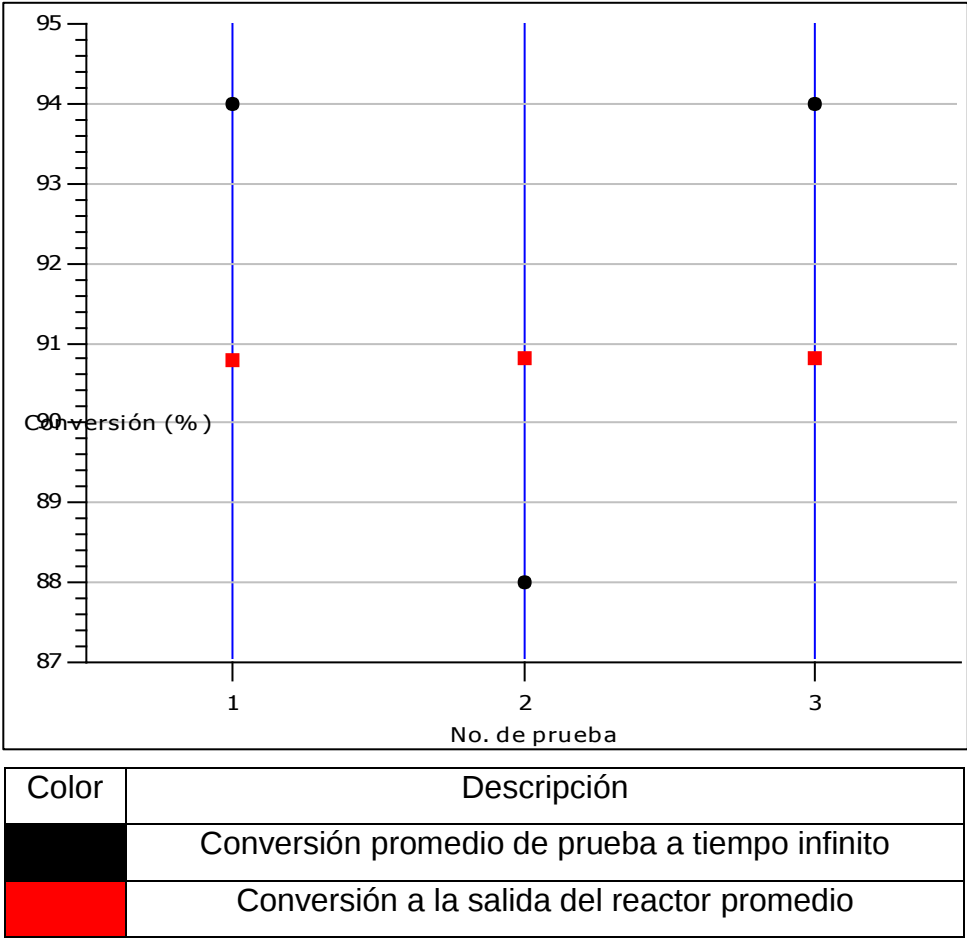
Fuente: tabla XX, datos calculados.

Tabla LI. **Errores de la conversión al infinito**

Prueba No.	Error absoluto promedio (%)	Error relativo promedio (%)	Error absoluto	Error relativo
1	5,9999	5,999906	7,999	7,999
2	11,9999	11,999912		
3	5,9999	5,999906		

Fuente: tabla XXI, datos calculados.

Figura 95. Conversiones promedio de pruebas



Fuente: tabla XXI, datos calculados.

4.4. Propuesta de práctica de laboratorio

4.4.1. Título de práctica de laboratorio

Conversión de reacción de saponificación del acetato de etilo.

4.4.2. Objetivos

Son las consideraciones teóricas que el estudiante adquirirá por medio del desarrollo de la práctica de laboratorio.

4.4.2.1. General

Estudiar el efecto de la transferencia de calor en la operación de reactores químicos.

4.4.2.2. Específicos

1. Determinar la conversión de la saponificación del acetato de etilo, utilizando un reactor PFR con intercambiador de calor.
2. Calcular la conversión de la saponificación de acetato de etilo, utilizando un reactor PFR sin intercambiador de calor.
3. Comparar la diferencia entre la conversión de la saponificación de acetato de etilo con y sin transferencia de calor.
4. Definir el perfil longitudinal de temperaturas.
5. Calcular el espacio tiempo del reactor en base a los flujos de operación.

4.4.3. Material y equipo

- Reactor PFR y accesorios
- Conductímetro digital
- 4 termómetros
- Balanza analítica
- Picnómetro
- Espátula
- Varilla de agitación
- Beacker de 5 l
- Embudo plástico
- Recipiente de desechos líquidos
- Pipeta de 50 ml
- Propipeta
- Balón aforado de 1 l
- Cronómetro

4.4.4. Equipo de protección personal

- Bata de laboratorio
- Lentes de seguridad
- Botas punta de acero
- Guantes de neopreno o resistentes a químicos
- Mascara de gases orgánicos
- Pantalón de lona
- Cofia
- Guantes de calor

4.4.5. Reactivos e insumos

- 240 g de hidróxido de sodio
- 600 ml de acetato de etilo
- 40 litros de agua desmineralizada
- 10 litros de agua potable o desmineralizada

4.4.6. Procedimiento

En esta sección se describen los pasos a seguir para el desarrollo de la práctica.

4.4.6.1. Calibración de bombas de reactivos

- Preparar 10 l de una solución 0,3 M de hidróxido de sodio
- Preparar 10 l de una solución 0,3 M de acetato de etilo
- Verificar que los interruptores S1, S2, S3, S4, S5 y S6 estén en la posición de apagado.
- Verificar que las válvulas VALV1 y VALV2 estén cerradas.
- Quitar los tapones de los tanques T1 y T2.
- Trasvasar la solución de hidróxido de sodio 0,3 M al tanque de almacenamiento T1.
- Trasvasar la solución de acetato de etilo 0,3 M al tanque de almacenamiento T2.
- Verificar que el botón de paro de emergencia S1 no este accionado.
- Accionar el interruptor S3 a la posición de encendido.
- Accionar el interruptor S2 a la posición de encendido.
- Ajustar el voltaje de la bomba B1 en 12 V utilizado la perrilla del potenciómetro POT1.

- Abrir la válvula VALV1 y accionar al mismo tiempo el interruptor S4, para encender la bomba B1.
- Con un recipiente realizar tomas de 1 l y medir el tiempo con un cronometro.
- Apagar la bomba 1 con el interruptor S4.
- Repetir los pasos 9 al 15 tres veces más para la bomba B1 ajustando el voltaje en 16, 20 y 24 V respectivamente. Para la bomba B2 repetir los pasos 9 al 15 cuatro veces, ajustando el voltaje en 12, 16, 20 y 24 V respectivamente; el botón de encendido de B2 es el interruptor S5.

4.4.6.2. Calibración de bomba de agua

- Trasvasar 10 l de agua desmineralizada o potable al tanque T3.
- Colocar la manguera de recirculación de agua en el tanque T3.
- Verificar que el botón de paro de emergencia S1 este accionado.
- Verificar que los interruptores S2, S4, S5, S6 estén en la posición de apagado.
- Colocar el interruptor S3 en la posición de encendido.
- Verificar que el calentador de agua HT1 este apagado.
- Accionar el interruptor S6.
- Con un recipiente realizar tomas de agua y con un cronómetro medir 1 minuto.
- Apagar la bomba B3 con el interruptor S6.
- Recargar el tanque de almacenamiento T3 al nivel de 10 l.
- Conectar el calentador de agua HT1.
- Verificar que la luz piloto D2 del calentador esté encendida.
- Colocar la manguera de recirculación de agua en el tanque T3.
- Accionar el interruptor S6 para encender la bomba.

- Con los botones BOT1 y BOT2 ajustar el nivel de temperatura del calentador en 1.
- Esperar 2 minutos.
- Tomar la manguera de recirculación y realizar mediciones de volumen de agua con un recipiente por 1 minutos utilizando un cronómetro.
- Repetir los pasos 10 al 17 dos veces más ajustando el nivel del calentador en 2 y 3 respectivamente.

4.4.6.3. Prueba de reactor

- Preparar 10 l de una solución 0,3 M de hidróxido de sodio.
- Preparar 10 l de una solución 0,3 M de acetato de etilo.
- Verificar que el equipo este desconectado a la energía eléctrica.
- Verificar que las válvulas VALV1 y VALV2 estén cerradas.
- Trasvasar la solución de hidróxido de sodio al tanque T1.
- Trasvasar la solución de acetato de etilo al tanque T2.
- Trasvasar 10 l de agua desmineralizada al tanque T3.
- Verificar que el botón de paro de emergencia no esté activado.
- Colocar el interruptor S3 en la posición de encendido.
- Verificar que los interruptores S2, S4, S5 y S6 estén en la posición de apagado.
- Colocar la manguera de recirculación de agua en el tanque T3.
- Colocar la manguera de muestreo del reactor en un recipiente de muestreo.
- Conectar el reactor a la energía eléctrica de 120 V.
- Conectar el calentador HT1 a la fuente de energía eléctrica de 240 V.
- Verificar que la luz piloto D2 este encendida.
- Accionar el interruptor S2 de encendido general.

- Verificar que la luz piloto D1 este encendida.
- Verificar que los voltímetros VOLT1, VOLT2 y VOLT 3 estén encendidos y midiendo voltaje.
- Ajustar el voltaje de la bomba B1 con la perrilla POT1 en 24 V.
- Ajustar el voltaje de la bomba B2 con la perrilla POT2 en 24 V.
- Verificar el voltaje de la bomba B3 esté en un rango de 108 a 125 V.
- Encender la bomba B3 con el interruptor S6.
- Con los botones BOT1 y BOT2 configurar el nivel de temperatura de calentador HT1 en “nivel 3” para que opere a máxima potencia (11,8 kW).
- Esperar 3 minutos para que el sistema se estabilice.
- Encender de forma simultánea las bombas B2 y B3 con los interruptores S4 y S5 respectivamente; de igual forma abrir simultáneamente las válvulas VALV1 y VALV2.
- Esperar 2 minutos a que el sistema se estabilice.
- Tomar 4 muestras de 100 ml aproximadamente dejando 30 segundos entre cada muestreo.
- Con el conductímetro realizar mediciones de conductividad eléctrica y temperatura.
- Apagar las bombas B1, B2 y B3 con los interruptores S4, S5 y S6 respectivamente.
- Apagar el equipo con el interruptor S2.

4.4.7. Cálculos

- Determinar la conversión de la reacción a la salida del reactor.
- Realizar una simulación del reactor con Polymath 5.2 y determinar la conversión teórica esperada.
- Determinar los errores experimentales de las muestras realizadas.

4.5. Manual de operación y mantenimiento

Para poder operar correctamente el equipo se redactó un manual de operación y mantenimiento del reactor.

El manual describe los siguientes procedimientos de operación:

- Procedimiento de uso general del reactor
- Calibración de bomba B1 y B2
- Calibración de bomba B3
- Calibración de medidores de flujo
- Procedimiento de muestreo recomendado

El mantenimiento del reactor consta de los siguientes procedimientos:

- Mantenimiento de la carcasa del reactor
- Mantenimiento del enchaquetamiento del reactor
- Mantenimiento de la bomba B3
- Limpieza de los tanques de almacenamiento T1, T2 y T3
- Mantenimiento eléctrico
- Listado de repuesto del reactor
- Listado de proveedores de repuestos del reactor
- Programa de mantenimiento del reactor

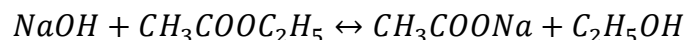
El manual puede observarse en el apéndice 1.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Diseñar un reactor con fin educativo tiene varias limitantes puesto que debe satisfacer otros requerimientos distintos de los reactores industriales. Un equipo de laboratorio didáctico debe ser fácil de utilizar y ocupar un espacio limitado.

Debido a que el equipo a ser utilizado por estudiantes, y no por operarios capacitados y que han sido entrenados para utilizar específicamente el equipo. El diseño debía ser simple para facilitar la comprensión del estudiante y reducir el riesgo de accidentes. El primer paso en el diseño del reactor fue seleccionar una reacción cuyos reactivos y productos tuvieran una reactividad leve, esto con el fin de reducir los riesgos.

La reacción seleccionada fue la saponificación de acetato de etilo. Las propiedades de esta reacción son fáciles de controlar y estudiar. Es una reacción simple donde los coeficientes estequiométricos de reactivos como de sus productos son la unidad, esto simplifica los cálculos, operatoria y diseño del reactor.



Esta reacción es casi isotérmica, aunque estrictamente es una reacción exotérmica, sin embargo, no presenta liberación excesiva de energía. Otra característica importante es que el monitoreo de la reacción se puede realizar de diferentes maneras, entre las cuales destaca la conductimétrica por su exactitud, aunque también puede emplearse una técnica volumétrica.

Otra razón por la que se seleccionó dicha reacción es que los reactivos utilizados son altamente comerciales, baratos, y son factibles para realizar varios análisis a un bajo costo.

Una vez determinada la reacción a utilizar el segundo paso fue determinar el tipo de reactor a diseñar. El reactor PFR fue seleccionado debido a que no se contaba con un equipo de flujo tapón. Un reactor de flujo tapón es aquel que opera en estado estable, con movimiento continuo de los reactivos en una dirección, y en el que se reducen las perturbaciones de flujo a fin de controlar la reacción para que se dé a cabo una conversión gradual de los reactivos en productos. Usualmente tienen una forma tubular, por lo que comúnmente tiene longitudes muy grandes con relación al diámetro.

De acuerdo con un sondeo realizado a diferentes fabricantes de reactores con fines educativos el volumen de un reactor de laboratorio puede oscilar entre 0,01 a 2,5 l. El volumen de diseño para el reactor es de 1,7 l, con una longitud de 21,5 m aproximadamente.

El reactor fue diseñado para maximizar la conversión de la reacción; el diseño de este reactor requirió conocimientos de termodinámica, cinética química, transferencia de masa y energía, transporte de fluidos, balance de masa y energía.

Para controlar la turbulencia del flujo de la reacción se diseñó un sistema de curvas de giro amplio utilizando codos de radio medio. Para explicar el origen de la turbulencia en una curva se debe conocer el concepto de flujo secundario, esto es un fenómeno en el que el cambio de dirección de una tubería genera un choque del fluido con las paredes, esto se debe a que los vectores de fuerza de la corriente del fluido son perpendiculares al eje de

rotación. Esto genera resistencia por fricción y debido a la acción centrífuga se producen pequeños remolinos. El efecto anterior se denomina circulación secundaria o efecto de Dean, que se produce a ángulos rectos, con relación al flujo principal. Debido a esta circulación, la pérdida de energía por fricción en una tubería curva es mayor que en una longitud igual a una tubería recta. En un reactor de flujo tapón esta condición se desea disminuir al mínimo. La relación entre los radios es 0,22. Para reducir la turbulencia generada por las curvas, se utilizó tubo pulido grado alimenticio, se utilizaron codos tipo clamp y se seleccionaron codos en los que la relación entre el diámetro de giro y el diámetro interno de los codos fuera la menor posible. En el diseño también se consideró el régimen de flujo, se consideró que un flujo turbulento menor a 8 000 era adecuado para operar el reactor, el número de Reynolds de diseño en el reactor es 6 551,4. Se utilizó tubo de acero inoxidable 304 pulido tipo espejo grado alimenticio $D=1/2$ pulgada para reducir las perturbaciones por fricción.

Para el cálculo de las bombas de reactivos, se establecieron previamente los parámetros de operación del reactor siendo los flujos molares de alimentación de reactivos 0,3 mol/min de hidróxido de sodio y 0,3 mol/min de acetato de etilo. Para poder ejemplificar el efecto del calor en las reacciones se consideró añadir un intercambiador de calor al reactor y así estudiar dicho efecto. Para ello se determinaron las temperaturas de entrada y salida del reactor siendo 25 °C y 43 °C respectivamente.

Una vez conocidos los parámetros de operación del reactor se dimensionó el sistema térmico. Se diseñó un intercambiador de calor tubo-tubo donde el tubo interno corresponde al cuerpo del reactor y el externo al enchaquetamiento donde circularía agua de calentamiento. Para la determinación de las dimensiones del intercambiador de calor se realizaron cálculos de flujo de calor

necesario para calentar la reacción y el coeficiente global de transferencia de calor. Se realizaron varias suposiciones: la primera es que se consideró que la reacción corresponde a una solución muy diluida de hidróxido de sodio y acetato de etilo, por lo que en los cálculos no se observan propiedades del etanol ni acetato de sodio. La segunda suposición es que se despreciaron los efectos de pérdida de calor por radiación y conducción con el aire.

Para el cálculo de los coeficientes individuales de película de transferencia de calor de la mezcla reactante y el agua se utilizó la correlación empírica de Gnielinski esta ecuación tiene un error entre el 3 al 5 %, sirve para calcular el número de Nusselt en conductos bajo régimen turbulento. Las perturbaciones por fricción por medio de una la correlación empírica de Swamee & Jain.

De los cálculos se determinó que los parámetros de diseño del sistema térmicos son: $U = 1\,567,32 \frac{W}{m^2K}$, el flujo de calor necesario para calentar la reacción es $\dot{Q} = 2\,420,66\,W$, el área de transferencia de calor es $A(TDC) = 0,3\,m^2$ con una longitud $L = 9,3\,m$ utilizando un tubo de $D = 1\,pulgada$ nominal.

Una vez caracterizado el sistema térmico del reactor, se procedió a determinar los parámetros de operación del reactor, para ello se determinó la conversión de diseño. Para ello se armó un sistema de ecuaciones diferenciales y se utilizó Polymath 5.1. para resolverlo, obteniendo un valor de $X = 99,53\%$ de conversión a la salida del reactor. Para determinar el valor experimental se utilizó un conductímetro Pancellent con un rango de medición de $0 \sim 9\,990\,\mu S/cm$ y una precisión de $\pm 2\%$. La concentración de alimentación de reactivos es de $0,3\,mol/l$ para hidróxido de sodio y acetato de etilo, siendo una alimentación equimolar.

Determinados los parámetros del diseño térmico y de la reacción, se procedió al diseño espacial del reactor, para ellos se consideró el espacio físico que se disponía. El lugar donde se instaló el equipo es el Laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química, cuenta con mesas de laboratorio de un tamaño aproximado de 1,1 m de ancho por 3,5 m de largo, aunque se podía haber diseñado un reactor con una longitud de tramos de alrededor de 3 m, esto no era factible dado que el laboratorio se utilizaba para otros cursos y un equipo con una longitud muy grande dificultaba la movilidad en el laboratorio. Por ello se analizó y se decidió utilizar una configuración espacial donde la tubería del reactor se distribuyera en 4 niveles con 4 tramos por nivel (ver fig. 59 a 78). El diseño ocupa un espacio aproximado de 1 m^3 con forma cubica, optimizando el uso del espacio físico. Luego de determinar la configuración espacial del reactor se procedió a seleccionar los accesorios de tubería, y además seleccionar elementos de monitoreo del reactor como manómetros, termómetros, entre otros, los planos de los accesorios más importantes se pueden ver en las fig. 82 a 84.

Otro de los problemas del diseño era que el laboratorio no contaba con una línea de vapor o alguna fuente de calentamiento similar. Por ello se analizaron tres posibles soluciones; utilizar un calentador de agua eléctrico con tanque de almacenamiento, utilizar un calentador de gas de paso, utilizar un calentador eléctrico de paso. Se seleccionó el calentador eléctrico de paso, dado que era el más económico y emplea menos tiempo para calentar el agua. El calentador eléctrico seleccionado tiene un consumo de potencia de 11,8 kW.

Luego de determinar todos los accesorios, equipo auxiliares y medidores, se procedió a dimensionar la potencia requerida para las bombas de agua y de reactivos, para ello se realizó un balance de momento comúnmente llamado ecuación general de la energía mecánica para el enchaquetamiento, y para el

reactor. La potencia de las bombas de los reactivos es de 5 a 21,5 W, son bombas con un sistema de regulación de voltaje, por lo que tiene un gran rango de operación. Respecto a la bomba de agua, se decidió utilizar una bomba de $\frac{1}{2}$ hp.

Previo a la construcción del reactor se diseñaron los soportes o bastidores del reactor (ver fig. 79 a 81), además se diseñó el sistema eléctrico de regulación de voltaje de las bombas. También se realizó el diseño de un tablero eléctrico para control de las bombas del reactor y así facilitar la operación del equipo. El plano eléctrico puede observarse en la figura 85 y la codificación de los componentes en la tabla XXXVI. Se cuenta con potenciómetros de 20 k Ω y reguladores de voltaje LM317 para regular el voltaje de las bombas de reactivos. Los flujos volumétricos de operación de las bombas de reactivos son de 1 l/min, en conjunto el flujo volumétrico de la mezcla reactante es de 2 l/min, el flujo volumétrico de operación de la bomba del agua de calentamiento es 7 l/min.

La última etapa de la fase del diseño del reactor consistió en la elaboración de los planos del reactor, estos planos sirvieron como base para la construcción del reactor, aunque se realizaron algunos ajustes debido a limitaciones de los materiales de construcción.

Respecto a la construcción del reactor, las técnicas utilizadas fueron el mecanizado, soldadura MMA y TIG. De los dos tipos de soldadura utilizados cabe destacar la soldadura TIG, pues fue utilizada para la construcción del cuerpo del reactor, esta soldadura garantiza cordones de soldadura lisos, lo que sirve para reducir la perturbación de flujo en las uniones.

En cuanto a la validación del funcionamiento del reactor, en la tabla XXXVII se observan los flujos volumétricos de calibración de la bomba de hidróxido de sodio, de esto se determinó que el voltaje de operación de la bomba B1 correspondía a 20 V con un flujo volumétrico de 1,023 l/min, este es el valor más cercano al flujo de diseño 1 l/min. En la tabla XXXVIII se observan los flujos volumétricos de calibración de la bomba de acetato de etilo B2, de esto se determinó que el voltaje de operación es 20 V con un flujo de 1.0286 l/min se aproxima al valor de diseño de 1 l/min. Respeto a la calibración de la bomba de agua se determinó que para el nivel 3 de calentador el flujo volumétrico es de 7,058 l/min dicho valor difiere 0,058 l/min del valor de diseño, por lo que se considera aceptable.

La tabla XLII muestra la conversión experimental promedio de la prueba No. 1 del reactor, el reactor se validó para una reacción con alimentación equimolar concentraciones de hidróxido de sodio y acetato de etilo 0,3 M. de cuatro repeticiones que se realizaron durante la prueba No. 1, la variación no fue significativa, esto puede observarse en la tabla XL. Se obtuvo una conversión promedio del 90,79%, con un error absoluto de 8,74%. La conversión se comparó con el valor teórico de diseño. En la tabla XLV se observa el valor de la conversión promedio de la prueba No. 2 cuyo valor corresponde a 90,81 % con un error absoluto de 8,72%. En la tabla XLVII se observa el valor de la conversión promedio de la prueba No. 3, se observa que la mayor conversión se dio en esta prueba cuyo valor es 90,82 % y un error absoluto de 8,71 %. A partir de los datos anteriores se realizó un promedio para determinar la conversión experimental del reactor este valor puede observarse en la tabla XLIX. Se obtuvo una conversión de 90,81 % con un error absoluto de 8,72 %, con un error relativo de 8,76 %. El error relativo del valor promedio de conversión del reactor está por debajo del 10 % por lo que se obtuvo un grado de exactitud aceptable. Sin embargo, cabe destacar que el valor de conversión

de diseño corresponde a un valor ideal y no considera diversos aspectos que en la práctica no es posible conseguir.

El alto grado de precisión obtenido de la conversión, válida el funcionamiento del reactor utilizando una temperatura de alimentación de 25 °C y una concentración inicial de 0,3 M.

En la tabla L se observa el valor de la conversión al infinito de la reacción. Se obtuvo una conversión al infinito de 92 %, comparándola con el 99,99 % de valor teórico se observa que el error relativo es de 7,99 %. La conversión al infinito sirve para analizar el mezclado de los reactivos, que la conversión al infinito no llegara al 99,99 % indica un mal proceso de mezclado, o posiblemente un problema en las concentraciones iniciales de los reactivos. Sin embargo, desde el punto de vista operativo este error es aceptable dado que las condiciones de un sistema real siempre difieren de las condiciones idealizadas de la teoría.

Se espera que la vida útil de reactor PFR sea de 15 años, sin embargo, para ello es necesario dar mantenimiento, realizar procedimientos y rutinas de limpieza e inspección para detectar posibles problemas, es por ello que en el apéndice 1 se puede observar un manual de operación y mantenimiento del reactor. El mantenimiento preventivo puede asegurar un funcionamiento óptimo del reactor.

CONCLUSIONES

1. Se ha diseñado un reactor PFR didáctico para el curso de Cinética de Procesos Químicos de la carrera de Ingeniería Química, empleando un software para realizar una simulación de la conversión teórica de diseño.
2. Se elaboraron planos del reactor para facilitar la explicación de las partes de este, y también para detallar más a fondo los procesos de operación y mantenimiento del reactor.
3. Se construyó un reactor PFR, con volumen de 1,7 l, y una longitud de 21,5 m de longitud, el material de cuerpo del reactor es tubo de acero inoxidable ASTM A270 304. Los bastidores o soportes del reactor son de hierro negro de 1 pulgada revestidos con pintura epóxica.
4. Las conversiones experimentales cuyo valor promedio es 90,81 % con un error de 8,71 % muestran que el reactor construido funciona como un reactor PFR y que su error es aceptable, para un grado de confianza del 90 %.
5. Con un error experimental menor al 10 % se da por validado el reactor PFR para la reacción de saponificación de acetato de etilo con alimentación equimolar de reactivos 0,3 M.
6. El método conductimétrico muestra ser fiable para el análisis de la concentración final de la reacción.

7. Se realizó una propuesta de una práctica de laboratorio para que el reactor sea implementado en el curso de Cinética de Procesos Químicos.
8. Se redactó un manual de operación y mantenimiento del reactor, este da indicaciones en caso de emergencias, procedimientos detallados de operación, mantenimiento, listado de repuestos y de proveedores.

RECOMENDACIONES

1. Instalar celdas conductimétricas a lo largo del reactor para estudiar el efecto del volumen del reactor en la conversión de la reacción.
2. Realizar estudios de velocidad de reacción para diferentes reacciones.
3. Validar el funcionamiento del reactor utilizando un conductímetro con mayor trazabilidad.
4. Desarrollar pruebas de laboratorio para estudiar otras reacciones, validando los métodos y verificando que los reactivos no dañen el equipo.
5. Utilizar métodos de determinación de la conversión distintos al conductimétrico para mejorar el análisis de la reacción.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALDÁS, Jorge y VIVAR, Gabriel. *Diseño y construcción de un reactor semicontinuo para la obtención de acetato de sodio*. Trabajo de graduación Ingeniería Química, Ecuador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2014. 85 p.
2. Almacenes Vidrí El Salvador. *Catálogo*. [en línea]. <<https://www.vidri.com.sv/producto/40248/Codo-de-acero-inoxidable-1-PULGADAS.html>>. [Consulta: 22 de agosto de 2018].
3. Amazon. *Catálogo*. [en línea]. <<https://www.amazon.com/AEO-12V-Brushless-Submersible-Fountain/dp/B01IAFCRF2>>. [Consulta: 3 de diciembre de 2017].
4. ARTEMOV, V. G. Et al. *Conductivity of aqueous HCL, NaOH and NaCl solutions: Is water just a substrate?* [en línea]. <<http://iopscience.iop.org/article/10.1209/0295-5075/109/26002>>. [Consulta: 2 de diciembre de 2017].
5. BRANAN, Carl R. *Soluciones Prácticas para el Ingeniero Químico*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1984. 408 p.
6. CAÑAVERA, Teddy y CUADRADO, Remberto. *Simulación con MATLAB y SCILAB de un reactor tipo tanque agitado (CSTR)*. Trabajo de graduación de Ingeniería Electrónica, Colombia, Universidad Tecnológica de Bolívar, 2012. 60 p.

7. CONSTRUACTIVO. *Catálogo*. [en línea]. <<https://www.construactivo.com/bombas-perifericas/97-bomba-periferica-12-hp-pretul-7501206619995.html>>. [Consulta: 1 de enero de 2017].
8. DANIELS F. et. al. *Experimental Physical Chemistry*. 6a ed. Canada: McGraw-Hill, 1962. 505 p.
9. DE LEÓN, Otto Raúl y ASANOSKI, Levent. *Guía para el estudio de la transferencia de calor: Documento consolidado-Transferencia de calor (IQ-3)*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 54 p.
10. DOW CHEMICAL COMPANY. *Manual de solución de soda cáustica*. [en línea]. <https://www.academia.edu/8169598/Manual_De_Soluci%C3%B3n_De_Soda_C%C3%A1ustica_Contenidos>. [Consulta: febrero de 2018].
11. DYNALON LABWARE. *Catálogo*. [en línea]. <<https://www.dynalon.com/PublicStore/product/Baritainer-Jerry-Can,28.aspx>>. [Consulta: 7 de enero de 2018].
12. Enciclopedia encuentra todas las respuestas. *Biblioteca*. [en línea]: <<http://queesela.net/atomo-partes-como-esta-formado/>>. [Consulta: 28 de junio de 2018].
13. Fenómenos de transporte. *Rugosidad absoluta de los materiales*. [en línea]. <<https://ftransp.files.wordpress.com/2013/05/apendice-1-flujo-incompresible.pdf>>. [Consulta: 10 de junio de 2018].

14. FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. 4a ed. México: Pearson Educación, 2008. 1084 p.
15. G.U.N.T Gerätebau GmbH. *CE 310.02 Reactor tubular*. [en línea]. <https://www.gunt.de/images/datasheet/35/CE-310.02-Reactor-tubular-gunt-35-pdf_1_es-ES.pdf>. [Consulta: 28 de julio de 2018].
16. GARCÍA, Guillermo. *Chem. Reactor Simulator: Herramienta de simulación de CSTR como apoyo a la docencia*. Trabajo de graduación Ingeniería Química, España, Universidad Politécnica de Madrid, 2016. 97 p.
17. GEANKOPLIS, C. J. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3a ed. México: CECSA, 1998. 1024 p.
18. GUARIN, S. N. *Estadística Aplicada*. 1a. ed. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2002. 202p.
19. Guatemala Digital. *Catálogo*. [en línea]. <<https://guatemaladigital.com/Laboratorio+y+cient%EDfico/Dynalonn+Baritainer+4055940002+HDPE%2FQUORAL+Jerry+Can%2C+Natural%2C+10L+Capacity/Producto.aspx?CodigoP=B00DWFWB2A>>. [Consulta: 3 de enero de 2018].
20. HEREDIA, Sandra y HUACHO, Iván. *Diseño y construcción de un reactor flujo pistón*. Trabajo de graduación Ingeniería Química, Ecuador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, 2012. 86 p.

21. HERNÁNDEZ RIESCO, Germán. *Manual del soldador*. 17a ed. España: CESOL, 2006. 634 p.
22. HERNÁNDEZ ÁVILA, Sergio Fernando. *Evaluación de la cinética de hidrólisis del sistema $H_4P_2O_7$ -HCL, monitoreado por espectrofotometría (VIS), utilizando un reactor discontinuo –CSTR-, para diferentes condiciones de operación, a nivel de laboratorio*. Trabajo de graduación Ingeniería Química Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 87p.
23. Impacto Ferretero. *Catálogo*. [en línea]. <<https://www.impactoferretero.mx/valvula-de-bola-19-mm-34-cementar-cpvc-cvbola19>>. [Consulta: 22 de agosto de 2018].
24. IZQUIERDO, J., et al. *Cinética de las Reacciones Químicas*. España: Universidad de Barcelona, 2004. 459 p.
25. KADZHAROV V.T. *Investigación experimental de la viscosidad dinámica del acetato de etilo a diferentes temperaturas y presiones*. [en línea]. <<http://www.ddbst.de/free-software.html#Downloads>>. [Consulta: 10 de agosto de 2018].
26. KERN, Donald Q. *Procesos de Transferencia de Calor*. 1a ed. México: McGraw-Hill, 1965. 980 p. ISBN: 968-26-1040-0.
27. LAIDLER, Keith y MEISER, John. *Fisicoquímica*. México: CECSA, 2002. 987 p.

28. LAINFIESTA LÓPEZ, Diego Bernardo. *Diseño, construcción y evaluación de un reactor flujo pistón de forma helicoidal escala laboratorio*. Trabajo de graduación Ingeniería Química Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 143 p.
29. LOU DÍAZ, Zaid Jacobo. *Validación del uso de un reactor modificado de tipo discontinuo para la hidrólisis alcalina del acetato de etilo monitoreada por conductimetría para ser utilizado en estudios de Cinética Química*. Trabajo de graduación Ingeniería Química, Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2007. 114 p.
30. MARROQUÍN AGUILAR, Víctor Demetrio. *Diseño de la práctica "Hidrolisis alcalina del Acetato de Etilo" para el reactor computarizado continuo del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad Rafael Landívar*. Trabajo de graduación Ingeniería Química, Guatemala, Universidad Rafael Landívar, 2007. 105 p.
31. MCCABE, John, et. al. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. 4a ed. España: Reverté, 1980. 432 p.
32. Novex. *Catálogo*. [en línea]. <<https://www.novex.com.gt/producto/55465/ANILLO-ACERO-INOXIDABLE-1-PULG.html>>. [Consulta: 22 de agosto de 2018].
33. PERRY, R. Green, D.; Maloney, O. *Manual del Ingeniero Químico*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2001. 3224 p.

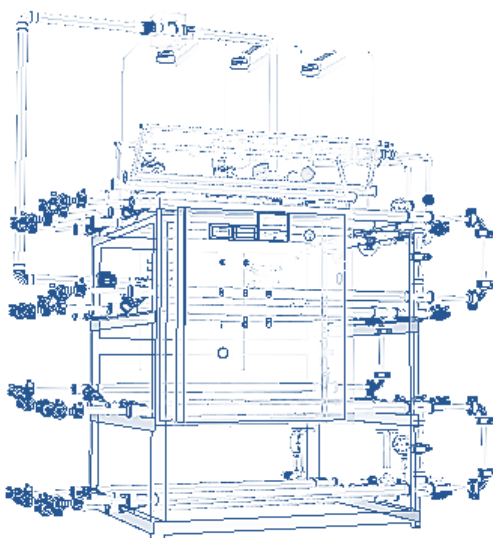
34. PERRY, R. Green, D.; Maloney, O. *Manual del Ingeniero Químico*, 8a ed. España: McGraw-Hill/ Interamericana, 2008, . 2173 p.
35. PERRY, R. Green, D.; Maloney, O. *Manual del Ingeniero Químico*, 6a ed. España: McGraw-Hill/ Interamericana, 1994. 2578 p.
36. SMITH J.M. *Ingeniería de la Cinética Química*. México: CECSA, 1991. 774 p.
37. Soluciones en Acero. *Catálogo*. [en línea]. <<https://www.enaceroinox.com/shop/product/codo-corto-a-90-grados-con-ferrula-en-extremos-s316l-tipo-3a-937?category=51>>. [Consulta: 22 de agosto de 2018].
38. StaMixCo LLC. *Plug Flow Reactor Static Mixer*. [en línea]. <<http://www.stamixco-usa.com/plug-flow-reactors>>. [Consulta: 28 de julio de 2018].
39. SULZER CHEMTECH LTD. *Polymers production technology*. [en línea]. <https://www.sulzer.com/-/media/files/products/process-technology/processes-and-applications/brochures/polymer_production.ashx>. [Consulta: 28 de julio de 2018].
40. Titan Tankless Water Heater. *Catálogo*. [en línea]. <<https://www.titanheater.com/proddetail.php?prod=SCR2-N120>>. [Consulta: 10 de agosto de 2018].

41. Universidad Tecnológica Nacional. *Conductividad de electrolitos*. [en línea]. <<http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/fiquimica/conductividad>>. [Consulta: 27 de junio de 2018].
42. Válvulas y Termoplásticos Industriales. *Catálogo*. [en línea]. <<https://4703-mx.all.biz/>>. [Consulta: 22 de agosto de 2018].
43. WHITTEN, R., DAVIS, R., PECK, M. *Química General*. 5a ed. España: McGraw-Hill, 1998. 565 p.
44. WINGROVE, A. y CARET, R. *Química Orgánica*. México: Oxford, 1999. 1115 p.
45. Winters. *Catálogo* [en línea]. <<http://winters.com/product/pfq-zr-stabilizr-stainless-steel-gauge/>>. [Consulta: 17 de julio de 2017].

APÉNDICES

Apéndice 1. **Manual de operación y mantenimiento del reactor**

Manual de operación y mantenimiento



Plug Flow Reactor (PFR)- Reactor de flujo tapón

Elaborado por: **Carlos Rodrigo Hernández Pérez**

Asesorado por: Adolfo Narciso Gramajo Antonio

Tesis: Diseño de un reactor continuo de flujo tapón (PFR) a escala laboratorio para uso docente en el Área de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química, Facultad de ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala

Marzo 2018

Continuación de apéndice 1.

Información importante de seguridad

La mayoría de los accidentes relacionados con la operación, el mantenimiento o la reparación de este equipo se deben a que no se observan las precauciones y reglas básicas de seguridad. Con frecuencia se puede evitar un accidente si se reconoce una situación que puede ser peligrosa antes de que ocurra el accidente. Todo usuario debe estar alerta a la posibilidad de peligros. Se debe tener la capacitación necesaria, los conocimientos y las herramientas para realizar estas funciones correctamente.

La operación, reparación y el mantenimiento incorrecto de este equipo pueden ser peligrosos y pueden resultar en accidentes graves o mortales.

No opere este equipo ni realice ningún trabajo de mantenimiento, reparación o limpieza hasta que haya leído y entendido toda la información de operación, mantenimiento y reparación.

Se proporcionan avisos y advertencias de seguridad en este manual y en el equipo. Si no se presta atención a estas advertencias de peligro, pueden ocurrir lesiones personales y mortales a usted o a otras personas.

Los peligros se identifican con el “Símbolo de Alerta de Seguridad”, seguido por una palabra informativa como “PELIGRO”, “ADVERTENCIA” O “PRECAUCIÓN”. A continuación, se muestra el Símbolo de Alerta “PELIGRO RIESGO ELECTRICO”.



El significado de este símbolo de alerta es el siguiente:

¡Atención! ¡Este alerta! ¡Riesgo eléctrico! Está en juego su seguridad

El mensaje que aparece debajo de la advertencia explica el peligro y puede estar presentado en forma escrita, por medio de ilustraciones o ambas formas.

No pueden anticiparse todas las circunstancias que podrían implicar un riesgo de peligro. Por lo tanto, las advertencias incluidas en este manual y en el equipo no pretenden cubrir todas las posibilidades. Si usa una herramienta, procedimiento, método de trabajo o técnica de operación que no ha sido recomendado específicamente en este manual, usted debe comprobar que no representa un peligro para usted o para otros individuos. Usted debe asegurarse también que no se dañará el equipo ni será peligroso utilizarlo como consecuencia de los procedimientos de operación, mantenimiento o reparación que usted seleccione.

La información, las especificaciones y las ilustraciones contenidas en este manual se basan en la información disponible en la fecha que se preparó la publicación del presente manual. Las especificaciones, los pares de apriete, las presiones, las mediciones, los ajustes, las ilustraciones u otros datos pueden cambiar en cualquier momento.

Continuación de apéndice 1.

Contenido

Prefacio	4	Sección de Mantenimiento	
Sección de seguridad		Mantenimiento de la carcasa y enchaquetamiento del reactor	22
Avisos de seguridad	5	Mantenimiento de la bomba B3	26
Información general sobre peligros	5	Limpieza de los tanques T1, T2 y T3	27
Prevención contra quemaduras	6	Mantenimiento eléctrico	28
Prevención de incendios o explosiones	6	Listado de repuestos del reactor y Proveedores	30
Prevención contra cortes	7		
Subida y bajada	8	Programa de mantenimiento del Reactor	32
Antes de arrancar el reactor	8		
Arranque del reactor	9		
Parada del reactor	9		
Sistema eléctrico	9		
Sección de información Sobre el Equipo			
Vistas del Reactor	10		
Sección de Operación			
Medidores e indicadores	15		
Uso general para reacción química	18		
Calibración de bomba B1 y B2	19		
Calibración de bomba B3	20		
Procedimiento de tomas de muestra recomendado	21		
Procedimiento de trasvasado de reactivos y agua	21		

Continuación de apéndice 1.

Prefacio

Información sobre publicaciones

Este manual contiene instrucciones de operaciones e información sobre seguridad y mantenimiento. Este manual debe guardarse cerca del equipo o en el lugar donde se guarden los documentos técnicos de los equipos. Lea, estudie y guarde el manual con los planos e información del equipo.

Seguridad

Esta sección de seguridad indica las precauciones de seguridad básicas. Además, esta sección identifica las situaciones de peligro y advertencia. Lea y entienda las normas de precaución básicas que aparecen en la sección de seguridad antes de operar, efectuar mantenimiento o reparar este equipo.

Operación

Las técnicas de operación que se describen en este manual son básicas. Ayudan a desarrollar las destrezas y las técnicas necesarias para operar el equipo de forma más eficaz. Las destrezas y las técnicas mejoran a medida que el usuario va adquiriendo más conocimientos sobre el equipo y sus capacidades.

La sección de operación constituye una referencia para los usuarios. Las fotografías e ilustraciones guían al usuario por los procedimientos de inspección, arranque, operación y parada del equipo.

Mantenimiento

La sección de mantenimiento constituye una guía para el cuidado del reactor. Las instrucciones paso a paso ilustradas están agrupadas por horas de servicio. Los artículos del programa de mantenimiento hacen referencia a las instrucciones detalladas siguientes.

El servicio recomendado debe efectuarse siempre en el intervalo apropiado según se indique en el Programa de Mantenimiento. El ambiente de operación real del reactor también regula el programa de mantenimiento. Por lo tanto, en condiciones de operación muy húmedas, polvorientas o si el reactor se usa con reactivos muy fuertes, tal vez sean necesarios una limpieza y mantenimiento más frecuentes de lo especificado en el programa de mantenimiento.

Los componentes del programa de mantenimiento están organizados para un programa de administración de mantenimiento preventivo. Si se sigue el programa de mantenimiento preventivo, no es necesario efectuar una afinación periódica. La puesta en práctica de un programa de administración de mantenimiento preventivo debe reducir al mínimo los costos de mantenimiento.

Intervalos de mantenimiento

Efectúe el mantenimiento de los componentes en múltiplos del intervalo original. Se recomienda copiar y mostrar los programas de mantenimiento cerca del reactor como recordatorio. También se recomienda llevar un registro de mantenimiento.

Continuación de apéndice 1.

Sección de seguridad

Avisos de seguridad

En el reactor pueden haber varias etiquetas de advertencia específicas. En esta sección se revisan la ubicación exacta de las etiquetas y se describe el peligro correspondiente. Familiarícese con todas las etiquetas de advertencia.

Asegúrese de que todas las etiquetas de advertencia sean legibles. Limpie o reemplace las etiquetas si no se pueden leer palabras o si no se pueden ver las ilustraciones. No utilice disolventes, la gasolina y los productos químicos abrasivos pueden desprender el adhesivo de las etiquetas.

Información general sobre peligros

Coloque una etiqueta de advertencia “No operar” o una etiqueta similar en el botón de paro de emergencia S1 o en algún lugar del tablero eléctrico TB antes de dar servicio o reparar el reactor.

Ilustración 1



Ilustración 2



Use un casco, lentes de seguridad y cualquier otro equipo de protección que se requiera.

No lleve ropa o artículos de joyería holgados que puedan engancharse en los controles o en otras partes del reactor.

Asegúrese de que todos los protectores y todas las tasan están bien colocadas en su posición en el reactor.

Mantenga el reactor libre de materias extrañas.

Quite la basura, el aceite, las herramientas y cualquier otro artículo de las bases y soportes del reactor.

Nunca ponga fluidos de mantenimiento en recipientes de vidrio. Drene todos los líquidos en un recipiente adecuado.

Obedezca todos los reglamentos locales sobre desecho de líquidos.

Use todas las disoluciones de limpieza con cuidado pues pueden dañar componentes del tablero eléctrico.

Continuación de apéndice 1.

Aire a presión

El aire comprimido puede causar que salgan despedidos la basura, pero puede provocar emisión de partículas nocivas para los ojos y nariz.

Cuando se usa aire comprimido o cualquier otro agente de limpieza a presión, use ropa de protección, zapatos de protección y lentes de seguridad.

La presión máxima de aire para propósitos de limpieza tiene que estar por debajo de 22 PSI.

Penetración de fluidos

La presión en el sistema de agua de calentamiento del reactor ronda los 15 PSI asegúrese que los tubos y accesorios de los tubos de descarga y enchaquetamiento del reactor estén bien apretados.

Prevención contra quemaduras

No toque la carcasa del calentador HT1, la tubería de descarga de la bomba B3, el enchaquetamiento del reactor, y en general la carcasa del reactor en marcha, ni después de haberse utilizado. Deje que se enfríe el reactor antes de realizar cualquier tarea de mantenimiento. Alivie toda la presión de tuberías y vacíe los líquidos remanentes del reactor.

Un posible bajo caudal de operación del sistema de bombeo de agua caliente puede provocar elevación de la temperatura hasta los 80 °C por lo que se recomienda estar alerta al flujo de agua.

Prevención de incendios o explosiones

Ilustración 3



La incorrecta intervención de los componentes eléctricos del reactor puede provocar cortocircuitos que pueden evolucionar en incendios.

No efectúe soldaduras en las tuberías o en los soportes del reactor cuando los tanques o las tuberías contengan reactivos.

Los cables, componentes eléctricos y dispositivos de seguridad se deben mantener en buenas condiciones. Todos los cables eléctricos deben estar tendidos correcta y firmemente sujetos. Revise diariamente todos los cables eléctricos. Repare todos los cables que estén flojos o deshilachados, antes de operar el reactor.

No utilice ningún cable o alambre que sea de un calibre menor de lo recomendado. No derive ningún fusible o disyuntor.

La formación de arcos eléctricos o chispas pueden causar un incendio. Conexiones seguras, el uso de cables recomendados y el mantenimiento correcto de los cables ayudarán a evitar la formación de arcos y de chispas.

Continuación de apéndice 1.

Nunca compruebe la carga de los capacitores mediante la colocación de un objeto metálico a través de los bornes. Utilice un voltímetro o hidrómetro.

Las conexiones incorrectas de los cables puente pueden causar una explosión que resulte en lesiones.

Extintor de incendios

Asegúrese de tener disponible un extintor de incendios. Familiarícese con la operación del extintor de incendios. Inspeccione el extintor de incendios y efectúe su servicio regularmente. Obedezca las recomendaciones de la placa de instrucciones.

Tuberías, tubos y mangueras

No doble las tuberías. No golpee las tuberías. No instale tuberías que estén dobladas o dañadas.

Repare todas las tuberías que estén flojas o dañadas. Las fugas pueden causar incendios. Consulte el listado de proveedores para obtener piezas de repuesto.

Compruebe cuidadosamente las tuberías, los tubos y las mangueras. No utilice su mano sin protección para ver si hay fugas. Use un cartón para comprobar si hay fugas. Apriete todas las conexiones.

Reemplace las piezas si ocurre una de las condiciones siguientes:

- Conexiones de extremo dañadas o con fugas.
- Capas exteriores raídas o cortadas.
- Cables al descubierto.
- Capas exteriores hinchadas.
- Plegamientos en la parte flexible de la manguera.
- Cables de refuerzo incrustados o en las capas exteriores.
- Conexiones de extremo desplazadas de su posición.

Asegúrese de que todas las abrazaderas, protectores y empaques estén correctamente instalados. Durante operación del reactor, esto ayudara a evitar fugas de líquidos, el roce contra otras piezas y el calor excesivo.

Prevención contra aplastamiento o cortes

Si el reactor está instalado en una posición de altura, compruebe que los soportes estén en óptimas condiciones antes de realizar cualquier trabajo en el reactor.

A menos que se den otras instrucciones de mantenimiento, no trate nunca de hacer ajustes con el reactor en marcha.

Manténgase alejado de todas las piezas giratorias y de todas las piezas en movimiento (motores de bombas, ventiladores, etc.). Mantenga los protectores en posición hasta que se realice el mantenimiento.

Continuación de apéndice 1.

Mantenga los objetos alejados de las aspas de los ventiladores. Las aspas de los ventiladores lanzarán o cortarán los objetos.

Lleve gafas protectoras para evitar posibles lesiones en los ojos en caso de que las aspas golpeen un objeto.

Al golpear objetos pueden salir partículas despedidas. Antes de que un objeto sea golpeado, asegúrese de que nadie resulte lesionado debido a la proyección de partículas.

Subida y bajada

Inspecciones las escaleras, y el área de trabajo antes de montar el reactor. Mantenga el área de trabajo limpia y las escaleras en buenas condiciones.

Suba y baje el reactor solamente por lugares que tengan escalones o pasamanos.

Dé frente al motor para montarlo o desmontarlo. Mantenga tres puntos de contacto con los escalones y agarraderas. Use los dos pies y una mano o un pie y las dos manos. No use los controles como pasamanos.

No se pare en componentes que no puedan soportar su peso. Use una escalera adecuada o una plataforma de trabajo. Sujete el reactor para que no se mueva.

No transporte las herramientas o los pertrechos cuando suba o cuando baje del motor. Use una soga para levantar y bajar las herramientas o suministros.

Antes de arrancar el reactor

ATENCIÓN

Para el arranque inicial del reactor después de un largo tiempo o después de un mantenimiento mayor, tome las medidas necesarias para apagar el reactor en caso de que opere de manera anormal. Esto se puede lograr pulsando el botón de paso de emergencia S1 a tiempo.

La parada por una sobre corriente debe ocurrir automáticamente por los interruptores termomagnéticos del cableado eléctrico. Si no ocurre una parada automática, oprima el botón de paró de emergencia para cortar el suministro eléctrico el circuito interno del reactor.

Inspeccione el reactor para ver si existen riesgos de incendio.

Antes de arrancar el reactor, asegúrese de que no haya nadie sin equipo de protección personal.

Todos los soportes y conexiones; tanto eléctricas como mecánicas deben estar bien aseguradas.

Continuación de apéndice 1.

Arranque del motor

Si hay una etiqueta de advertencia fijada al botón de paro de emergencia o al tablero eléctrico, NO arranque el reactor ni mueva los controles. Consulte con los encargados antes de arrancar el reactor.

Arranque el reactor siempre de acuerdo con el procedimiento que se describe en el tema del Manual de Operación y Mantenimiento, “Arranque del reactor” en la sección de Operación. El conocimiento del procedimiento correcto puede ayudar a evitar daños importantes a los componentes del reactor. También ayudará a evitar lesiones personales.

Para asegurar que el calentador de agua del enchaquetamiento esté funcionando correctamente, compruebe el medidor de temperatura de ingreso TEMP1 durante la operación del reactor.

Parada del reactor

Paré el reactor de acuerdo con el procedimiento indicado en el Manual de Operación y Mantenimiento, “Parada del reactor” en la sección de Operación para evitar el recalentamiento de los motores de las bombas y el desgaste acelerado de los componentes eléctricos del motor.

Use el botón de paro de emergencia S1 solamente en caso de emergencia. No use el botón de paro de emergencia para un paro normal del reactor. Después de un paro de emergencia, No arranque el reactor hasta que no se haya corregido el problema que produjo el paro de emergencia.

Pare el motor si ocurre una condición de exceso de velocidad en los motores durante el arranque inicial después de un mantenimiento. Esto puede lograrse pulsando el botón de paro de emergencia S1.

Sistema eléctrico

No desconecte nunca de la batería de un circuito de las fuentes de poder de 12V o 24V.

Los cables sueltos o flojos pueden provocar chispas. Inspeccione regularmente todas las conexiones eléctricas para ver si hay cables flojos o raídos. Apriete todos los cables eléctricos flojos antes de arrancar el reactor. Repare todos los cables eléctricos deshilachados antes de arrancar el motor.

Es necesario conectar correctamente a tierra el sistema eléctrico del reactor para obtener el rendimiento y la fiabilidad óptimos del reactor. La conexión incorrecta a tierra causará corrientes parásitas y circuitos eléctricos no fiables.

Los recorridos no controlados del circuito eléctrico pueden dañar los cojinetes de la bomba B3, las superficies del muñón de cojinete de la bomba B3.

Si el reactor se instala sin correas a tierra, este puede sufrir daño por descarga eléctrica.

Todas las conexiones a tierra deben estar apretadas y libres de corrosión.

Continuación de apéndice 1.

Sección de información sobre el producto

Vistas del reactor

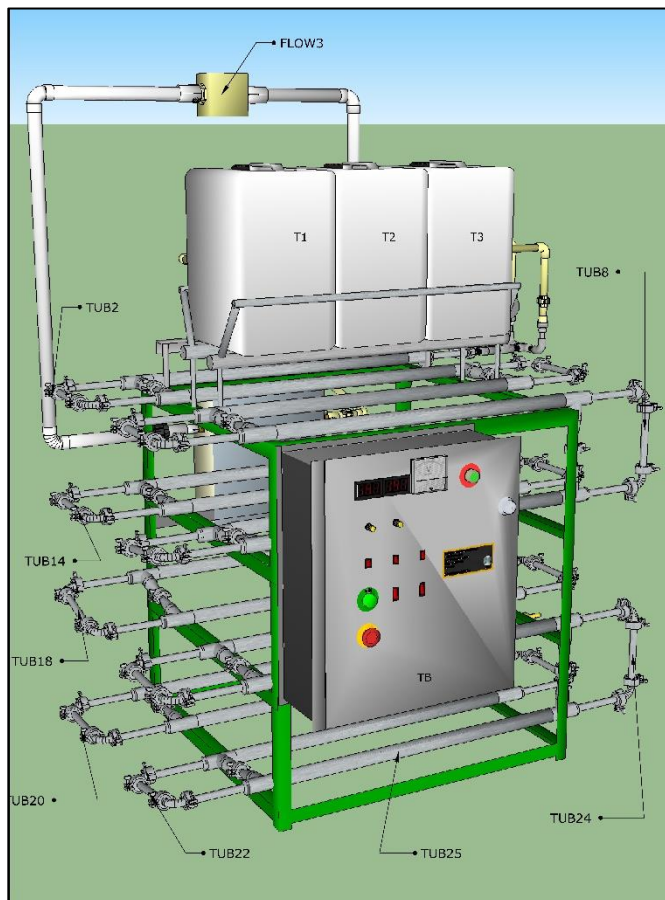


Ilustración 4

(FLOW3) Medidor de flujo del sistema de agua de calentamiento

(TUB2) Sección de tubería No.2*

(TUB8) Sección de tubería No.8*

(TUB14) Sección de tubería No.14*

(TUB18) Sección de tubería No.18*

(TUB20) Sección de tubería No.20*

(TUB22) Sección de tubería No.22*

(TUB24) Sección de tubería No.24*

(TUB25) Sección de tubería No.25*

(TB) Tablero eléctrico

(T1) Tanque de almacenamiento de reactivos No. 1

(T2) Tanque de almacenamiento de reactivos No. 2

(T3) Tanque de almacenamiento de agua de calentamiento

*Para más información de los componentes consultados los planos del reactor.

Continuación de apéndice 1.

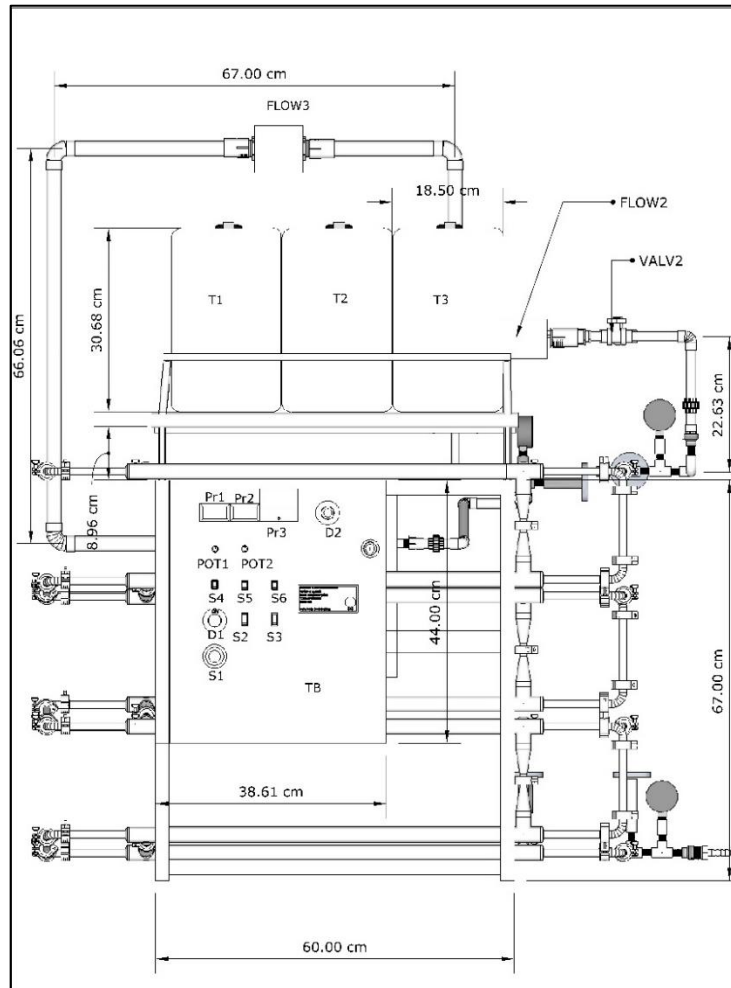


Ilustración 5

- | | |
|--|--|
| (S1) Botón de paro de emergencia | (S2) Interruptor de encendido general |
| (S3) Interruptor de sistema de enfriamiento | (S4) Interruptor de encendido de bomba B3 |
| (S5) Interruptor de encendido de bomba B2 | (S6) Interruptor de encendido de bomba B3 |
| (POT1) Perilla de potenciómetro de regulación de voltaje de bomba B1 | (POT2) Perilla de potenciómetro de regulación de voltaje de bomba B2 |
| (Pr1) Voltímetro de bomba 1 | (Pr2) Voltímetro de bomba 2 |
| (Pr3) Voltímetro de bomba 3 | (D1) Luz piloto de encendido general |
| (D2) Luz piloto de encendido de calentador eléctrico. | (FLOW2) Medidor de flujo No. 2 |
| (VALV2) Válvula de sistema de tubería de descarga de bomba B2 | (FLOW3) Medidor de flujo No. 3 |
| (T1) Tanque de almacenamiento de reactivos 1 | (T2) Tanque de almacenamiento de reactivos 2 |
| (T3) Tanque de almacenamiento de agua de calentamiento. | |

Continuación de apéndice 1.

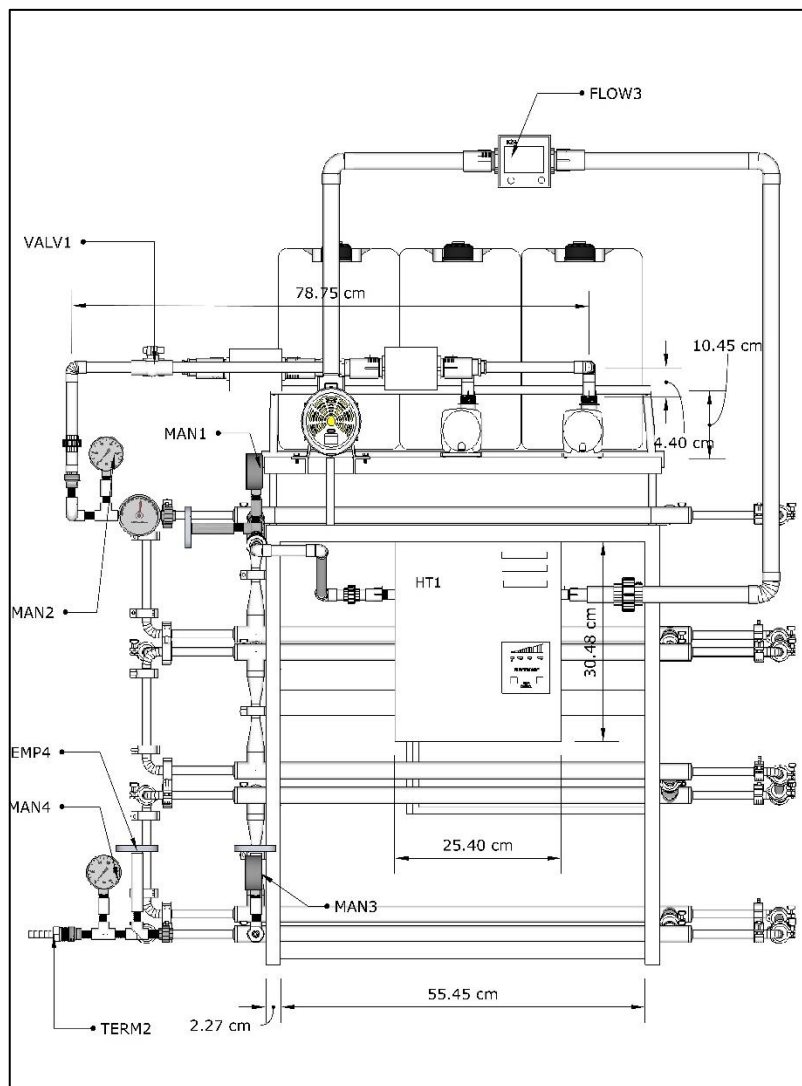


Ilustración 6

(VALV1) Válvula de tubería de descarga de bomba B1

(MAN1) Manómetro de ingreso de agua de calentamiento

(MAN2) Manómetro de ingreso de mezcla reactante

(MAN3) Manómetro de salida de agua de calentamiento

(MAN4) Manómetro de salida de productos de reacción

(TEMP4) Termómetro de salida de productos de reacción

(TERM2) Terminal de manguera de productos de reacción

(HT1) Calentador eléctrico de agua

Continuación de apéndice 1.

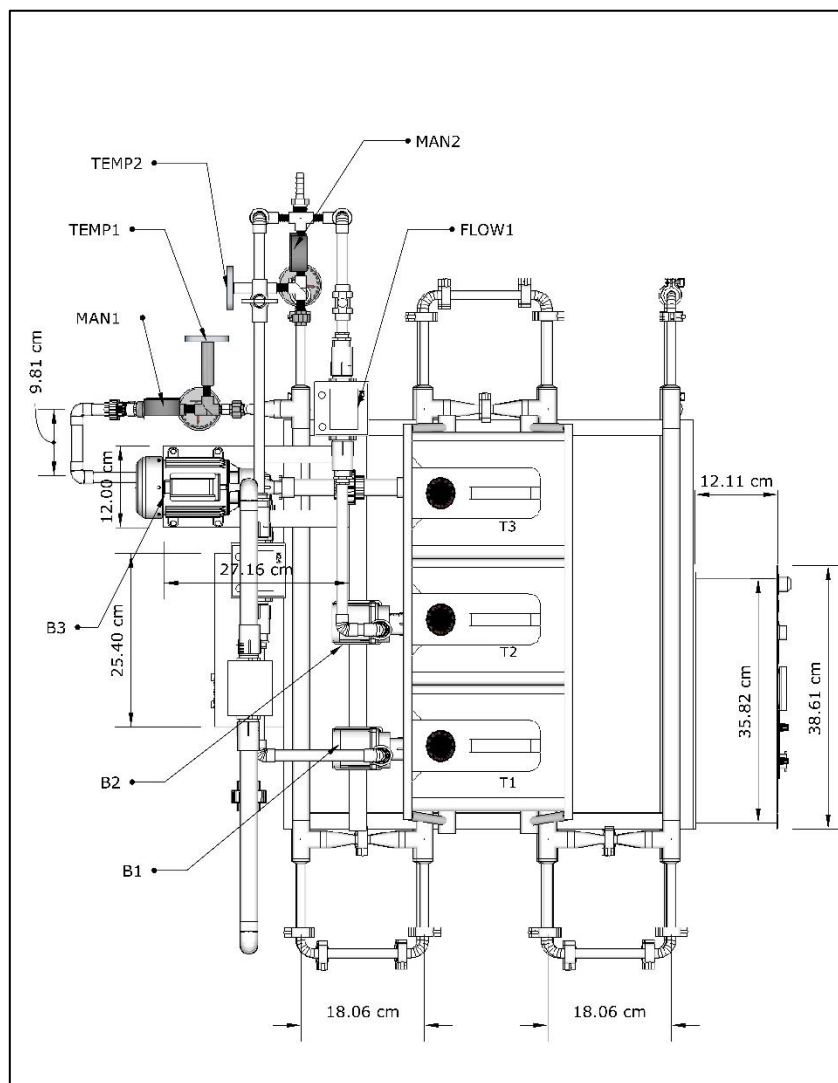


Ilustración 7

(B1) Bomba 1
 (B2) Bomba 2
 (B3) Bomba 3
 (MAN1) Manómetro de ingreso de agua de calentamiento
 (MAN2) Manómetro de ingreso de mezcla reactante

(TEMP1) Termómetro de ingreso de agua de calentamiento
 (TEMP2) Termómetro de ingreso de mezcla reactante
 (FLOW2) Medidor de flujo de tubería de descarga de bomba B2

Continuación de apéndice 1.

Descripción del reactor

El reactor está diseñado para las siguientes aplicaciones: reacción de saponificación del acetato de etilo, reacciones de líquidos orgánicos y ácidos débiles. El reactor puede usarse con variación de velocidades de alimentación de reactivos desde 12 V a 24 V. El caudal de la bomba 3 puede regularse, instalando una válvula de globo de 1", el calentador puede utilizarse en 3 modos: nivel 1, nivel 2 y nivel 3.

Tabla 1

Especificaciones del reactor PFR	
Volumen	1,7 l
Diámetro de tubería de reactor	½ pulg.
Diámetro de tubería de enchaquetamiento	1 pulg.
Potencia máxima de calentador eléctrico	11,8 kW
Potencia máxima de bomba B1	21,5 W
Potencia máxima de bomba B2	21,5 W
Potencia bomba B3	½ hp
Material de tubería de reactor, enchaquetamiento y accesorios.	Acero inoxidable AISI 304 pulido grado alimenticio
Conversión de diseño para reacción de saponificación de acetato de etilo con $V=1$ l/min para reactivos y $V=7$ l/min para agua de calentamiento con HT1 operando a 11,8 kW $T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$ y $P_{amb}=0,84$ atm	99 %

Vida útil del reactor

La eficiencia del reactor y el máximo aprovechamiento de su rendimiento dependen de lo bien que se pongan en práctica las recomendaciones de operación y mantenimiento apropiadas.

La duración esperada del reactor generalmente es pronosticada por el uso promedio semestral. La vida útil de reactor es de aproximadamente 15 años con un uso moderado.

Continuación de apéndice 1.

Sección de operación

Medidores e indicadores

Los medidores proporcionan indicaciones del funcionamiento del reactor. Asegúrese de que estén en buenas condiciones de operación.

Las variaciones evidentes en las lecturas de los medidores indican posibles problemas del medidor o del reactor. Los problemas también pueden estar indicados por las lecturas de los medidores que cambian aun cuando sus lecturas estén dentro de las especificaciones. Determine y corrija la causa de cualquier variación significativa en las lecturas.

Voltímetro digital

Ilustración 8



Este medidor indica el voltaje de las bombas de corriente directa (DC) B1 y B2 tiene un rango de medición de 3,2 V a 40 V.

El reactor está equipado con dos voltímetros en la codificación de los planos pueden verse con los códigos VOLT1 y VOLT2

Los voltajes de operación de las bombas B1 y B2 son 12 V a 24 V, si el voltímetro indica un valor por debajo

o superior al rango anterior proceda a corregir el voltaje con el siguiente procedimiento:

1. Tratar de regular el voltaje con las perillas POT1 y POT2.
2. Si el error persiste pulse el botón de paro de emergencia S1.
3. Desconecte el reactor del tomacorriente.
4. Revise los componentes eléctricos guiándose con el plano eléctrico del reactor.
5. Desconecte las bombas B1 y B2 del circuito eléctrico
6. Con un multímetro digital mida los voltajes antes del regulador de voltaje LM317, el valor debe ser de 24 a 26 V, si este valor es superior indica un fallo en la fuente de voltaje de 24 V.
7. Este componente tiene un circuito eléctrico complejo, por lo que se recomienda que un técnico en electrónica certificado lo revise. A continuación se muestra:

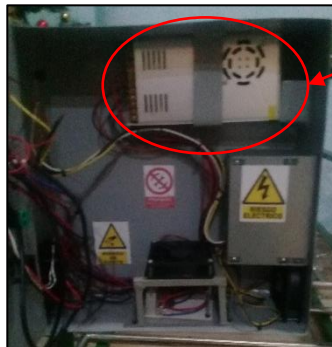


Ilustración 9

Continuación de apéndice 1.

8. Si los voltajes anteriores al regulador LM317 son correctos, revise los capacitores C1, C2, C3 y C4, Las resistencias R1 y R2. Si el problema no corresponde a ninguno de los componentes anteriores busque ayuda de un técnico certificado.

Voltímetro análogo

Ilustración 10



Este medidor indica el voltaje de la bomba B3 de corriente alterna (AC) y tiene un rango de medición de 0 a 300 V.

El reactor está equipado con un voltímetro análogo en la codificación de los planos puede verse con el código VOLT3.

El voltaje de operación de la bomba B3 tiene un rango de 108 a 120 V, si el voltímetro indica un valor por debajo o superior al rango anterior proceda a revisar el sistema eléctrico con el siguiente procedimiento:

1. Pulse el botón de paro de emergencia S1.
2. Desconecte el reactor del tomacorriente.
3. Revise la conexión de la bomba B3.
4. Verifique que los cables estén en buenas condiciones.
5. Revise posibles cortocircuitos eléctricos.
6. Verifique el voltaje de entrada al reactor en el tomacorriente 120V.
7. Si las mediciones anteriores están correctas, con un multímetro proceda a medir el voltaje de entrega a la bomba B3.
8. Si el voltaje está en el rango de operación normal, el voltímetro análogo está dañado o puede estar mal calibrado. En este caso sustituya el voltímetro por uno nuevo.

Termómetros

Ilustración 11



Este medidor indica la temperatura de los flujos de reactivos, productos, agua de ingreso y agua de salida, tiene un rango de medición de -10 a 120 °C.

El reactor está equipado con cuatro termómetros analógicos bimetálicos de acero inoxidable con conexión roscada 1/4 pulg. rosca NPT, en la codificación de los planos pueden verse con los códigos TEMP1, TEMP2, TEMP3 Y TEMP4.

La temperatura máxima de operación a la cual está diseñado el reactor es 95°C, los empaques de las conexiones clamp no soportan temperaturas mayores a los 100 °C.

Si alguno de los cuatro termómetros indica una temperatura superior a los 95 °C realice el procedimiento que a continuación se describe:

1. Pulse el botón de paro de emergencia.
2. Desconecte el calentador eléctrico HT1 del tomacorriente de 240 V.
3. Desconecte el reactor del tomacorriente de 120 V.

Continuación de apéndice 1.

4. Compruebe que los termómetros estén bien calibrados, para ello puede utilizar otro termómetro con una mejor trazabilidad.
5. Si algún termómetro no está bien calibrado sustitúyalo. Realice nuevamente una prueba funcionamiento del reactor. Si las mediciones de temperatura vuelven a los rangos normales de operación, el problema está resuelto.
6. Si el problema no se debe a los termómetros continúe al paso 7.
7. Contacte a un técnico de calentadores de agua de paso certificado, para que diagnostique el calentador.

Manómetros

Ilustración 12



Este medidor indica la presión de los flujos de reactivos, productos, agua de ingreso y salida, tienen un rango de medición de 0 a 60 psi.

El reactor está equipado con cuatro manómetros de Bourdon de acero inoxidable con conexión roscada 1/4 pulg. rosca NPT, en la codificación de los planos pueden verse con los códigos MAN1, MAN2, MAN3 y MAN4.

La máxima presión de sistema se da en la tubería de descarga de la bomba 3 donde la presión puede alcanzar los 14 PSI en picos de operación.

La presión de operación normal en los manómetros MAN3 y MAN4 por lo general ronda en valores muy cercanos a 0 psi, la presión de MAN2 por lo general oscila entre 1 a 2 psi, y MAN4 presenta valores entre 11 a 14 psi. Si alguno de los cuatro manómetros indica un valor de presión que no está en el rango de operación normal. Realice el siguiente procedimiento de inspección:

1. Si la presión es muy elevada (mayor a 25 PSI) pulse el botón de paro de emergencia.
2. Verifique que los deje que los fluidos salgan del reactor por gravedad.
3. Verifique con los manómetros que la presión disminuye.
4. Si la presión no disminuye y los líquidos no salen por gravedad, verifique que las mangueras de salida de agua y productos no estén aplastadas o con dobleces que impidan el paso del flujo.
5. Si la sobre presión fue provocada por un doblez o una condición anormal de las mangueras el problema está resuelto, en caso contrario seguir al paso 6.
6. Verificar la bomba B3, con un multímetro medir corriente, voltaje.
7. Comunicarse con un técnico en bombas si los parámetros anteriores son correctos.

Continuación de apéndice 1.

Uso general para reacción química

El reactor está diseñado para optimizar la reacción de saponificación de acetato de etilo con concentraciones iniciales de 0,3 M de NaOH y 0,3M de acetato de etilo, con temperatura inicial de 25 °C. Sin embargo, el reactor tiene varios parámetros que pueden modificarse para trabajar con otras reacciones químicas. * El flujo de agua de calentamiento puede regularse instalando una válvula de globo en la tubería de descarga de la bomba B3. A continuación se muestra el proceso general para utilizar el reactor con una reacción química:

1. Definir la reacción a utilizar.
2. Definir los parámetros de operación: Flujo a alimentación de reactivos, flujo de alimentación de agua, nivel de operación de calentador eléctrico.
3. Calibre los flujos de alimentación de reactivos y productos de acuerdo al procedimiento "Calibración de bomba B1 y B2".
4. Calibre el flujo de agua de alimentación con la válvula de globo*. Si no ha instalado una válvula de globo omita este paso.
5. Verifique que las válvulas VALV1 y VALV2 estén cerradas.
6. Trasvase los reactivos, productos y agua desmineralizada a los tanques de almacenamiento T1, T2 y T3 respectivamente, siguiendo el "Procedimiento de trasvasado de reactivos y agua" en la sección de Operación.
7. Verifique que el botón de paro de emergencia no esté pulsado.
8. Coloque el interruptor S3 en la posición de encendido.
9. Coloque los interruptores S4, S5 y S6 en la posición de apagado.
10. Verifique que el interruptor S2 este en la posición de apagado.
11. Conecte la espiga del reactor a un tomacorriente de 120 V.
12. Conecte la espiga del calentador HT1 al tomacorriente de 240V.
13. Verifique que la luz piloto D2 este encendida.
14. Coloque la manguera de recirculación de agua en el tanque T3.
15. Coloque la punta de la manguera de productos en un recipiente para almacenar los productos. Si desea puede colocarla en la tubería de desechos y seguir el "Procedimiento de muestreo para monitoreo de parámetros de conversión".
16. Coloque el interruptor S2 en la posición de encendido.
17. Regule el voltaje de la bomba B1 con la perilla POT1 al voltaje de operación determinado con la calibración.
18. Regule el voltaje de la bomba B2 con la perilla POT2 al voltaje de operación determinado con la calibración.
19. Si ha instalado una válvula de globo para la bomba B3, abra por completo la válvula. En caso contrario omitir este pasó.
20. Coloque simultáneamente los interruptores S4 y S5 en las posiciones de encendido. Al mismo tiempo abra las válvulas VALV1 y VALV2.
21. Espere 3 minutos a que el sistema se estabilice.
22. Coloque el interruptor S3 en la posición de encendido.
23. Si se tiene una válvula de globo regule el caudal de acuerdo a la calibración. En caso contrario omitir este pasó.
24. Espere 2 minutos.
25. Comience a realizar la toma de muestras para evaluación de conversión, de acuerdo con el "Procedimiento de muestreo para monitoreo de parámetros de conversión".
26. Coloque los interruptores S4, S5 y S6 en lo posición de apagado.
27. Trasvase agua a los tanques T1, T2 hasta el nivel de 10 l.
28. Encienda la bomba B1 con el interruptor S4.

18

Continuación de apéndice 1.

29. Espere a que el nivel del líquido del tanque T1 llegue hasta 1 cm por encima de la tubería de succión de la bomba B1.
30. Apague la bomba B1 con el interruptor S4.
31. Encienda la bomba B2 con el interruptor S5.
32. Espere a que el nivel de líquido del tanque T2 llegue hasta 1 cm por encima de la tubería de succión de la bomba B2.
33. Apague la bomba B2 con el interruptor S5.
34. Si va dejar de utilizar el reactor por un largo tiempo se debe vaciar el tanque T3. En caso contrario el agua de calentamiento se puede dejar almacenada para reutilizarse.
35. Coloque el interruptor S3 en la posición de apagado.
36. Coloque el interruptor S2 en la posición de apagado.
37. Espere a que los voltímetros se apaguen.
38. Desconecte la espiga del reactor del tomacorriente de 120 V.
39. Desconecte la espiga del calentador HT1 del tomacorriente de 240 V.

Calibración de bomba B1 y B2

Las bombas B1 y B2 son idénticas, por lo tanto, el procedimiento de calibración de ambas es el mismo.

1. Verifique que la válvula VALV1 esté cerrada.
2. Prepare 20 l de la solución o líquido a calibrar.
3. Coloque 10 l del líquido a calibrar en el tanque de almacenamiento T1.
4. Verifique que el botón de paro de emergencia no esté pulsado.
5. Verifique que los interruptores S2, S3, S4, S5 y S6 este en la posición de apagado.
6. Conecte el reactor al tomacorriente de 120 V.
7. Encienda el reactor con el interruptor S2.
8. Encienda el sistema de enfriamiento eléctrico con el interruptor S3.
9. Regule el voltaje de la bomba B1 con la perilla POT 1 en 12 V.
10. Coloque simultáneamente el interruptor S4 y la válvula VALV1 en la posición de encendido y en la posición de abierto respectivamente.
11. Mida 30 segundos con un cronómetro y simultáneamente tome el volumen de líquido con un recipiente.
12. Repita el paso 10 dos veces más.
13. Apague la bomba B1 con el interruptor S4.
14. Repita los pasos 7 al 12 seis veces más variando el voltaje en 14, 16, 18, 20, 22 y 24 V respectivamente. Si el nivel del líquido está 3 cm por encima del nivel de la tubería de succión de la bomba B1 recargue el líquido hasta el nivel de 10 l.
15. Apague el reactor con el interruptor S2.
16. Luego de realizar todas las muestras utilice un balón aforado y una pipeta para medir volumen de agua recolectado en cada muestra.
17. Calcule el flujo de líquido en l/min para cada muestra.
18. Calcule el promedio de flujo de líquido para cada voltaje.
19. Construya una gráfica de flujo volumétrico vs voltaje.
20. Aplicando métodos matemáticos determine un modelo lineal o polinomial que se ajuste a la curva de calibración del paso 19.
21. Repita los pasos 1 al 20 para calibrar la bomba B2, utilizando la válvula VALV2, tanque T2, interruptor S5, perilla POT2 en lugar de; VALV1, T1, S5 y POT2, debido a que estos componentes corresponden al sistema eléctrica de la bomba B1.

Continuación de apéndice 1.

Calibración de bomba B3

La bomba B3 no está equipada con un sistema de regulación de caudal. Si usted desea puede instalar una válvula de globo en la tubería de descarga de la bomba antes del calentador HT1. Sin embargo la calibración de la bomba con este accesorio se debe realizar por el usuario. En este apartado la calibración no considera dicho accesorio.

1. Verifique que la punta de la manguera de recirculación de agua este colocada en el tanque T3.
2. Llene el tanque T3 con agua desmineralizada hasta el nivel de 10 l.
3. Verifique que el botón de paro de emergencia no este pulsado.
4. Verifique que los interruptores S2, S3, S4, S5 y S6 estén en la posición de apagado.
5. Conecte el reactor al tomacorriente de 120 V.
6. Verifique que el calentador HT1 este desconectado del tomacorriente, para ello observar que la luz piloto D2 este apagada.
7. Coloque la punta de la manguera de recirculación de agua en un recipiente para desechos.
8. Encender el reactor con el interruptor S2.
9. Encender el sistema de enfriamiento del reactor con el interruptor S3.
10. Encender la bomba B3 con el interruptor S6.
11. Esperar 1 minuto a que se estabilice el sistema y se llene de agua la tubería.
12. Tomar la manguera y con un recipiente intervenir el flujo de agua por 1 minuto, para medir el tiempo se recomienda utilizar un cronómetro.
13. Apagar la bomba B3 con el interruptor S3.
14. Colocar la manguera en el tanque T3.
15. Con un balón aforado o una probeta medir el volumen de agua recolectado y anotarlo.
16. Trasvase el agua recolectada al tanque T3.
17. Repita los pasos 9 al 16 tres veces más.
18. Conecte el calentador HT1 al tomacorriente de 240 V.
19. Verifique que la Luz piloto D2 este encendida.
20. Verifique que la punta de manguera de recirculación de agua este en el tanque T3.
21. Encender la bomba B3 con el interruptor S6.
22. Configurar el calentador HT1 con los botones BOT1 y BOT2 en el nivel 1.
23. Esperar 1 minuto para que el calentador se estabilice.
24. Tomar la manguera y con un recipiente intervenir el flujo de agua por 1 minuto, para medir el tiempo se recomienda utilizar un cronómetro.
25. Apagar la bomba B3 con el interruptor S3.
26. Colocar la manguera en el tanque T3.
27. Con un balón aforado o una probeta medir el volumen de agua recolectado y anotarlo.
28. Trasvase el agua recolectada al tanque T3.
29. Repetir los pasos 21 al 28 tres veces más, omitiendo los pasos 22 y 23 pues el calentador ya está configurado.
30. Repetir los pasos 21 al 29 dos veces más para los niveles 2 y 3 de potencia del calentador HT1.
31. Verificar que la bomba B3 este apagada.
32. Apagar el sistema de enfriamiento con el interruptor S3.
33. Apagar el reactor con el interruptor S2.
34. Desconectar el reactor del tomacorriente de 120 V.
35. Desconectar el calentador HT1 del tomacorriente de 240 V.

Ilustración 13



Continuación de apéndice 1.

Procedimiento de muestreo para monitoreo de parámetros de conversión

Para realizar una correcta toma de una muestra para medir la conversión de la reacción se recomienda el siguiente procedimiento:

1. La manguera de productos de la reacción debe estar colocada en un recipiente de desechos de aproximadamente 20 l o 5 galones.
2. Colocar en un beacker de 50 ml el conductímetro digital Pancellent, y configurarlo en uS/cm con temperatura en grados Celsius.
3. Cuando se requiera realizar una toma de muestra, con la mano colocar la punta de manguera en el beacker de 50 ml.
4. Colocar la manguera nuevamente en el recipiente de desechos.
5. Anotar la medida de conductividad eléctrica que indica el medidor de conductividad.
6. Repetir los pasos 2 al 5 la cantidad de veces necesarias que se deba realizar muestreos de acuerdo al diseño experimental.

Procedimiento de trasvasado de reactivos y agua

Para evitar accidentes debido al llenado de los tanques T1, T2 y T3, se recomienda el siguiente procedimiento para trasvasar de manera segura los reactivos y agua a los tanques:

1. Colocar lo líquidos en un beacker de 5 l o mayor, de preferencia que tenga asa para sujetarlo como una mano.
2. Si el reactor está colocado en una posición alta, utilizar una escalera de doble banda para subir.
3. Utilizando un embudo verter el líquido en el tanque T1, T2 o T3, de acuerdo al líquido que se esté trasvasando.
4. No se debe rebalsar el embudo y el beacker debe de inclinarse con un ángulo máximo de 0 grados sobre la horizontal. Esto para evitar derrames sobre el tablero eléctrico.
5. Si el reactor no se utilizará de manera inmediata, tape los tanques T1, T2 o T3 con los tapones respectivos.
6. Limpie la zona superior de los tanques siempre que se haya trasvasado un líquido.
7. Verifique que no se realizaron derrames de líquidos, si hay derrame seque inmediatamente la partes.
8. Utilice un paño seco para quitar todo resto de humedad.

Continuación de apéndice 1.

Sección de Mantenimiento

El mantenimiento se define como el conjunto de acciones requeridas para llevar un equipo a condiciones normales de operación, su fin no es mejorar del equipo, sino únicamente asegurar que el equipo o herramienta funcione de manera confiable evitando paros no programados.

La sección de mantenimiento contiene una serie de procedimientos recomendados para mantener la confiabilidad en el reactor, prevenir desgaste de los componentes y corregir errores antes de que ocurran.

Mantenimiento de la carcasa y enchaquetamiento del reactor

El cuerpo de reactor está fabricado por tubería de acero inoxidable AISI 304 ASTM A270 pulida 240 Gritt de 1/2 pulgada de diámetro. Cuenta con uniones clamp para fácil desmontaje.

La tubería de acero inoxidable es fácil de limpiar, regularmente sólo basta limpiar con agua y jabón, enjugar con agua limpia y secar con un paño.

La frecuencia de limpieza y mantenimiento de los tubos de aceros inoxidables puede verse en el apartado “Programa de mantenimiento del reactor” de la sección de Mantenimiento. A continuación, se muestra el proceso de limpieza y mantenimiento rutinario del reactor, posteriormente se describe acciones correctivas para otros problemas más complejos.

1. Verificar que el reactor esta desconectado de cualquier fuente de electricidad.
2. Verificar que no hay líquidos dentro de la tubería del reactor.
3. Colocarse equipo de protección personal: botas punta de acero, guantes de neopreno, lentes de seguridad, mascarilla de gases, bata de laboratorio y bata impermeable.
4. Con una llave inglesa ajustable (cangrejo) aflojar las abrazaderas clamp de las secciones de tubería: TUB2, TUB4, TUB6, TUB8, TUB10, TUB12, TUB14, TUB16, TUB18, TUB 20, TUB 22, TUB 24, TUB26, TUB28 Y TUB30. Ver ilustraciones 14 y 15.

Ilustración 14

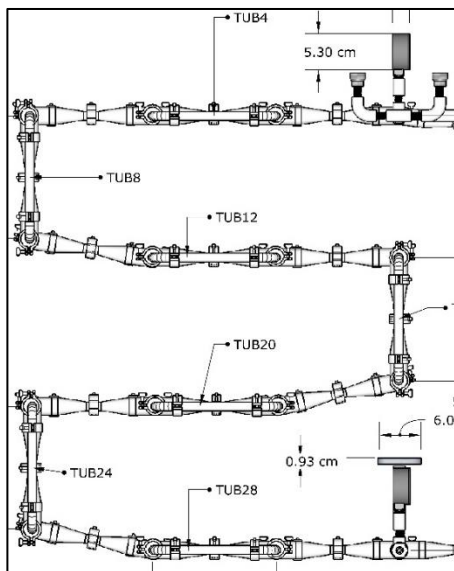
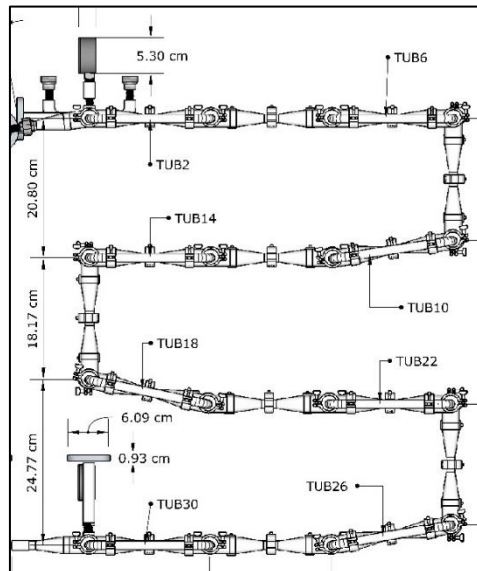


Ilustración 15



Continuación de apéndice 1.

5. Con la mano terminar de aflojar las abrazaderas del paso 4. En la ilustración 16 se muestra un ejemplo de las secciones TUB2, TUB4, etc. sin las abrazaderas.

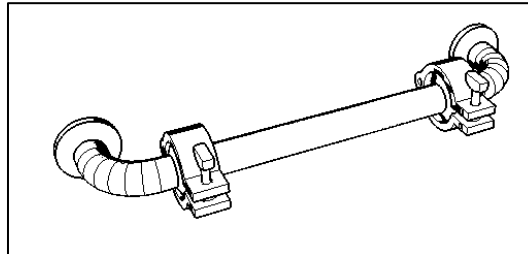
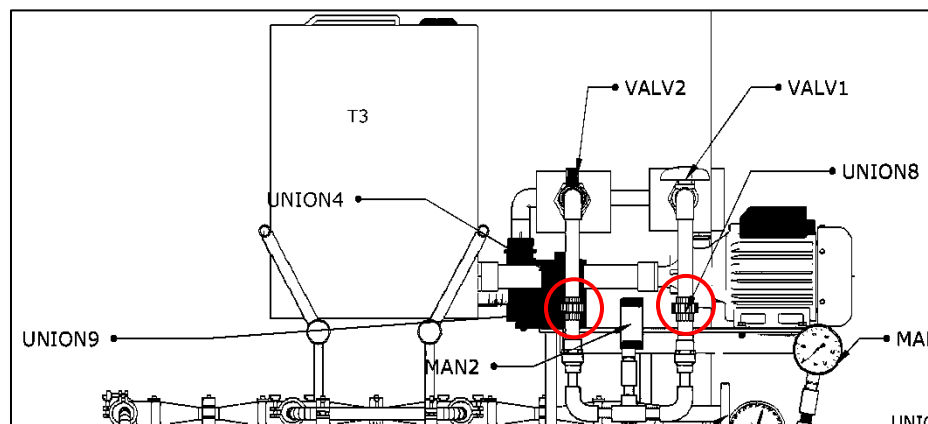


Ilustración 16

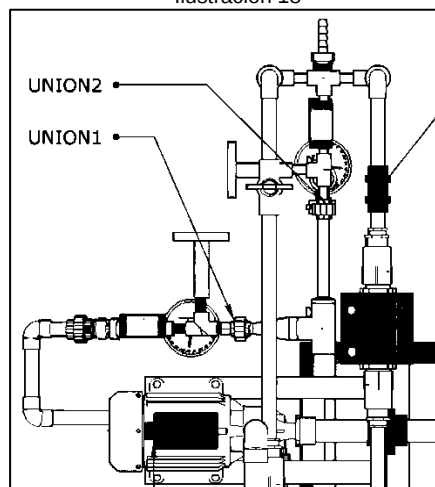
6. Con una llave para tubos Stillson aflojar y separar las uniones universales UNION8 y UNION9, ver la ilustración 17:

Ilustración 17



7. Con la llave inglesa y la llave Stillson aflojar la unión universal de acero inoxidable UNION2:

Ilustración 18



Continuación de apéndice 1.

8. La sección de unión de flujos de reactivos (ver ilustración 19) de la bomba B1 y bomba B2, puede ser desensamblada y limpiar los niples, codos, tee, etc. de manera más rigurosa. Esto queda a discreción del usuario que deberá analizar el grado de suciedad de la tubería.

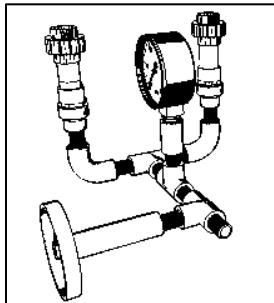


Ilustración 19

9. Prepare una mezcla de agua con jabón.
10. Proceda a limpiar el interior de la tubería con un cepillo lavaprobetas y la mezcla del paso 9. Debe limpiar las secciones de tubería TUB1, TUB2 a la sección TUB31. A continuación, se muestra una ilustración de las secciones impares TUB1, TUB3, TUB 5, etc.

Ilustración 20

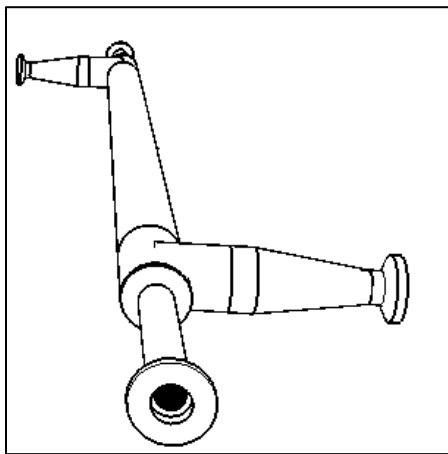


Ilustración 21



11. Con un paño y la mezcla del paso 9, limpie el exterior de las secciones de tubería.
12. Utilizando agua a presión enjuague las secciones tubería para retirar el jabón, aplique agua a presión en el interior de la tubería.
13. Deje escurrir las secciones de tubería para eliminar el exceso de agua.
14. Con un paño seco proceda a secar las secciones de tubería.
15. Utilizando las herramientas descritas en pasos anteriores vuelva a ensamblar las secciones de tuberías.

A continuación, se muestra una tabla de para solución de diversos problemas que se pueden presentar en la carcasa del reactor.

Continuación de apéndice 1.

Tabla 2

PROBLEMA	HERRAMIENTAS DE SOLUCIÓN	DESCRIPCIÓN
Suciedad mediana	Jabón o detergente suave, agua caliente	Pasar una esponja, aclarar con agua limpia y pasar un trapo seco. Seguir la dirección del pulimentado para un mejor resultado. Al secar cerciorarse que no se dejan marcas rayadas.
Manchas persistentes y decoloración en todos los acabados.	Solución suave de limpieza, limpiadores poco abrasivos y especialmente limpiadores para aceros inoxidable.	Utilizar un trapo, esponja, o cepillo de fibra (nylon suave o cerda natural). Aclarar bien con agua limpia y secar. Seguir las líneas del pulido.
Depósitos de minerales, incrustaciones por dureza de agua.	Solución compuesta ácido acético concentrado al 25% en volumen.	Remojar las secciones de tubería en la solución, cepillar para aflojar y aclarar bien con agua limpia.
Aceite o marcas de grasa en todos los acabados.	Disolventes orgánicos, acetona, limpiadores para acero inoxidable, tricloroetanol. La grasa endurecida puede ser ablandada de antemano con amoníaco.	Limpiar con jabón y agua caliente, aclarar con agua limpia y secar. Seguir las líneas del pulido.
Oxidación (manchas) y otros resultados de la corrosión. "hierro libre" incrustado o adherido.	Las manchas pueden ser quitadas usando limpiadores ácidos. Para esto prepare una solución al 7% en volumen de ácido clorhídrico.	Aclarar bien con agua limpia, Usar guantes de neopreno, mezclar la solución en un recipiente de vidrio.
Perforaciones en la tubería por golpes o daños de impacto.	Comuníquese con un técnico en mantenimiento industrial (soldador, mecánico, etc.) para que evalúe el daño.	Dependiendo del daño le recomendará reparar la pieza, o fabricar una nueva.

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 1.

Mantenimiento de la bomba B3

Limpieza del impulsor y ventilador:

1. Desconecte el reactor de los tomacorrientes de 120 V y 240 V.
2. Con una cuchilla quite la cinta de aislar del empalme de cables de alimentación de la bomba B3.

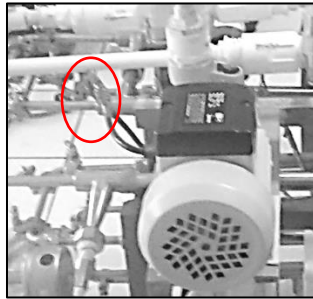


Ilustración 22

3. Con una llave inglesa ajustable y una llave Stillson retire las tuberías de descarga y succión de la bomba B3.
4. Con un destornillador de cruz y una llave de cola corona retire los tornillos de sujeción de la bomba B3.

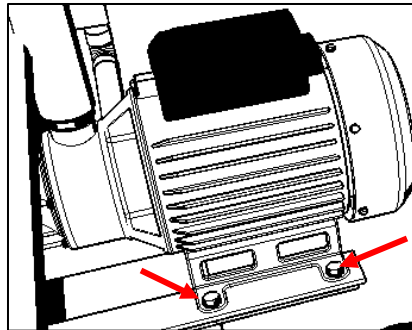


Ilustración 23

5. Con un destornillador retire la cubierta del ventilador ubicado en la parte posterior de la bomba.

Ilustración 24



Ilustración 25



Continuación de apéndice 1.

6. Con una llave hexagonal retire los tornillos de la cubierta del impulsor.

Ilustración 26



Ilustración 27



7. Con ayuda de dos destornilladores planos retire el impulsor.

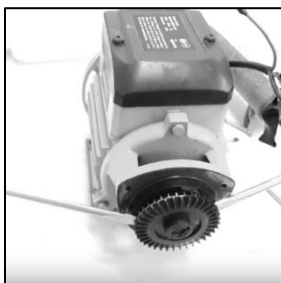


Ilustración 28

8. Limpie el ventilador con un cepillo de cerdas naturales.
9. Limpie el impulsor remojándolo en una solución decapante para retirar el óxido.
10. Limpie suavemente el impulsor con una esponja.
11. Con agua retirar el exceso de óxido.
12. Una vez limpios el ventilador y la turbina. Proceda a colocarlos en su lugar con ayuda de un martillo, dando golpes suaves.
13. Colocar la cubierta del ventilador.
14. Colocar la cubierta del impulsor.
15. Atornillar la cubierta del impulsor.
16. Colocar la bomba en el soporte correspondiente.
17. Colocar los tornillos y tuercas de sujeción de la bomba.
18. Instalar las tuberías de succión y descarga de la bomba.

Limpieza de los tanques T1, T2 y T3

Los tanques de alimentación de reactivos y de agua del sistema de calentamiento deben permanecer limpios, libres de partículas extrañas y libres de sarro. Para ellos es necesario realizar un procedimiento de limpieza pues la suciedad puede dañar los impulsores de las bombas centrífugas.

1. En los tanques T1 y T2 es necesario agregar una solución al 25% v/v de ácido acético al nivel de 10 l.
2. Dejar reposar la solución por 3 minutos.
3. Encender el reactor.
4. Encender la bomba B1 y esperar a vaciar el tanque T1.
5. Apagar la bomba B1.
6. Encender la bomba B2 y esperar a vaciar el tanque T2.
7. Apagar el tanque T2.

Continuación de apéndice 1.

8. El tanque T3 puede ser desconectado de la bomba B3 utilizando una llave Stillson. Para ellos es necesarios aflojar la unión universal UNION4.
9. Lavar el tanque con agua y jabón.
10. Limpiar con una solución igual a la del paso 1.
11. Secar el tanque T3.
12. Volver a colocarlo en el soporte correspondiente.
13. Conectar la unión universal UNION4.

Mantenimiento eléctrico

1. Con la llave correspondiente abrir la puerta del tablero eléctrico



Ilustración 29

2. Realizar una inspección visual de los componentes del tablero eléctrico.
3. Revisar empalmes.
4. Si hay algún empalme flojo, apretarlo con ayuda de un alicate.
5. Revisar las soldaduras de estaño de los circuitos de regulación de voltaje de las bombas B1 y B2.
6. Si alguna soldadura está dañada repararla con estaño y cautín.
7. Apretar los tornillos de las borneras de distribución de voltaje de la fuente
8. Apretar los tornillos de sujeción de los ventiladores.
9. Apretar los tornillos de sujeción de la fuente de poder de 12V.
10. Apretar los tornillos de sujeción de la fuente de poder de 24V.
11. Revisar los interruptores S2, S3, S4, S5 y S6.
12. Revisar la conexión del botón de paro de emergencia.
13. Aplicar limpia contactos (Circuit Clean marca IM de Alkemy) en las borneras de la fuente de 24 V, Luz piloto D2, Luz piloto D1 y botón de paro de emergencia.
14. Revisar los cables eléctricos.
15. Reemplazar los cables deteriorados.
16. Revisar la espiga 120 V del reactor.
17. Apretar los bornes de la espiga 120 V.
18. Revisar la espiga 240 V del calentador HT1.
19. Apretar los bornes de la espiga 240 V.
20. Revisar los tornillos de sujeción de calentador HT1.

Continuación de apéndice 1.

21. Revisar las baterías de los medidores de flujo FLOW1, FLOW2, FLOW3. Para ello utilizar un destornillador de cruz y retirar la placa metálica de la parte posterior.



Ilustración 30

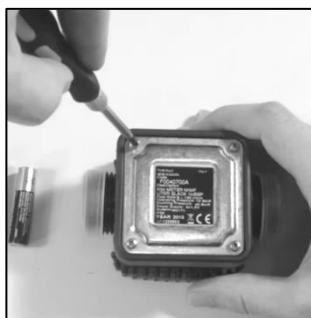


Ilustración 31



Ilustración 32

22. Con un multímetro mida el voltaje de las baterías, de ser necesario reemplace las baterías por unas nuevas (baterías AA).

Continuación de apéndice 1.

Listado de repuestos del reactor y proveedores

RESPUESTO	PROVEEDORES
-Abrazadera clamp 1/2 pulgada SS304 -Codo clamp 90° 1/2 pulgada SS304 -Ferrula clamp corta 1/2 pulgada SS304 -Tubo de acero inoxidable ASTM A270 SS304 D= 1 pulgada D=1/2 -Reducidores concéntricos de 1 a 1/2 pulgada soldables SS304 pulido sanitario -Tee soldable 1 pulgada SS304 pulido sanitario -Empaque clamp 1/2 pulgada	 42 calle 22-17 zona 12, Colonia industrial, Santa Elisa, Guatemala. PBX: 23988413, 23868787. http://www.mainco.com.gt/ Correo: inoxidable@mainco.com.gt  Soluciones en Acero S.A. Ofibodegas Fraijanes Ofibodega 5 Km 17 calle a Monte Vista Club, Guatemala. Tel: 66243400 Correo: sales@enaceroinox.com
-Bomba DC AEO-WP501210	 733 9na. Avenida, City of Industry, California 91745. USA Tel: +1 (626) 581 6845 http://www.aeoselect.com/index.html Correo: sales@aeoselect.com
-Bomba periférica Pretul ½ Hp	 Tel: +502 2499-9999 https://cemaco.com/
-Repuestos electrónicos	 10 Calle 0-26, Zona 10, 1010, Guatemala, frente a Restaurante Altuna y edificio Corporativo Reforma 10 PBX (502) 2498 7000 Ext. 2801, 2806 y 2820 Correo: tiendareforma@steren.com.gt  11 avenida 31-47 Zona 12 2do. Nivel Local C Tel: (502) 2476-7800 http://electronicarych.com/ Correo: ventas@electronicarych.com

Continuación de apéndice 1.

	 12av. 9-76 zona 1, Ciudad de Guatemala. Tel: 2220-3612, 41790370 https://www.electronicasmd.com/ Correo: guatemalaSMD@gmail.com
-Fuente de 24V DC.	 Condado El Naranjo 23 Calle 14-75 Z.4 Empresarial Fiori II, Bodega 2, Mixco, Guatemala, Guatemala Tel: +502 2311 9000 https://giganet.com.gt/
-Fuente de 12V DC.	 6a Avenida 8-28 Zona 9 Guatemala, Guatemala Tel: (502) 2328-0000 http://www.intelaf.com/index.aspx Correo: zona9@intelaf.com
-Accesorios roscados NPT SS304 D= 1/4 pulg.	 42 calle 22-17 zona 12, Colonia industrial, Santa Elisa, Guatemala. PBX: 23988413, 23868787. http://www.mainco.com.gt/ Correo: inoxidable@mainco.com.gt COFESA, S.A. Corporación Ferretera y Servicios Agroindustriales, S.A. 18 Calle 18-07, zona 12, Guatemala, C.A. Tel: 24727769, 24745300  Tel: 22215523 http://tricombus.com/inicio/ Correo: ventas@tricombus.com  Blvd. Los Próceres 13 Avenida 17-33 zona 10. Guatemala. Guatemala Tel: 2379-5200 https://www.novex.com.gt/

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 1.

Programa de mantenimiento del reactor

ACTIVIDAD	FRECUENCIA
Mantenimiento de la carcasa y enchaquetamiento	Semestral
Mantenimiento de bomba B3	Cada 4 Meses
Limpieza de los tanques	Mensual
Mantenimiento eléctrico	Semestral
Inspección y apretado de abrazaderas, uniones universales, tornillos de sujeción, accesorios roscados	Mensual
Limpieza general del reactor y tablero eléctrico	Trimestral
Inspección y mantenimiento de soportes: aplicación de pinturas, limpiezas de soportes.	Anual
Calibración de manómetros	Cada 2 años
Calibración de termómetros	Cada 2 años
Calibración de medidores de flujo	Semestral
Reemplazo de empaque clamp	Cada 4 años
Mantenimiento y diagnostico preventivo de calentador eléctrico ¡Contactar a un técnico especializado!	Cada 2 años
Reemplazo de mangueras de vinil de recirculación de agua y productos	Anual

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Datos originales

Tabla I. Toma de datos de prueba 1 de validación del reactor

PRUEBA NO. 1 DE 3																		
	Reactor										Enchaquetamiento							
	[AC]o (M)	[NaOH]o (M)	To (°C)	Po (PSI)	Tf (°C)	Pf (PSI)	K (uS/cm)	K ∞ (uS/cm)	V NaOH AC	V V AC (L/min)	Nivel Heater	To (°C)	Tf (°C)	V H ₂ O (L/min)	Po (PSI)	Pf (PSI)		
R1	0.3	0.3	23	1	37.70	0	5508	7322	20	20	1.023	1.029	3	40.0	39.0	7.071	12	0.00
R2	0.3	0.3	23	1	38.00	0	5501	7306	20	20	1.023	1.029	3	40.0	39.0	7.071	12	0.00
R3	0.3	0.3	23	1	37.90	0	5502	7306	20	20	1.023	1.029	3	40.0	39.0	7.071	12	0.00
R4	0.3	0.3	23	1	37.80	0	5498	7328	20	20	1.023	1.029	3	40.0	39.0	7.071	12	0.00

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla II. Toma de datos de prueba 2 de validación del reactor

PRUEBA NO. 2 DE 3																
Reactor											Enchaquetamiento					
	[AC] _o (M)	[NaOH] _o (M)	To (°C)	Po (PSI)	Tf (°C)	Pf (PSI)	K (us/cm)	K _∞ (us/cm)	V NaOH	V AC	Nivel Heater	To (°C)	Tf (°C)	V H ₂ O (L/min)	Po (PSI)	Pf (PSI)
R1	0.3	0.3	23	1	41.50	0	5508	7306	20	20	3	44.0	42.5	7.068	12	0.00
R2	0.3	0.3	23	1	41.70	0	5503	7322	20	20	3	44.0	42.3	7.068	12	0.00
R3	0.3	0.3	23	1	41.70	0	5514	7322	20	20	3	44.0	42.7	7.068	12	0.00
R4	0.3	0.3	23	1	41.50	0	5505	7330	20	20	3	44.0	42.3	7.068	12	0.00

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla III. Toma de datos de prueba 3 de validación del reactor

PRUEBA NO. 3 DE 3																
	Reactor										Enchaquetamiento					
	[AC]o (M)	[NaOH]o (M)	To (°C)	Po (PSI)	Tf (°C)	Pf (PSI)	K (uS/cm)	K ∞ (uS/cm)	V NaOH	V AC	Nivel Heater	To (°C)	Tf (°C)	V H ₂ O (L/min)	Po (PSI)	Pf (PSI)
R1	0.3	0.3	23	1	43.70	0	5526	7332	20	1.023	20	47.0	44.0	7.058	12	0.00
R2	0.3	0.3	23	1	43.30	0	5520	7332	20	1.023	20	47.0	44.0	7.058	12	0.00
R3	0.3	0.3	23	1	43.50	0	5526	7332	20	1.023	20	47.0	44.0	7.058	12	0.00
R4	0.3	0.3	23	1	43.70	0	5526	7332	20	1.023	20	47.0	44.0	7.058	12	0.00

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla IV. Toma de datos de calibración de bomba B1

Voltaje (V)	Repetición	Tiempo (min.s)	Volumen (l)	Temperatura (°C)
12	1	2,01	1,260	25
	2	2,02	1,245	25
	3	2,01	1,222	25
16	1	2,01	1,704	25
	2	2,00	1,714	25
	3	2,02	1,718	25
20	1	1,59	1,983	25
	2	1,58	2,035	25
	3	2,01	2,086	25
24	1	2,02	2,346	25
	2	1,58	2,226	25
	3	2,01	2,326	25

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Toma de datos de calibración de bomba B2

Voltaje (V)	Repetición	Tiempo (min.s)	Volumen (l)	Temperatura (°C)
12	1	2,02	1,284	25
	2	2,02	1,258	25
	3	2,00	1,237	25
16	1	1,59	1,750	25
	2	2,00	1,739	25
	3	2,01	1,729	25
20	1	2,01	2,051	25
	2	2,01	2,086	25
	3	2,01	2,086	25
24	1	2,00	2,308	25
	2	2,01	2,283	25
	3	1,59	2,288	25

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla VI. **Toma de datos de calibración de bomba B3**

Nivel de calentador	Repetición	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Volumen (l)
0	1	25	30,00	3,5425
	2	25	31,00	3,6559
	3	25	30,00	3,5490
1	1	37	30,00	3,5370
	2	37	31,00	3,6528
	3	37	31,00	3,6534
2	1	41	31,00	3,6466
	2	41	30,00	3,5440
	3	41	30,00	3,5290
3	1	46	2,00	0,2353
	2	46	2,00	0,2353
	3	46	2,00	0,2353

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Concentraciones molares al infinito de hidróxido de sodio de la prueba 1 del reactor**

Prueba No. 1 del reactor		
Repetición	Muestra No.	[NaOH] $t \rightarrow \infty$ (M)
1	1	0,022
	2	0,030
	3	0,032
2	4	0,016
	5	0,028
	6	0,136
3	7	0,016
	8	0,030
	9	0,022

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla VIII. **Concentraciones molares al infinito de hidróxido de sodio de la prueba 2 del reactor**

Prueba No. 2 del reactor		
Repetición	Muestra No.	[NaOH] $t \rightarrow \infty$ (M)
1	10	0,032
	11	0,028
	12	0,012
2	13	0,016
	14	0,016
	15	0,016
3	16	0,060
	17	0,028
	18	0,016

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Concentraciones molares al infinito de hidróxido de sodio de la prueba 3 del reactor**

Prueba No. 3 del reactor		
Repetición	Muestra No.	[NaOH] $t \rightarrow \infty$ (M)
1	19	0,014
	20	0,028
	21	0,024
2	22	0,012
	23	0,032
	24	0,080
3	25	0,028
	26	0,028
	27	0,028

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla X. **Valores de concentración de hidróxido de sodio en función de la conductividad eléctrica.**

Conductividad eléctrica (S*cm ⁻¹)	Concentración de hidróxido de sodio (mol/l)
3,0*10 ⁻⁶	10 ⁻⁵
2,5*10 ⁻⁵	0,0001
0,0002	0,001
0,002	0,01
0,02	0,1
0,2	1
0,5	6

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Datos calculados

Tabla XI. Errores y conversiones de la prueba 1 del reactor

Repetición	K(uS/m)	[NaOH] _o (M)	[NaOH] _f (M)	Nivel de heater	Conversión experimental (%)	Conversión teórica (%)	Error absoluto (%)	[NaOH] _o (M)	Error absoluto promedio (%)	Conversión experimental promedio (%)
1	0,005526	0,3	0,02765	3	90,7832	99,53	8,7468	0,3	8,7443	90,7857
2	0,005520	0,3	0,02762	3	90,7932	99,53	8,7368			
3	0,005526	0,3	0,02765	3	90,7832	99,53	8,7468			
4	0,005526	0,3	0,02765	3	90,7832	99,53	8,7468			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Errores y conversiones de la prueba 2 del reactor

Repetición	K(uS/m)	[NaOH] _o (M)	[NaOH] _f (M)	Nivel de heater	Conversión experimental (%)	Conversión teórica (%)	Error absoluto (%)	[NaOH] _o (M)	Error absoluto promedio (%)	Conversión experimental promedio (%)
1	0,005508	0,3	0,02756	3	90,8132	99,53	8,7168	0,3	8,7159	90,8141
2	0,005503	0,3	0,02754	3	90,8216	99,53	8,7084			
3	0,005514	0,3	0,02759	3	90,8032	99,53	8,7268			
4	0,005505	0,3	0,02755	3	90,8182	99,53	8,7118			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Errores y conversiones de la prueba 3 del reactor

Repetición	K(uS/m)	[NaOH] _o (M)	[NaOH] _f (M)	Nivel de heater	Conversión experimental (%)	Conversión teórica (%)	Error absoluto (%)	[NaOH] _o (M)	Error absoluto promedio (%)	Conversión experimental promedio (%)
1	0,005508	0,3	0,02756	3	90,8132	99,53	8,7168	0,3	8,7072	90,8228
2	0,005501	0,3	0,02753	3	90,8249	99,53	8,7051			
3	0,005502	0,3	0,02753	3	90,8232	99,53	8,7068			
4	0,005498	0,3	0,02751	3	90,8299	99,53	8,7001			

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 3.

Tabla XIV. **Conversiones de la reacción de saponificación del acetato de etilo de la prueba 1 del reactor**

Prueba No. 1 del reactor					
Repetición	Muestra No.	[NaOH] $t \rightarrow \infty$ (M)	[NaOH] _o (M)	Conversión	Conversión (%)
1	1	0,022	0,3	0,92667	92,66667
	2	0,030	0,3	0,90000	90,00000
	3	0,032	0,3	0,89333	89,33333
2	4	0,016	0,3	0,94667	94,66667
	5	0,028	0,3	0,90667	90,66667
	6	0,136	0,3	0,54667	54,66667
3	7	0,016	0,3	0,94667	94,66667
	8	0,030	0,3	0,90000	90,00000
	9	0,022	0,3	0,92667	92,66667

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Conversiones de la reacción de saponificación del acetato de etilo de la prueba 2 del reactor**

Prueba No. 2 del reactor					
Repetición	Muestra No.	[NaOH] $t \rightarrow \infty$ (M)	[NaOH] _o (M)	Conversión	Conversión (%)
1	1	0,032	0,3	0,89333	89,33333
	2	0,028	0,3	0,90667	90,66667
	3	0,012	0,3	0,96000	96,00000
2	4	0,016	0,3	0,94667	94,66667
	5	0,016	0,3	0,94667	94,66667
	6	0,016	0,3	0,94667	94,66667
3	7	0,060	0,3	0,80000	80,00000
	8	0,028	0,3	0,90667	90,66667
	9	0,016	0,3	0,94667	94,66667

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 3.

Tabla XVI. **Conversiones de la reacción de saponificación del acetato de etilo de la prueba 3 del reactor**

Prueba No. 3 del reactor					
Repetición	Muestra No.	[NaOH] $t \rightarrow \infty$ (M)	[NaOH] ₀ (M)	Conversión	Conversión (%)
1	1	0,014	0,3	0.95333	95,33333
	2	0,028	0,3	0.90667	90,66667
	3	0,024	0,3	0.92000	92,00000
2	4	0,012	0,3	0.96000	96,00000
	5	0,032	0,3	0.89333	89,33333
	6	0,080	0,3	0.73333	73,33333
4	7	0,028	0,3	0.90667	90,66667
	8	0,028	0,3	0.90667	90,66667
	9	0,028	0,3	0.90667	90,66667

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Conversiones al infinito de la reacción de saponificación del acetato de etilo de la prueba 1 del reactor**

Prueba No. 1 del reactor				
Repetición	Muestra No.	Conversión (%)	Promedio de conversión (%)	Promedio de la prueba (%)
1	1	92,66667	92,67	94
	2	90,00000		
	3	89,33333		
2	4	94,66667	94,67	
	5	90,66667		
	6	54,66667		
3	7	94,66667	94,67	
	8	90,00000		
	9	92,66667		

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 3.

Tabla XVIII. **Conversiones al infinito de la reacción de saponificación del acetato de etilo de la prueba 2 del reactor**

Prueba No. 2 del reactor				
Repetición	Muestra No.	Conversión (%)	Promedio de conversión (%)	Promedio de la prueba (%)
1	1	89,33333	89,33	88
	2	90,66667		
	3	96,00000		
2	4	94,66667	94,67	
	5	94,66667		
	6	94,66667		
3	7	80,00000	80,00	
	8	90,66667		
	9	94,66667		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Conversiones al infinito de la reacción de saponificación del acetato de etilo de la prueba 3 del reactor**

Prueba No. 3 del reactor				
Repetición	Muestra No.	Conversión (%)	Promedio de conversión (%)	Promedio de la prueba (%)
1	1	95,33333	95,33	94
	2	90,66667		
	3	92,00000		
2	4	96,00000	96,00	
	5	89,33333		
	6	73,33333		
3	7	90,66667	90,67	
	8	90,66667		
	9	90,66667		

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 3.

Tabla XX. **Conversión promedio de la reacción de saponificación del acetato de etilo del reactor**

Prueba No.	Conversión promedio	Conversión de la reacción al infinito
1	94	92
2	88	
3	94	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Conversiones promedio de pruebas a la salida del reactor y a tiempo infinito**

Prueba No.	Conversión promedio $t \rightarrow \infty$	Conversión promedio a la salida del reactor
1	94	90,78570
2	88	90,81406
3	94	90,82282

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Muestra de cálculo de resultados de validación**

1. Conversión de tiempo en segundos a tiempo en minutos de las corridas de calibración de las bombas B1, B2 y B3.

La conversión de tiempo de segundos a minutos se realizó con la siguiente expresión:

$$t(min) = \frac{t(s)}{60}$$

Donde:

$t(min)$: tiempo en minutos

$t(s)$: tiempo en segundos

Sustituyendo el valor de la repetición 1 de la calibración de la bomba B1 con voltaje de 12 V:

$$t(min) = \frac{1}{60}$$

$$t(min) = 0,01667 \text{ min}$$

2. Tiempo total en minutos de las corridas de calibración de calibración de las bombas B1 y B2.

El tiempo total en minutos para las corridas se calculó con la siguiente expresión:

$$t_T = t1 + t(min)$$

Continuación de apéndice 4.

Donde:

t_T : tiempo total (min)

t_1 : número entero de tiempo (min) de la toma de datos.

$t(\text{min})$: fracción de tiempo en segundo convertidos a (min).

Sustituyendo los valores de la repetición 1 de la calibración de la bomba B1 con voltaje de 12 V:

$$t_T = 2 \text{ min} + 0,01667 \text{ min}$$

$$t_T = 2,0167 \text{ min}$$

3. Flujo volumétrico de las corridas de calibración de las bombas B1 y B2.

El flujo volumétrico de se calculó con la siguiente expresión:

$$\dot{V} = \frac{V}{t_T}$$

Donde:

$\dot{V}$: flujo volumétrico las soluciones de reactivos (l/min).

V : volumen (l).

t_T : tiempo total (min).

Sustituyendo los valores de la repetición 1 de la calibración de la bomba B1 con voltaje de 12 V:

$$\dot{V} = \frac{1,260 \text{ l}}{2,0167 \text{ min}}$$

Continuación de apéndice 4.

$$\dot{V} = 0,6250 \frac{l}{min}$$

4. Flujo volumétrico promedio a un voltaje fijo de las corridas de calibración de la bomba B1, B2 y B3.

El promedio de flujo volumétrico se calculó con la siguiente expresión:

$$\bar{V} = \frac{\dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3}{3}$$

Donde:

$\bar{V}$: flujo volumétrico promedio (l/min).

$\dot{V}_1$: flujo volumétrico de la repetición 1 (l/min).

$\dot{V}_2$: flujo volumétrico de la repetición 2 (l/min).

$\dot{V}_3$: flujo volumétrico de la repetición 3 (l/min).

Sustituyendo los valores de la repetición 1 de la calibración de la bomba B1 con voltaje de 12 V:

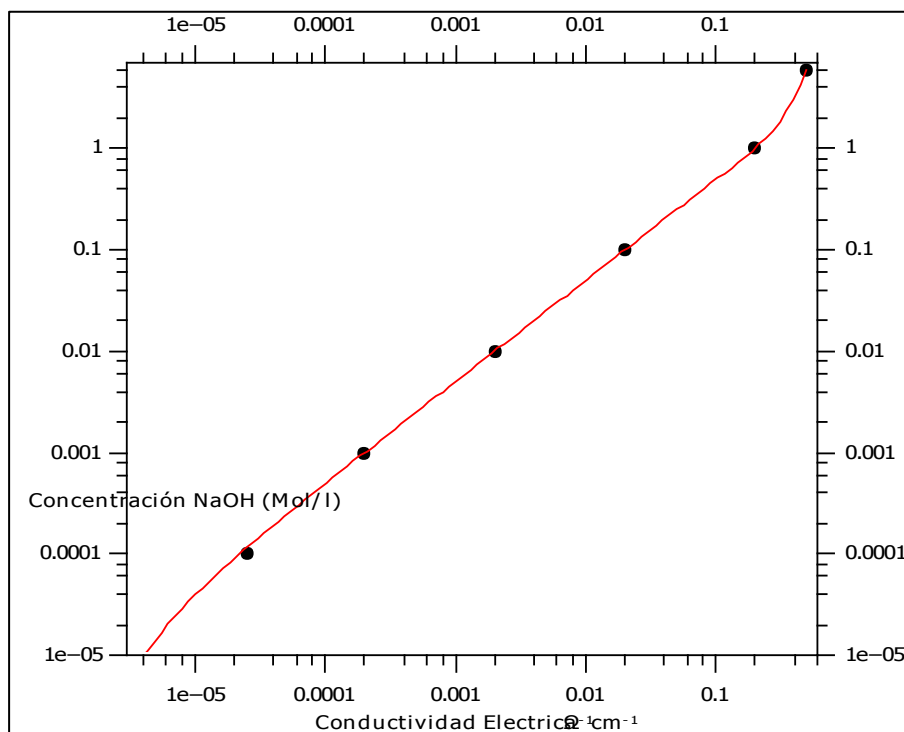
$$\bar{V} = \frac{0,6250 \frac{l}{min} + 0,6122 \frac{l}{min} + 0,6060 \frac{l}{min}}{3}$$

$$\bar{V} = 0,6144 \frac{l}{min}$$

Continuación de apéndice 4.

- Regresión polinomial de la concentración de hidróxido de sodio en función de la conductividad eléctrica y cálculo de concentración para corridas validación de pruebas del reactor.

Tomando los datos de la tabla XX de datos calculados, se realizó una regresión polinomial de cuarto grado, obteniendo la siguiente gráfica y modelo matemático:



Color	Modelo matemático ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	R^2	Rango de validez (mol/l)	
			Mínimo	Máximo
	$CH = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$	0,9999	10^{-5}	6
Valor de coeficientes ($\Omega^{-1}m^{-1}$)				
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
-1×10^{-5}	5,0056	$9,58 \times 10^{-3}$	$-1,9 \times 10$	$9,4 \times 10$
Incerteza de coeficientes ($\Omega^{-1}m^{-1}$)				
7×10^{-6}	8×10^{-3}	4×10^{-4}	3	4

Fuente: elaboración propia, empleando datos de tabla XX de datos calculados.

Continuación de apéndice 4.

Sustituyendo el valor de conductividad de la repetición 1 de la prueba 1 del reactor:

$$CH = -1 * 10^{-5} + 5,0056 * \left(0,005508 \frac{S}{m}\right) + 9,58 * 10^{-3} * \left(0,005508 \frac{S}{m}\right)^2 - 1,9 * 10 * \left(0,005508 \frac{S}{m}\right)^3 + 9,4 * 10 * \left(0,005508 \frac{S}{m}\right)^4$$

$$CH = 0,0275603129 \frac{mol}{l}$$

6. Cálculo de conversión experimental de las pruebas del reactor.

La conversión de la reacción de saponificación del acetato de etilo de cálculo con la siguiente expresión:

$$X = \frac{[NaOH]_o - [NaOH]_f}{[NaOH]_o} * 100$$

Donde:

X : conversión de la reacción (%).

$[NaOH]_o$: concentración de hidróxido de sodio al inicio (mol/l).

$[NaOH]_f$: concentración de hidróxido de sodio a la salida del reactor (mol/l).

Sustituyendo los valores de la repetición 1 de la prueba 1 del reactor:

$$X = \frac{0,3 \frac{mol}{l} - 0,027560313 \frac{mol}{l}}{0,3 \frac{mol}{l}} * 100$$

Continuación de apéndice 4.

$$X = 90,813229 \%$$

7. Error absoluto de la conversión de las corridas de las pruebas de validación del reactor.

El error absoluto se calculó con la siguiente expresión:

$$E = |X_T - X_E|$$

Donde:

E : error absoluto de la conversión (%)

X_T = conversión teórica según diseño del reactor (%).

X_E = conversión experimental según prueba del reactor (%).

Sustituyendo los valores de la repetición 1 de la prueba 1 del reactor:

$$E = 99,53 \% - 90,8132\%$$

$$E = 8,72 \%$$

8. Promedio de conversión experimental de las pruebas del reactor.

El promedio de la conversión experimental se calculó con la siguiente expresión:

$$\overline{X_E} = \frac{X_{E1} + X_{E2} + X_{E3} + X_{E4}}{4}$$

Continuación de apéndice 4.

Donde:

$\overline{X_E}$: conversión experimental promedio de la prueba (%).

X_{E1} : conversión experimental de la repetición 1 (%).

X_{E2} : conversión experimental de la repetición 2 (%).

X_{E3} : conversión experimental de la repetición 3 (%).

X_{E4} : conversión experimental de la repetición 4 (%).

Calculando el valor de la conversión experimental promedio de la prueba 1:

$$\overline{X_E} = \frac{90,8132 \% + 90,8216 \% + 90,8032 \% + 90,8182 \%}{4}$$

$$\overline{X_E} = 90,81\%$$

9. Promedio de error absoluto de las pruebas del reactor.

El promedio del error absoluto de las pruebas del reactor se calculó con la siguiente expresión:

$$\overline{E} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{4}$$

Donde:

$\overline{E}$: error absoluto promedio de la prueba (%).

E_1 : error absoluto de la repetición 1 (%).

E_2 : error absoluto de la repetición 2 (%).

E_3 : error absoluto de la repetición 3 (%).

E_4 : error absoluto de la repetición 4 (%).

Continuación de apéndice 4.

Sustituyendo los valores de la prueba 1 del reactor:

$$\bar{E} = \frac{8,72 \% + 8,71 \% + 8,71 \% + 8,70 \%}{4}$$

$$\bar{E} = 8,71 \%$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Proceso de construcción del reactor**

En este apéndice se describen los pasos del proceso de construcción del reactor, las figuras que a continuación se presentan están ordenadas de manera cronológica.

Figura 1. **Corte de tubo de acero inoxidable ASTM A270 SS304**



Fuente: taller de manufactura, casa 60, cluster 2, Villa Romana, zona 10, Villa Nueva, Guatemala.

Figura 2. **Tubos cortados**



Fuente: taller de manufactura, casa 60, cluster 2, Villa Romana, zona 10, Villa Nueva, Guatemala.

Continuación de apéndice 5.

Figura 3. **Mecanizado de la pieza para sostener el tubo del reactor en el enchaquetamiento**



Fuente: centro de mecanizado de ingeniería mecánica, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12, Guatemala.

Continuación de apéndice 5.

Figura 4. **Férrula antes del mecanizado**



Fuente: centro de mecanizado de ingeniería mecánica, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12, Guatemala.

Figura 5. **Férrula después del mecanizado**



Fuente: centro de mecanizado de ingeniería mecánica, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12, Guatemala.

Continuación de apéndice 5.

Figura 6. Reactor en proceso de ensamblaje



Fuente: taller de manufactura, casa 60, cluster 2, Villa Romana, zona 10, Villa Nueva, Guatemala.

Figura 7. Reactor con tablero eléctrico instalado



Fuente: taller de manufactura, casa 60, cluster 2, Villa Romana, zona 10, Villa Nueva, Guatemala.

Continuación de apéndice 5.

Figura 8. **Reactor con tanques instalados**



Fuente: taller de manufactura, casa 60, cluster 2, Villa Romana, zona 10, Villa Nueva, Guatemala.

Figura 9. **Equipo de soldadura TIG utilizado**



Fuente: Soldaduras especiales AS. *Equipo de soldadura TIG*.

<http://www.soldadurasespecialesas.com/equipos-de-oxicorte-en-bogota/>. Consulta: 25 de septiembre de 2018.

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de análisis de muestras de productos del reactor de LAPROMED

Pag. 1/1



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de C.C. Q.Q. y Farmacia
Laboratorio de Producción de Medicamentos
LAPROMED 3calle 6-47 zona 1

INFORME DE ANÁLISIS
-LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD LAPROMED-

NOMBRE DEL PRODUCTO: No indica	IDENTIFICACIÓN: muestras Tesis Carlos Hernández	LOTE No. No indica
FECHA DE FABRICACION: No indica	FECHA DE ANALISIS: 4-13jun.18	FECHA DE EXPIRACIÓN : No indica
FECHA DE RECEPCIÓN: 4jun2018	No. DE ANALISIS: 111/18	MUESTREO POR : Personal ajeno a LAPROMED
ANALISTAS: K.Dionicio/R.Roca	EQUIPO UTILIZADO: TITRONIC UNIVERSAL SCHOTT	REACTIVOS: Hcl 1N, Fenolftaleína, Rojo de metilo, agua destilada

Muestra No.	pH	Concentración Básica / molar	Observaciones
1	6.59	0.022	Rm.
2	6.65	0.030	Rm.
3	6.70	0.032	Fenolftaleína
4	13.15	0.016	Fenolftaleína
5	12.15	0.028	Fenolftaleína
6	13.14	0.136	Fenolftaleína
7	12.71	0.016	Fenolftaleína
8	12.71	0.030	Fenolftaleína
9	12.50	0.022	Fenolftaleína
10	6.81	0.032	Fenolftaleína
11	12.56	0.028	Fenolftaleína
12	12.10	0.012	Fenolftaleína
13	10.88	0.016	Fenolftaleína
14	6.36	0.016	Rm
15	6.31	0.016	Rm
16	12.84	0.060	Fenolftaleína
17	7.55	0.028	Rm
18	11.91	0.016	Fenolftaleína
19	12.20	0.014	Fenolftaleína
20	12.37	0.028	Fenolftaleína
21	12.59	0.024	Fenolftaleína
22	11.24	0.012	Fenolftaleína
23	7.32	0.032	Rm
24	12.70	0.080	Fenolftaleína
25	6.93	0.028	Rm
26	6.85	0.028	Rm
27	7.41	0.028	Fenolftaleína



Libro de referencia: R16B pag.161-162/R4B/53. Rm: Rojo de metilo.

Este documento no puede ser reproducido sin la autorización de las autoridades de LAPROMED.

Lidia Claudia Villeda Salazar
Jefe del Departamento de Control de Calidad
LAPROMED

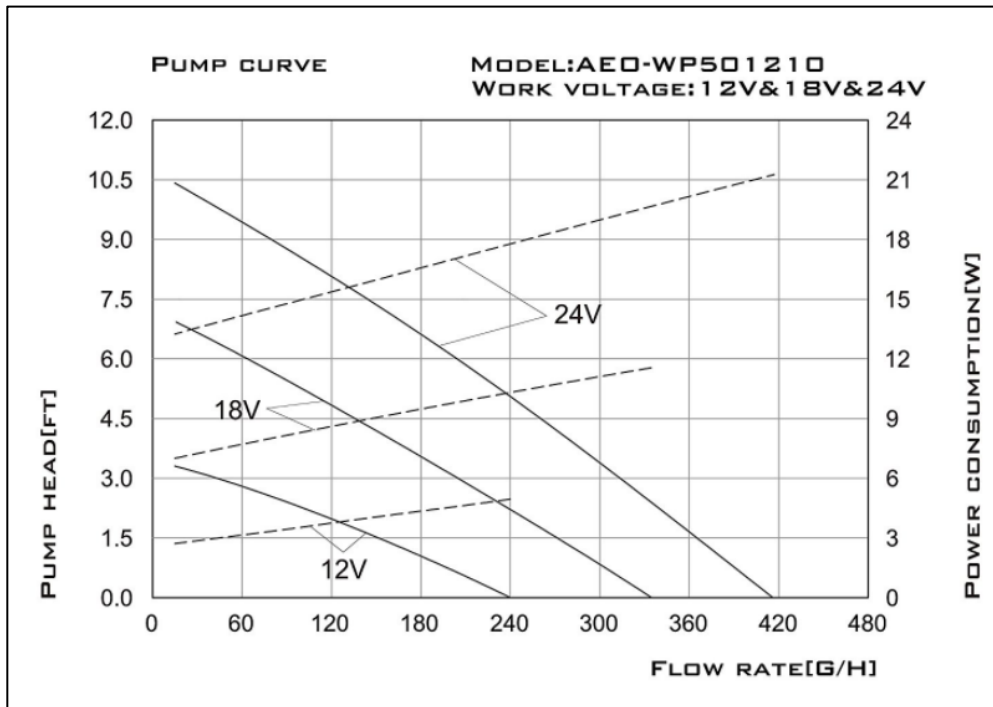
Quia
CONTROL DE CALIDAD
LAPROMED



Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia USAC. LAPROMED, 3 Calle 6-47 Zona 1, Plazuela San Sebastián.
Teléfonos 22539167, 22539162, 22535063, Fax 22532164. Horario de Atención: de lunes a viernes de 7:00 a 15:00 horas Correo electrónico: lapromed.ventas@gmail.com

Fuente: LAPROMED. Informe de análisis de muestras de Tesis Carlos Hernández. Laboratorio de Control de Calidad, Laboratorio de Producción de Medicamentos. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 2. Curva característica de la bomba AEO WP-501210



Fuente: Amazon. Catálogo. <https://www.amazon.com/AEO-240-410-Current-Brushless-submersible/dp/B01MAWH94U>. Consulta: 2 de marzo de 2018.