



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UN REACTOR DE TANQUE AGITADO CONTINUO CON FINES  
DIDÁCTICOS**

**Luis Augusto Díaz Corzo**

Asesorado por el Ing. Julio David Vargas García

Guatemala, marzo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN REACTOR DE TANQUE AGITADO CONTINUO CON FINES  
DIDÁCTICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**LUIS AUGUSTO DÍAZ CORZO**

ASESORADO POR EL ING. JULIO DAVID VARGAS GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, MARZO 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. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Juan Pablo Argueta Elías
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 DE TANQUE AGITADO CONTINUO CON FINES DIDÁCTICOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 27 de noviembre de 2017.



**Luis Augusto Díaz Corzo**

Guatemala 17 de septiembre 2018

Ingeniero

**Carlos Salvador Wong Davi**

Director de Escuela de Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Carlos Wong

Le deseo éxitos en sus actividades diarias y en cada uno de los aspectos laborales en los cuales se desempeña.

Por medio de la presente hago de su conocimiento que el Informe Final de Trabajo de Graduación titulado: -Diseño de un reactor de tanque agitado continuo con fines didácticos-, del estudiante de la carrera de Ingeniería Química, **Luis Augusto Díaz Corzo**, identificado con el número de carné **201021227** y documento único de identificación **2679 58633 0101**, ha sido revisado y aprobado por mi persona, bajo los criterios que considero adeptos para el informe final de trabajo de graduación según los requerimientos de la Escuela de Ingeniería Química.

Sin otro particular,

**Julio David Vargas García**  
Ingeniero Químico  
Col.1688

---

**Ing. Julio David Vargas García**  
**Colegiado 1688**  
**Asesor de Tesis**  
**Escuela de Ingeniería Química**



Guatemala, 16 de enero de 2019.  
Ref. EIQ.TG-IF.002.2019.

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 **033-2017** 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: **Luis Augusto Díaz Corzo**.  
Identificado con número de carné: **2679 58633 0101**.  
Identificado con registro académico: **2010-21227**.  
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:

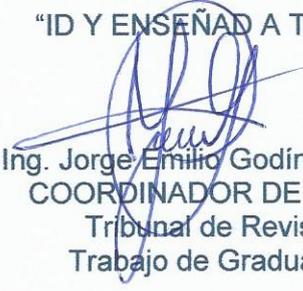
**DISEÑO DE UN REACTOR DE TANQUE AGITADO CONTINUO**  
**CON FINES DIDÁCTICOS**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Julio David Vargas García**.

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 ENSEÑAD A TODOS"

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



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.017.2019

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, **LUIS AUGUSTO DÍAZ CORZO** titulado: **"DISEÑO DE UN REACTOR DE TANQUE AGITADO CONTINUO CON FINES DIDÁCTICOS"**. 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, febrero 2019 **FACULTAD DE INGENIERIA USAC**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**

Cc: Archivo  
CSWD/ale



Asociación Guatemalteca de Acreditación de Instituciones de Enseñanza Superior





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 DE TANQUE AGITADO CONTINUO CON FINES DIDÁCTICOS”** presentado por el estudiante universitario: **Luis Augusto Díaz Corzo** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

*2019*  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, Marzo de 2019

/echm

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por las bendiciones que me brinda así como por la capacidad de poder perseguir mis sueños y por su apoyo y amor.
- Mis padres** Zaida Rebeca Corzo y Luis Gustavo Diaz, por el apoyo, amor y la abnegación que me brindan para que pueda cumplir todas mis metas.
- Mis hermanos** Zaida, Gustavo y Jorge Díaz, por ser mis ejemplos a seguir, por su amor y apoyo incondicional, por creer en mí, aconsejarme y darme ánimos siempre.
- Toda mi familia** Por el amor, el apoyo y por el ejemplo de que con esfuerzo y dedicación todo se logra.
- Mis amigos y mi novia** Por compartir tantas alegrías, tristezas, desvelos, frustraciones y éxitos. Que este logro sea el inicio de muchos otros logros.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de formarme como profesional con los estándares éticos y educativos.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme las herramientas necesarias para desarrollarme académicamente, y buscar la excelencia de quienes pasamos por sus salones.
<b>Área de Fisicoquímica, EIQ</b>	Por darme la oportunidad de desarrollarme académica y laboralmente; por encontrar excelentes personas que desean el bien de los demás.
<b>Mis amigos y novia</b>	Por incentivarne a ser mejor persona, por los bellos momentos durante la carrera y fuera de ella; porque la amistad es algo más que el interés.
<b>Familia</b>	Toda mi familia, por el ejemplo, el apoyo y la amistad.
<b>Ing. Julio Vargas</b>	Por su apoyo y disponibilidad para asesorarme en este trabajo de investigación.

**Ing. William Fagiani**

Por su colaboración y apoyo en la elaboración de este trabajo de investigación.

**Inga. Ana Herrera**

Por su ayuda y sus recomendaciones al realizar este trabajo de investigación.

**Inga. Mayra Queme**

Por su ayuda en el desarrollo del tema e incentivarme a realizarlo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación .....	3
1.3. Determinación del problema.....	4
1.3.1. Definición .....	4
1.3.2. Delimitación .....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Cinética de las reacciones químicas .....	5
2.1.1. Reacción química .....	5
2.1.2. Cinética química .....	5
2.1.3. Teoría de colisiones.....	5
2.1.4. Velocidad de reacción .....	6
2.1.5. Ley de velocidad.....	7
2.1.6. Constante de velocidad de reacción.....	7
2.2. Reactores químicos.....	8
2.2.1. Balance general de masa .....	8
2.2.2. Reactor de tanque agitado continuo .....	10

2.3.	Agitación y mezclado de líquidos .....	11
2.3.1.	Tipos de agitadores para tanques de mezclado .....	13
2.3.1.1.	Agitador propulsor de tres aspas...	13
2.3.1.2.	Agitadores de paletas.....	13
2.3.1.3.	Agitadores de turbina .....	14
2.3.1.4.	Agitadores de banda helicoidal .....	14
2.4.	Tiempo de residencia.....	15
2.4.1.	Espacio tiempo.....	16
2.5.	Hidrolisis de ésteres.....	16
2.5.1.	Ésteres .....	16
2.5.2.	Hidrolisis.....	17
2.5.2.1.	Hidrólisis básica .....	17
2.6.	Conductimetría.....	19
2.6.1.	Electrolitos débiles .....	20
2.6.2.	Electrolitos fuertes.....	21
3.	MARCO METODOLÓGICO .....	23
3.1.	Variables .....	23
3.1.1.	Diseño .....	23
3.1.2.	Construcción .....	23
3.1.3.	Evaluación.....	24
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	24
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	24
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	25
3.4.1.	Equipo y cristalería.....	25
3.4.2.	Reactivos.....	26
3.4.3.	Materiales.....	26
3.5.	Metodología experimental .....	27

3.5.1.	Diseño del reactor de tanque agitado .....	28
3.5.1.1.	Diseño del sistema de agitación ....	30
3.5.1.2.	Circuito de bombeo y agitación.....	34
3.5.1.3.	Construcción del reactor.....	35
3.5.1.4.	Calibración de las bombas centrifugas .....	35
3.5.1.5.	Calibración del agitador .....	36
3.5.1.6.	Validación del reactor por medio de la reacción del sistema acetato de etilo-hidróxido de sodio .....	36
4.	RESULTADOS .....	39
4.1.	Diseño del módulo y reactor de tanque agitado continuo .....	39
4.2.	Reactor de tanque agitado continuo construido .....	42
4.3.	Validación del reactor de tanque agitado continuo por medio de la conversión del sistema acetato de etilo e hidróxido de sodio .....	45
4.4.	Instructivo, realización de práctica.....	46
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	49
5.1.	Análisis del diseño y la construcción de un reactor de tanque agitado continuo para reacciones líquidas en fase líquida .....	49
5.2.	Análisis de la validación del reactor por medio de la hidrolisis alcalina del sistema acetato de etilo-hidróxido ...	49
5.3.	Análisis de la práctica de laboratorio para ser desarrollada utilizando el reactor.....	50

CONCLUSIONES.....	51
RECOMENDACIONES .....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	55
APÉNDICES.....	57

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Patrones de mezclado en un reactor de tanque agitado continuo .....	10
2.	Modelo de flujo en un tanque con placas deflectoras y un agitador de turbinas con flujo axial.....	12
3.	Tipos de agitadores para mezcladores .....	14
4.	Fórmula general de un éster .....	16
5.	Hidrólisis básica de un éster.....	17
6.	Mecanismo de reacción de la hidrólisis alcalina del acetato de etilo .....	18
7.	Reacciones secundarias para la hidrólisis alcalina del acetato de etilo .....	18
8.	Medidas generales del estanque con el impulsor.....	31
9.	Vista de planta, módulo del reactor .....	39
10.	Vista de planta base, módulo del reactor .....	40
11.	Vista lateral izquierda del reactor de tanque agitado continuo y sistema de agitación.....	40
12.	Vista lateral derecha del reactor de tanque agitado continuo y sistema de agitación .....	41
13.	Vista de planta del reactor de tanque agitado continuo.....	42
14.	Vista de la elevación frontal, módulo del reactor .....	43
15.	Vista de la elevación trasera, módulo del reactor .....	43
16.	Vista lateral derecha, módulo del reactor .....	44
17.	Vista lateral izquierda, módulo del reactor.....	44

18.	Vista de planta, módulo del reactor.....	45
19.	Diagrama de flujo del equipo .....	47

## TABLAS

I.	Balance de moles .....	8
II.	Conductividades iónicas molares en agua a 25 °C (a dilución infinita) .....	22
III.	Conversión del sistema.....	45
IV.	Experimento 01: reactor de tanque agitado continuo, procedimiento experimental.....	46
V.	Simbología del diagrama de flujo del equipo .....	48

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>b</b>	Conversión teórica esperada al volumen de reactor tubular V (%)
<b>C</b>	Concentración inicial en los contenedores de reactivos del reactor (mol/L)
<b>C<sub>v</sub></b>	Coefficiente de variación
<b>E<sub>x</sub></b>	Error relativo entre la conversión experimental y la conversión teórica esperada (%)
<b>k</b>	Constante de velocidad de la reacción específica $\left(\frac{L}{mol*s}\right)$
<b>K</b>	Conductividad promedio determinada con el conductímetro en la corrida (mS/cm)
<b>K<sub>0</sub></b>	Conductividad de una solución de hidróxido de sodio con la mitad de la concentración que posee la solución de hidróxido de sodio en el depósito del reactor tubular (mS/cm)
<b>K<sub>∞</sub></b>	Conductividad de la solución de acetato de sodio resultante de la reacción completa de las soluciones de hidróxido de sodio y acetato de etilo (mS/cm)
<b>X</b>	Conversión de la reacción (%)
<b><math>\bar{X}</math></b>	Conversión promedio de la reacción entre el acetato de etilo e hidróxido de sodio

$\sigma$	Desviación estándar
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
<b>g</b>	Gramo
$\bar{x}_i$	Media aritmética de muestra i
<b>mL</b>	Mililitro
<i>n</i>	Número de repeticiones realizadas
%	Porcentaje
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
$r_A$	Velocidad de aparición de A ( $\text{mol s}^{-1}$ )( $\text{mol min}^{-1}$ )
<b>V</b>	Volumen
<b>Re</b>	Número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido
$\rho$	Densidad ( $\text{Kg/m}^3$ )
$\mu$	Viscosidad ( $\text{Pa/s}$ )
<b>d</b>	Diámetro del agitador
<b>N</b>	Velocidad angular (rps)
<b>V</b>	Volumen
<b>P</b>	Potencia (W)
<b>W</b>	Unidad de potencia del sistema internacional
<b>Pa</b>	Unidad de presión en el sistema internacional
<b>h</b>	Altura
<b>r</b>	Radio de una circunferencia

## GLOSARIO

<b>Agitador</b>	Dispositivo o aparato utilizado para agitar o revolver líquidos.
<b>Cinética</b>	Rapidez con la que ocurren las reacciones, el equilibrio dentro del reactor y la velocidad de la reacción química.
<b>Conductimetría</b>	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.
<b>Conductancia eléctrica</b>	Inverso de la resistencia eléctrica.
<b>CSTR</b>	Reactor de tanque agitado de flujo continuo.
<b>Mecanismo de reacción</b>	Secuencia de eventos químicos individuales, cuyo resultado global produce la reacción observada.
<b>PFR</b>	Reactor tubular flujo tapón.

<b>Reacción homogénea</b>	Cuando se afecta solamente una fase, ya sea gaseosa, sólida o líquida.
<b>Reactor continuo</b>	Mientras tiene lugar la reacción química al interior del reactor, éste se alimenta constantemente de material reactante y también retira ininterrumpidamente los productos de la reacción.
<b>Reactor químico</b>	Unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas. Dicha unidad procesadora está constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas, y está gobernado por un algoritmo de control.

## RESUMEN

El siguiente trabajo de graduación tuvo como objetivo diseñar y construir un reactor de tanque agitado continuo el cual fue evaluado por medio de la hidrólisis alcalina del acetato de etilo. Dicho reactor es una nueva herramienta para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Para cumplir con los objetivos planteados se procedió a dividir el trabajo en tres etapas.

- **Diseño:** esta parte abarcó el diseño del reactor de tanque agitado por medio de una reacción de estudio, el sistema de agitación y el sistema de alimentación de reactivos. Se obtuvo un diseño que facilita el aprendizaje de cinéticas químicas y de reactores químicos; adicional se incluyó en el presente trabajo una práctica de laboratorio para ser ejecutada con el equipo diseñado.
- **Construcción:** previamente concluida la parte del diseño, se procedió a la obtención de los materiales necesarios, y se construyó el reactor bajo las condiciones y criterios establecidos. Esta parte también contempló calibrar el sistema de bombeo y de agitación. Se determinó que el sistema puede variar la velocidad de agitación de 40 rpm a 750 rpm y el tiempo de residencia de 60 s a 120 s.
- **Evaluación:** esta etapa consistió en determinar el funcionamiento del equipo construido, esto se realizó por medio de la conversión de la

hidrolisis alcalina del acetato de etilo; dicha reacción se monitoreó por medio de conductimetría. Se determinó que el reactor se comporta de acuerdo a las características previamente diseñadas ya que fue preciso y exacto al compararse con un valor de referencia; adicional se concluye que es apto para prácticas de laboratorio.

Al concluir las etapas planteadas previamente, se determinó que el equipo pueda satisfacer las necesidades existentes en el estudio de reactores y cinéticas químicas que forman parte de los estudios básicos del pensum de la carrera de Ingeniería Química.

# OBJETIVOS

## General

Diseñar un reactor de tanque agitado continuo con fines didácticos, para el estudio de cinética química en fase líquida.

## Específicos

1. Diseñar un reactor de tanque agitado continuo para reacciones líquidas en fase líquida.
2. Construir un reactor de tanque agitado continuo que permita variar el tiempo de residencia y la velocidad de agitación en un rango de 60 a 120 segundos y 100 rpm a 500 rpm, respectivamente.
3. Validar el funcionamiento del reactor por medio de la hidrólisis alcalina del sistema acetato de etilo-hidróxido.
4. Diseñar una práctica de laboratorio para ser desarrollada utilizando el reactor.



## INTRODUCCIÓN

Un reactor químico es el corazón de los procesos donde se llevan a cabo reacciones químicas, ya que convierte la alimentación de materias primas en productos. Los reactores son diseñados para un campo en específico para satisfacer los requerimientos de un proyecto o proceso.

Muchos reactores son diseños únicos y exclusivos debido a la naturaleza de las reacciones que se llevan a cabo, en especial, para reacciones de catálisis o multifase. El presente trabajo buscó diseñar y construir un reactor que permita evaluar distintas reacciones químicas en fase líquida.

El diseño del reactor es un paso vital en el diseño general del proceso y es importante asegurar que el equipo especificado será capaz de lograr los rendimientos y la selectividad deseados cuando se opera.

A continuación, se detalla el diseño y la construcción de un reactor de tanque agitado continuo; también, se incluye la evaluación de la unidad diseñada y construida por medio de la comparación de la conversión obtenida de la hidrólisis alcalina de acetato de etilo con hidróxido de sodio utilizando una técnica conductimétrica y una práctica para ser ejecutada en laboratorio.



# 1. MARCO CONCEPTUAL

## 1.1. Antecedentes

En el ámbito educativo, la teoría y la práctica constituyen dos campos que gestionan conocimientos de diferente tipo. Poseer las herramientas necesarias para ambas es de vital importancia para la formación de un profesional; por lo tanto el área de fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química está comprometida con la mejora continua para ayudar al estudiante a desarrollar las competencias necesarias para su vida profesional; por lo cual se han trabajado distintas investigaciones con el fin de mejorar la didáctica del tema de la cinética de las reacciones químicas y el diseño de reactores químicos; sin embargo, el diseño y la construcción de reactores de tanque agitado continuo no ha formado parte de las mismas; debido a ello este trabajo de graduación desea brindar una herramienta más al estudiante para que aumente su conocimiento.

Actualmente, existen diversos tipos de investigaciones que constituyen antecedentes para lo que se propone en este protocolo. Estas investigaciones fueron realizadas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala se enlistan a continuación:

- *Diseño, construcción y evaluación de un reactor flujo pistón de forma helicoidal a escala laboratorio*, de Diego Bernardo Lainfiesta López, en el año 2009. Se creó una herramienta práctica para la investigación de cinéticas químicas.

- *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*, de Zaid Jacobo Lou Díaz, en el año 2007. Se reparó un reactor y se validó su funcionamiento.
- *Evaluación del grado de conversión en el sistema químico cloruro Férrico-cloruro estañoso catalizado con HCl, correspondiente a una cinética de tercer orden, realizado a diferentes concentraciones y temperaturas de operación en un reactor tubular tipo laboratorio*, de Willy Vidal Pirir Rojas, en el año 1991. Este trabajo logró determinar la cinética del sistema de estudio.
- *Evaluación de un reactor tubular de laboratorio para una reacción homogénea e irreversible de segundo orden*, de Walter Oswaldo Zelanda Sánchez, en 1988. En esta investigación se determinó la funcionalidad del reactor y su correcto funcionamiento.
- *Optimización de la operación de un reactor tipo tubular de laboratorio a temperatura y concentración constante para una reacción homogénea de primer orden*, de Francisco Rosales Cerezo, en 1986. El investigador logró determinar la manera de utilizar el reactor para optimizar su funcionamiento.
- *Evaluación del diseño de un reactor tubular químico tipo laboratorio como recurso docente*, de Teresa Lisely De León Arana, en 1984.

Estas investigaciones se pueden clasificar, según el tema que analizaron, de la siguiente forma:

- Estudio de cinéticas químicas
- Diseño y construcción de reactores químicos tipo tubular y/o *batch*
- Evaluación del diseño de reactores químicos
- Validación y optimización de reactores químicos

Por lo que cada investigación podrá contribuir con el cuerpo teórico del presente trabajo de graduación.

## **1.2. Justificación**

El diseño, la construcción y la implementación de un reactor de tanque agitado continuo permitirá proveer un equipo didáctico a los estudiantes para aplicar sus conocimientos sobre flujo de fluidos, cinética química, química analítica y análisis estadístico, con lo cual aprenderán a utilizar un equipo de flujo estable y controlar las variables involucradas en el proceso; también, observarán cómo dichas variables tienen una incidencia en el resultado final de un proceso.

El reactor estará a disposición de los estudiantes y de la Escuela de Ingeniería Química para su uso en futuras prácticas de laboratorio, trabajos de graduación y proyectos de investigación.

El conocimiento teórico y práctico de la cinética química y uso de reactores es una parte fundamental en el rol del ingeniero químico. En la actualidad, el Área de Físicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química no posee un reactor continuo para el estudio de cinéticas químicas y el reactor por lotes que se posee no está disponible para su uso; por lo que, los estudiantes se ven limitados debido a las carencias existentes en dicho laboratorio; ya que se busca que el estudiante posea una alta preparación teórica y práctica es de vital importancia que se tengan las herramientas necesarias, para ayudar a

mejorar la formación de los futuros profesionales. Debido a esto el presente trabajo busca poder satisfacer esta necesidad a través del diseño y construcción de un reactor de tanque agitado continuo para disposición del laboratorio.

### **1.3. Determinación del problema**

Se procedió a definir y delimitar el problema de manera objetiva.

#### **1.3.1. Definición**

En la actualidad el Laboratorio de Físicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química presenta la parte experimental del estudio de cinética química bajo el estudio de reacciones de óxido reducción por medio de espectrofometría en reactores tipo *batch*; sin embargo, dicho laboratorio no cuenta con el equipo necesario para satisfacer el estudio de reactores químicos y otro tipo de reacciones. Por lo que el desarrollo práctico experimental de los estudiantes se ve limitado por la falta de equipo.

Debido a ello, se plantea diseñar y construir un reactor de tanque agitado continuo como recurso didáctico.

#### **1.3.2. Delimitación**

El diseño y la elaboración del reactor de tanque agitado continuo será específicamente para reacciones en fase líquida debido a que se planea utilizar un sistema de bombeo para la entrada de los reactivos; en dicho reactor se podrá variar la temperatura en un rango 20 °C a 40 °C, el tiempo de residencia de los reactivos de 60 a 120 segundos y la velocidad de agitación de 100 a 500 rpm.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Cinética de las reacciones químicas**

Es el estudio de las velocidades de las reacciones químicas y de los mecanismos mediante los que tienen lugar.

#### **2.1.1. Reacción química**

La reacción química es un proceso químico en el cual dos sustancias o más, denominados reactivos, por la acción de un factor energético, se convierten en otras sustancias designadas como productos modificando su estructura molecular y enlaces químicos.

#### **2.1.2. Cinética química**

La cinética química es el estudio de la rapidez y del mecanismo por medio de los cuales una reacción química se da bajo condiciones específicas. La velocidad es la masa, en moles por segundo, de un producto formado o de un reactivo consumido. El mecanismo es la secuencia de reacciones elementales e intermediarias cuyo resultado final produce la reacción observada.

#### **2.1.3. Teoría de colisiones**

Para que una reacción se lleve a cabo, debe producirse el choque o colisión de las partículas involucradas, para que se realice de una manera

eficaz debe cumplir dos aspectos. Las partículas reactantes deben tener una energía cinética suficiente para que se realice un reordenamiento de los enlaces químicos y se lleve a cabo la formación de una nueva sustancia y la segunda es que debe colisionar en una orientación adecuada.

Aplicando dicha teoría a la cinética química, se esperaría que la velocidad de una reacción química sea directamente proporcional al número de colisiones por segundo. Esto es utilizado para explicar la relación de velocidad de reacción respecto a la concentración, ya que al triplicar, por ejemplo, la concentración de los reactivos, se triplica también la probabilidad de colisión entre los reactivos, ya que existiría el triple de partículas que podrían reaccionar entre sí.

#### **2.1.4. Velocidad de reacción**

Bajo el concepto de reacción química dicho cambio no supone creación ni destrucción de materia, más bien su reordenamiento. En otras palabras la masa total del sistema se conserva. Sin embargo, al tratar la masa individual de las especies involucradas en la reacción química si se habla de velocidad de desaparición de masa. La velocidad de desaparición de una especie, por ejemplo A, es el número de moléculas de A que pierden su identidad química por unidad de tiempo por unidad de volumen mediante la ruptura y subsiguiente formación de enlaces químicos durante el curso de la reacción. Para que una especie dada 'aparezca' en el sistema, alguna fracción de otra especie presente deberá de perder su identidad química.

### 2.1.5. Ley de velocidad

La ley de velocidad o ecuación de velocidad de una reacción química es una ecuación algebraica que involucra la concentración o actividades de los reactivos (y productos cuando es una reacción reversible) de las diversas especies que participan en la reacción; la constante de velocidad de reacción viene dada por la siguiente ecuación:

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

Donde:

- $-r_A$ : es la velocidad de desaparición de A.
- $k_A (T)$ : es la constante de velocidad de reacción.
- $f(C_A, C_B, \dots)$  es una función de las concentraciones de las diversas especies.

### 2.1.6. Constante de velocidad de reacción

La constante de velocidad de reacción  $k$  no es una verdadera constante, solo es independiente de las concentraciones de las especies que intervienen en la reacción. Generalmente  $k$ , también conocida como velocidad de reacción específica, depende especialmente de la temperatura aunque en reacciones en fase gaseosa también depende del catalizador y se ve afectada por la presión total del sistema. También, puede verse afectada por otros parámetros como concentración iónica o el disolvente. Estas otras variables por lo regular tienen un efecto mucho menor que el efecto de la temperatura sobre la velocidad de reacción específica por lo que generalmente se asume que  $k$  depende únicamente de la temperatura.

## 2.2. Reactores químicos

Son equipos diseñados para llevar a cabo una cierta reacción química. Están diseñados para maximizar el grado de conversión y obtención de producto deseado.

### 2.2.1. Balance general de masa

Para hacer un balance de masa en un reactor es necesario especificar las fronteras del sistema. En este caso se asumirá que el sistema está delimitado dentro de un espacio conocido como volumen  $V$  en el cual se encuentra la especie  $j$ .; por lo tanto, el balance de moles sería:

$$\text{Entrada} + \text{generación} - \text{salida} = \text{acumulación}$$

Si se desea determinar el balance de moles para un tiempo dado se tendría de forma análoga:

Tabla I. **Balance de moles**

Velocidad de flujo de $j$ hacia el sistema	+	velocidad de generación de $j$ por reacción química dentro del sistema	-	Velocidad de flujo de $j$ desde el sistema	=	Velocidad de acumulación de $j$ dentro del sistema
--	---	--	---	--	---	--

Fuente: elaboración propia.

Lo que se representa de la siguiente manera:

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

Donde:

- $F_{j0}$ : es la velocidad de flujo de j hacia el sistema.
- $G_j$ : es la velocidad de generación de j por reacción química dentro del sistema.
- $F_j$ : es la velocidad de flujo de j desde el sistema.
- $N_j$ : es el número de moles de la especie j.

Al asumir que las variables temperatura, concentración de las especies y actividad catalítica (en algunos casos), se mantienen constantes en el espacio dentro del volumen del sistema, la generación de productos será igual al producto de la velocidad de formación de la especie j ( $r_j$ ) por el volumen V. Y si la velocidad de formación varía respecto a fracciones infinitesimales del volumen se puede plantear la velocidad de generación como:

$$G_j = \int_0^V r_j dV$$

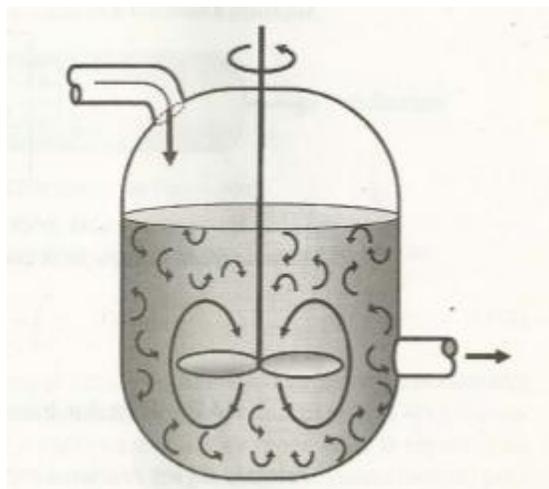
Donde:

- $G_j$ : es la velocidad de generación del producto
- $R_j$ : es la velocidad de formación del producto
- $dV$ : es una fracción infinitesimal del volumen

### 2.2.2. Reactor de tanque agitado continuo

El reactor de tanque agitado se emplea sobre todo para reacciones en fase líquida normalmente se emplea en estado estacionario y se asume una mezcla perfecta. Se denomina que no hay dependencia del tiempo o de la posición en la temperatura, la concentración o de la velocidad de reacción dentro del reactor. Se considera que todas las variables son iguales en todos los puntos del interior del reactor. Para sistemas donde el mezclado es considerado no ideal, este modelo de mezcla perfecta resulta inadecuado; por lo que se debe recurrir a otra técnica de modelaje, como la distribución de tiempo de residencia, para obtener resultados significativos.

Figura 1. **Patrones de mezclado en un reactor de tanque agitado continuo**



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 13.

Cálculo de la ecuación de balance de moles:

$$F_{j0} - F_j + \int_0^V r_j dV = \frac{dN_j}{dt}$$

Se aplica a un reactor en estado estacionario, es decir, que sus condiciones no cambian con el tiempo.

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

Por lo que al sustituir e integrar la ecuación adopta una forma conocida.

$$V = \frac{F_{j0} - F_j}{-r_j}$$

Con la ecuación anterior se puede predecir el volumen necesario para el reactor así como los posibles flujos aplicados.

### 2.3. Agitación y mezclado de líquidos

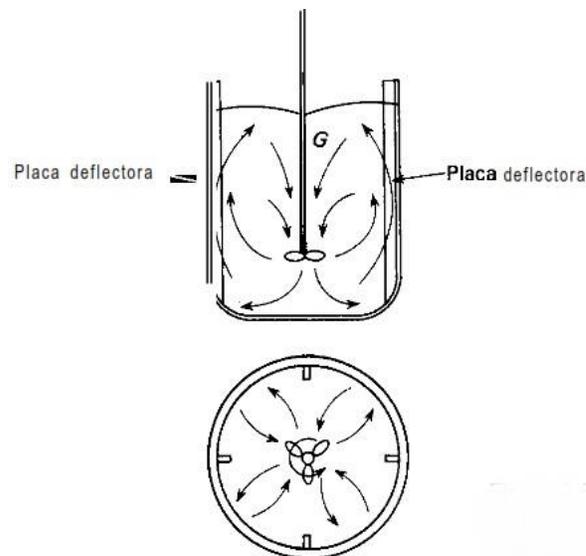
La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente, con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor. La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases, inicialmente separadas.

Los líquidos se agitan con más frecuencia en tanques o recipientes, generalmente, de forma cilíndrica y provista de un eje vertical. La parte superior del recipiente puede estar abierta al aire o cerrada. Las proporciones del tanque varían bastante, dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. El fondo del tanque es redondeado y no plano, con el fin de eliminar los rincones

escarpados o regiones donde no penetrarían las corrientes de fluido. La altura del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque. El rodete va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje soportado en la parte superior.

La trayectoria del flujo en un tanque de agitación depende de las propiedades del fluido, la geometría del tanque, el tipo de deflectores y del propio agitador. Si el agitador va montado verticalmente en el centro del tanque sin deflectores, normalmente se desarrollará una trayectoria tipo remolino, lo que es indeseable; se desarrolla un vórtice considerable y ocurren oleadas, en especial, cuando las velocidades de operación son altas. Para evitar esto, puede usarse una posición angular desplazada del centro, cuando se trata de propulsores de baja potencia.

Figura 2. **Modelo de flujo en un tanque con placas deflectoras y un agitador de turbinas con flujo axial**



Fuente: MCCABE, Warren L. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p. 249.

### **2.3.1. Tipos de agitadores para tanques de mezclado**

Para las diferentes demandas de las operaciones de mezclado en tanques, se dispone de diferentes tipos de agitadores, que combinando la forma de las aspas o paletas, disposición e inclinación, satisfacen los requerimientos para una operación de mezclado eficaz.

#### **2.3.1.1. Agitador propulsor de tres aspas**

El de tipo marino, similar a la hélice de un motor para lanchas, es uno de los más utilizados. El agitador puede ser móvil o estar montado en la pared de un tanque abierto, en posición desplazada del centro. Estos agitadores giran a velocidades entre 400 y 1 750 revoluciones por minuto, son para líquidos de baja viscosidad.

#### **2.3.1.2. Agitadores de paletas**

Son usados para velocidades de 20 a 200 revoluciones por minuto, la longitud mide de 60 % a 80 % del diámetro del tanque y la anchura de la paleta es de 1/6 a 1/10 de su longitud. En el agitador de paletas se da principalmente flujo radial y poco flujo axial o vertical.

La paleta de ancla o compuerta, barre o raspa las paredes del tanque y a veces su fondo, se emplea para líquidos viscosos que pueden generar depósitos en las paredes; y para mejorar la transferencia de calor hacia las mismas, pero no es buen mezclador.

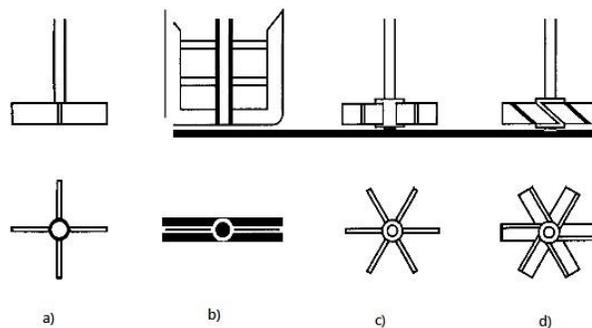
### 2.3.1.3. Agitadores de turbina

Cuando se procesan líquidos con amplia diversidad de viscosidades, se usan turbinas semejantes a un agitador de paletas múltiples con aspas más cortas. El diámetro de una turbina mide entre 30 % y 50 % del diámetro del tanque. Normalmente, las turbinas tienen cuatro o seis aspas. Las turbinas con aspas planas producen un flujo radial.

### 2.3.1.4. Agitadores de banda helicoidal

Se usan para fluidos muy viscosos, opera a pocas revoluciones por minuto en la región laminar; la banda se forma en trayectoria helicoidal y está unida a un eje central; el líquido se mueve en una trayectoria de flujo tortuosa hacia abajo en el centro y hacia arriba a los lados, con movimiento de giro; algunos tipos son: de banda helicoidal doble y de banda helicoidal con tornillo.

Figura 3. Tipos de agitadores para mezcladores



Fuente: GEANKOPLIS, Christie J. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. p. 162.

La figura 3 muestra los diferentes tipos de agitadores: paleta de cuatro aspas, paleta de compuerta o ancla, turbina abierta de seis aspas, turbina de aspas inclinadas.

#### **2.4. Tiempo de residencia**

El tiempo que transcurre para que una molécula pase por un reactor recibe el nombre de tiempo de residencia. Son dos las propiedades importantes de  $\theta$ : el tiempo transcurrido desde que la molécula entró al reactor (su edad) y el resto del tiempo que estará en el reactor (su vida residual). Interesa principalmente la suma de estos dos tiempos, que es  $\theta$ , pero es importante observar que el micromezclado solo puede verificarse entre moléculas que tengan la misma vida residual; no es posible que las moléculas se mezclen en un cierto punto del reactor para después volverse a separar en un punto posterior y tener vidas residuales diferentes.

La definición más conveniente de la función de distribución de tiempos de residencia es la fracción  $J(\theta)$  de la corriente efluente que tiene un tiempo de residencia inferior a  $\theta$ . Ninguna parte del fluido puede haber pasado por el reactor en un tiempo cero, por lo que, cuando  $\theta = 0$ ;  $J = 0$ . Análogamente, ninguna parte del fluido puede permanecer indefinidamente en el reactor, por lo que  $J$  tiende a 1 a medida que  $\theta$  tiende a infinito. Las variaciones de densidad, tales como las causadas por los gradientes de temperatura y presión, pueden afectar al tiempo de residencia y se adicionan a los efectos debidos a las variaciones de velocidad y micromezclado.

### 2.4.1. Espacio tiempo

El espacio-tiempo  $\tau$  se obtiene dividiendo el volumen del reactor entre la velocidad de flujo volumétrico que entra al reactor.

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

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

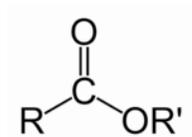
## 2.5. Hidrolisis de ésteres

A continuación, se presentan los ésteres.

### 2.5.1. Ésteres

Los ésteres son compuestos orgánicos en los cuales un grupo orgánico (simbolizado por R') reemplaza a un átomo de hidrógeno (o más de uno) en un ácido carboxílico. Generalmente, se obtienen a partir de la condensación de un ácido carboxílico y un alcohol, liberando agua. El proceso se denomina esterificación.

Figura 4. **Fórmula general de un éster**



Fuente: FROST PEARSON, Arthur Ralph. *Kinetics and Mechanics*. p.140.

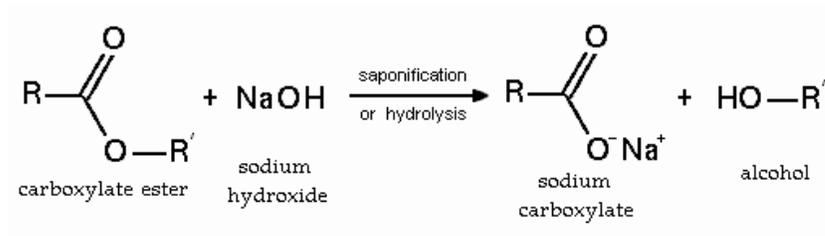
## 2.5.2. Hidrolisis

El proceso inverso a la esterificación se conoce como hidrólisis de los ésteres; en este proceso se recuperan el ácido carboxílico y el alcohol de los que provino el éster. Este proceso se puede dar en medio ácido o básico.

### 2.5.2.1. Hidrólisis básica

En la hidrólisis básica de los ésteres, también conocida como saponificación, estos reaccionan con el hidróxido de sodio formando un carboxilato de sodio y un alcohol, como se ve en la figura siguiente.

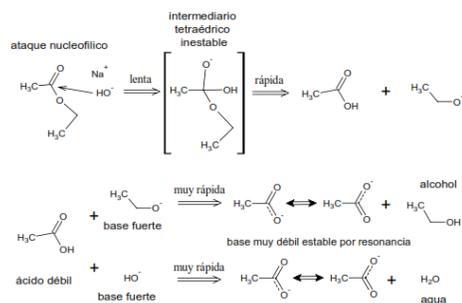
Figura 5. Hidrólisis básica de un éster



Fuente: FROST PEARSON, Arthur Ralph. *Kinetics and Mechanics*. p. 130.

Se propone que en la hidrólisis alcalina el  $\text{OH}^-$  al ser un nucleófilo fuerte ataca al carbono del grupo carbonilo, rompiendo el doble enlace y formando un anión intermediario que finalmente libera al grupo  $\text{R}'$  y se estabiliza por resonancia. Esto hace que la molécula del producto sea demasiado más estable que las de reactivos por lo que el equilibrio tiende a irse hacia el lado de los productos que hace que la reacción prácticamente irreversible.

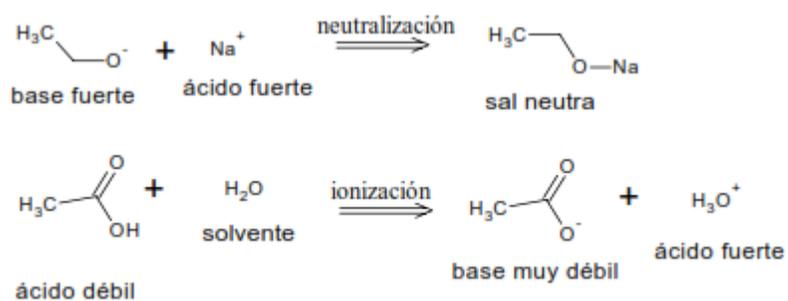
Figura 6. **Mecanismo de reacción de la hidrolisis alcalina del acetato de etilo**



Fuente: WINGROVE, Alan; CARET, Robert. *Química orgánica*. p. 115.

A continuación, se plantean las posibles reacciones secundarias derivadas del sistema de estudio.

Figura 7. **Reacciones secundarias para la hidrólisis alcalina del acetato de etilo**



Fuente: WINGROVE, Alan; CARET, Robert. *Química orgánica*. p. 117.

## 2.6. Conductimetría

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. En otras palabras, la conductividad eléctrica es un fenómeno de transporte que se da por la difusión de los iones en una solución.

En soluciones de electrolitos son propiedades importantes la resistencia eléctrica, conductancia eléctrica (inverso de la resistencia eléctrica) además de la conductividad.

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  $\Lambda$  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) del electrolito en sí. Para cuantificar el efecto de la concentración se definió una nueva variable conocida como conductividad molar ( $\Lambda$ ). Esta variable está

definida como la conductividad eléctrica dividida entre la concentración. Es decir:

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

Donde:

- $\Lambda$ : conductividad molar
- $k$ : conductividad electrolítica
- $c$ : concentración solución electrolítica

La importancia de la conductividad molar radica en que permite obtener la conductividad de los iones de 1 mol de una sustancia dada. Es interesante que en todos los casos se dé un descenso de la conductividad molar conforme la concentración aumenta. Sin embargo, es posible clasificar dos tipos de comportamiento relacionados finalmente con el efecto del carácter del electrolito en sí.

### **2.6.1. Electrolitos débiles**

Los electrolitos débiles suelen producir menos iones por su disociación parcial respecto a los electrolitos fuertes. Es por eso que presentan un descenso más pronunciado de la conductividad molar al aumentar la concentración respecto a los electrolitos fuertes. Debe de tomarse en cuenta que en este caso el grado de disociación afecta considerablemente la conductividad molar.

### 2.6.2. Electrolitos fuertes

Los electrolitos fuertes se disocian por completo, por lo que su conductividad molar tiende a ser casi constante a diferentes concentraciones. Si se baja la concentración hasta tener una dilución infinita se obtiene un valor de conductividad molar conocido como conductividad molar a dilución infinita ( $\Lambda^0$ ) la cual se puede determinar teóricamente a partir de la migración independiente de iones. Allí se postula que cada ión efectúa su propia contribución a la conductividad molar sin importar la naturaleza del otro ión con el cual está asociado. Debido a lo cual se puede determinar la conductividad molar a dilución infinita teórica a partir de las conductividades iónicas de cada ión. Por lo que:

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

Donde:

- $\Lambda^0$  conductividad Molar a disolución infinita
- $\Lambda_+^0$  conductividad molar del catión a disolución infinita
- $\Lambda_-^0$  conductividad molar del anion a disolución infinita

Tabla II. **Conductividades iónicas molares en agua a 25 °C (a dilución infinita)**

Catión	$\lambda^{\circ}_{+}$ (S cm <sup>2</sup> /mol)	Anión	$\lambda^{\circ}_{-}$ (S cm <sup>2</sup> /mol)
H+	349.8	OH-	198.6
Na+	50.1	Cl-	76.4
K+	73.5	Br-	78.1
Rb+	77.8	I-	76.8
Cs+	77.2	CH <sub>3</sub> COO-	40.9

Fuente: CHANG, Raymond. *Química*. p. 302.

O bien es posible determinar la conductividad del anión junto al catión mediante la ayuda de gráficas y correlaciones determinadas.

## **3. MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1. Variables**

Las variables que se analizarán en esta investigación pueden ser clasificadas en función de cada una de las etapas en las cuales se ha dividido el trabajo. A continuación se muestra la clasificación de las variables en función del diseño, la construcción y la evaluación.

#### **3.1.1. Diseño**

- Tiempo de residencia
- Concentración de reactivos
- Flujo de entrada
- Conversión
- Diámetro
- Altura
- Flujo de entrada
- Dimensiones del agitador
- Tipo de deflector

#### **3.1.2. Construcción**

- Selección de materiales
- Costo de materiales

### **3.1.3. Evaluación**

- Tiempo de residencia
- Revoluciones del agitador
- Concentración inicial
- Fracción de conversión
- Conductividad
- Flujo de alimentación
- Temperatura

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

Los campos que se mencionan a continuación delimitan el trabajo que se realizará de forma temporal y física.

- Ubicación: Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Equipo: reactor de tanque agitado continuo.
- Espacio temporal: año 2017-2018.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Investigador: Luis Augusto Diaz Corzo
- Asesor: Ing. Julio David Vargas García
- Ingenieros consultados: Ing. César Alfonso García Guerra

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

#### **3.4.1. Equipo y cristalería**

- Balanza analítica marca Sartorius Modelo BP3S, máxima capacidad: 150 g, mínimo valor de medición: 1.0 mg, voltaje: 8-14.5v.
- Conductímetro marca Hanna Instruments Modelo HI 9813, rango: 0.00-4.00 mS/cm, resolución: 0.01, desviación típica: +/- 2 %, dimensiones: 185 x 82 x 45 mm, peso: 520 g.
- Tacómetro lacer marca EXTECH Modelo 461995 Rango 10 a 9,999 rpm Desviación típica +/- 0,05 %.
- Balones aforados Pirex de 1 L y 2 L.
- Probeta de 50 ml y 250 ml.
- Pipetas aforadas de 1ml, 25 ml.
- Vidrio reloj.
- Espátulas de acero inoxidable.
- Pissetas de polietileno de 500 ml.
- Beakers tipo pirex de 25, 50, 100 y 250 ml.
- Termómetro.

### **3.4.2. Reactivos**

- Acetato de etilo
- Hidróxido de sodio
- Agua

### **3.4.3. Materiales**

El criterio de elección de los materiales de construcción fue: estables a la mayoría de reacciones empleadas en fase líquida, económicos y fáciles de conseguir. Las mejores alternativas encontradas se detallan a continuación.

- Planchas de acero inoxidable serie 316 de 1/32, 1/16 y 1/8 de pulgada de grosor.
- Tubo de acero inoxidable serie 316 de ¼, ½, 3 y 4plg de grosor.
- Plancha de madera de ½ plg de grosor.
- Manguera de silicón reforzada de ¼ plg de diámetro.
- Manguera de policloruro d vinilo cristalina ½ plg de diámetro.
- Tornillos de acero inoxidable serie 316 ½ plg de diámetro y 3plg de largo.
- Válvula de paso de acero inoxidable ¼ plg.
- Varilla de acero inoxidable de ¼ plg de diámetro.

- Bombas centrífugas.
- Motor DC.
- Rodamiento de bolas de 1 plg.

### **3.5. Metodología experimental**

Se diseñó un reactor de tanque agitado continuo para el sistema acetato de etilo e hidróxido de sodio; esto incluye el sistema de bombeo de reactivos, reactor, agitador, tanques para reactivos y productos y una base estable y duradera para todo lo modulo.

Se construyó el reactor de tanque agitado continuo cuyo diseño se encuentra en el presente trabajo de graduación.

Se desarrolló un software con el cual se calibraron las bombas centrífugas y el agitador. Esto se hizo mediante la variación de la potencia aplicada desde 0 % hasta 100 % en intervalos de 5 %. El líquido utilizado para la calibración fue el agua y con esta se determinó el flujo másico. Se midió la masa trasegada al variar el porcentaje de potencia aplicado en un intervalo de tiempo; luego, se convirtió en volumen por medio de su densidad a la temperatura de trabajo. Cada medición se realizó tres veces.

Se validó el uso del reactor con la comparación de la conversión de la reacción de hidrólisis alcalina acetato de etilo e hidróxido de sodio. Se ingresó concentraciones equimolares de los reactivos y se midió la conductividad, con la conductividad se calculó el porcentaje de conversión y se comparó mediante

un error relativo con la conversión que se obtendría en un reactor de tanque agitado continuo ideal.

### 3.5.1. Diseño del reactor de tanque agitado

Criterios de elección de volumen del reactor:

Para el cálculo del volumen se procedió a utilizar los datos de la hidrólisis alcalina del acetato de etilo y se definieron condiciones de operación y una conversión deseada.

“El valor de la constante de velocidad a 26 °C es de 2,7843 L/mol\*min y el orden global de la reacción es de 2,24, la concentración inicial bombeada es de 0,1 mol/L con un caudal de 0,1 L/min y una conversión de 0,35.”<sup>1</sup>

$$V = \frac{Fa_o - Fa}{-ra}$$

Para facilitar los cálculos del diseño del reactor se estableció el mismo flujo de concentración de reactivos para las condiciones de operación.

$$ra = k * [Ca(1 - x)]^2$$

Al sustituir las variables se obtiene el siguiente modelo:

$$V = \frac{Ca_o * V_o * X}{k * [Ca(1 - x)]^2}$$

---

<sup>1</sup> 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. 37.

Con los valores de las variables se obtiene:

$$V = \frac{0,1 * 0,1 * 0,35}{2,7843 * [0,1(1 - 0,35)]^{2,24}}$$

$$V = 0,625$$

$$V = 0,750L$$

Con base en el valor de volumen y debido a que este tendría un agitador, se aplicó un criterio de diseño del 20 % de volumen extra para cumplir con los requisitos.

Después de determinado el volumen se procedió a la determinación del diámetro y de la altura del tanque; debido a que el trabajo de investigación fue patrocinado a su totalidad por el investigador, se utilizó material reciclado porque el criterio fue construir el tanque con un tubo de 1,5 pulgadas de radio; se determinó la altura de la siguiente forma con todas las unidades en el sistema internacional:

$$V = \pi r^2 h$$

$$h = \frac{V}{\pi r^2}$$

$$h = \frac{750}{\pi 3,81^2}$$

$$h = 19,46cm$$

En la sección de resultados se observarán en los planos las dimensiones del reactor.

### 3.5.1.1. Diseño del sistema de agitación

- Parámetros de diseño

“Se define utilizar un impulsor de hélice de 3 paletas, ya que este tipo de impulsor trabaja principalmente para fluidos de baja viscosidad y para velocidades que pueden ser medias o altas.”<sup>2</sup>

Se utilizarán, para el diseño, placas deflectoras para evitar los vórtices alrededor del eje y reducir de esta manera los esfuerzos que actúen sobre este. Este tipo de impulsor resulta más económico y fácil de construir que un agitador de turbina con palas inclinadas.

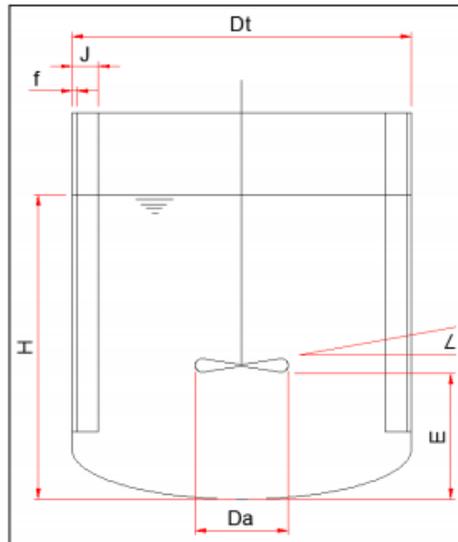
- Semejanzas geométricas para el impulsor de hélice de 3 paletas

Como punto de partida en el diseño de un agitador se pueden utilizar las semejanzas geométricas estandarizadas que relacionan las medidas generales del estanque con el impulsor.

---

<sup>2</sup> MCCABE SMITH, Harriot. *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. p. 49.

Figura 8. **Medidas generales del estanque con el impulsor**



$H / Dt=1$	$Da / Dt=0.33$	$E / Dt=0.33$
$\leq 25^\circ$	$J / Dt=0.1$	$f / J=0.02$

Con las correlaciones se obtienen los siguientes datos:

$Da= 3,4 \text{ cm}$

$J=0,47\text{cm}$

$w=0,58 \text{ cm}$

$L=0,9 \text{ cm}$

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

- Cálculo de potencia para selección de motor

Para la selección del motor, este debe cumplir con las condiciones propias de un elemento mecánico. Por otra parte, el motor seleccionado deberá trabajar a velocidades medias con el fin de reducir el consumo de potencia. Como

velocidad media para una hélice las velocidades pueden ser del orden de las 100 a las 500 rpm.

Considerando el medio al cual estará expuesto el agitador y su conjunto, se define utilizar acero inoxidable del tipo 316, para todos los componentes del agitador que se encuentren en el interior del tanque: las bajas y altas temperaturas.

El eje será dispuesto en el centro del tanque; por lo tanto, este debe contar con placas deflectoras con el fin de evitar la formación de vórtices en el fluido.

- Cálculo de potencia consumida

Para el cálculo de potencia consumida se calcula en primera instancia el número de Reynolds; debido a que las propiedades de los fluidos son similares entre sí, se tomaron las propiedades del hidróxido de sodio.

$$Re = \frac{Nd^2\rho}{\mu}$$

Datos de entrada:

- Densidad = 1 100 Kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad = 0,001 Kg /m\*s
- Velocidad angular = 500 rpm =8,33 rps
- Diámetro del agitador = 0,032 m

$$Re = \frac{8,33 * 0,034^2 * 1\ 100}{0,001} = 10\ 592,43$$

El número de potencia es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del impulsor y la fuerza de inercia. Cuando el tanque contiene placas deflectoras, el  $Np$  tiene una buena correlación con el número de Reynolds. Cuando existe régimen turbulento,  $Np$  tiene valor constante.

$$Np = \frac{P}{N^3 d^2 \rho}$$

En este caso, el  $Np$  es independiente del  $Re$  y la viscosidad no influye. En este intervalo el flujo es turbulento. La potencia puede estimarse a partir del producto del flujo generado por el impulsor y la energía cinética por unidad de volumen del fluido.

$$P = Kt * N^3 * d^5 * \rho$$

“El valor de  $Kt$  es de 0,32 para una hélice con 3 paletas y deflectores.”<sup>3</sup>

$$P = 0,32 * 8,33^3 * 0,034^5 * 1\ 100 = 68,2\ W$$

Después de calculada la potencia consumida se procedido a la selección del motor, considerando una eficiencia del 70 % y unas pérdidas por fricción del 35 % dando una potencia requerida del:

---

<sup>3</sup> MCCABE SMITH, Harriot. *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. p. 69.

$$P = \frac{68,2 * 1,35}{0,7} = 131,57 W$$

Con la potencia requerida se seleccionó un motor que cumpliera esas características de potencia y de velocidad y que trabajase en posición vertical.

### **3.5.1.2. Circuito de bombeo y agitación**

- Se realizan todas las configuraciones de los periféricos: UART, PWM, etc.
- Se entra al ciclo infinito para que el microcontrolador siempre ejecute el programa mientras esté encendido.
- Cada vez que se transmiten bits desde la computadora al microcontrolador se activa una interrupción.
- En la rutina de interrupción se implementó una máquina de estados a fin de determinar en qué el equipo se debe cambiar los valores de PWM.
- Después se actualiza el valor del ciclo de trabajo de acuerdo a la máquina de estados anteriores.
- Se programó el código de programación.
- Se realizaron los planos del circuito y se construyó.

### **3.5.1.3. Construcción del reactor**

- Se realizaron los planos del equipo.
- Con los planos del equipo se procedió a cortar todos los materiales a las medidas necesarias.
- Se perforó, soldó y pulió cada material para conformar el reactor y su base.
- Se armó el equipo para las pruebas y calibraciones preliminares.

### **3.5.1.4. Calibración de las bombas centrífugas**

- La bomba centrífuga se conectó al circuito.
- Se abrió la aplicación diseñada para controlar el sistema.
- El porcentaje de potencia se varió de 0 % a 100 % en intervalos de 5 %.
- En cada variación del sistema se trasegó agua por medio de la bomba en un intervalo de tiempo de 60 segundos.
- Se midió el peso del agua trasegada por las bombas.
- En cada variación del porcentaje de potencia se realizó el procedimiento tres veces.
- Se utilizó el mismo procedimiento para cada bomba.

### **3.5.1.5. Calibración del agitador**

- El motor del agitador se conectó al circuito.
- Se abrió la aplicación diseñada para controlar el sistema.
- El porcentaje de potencia se varió de 0 % a 100 % en intervalos de 5 %.
- Se utilizó como sustancia de calibración agua, debido a la similitud de viscosidades de la reacción a evaluar.
- Se introdujo el agitador dentro del reactor.
- Se midieron las revoluciones del agitador por medio de un tacómetro en cada variación.
- En cada variación se realizó el procedimiento tres veces obteniéndose las revoluciones a cada porcentaje de potencia aplicado.

### **3.5.1.6. Validación del reactor por medio de la reacción del sistema acetato de etilo-hidróxido de sodio**

- Se prepararon 2 L de solución de acetato de etilo 0,1 M.
- Se prepararon 2 L de solución de hidróxido de sodio 0,1 M.
- Se colocaron las soluciones de los reactivos en los tanques respectivos.

- Se midió la temperatura de las soluciones de reactivos.
- Se ajustó la conductividad del conductímetro según la referida por el patrón a esa temperatura.
- Se encendieron las bombas centrífugas y el agitador previamente calibradas y se tomó una muestra de 50 mL.
- Se determinó la conductividad de las muestra del paso 6 con el conductímetro previamente calibrado.
- El procedimiento descrito desde el paso 6 hasta el 7 se efectuó 5 veces.
- Con las conductividades se determinó el porcentaje de conversión en la muestra.
- Se comparó el porcentaje de conversión con las conversiones teóricas obtenidas con la ecuación del reactor de tanque agitado continuo ideal operado a las mismas condiciones del experimento.

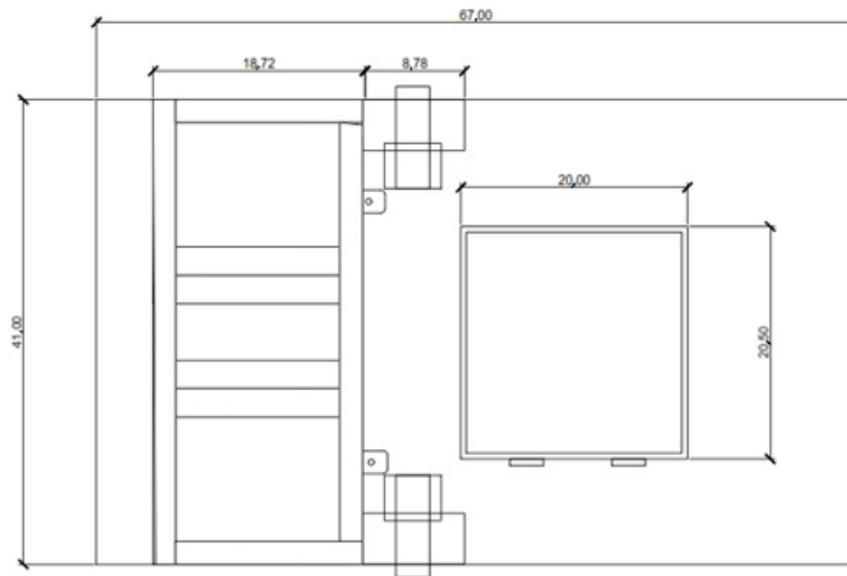


## 4. RESULTADOS

### 4.1. Diseño del módulo y reactor de tanque agitado continuo

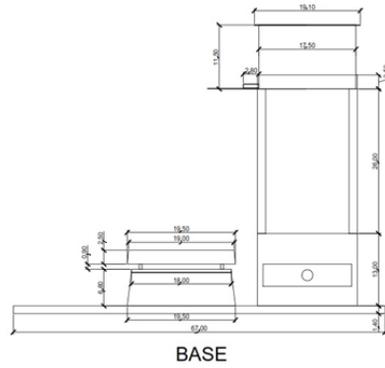
A continuación se presentan los planos del diseño del reactor, sistema de agitación y módulo de operación.

Figura 9. Vista de planta, módulo del reactor



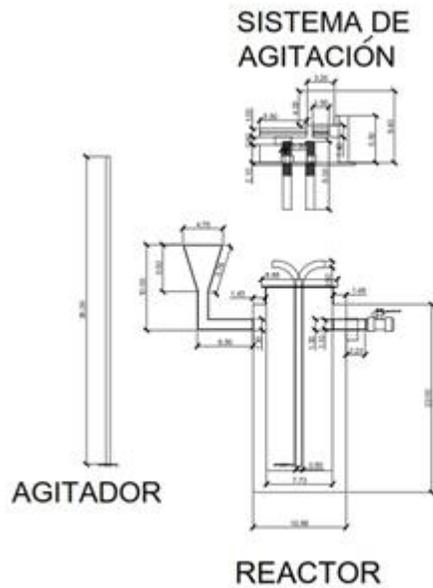
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Figura 10. **Vista de planta base, módulo del reactor**



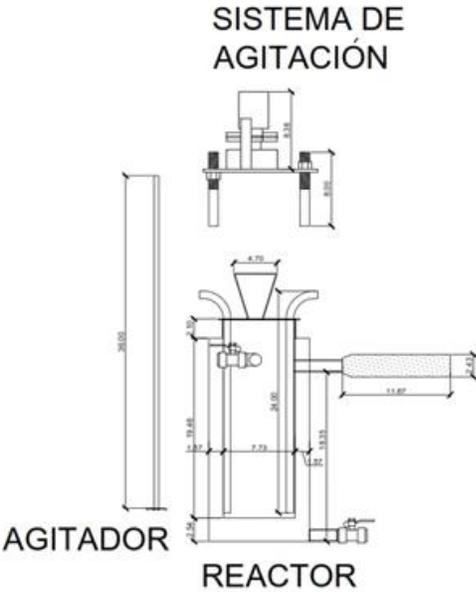
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Figura 11. **Vista lateral izquierda del reactor de tanque agitado continuo y sistema de agitación**



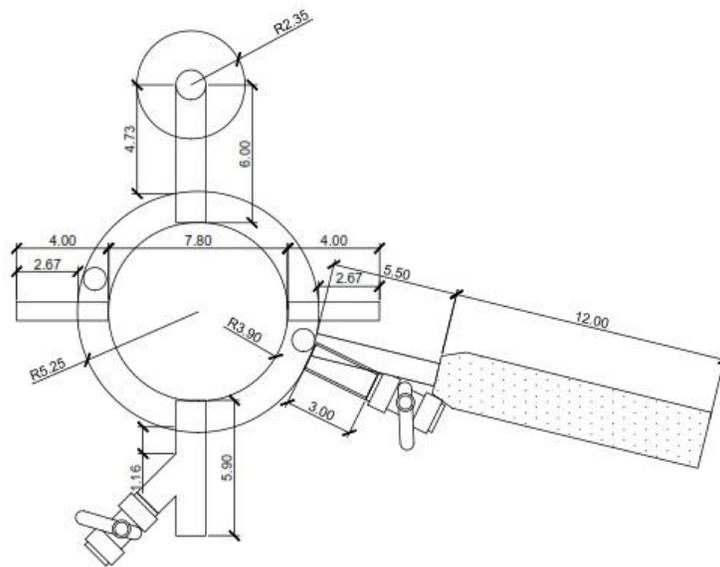
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Figura 12. **Vista lateral derecha del reactor de tanque agitado continuo y sistema de agitación**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Figura 13. Vista de planta del reactor de tanque agitado continuo



## REACTOR

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

### 4.2. Reactor de tanque agitado continuo construido

A continuación, se presentan fotografías del reactor, sistema de agitación y módulo de operación.

Figura 14. **Vista de la elevación frontal, módulo del reactor**



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Vista de la elevación trasera, módulo del reactor**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Vista lateral derecha, módulo del reactor**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Vista lateral izquierda, módulo del reactor**



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Vista de planta, módulo del reactor**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.3. **Validación del reactor de tanque agitado continuo por medio de la conversión del sistema acetato de etilo e hidróxido de sodio**

A continuación, se presentan los datos experimentales de la conversión del sistema, su comparación con el valor teórico.

Tabla III. **Conversión del sistema**

<b>Conversión teórica intervalos</b>			
<b>Valor</b>	<b>%X experimental</b>	<b>%X teórico</b>	<b>Error relativo %</b>
<b>Límite inferior</b>	31,54	31,15	1,25
<b>Valor puntual</b>	32,47	35,00	7,23
<b>Límite superior</b>	33,40	38,85	14,03

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4. Instructivo, realización de práctica

La práctica experimental desarrollada propone el siguiente procedimiento experimental, para la realización del informe con base en datos recolectados durante la experimentación.

Tabla IV. **Experimento 01: reactor de tanque agitado continuo, procedimiento experimental**

Curva de calibración

01. Calibrar el conductímetro con la solución patrón.
02. Preparar las siguientes soluciones

Disolución	Sustancia	Concentración molar	Volumen
1	Hidróxido de sodio	0,12	25 mL
2		0,10	
3		0,08	
4		0,06	
5		0,04	
6		0,02	
7	Acetato de sodio	0,12	
8		0,10	
9		0,08	
10		0,06	
11		0,04	
12		0,02	
13	Agua desmineralizada	N/A	

03. Medir y anotar la conductividad de cada una de las soluciones 3 veces.

Funcionamiento del reactor

04. Preparar 2L de solución de hidróxido de sodio a 0,1 M.
05. Preparar 2L de solución de acetato de etilo a 0,1 M.
06. Verter la solución de hidróxido de sodio en el tanque A.

Continuación de la tabla IV.

07. Verter la solución de acetato de etilo en el tanque B.
08. Conectar el modulo del reactor a la computadora.
09. Abrir la aplicación del módulo e ingresar el puerto serial asociado.
10. Fijar el porcentaje de potencia asociado al caudal deseado en cada bomba.
11. Fijar el porcentaje de potencia asociado a las revoluciones deseadas en el agitador.
12. Activar las bombas y el agitador.
13. Dejar funcionar el equipo hasta que se llene el tanque y así trabajar en estado estacionario.
14. Tomar tres muestras a cada minuto.
15. Medir y anotar la conductividad y temperatura de cada muestra.
16. Dejar funcionando el equipo hasta que se drenen los tanques de los reactivos.
17. Apagar la aplicación del módulo.

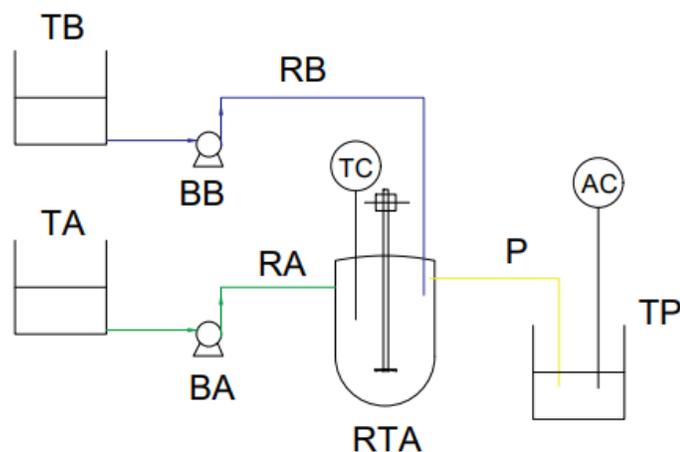
Reportar

01. Gráficas " $K = f(C_i)$ " para cada especie.
02. Determinar la conversión experimental de la reacción.
03. Comparar la conversión experimental con el modelo ideal de un reactor de tanque agitado continuo.

Nota: antes de realizar la practica leer el manual del reactor.

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Diagrama de flujo del equipo



Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Simbología del diagrama de flujo del equipo**

Código	Descripción	Símbolo
TA	Tanque reactivo A	
TB	Tanque reactivo B	
TP	Tanque reactivo productos	
BA	Bomba tanque A	
BB	Bomba tanque B	
RA	Tubería reactivo A	
RB	Tubería reactivo B	
P	Tubería productos	
RTA	Reactor de tanque agitado	
AC	Punto de medición de conductividad	
TC	Punto de medición de temperatura	

Fuente: elaboración propia.

## **5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

### **5.1. Análisis del diseño y la construcción de un reactor de tanque agitado continuo para reacciones líquidas en fase líquida**

El reactor de tanque agitado continuo diseñado y construido se muestra en las figuras 8 a la 17. este posee un volumen total de 0,750 L y un sistema de agitación que varía la velocidad en un rango de 100 rpm a 500 rpm; está diseñado para un tiempo de residencia de 60 s a 120 s y posee un muestreado a la salida del reactor. La totalidad de la estructura del reactor es de acero inoxidable, lo cual permite una variedad de reactivos y productos a través de él. Tiene una capacidad de 2 L por reactivo y un colector de productos de 4 L. El flujo volumétrico y la velocidad de agitación es variable gracias al microcontrolador y el circuito utilizado.

Los parámetros de diseño asignados fueron fundamentados en conceptos teóricos y prácticos referentes a la ley de velocidad de la reacción.

### **5.2. Análisis de la validación del reactor por medio de la hidrólisis alcalina del sistema acetato de etilo-hidróxido**

La tabla 2 muestra la conversión obtenida y sus límites utilizando una concentración de 0,01 M, para las soluciones de acetato de etilo e hidróxido de sodio. Se obtuvo una conversión de  $32,47 \pm 3,93$  % a un volumen de 0,6 L; dichas conversiones se compararon con el valor teórico que se obtendría en un reactor tanque agitado continuo ideal del mismo volumen y condiciones de flujo que el diseñado y construido.

La comparación de los resultados muestra que en la conversión existe un error relativo del 7,23 % con respecto a la del valor ideal y que el mayor error se obtuvo en el límite mayor de conversión con un valor del 14,3.

Todos los resultados exhiben un error relativo menor al 15 %, por lo que se obtuvo un grado de exactitud aceptable. Se determinó que a una concentración de 0,01 M de los reactivos, el reactor construido se comportó de acuerdo a lo esperado y que la técnica conductimétrica empleada es exacta en estas concentraciones.

Los valores obtenidos son precisos ya que se obtuvo un coeficiente de variación de 2,86 % el cual denota una leve variabilidad en los datos obtenidos.

### **5.3. Análisis de la práctica de laboratorio para ser desarrollada utilizando el reactor**

Para la comprensión de la utilización del equipo, se realizó una práctica que incluye el procedimiento operativo, con el fin de que los alumnos a partir de la experimentación, sean capaces de generar un informe que involucre las variables de operación y las variables de cálculo.

## CONCLUSIONES

1. Se diseñó un reactor de tanque agitado continuo como equipo didáctico para el estudio de la cinética química.
2. Se construyó un reactor de tanque agitado continuo, el cual varía el tiempo de residencia en un intervalo de 60 a 120 segundos y la velocidad de agitación en un intervalo de 100 rpm a 500 rpm.
3. Se validó el funcionamiento del reactor construido por medio del monitoreo del avance de la reacción de hidrólisis alcalina del acetato brindando datos exactos y precisos con respecto a los de referencia.
4. Se desarrolló una práctica experimental para la guía de los estudiantes para la realización de futuras prácticas dentro del Laboratorio de Fisicoquímica.



## RECOMENDACIONES

1. Monitorear la hidrólisis alcalina del acetato de etilo a concentraciones mayores y con un conductímetro que posea un rango de detección mayor.
2. Insertar en el reactor una celda conductimétrica para monitorear así la reacción estudiada en tiempo real.
3. Utilizar el reactor de tanque agitado continuo construido para el monitoreo de otras reacciones, verificando siempre la compatibilidad de los reactivos con el mismo.
4. Ampliar las aplicaciones del equipo construido en la didáctica de los cursos de la carrera.



## BIBLIOGRAFÍA

1. CHANG, Raymond. *Química*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 1998. 1012 p.
2. FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. 3a ed. México: Prentice Hall, 2001. 968 p.
3. LAIDLER, Keith; MEISER, John H. *Fisicoquímica*. México: C ECSA, 2002. 987 p.
4. LAINFIESTA LÓPEZ, Diego Bernardo. *Diseño, construcción y evaluación de un reactor flujo pistón de forma helicoidal escala laboratorio*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 391 p.
5. 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 de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2007. 106 p.
6. McCABE SMITH, Harriot. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. 103 p.

7. SMITH, J. M. *Ingeniería de la Cinética Química*. México: CECSA, 1991. 774 p.
8. WARDER, R. B. *The speed of saponification of ethyl acetate american chemical journal*. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2008. 391 p.
9. WINGROVE, Alan; CARET, Robert. *Química Orgánica*. México: Oxford University Press, 1999. 1115 p.
10. ZELADA SÁNCHEZ, Walter Humberto. *Evaluación de un reactor tipo tubular de laboratorio para una reacción homogénea e irreversible de segundo orden (sistema acetato de etilo – hidróxido de sodio)*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1988. 151 p.

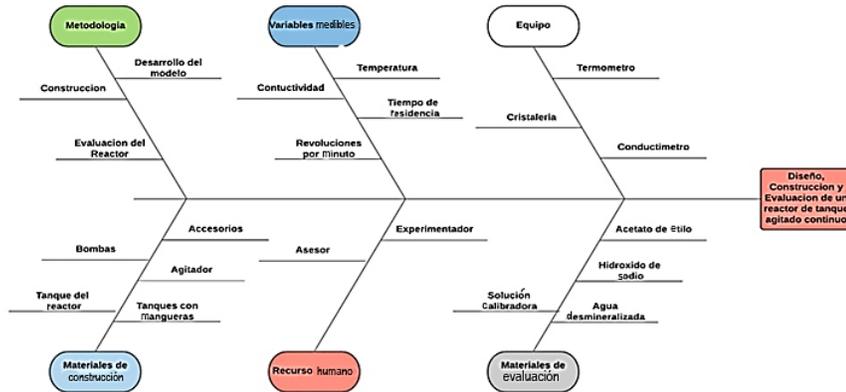
## APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

	Área	Tema general	Tema específico
Ingeniería química	Química	Química analítica y orgánica	Hidrólisis alcalina, saponificación y conductimetría
	Fisicoquímica	Cinética de los procesos químicos	Diseño de reactores y leyes de velocidad
	Operaciones unitarias	Flujo de fluidos diseño de equipo	Bombas agitadores, diseño de equipos y tanques
	Ciencias básicas y complementarias	Ingeniería eléctrica estadística Ciencia de los materiales Ingeniería económica	Motores, circuitos, estadística, materiales para equipos, costos de materiales y optimización

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 3. Masa de agua trasegada variando porcentaje de potencia en la bomba No.1

Potencia (%)	Tiempo(s)	Tara (g)	m1(g)	m2(g)	m3(g)
5	60	415,73	0	0	0
10	60	415,73	0	0	0
15	60	415,73	0	0	0
20	60	415,73	0	0	0
25	60	415,73	490,9	475,67	482,42
30	60	415,73	540,86	528,05	531,79
35	60	415,73	700,97	701,92	704,55
40	60	415,73	942,2	950,45	963,87
45	60	415,73	1 092,43	1 070,14	1 100,93
50	30	415,73	833,05	825,03	832,96
55	30	415,73	901,21	918,54	923,11
60	30	415,73	1 007,29	992,81	990,98
65	30	415,73	1 061,21	1 041,34	1 040,81
70	30	415,73	1 090,56	1 114,7	1 086,32
75	30	415,73	1 145,43	1 137,99	1 099,94
80	30	415,73	1 157,29	1 217,38	1 140,16
85	30	415,73	1 221	1 212	1 234,35
90	30	415,73	1 255,35	1 255,75	1 263,15
95	30	415,73	1 336,7	1 350	1 291,04
99	30	415,73	1 320,4	1 345,25	1 323,42

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Masa de agua trasegada variando porcentaje de potencia en la bomba No.2**

Potencia (%)	Tiempo(s)	Tara (g)	m1(g)	m2(g)	m3(g)
5	60	415,73	0	0	0
10	60	415,73	0	0	0
15	60	415,73	0	0	0
20	60	415,73	0	0	0
25	60	415,73	474,15	453,52	464
30	60	415,73	844,6	840	840,84
35	60	415,73	1 047,11	1 042,38	1 045,75
40	60	415,73	1 208,68	1 253,15	1 247,73
45	60	415,73	1 343,29	1 371,47	1 359,57
50	30	415,73	997,32	990,74	988,05
55	30	415,73	1 053	1 053,94	1 046,91
60	30	415,73	1 091,91	1 085,33	1 092,83
65	30	415,73	1 122,07	1 111,47	1 128,6
70	30	415,73	1 154,76	1 150	1 157,47
75	30	415,73	1 190,57	1 171,46	1 171,56
80	30	415,73	1 203,81	1 221	1 233,45
85	30	415,73	1 228,41	1 235,42	1 224,7
90	30	415,73	1 285,65	1 274,85	1 283,12
95	30	415,73	1 288,18	1 270,28	1 277,48
99	30	415,73	1 309,49	1 280,55	1 300

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Velocidad de agitación variando porcentaje de potencia en el agitador**

Potencia (%)	rpm1	rpm2	rpm3	rpm4	rpm5
5	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
25	31,4	48,3	53,6	19	61,3
30	147,1	141,5	173,2	185,3	134,2
35	183,1	215,4	160,2	165,3	181,9
40	195,2	251,3	187	200	228,2
45	258,3	247,9	291,3	260,6	256,3
50	333,7	335,8	349,5	314,7	334,5
55	382,9	391,8	380	387,2	377,2
60	385,2	388	383,7	381,7	400
65	414	406,5	392,4	424	447,5
70	484,8	474,8	424	479,2	483,1
75	485,4	518	470,3	493,7	543,5
80	497,6	544,4	513,2	523,3	536,2
85	666	587,3	581,2	597,1	638
90	623,5	645,8	669,2	686,9	627,5
95	678,4	667,3	712	731	693,4
99	832,2	720,5	777,8	789	800

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Conductividad de soluciones de hidróxido de sodio a distintas concentraciones en un volumen de 100 mL**

Concentración (M)	Conductividad 1 (mS/cm)	Conductividad 2 (mS/cm)	Conductividad 3 (mS/cm)
0,1190	8,3300	8,3300	8,3200
0,1013	8,2200	8,2200	8,2100
0,0790	7,8700	7,8700	7,9700
0,0585	6,9400	6,9100	6,9100
0,0393	5,3400	5,2900	5,3200
0,0053	0,5900	0,5600	0,5800

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Conductividad de soluciones de acetato sodio a distintas concentraciones en un volumen de 100 mL**

Concentración (M)	Conductividad 1 (mS/cm)	Conductividad 2 (mS/cm)	Conductividad 3 (mS/cm)
0,1196	3,7200	3,7300	3,7000
0,1002	3,2600	3,2800	3,2800
0,0798	2,5400	2,5400	2,5300
0,0599	2,0000	2,0100	2,0000
0,0406	1,3500	1,3600	1,3600
0,0051	0,2100	0,2100	0,2100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Conductividad a la salida del reactor, con concentraciones iniciales de 0,1 M de los reactivos**

Muestra	Conductividad
1	5,52
2	5,45
3	5,49
4	5,45
5	5,54

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Caudales de agua según porcentaje de potencia trasegados al reactor para la bomba 1 y 2**

Potencia	Caudal	
	Bomba 1	Bomba 2
5	0,000	0,000
10	0,000	0,000
15	0,000	0,000
20	0,000	0,000
25	1,121	0,803
30	1,964	7,101
35	4,779	10,489
40	8,941	13,680
45	11,202	15,706
50	13,821	19,210
55	16,619	21,185
60	19,377	22,476
65	21,069	23,499
70	22,715	24,612
75	23,735	25,404
80	25,196	26,790
85	26,891	27,126
90	28,078	28,849
95	30,339	28,764
99	30,465	29,365

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Modelos calculados según el porcentaje de potencia para la calibración del caudal de las bombas y la velocidad del agitador**

Equipo	Modelo en f(%w)
Bomba A	$m/(g/s) = -18,115 + 0,7938 \%W - 0,003063 \%W^2$
Bomba B	$m/(g/s) = -19,06 + 1,0128 \%W - 0,005393 \%W^2$
Agitador	$f/(rpm) = -491,2 + 30,06 \%W - 0,3801 \%W^2 + 0,002077 \%W^3$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Conversiones experimentales obtenidas durante la validación del reactor**

Muestra	Conductividad	Conversión X	Porcentaje de conversión %X
1	5,92	0,317830521	31,78305209
2	5,85	0,333836374	33,38363744
3	5,89	0,324690172	32,46901724
4	5,85	0,333836374	33,38363744
5	5,94	0,31325742	31,32574199
Promedio		0,324690172	32,46901724
Desviación estándar		0,009288012	0,928801208
Coeficiente de variación		0,028605769	0,028605769

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Conversión teórica obtenida mediante el modelo de un reactor ideal**

Conversión teórica intervalos		
Valor	X	%X
Límite inferior	0,46799125	46,799125
Valor puntual	0,34626859	35
Límite superior	0,24457	24,457

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 13. Muestra de cálculo

- Cálculo de la conductividad promedio a partir de las conductividades de las distintas repeticiones.

La conductividad promedio se calculó con la siguiente expresión:

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

- $\bar{K}$  = conductividad promedio determinada (mS/cm).
- $K_i$  = conductividad determinada con el conductímetro en la corrida (mS/cm).
- n: es el número de corridas realizadas.

Sustituyendo valores para la repetición No.1, No.2, No.3, No.4 y No.5 de soluciones 0,01 M de hidróxido de sodio y acetato de etilo, a la salida del reactor se obtiene:

$$\bar{K} = \frac{5,52\text{mS/cm} + 5,45\text{mS/cm} + 5,49\text{mS/cm} + 5,45\text{mS/cm} + 5,54\text{mS/cm}}{5}$$

$$\bar{K} = 5,59 \text{ mS/cm}$$

- Cálculo de la conversión a partir de conductividades

El cálculo de la conversión a partir de la conductividad se calculó con la siguiente expresión:

Continuación del apéndice 13.

$$\bar{X} = \frac{K + K_0}{K_\infty + K_0}$$

Donde:

- $\bar{X}$  = la conversión promedio de la reacción entre el acetato de etilo e hidróxido de sodio.
- $K$  = conductividad promedio determinada con el conductímetro en las corridas respectivas (mS/cm).
- $K_0$  = conductividad de una solución de hidróxido de sodio con la mitad de la concentración que posee la solución de hidróxido de sodio en el depósito del reactor (mS/cm).
- $K_\infty$  = conductividad de la solución de acetato de sodio resultante de la reacción completa de las soluciones de hidróxido de sodio y acetato de etilo (mS/cm).

Sustituyendo valores con soluciones 0.01 M de hidróxido de sodio y acetato de etilo, se obtiene:

$$\bar{X} = \frac{5,49 - 6,91}{2,54 - 6,91}$$

$$\bar{X} = 0,3247$$

$$\bar{X} = 32,47 \%$$

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 14. Análisis de error

- La desviación estándar de la conversión se calculó con la siguiente expresión.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

- $\sigma_x$ = es la desviación estándar de la conversión (%)
- $\bar{X}$ = es la conversión promedio de las repeticiones (%)
- $X_i$ = es la conversión obtenida en la repetición i (%)
- $n$ = es el número de corridas realizadas

Sustituyendo valores para las repeticiones de la 1 a la 5 a una concentración de 0,01 M para el acetato de etilo e hidróxido de sodio, se obtiene:

$$\sigma_x = 0,9288$$

- El coeficiente de variación de la conversión se calculó con la siguiente expresión:

$$CV_x = \frac{\sigma_x}{\bar{X}}$$

Donde:

- $CV_x$ =es el coeficiente de variación de la conversión
- $\sigma_x$ = es la desviación estándar de la conversión (%)

Continuación del apéndice 14.

- $\bar{X}$  = es la conversión promedio de las repeticiones (%)

Sustituyendo valores para las repeticiones de la 1 a la 5 a una concentración de 0.01 M para el acetato de etilo e hidróxido de sodio, se obtiene:

$$CV_x = \frac{0,9288}{32,47}$$

$$CV_x = 0,0286$$

- El error relativo entre la conversión experimental y la conversión teórica esperada se calculó con la siguiente expresión:

$$E_x = \frac{|\bar{X}-b|}{b} * 100$$

- $E_x$  = es el error relativo entre la conversión experimental y la conversión teórica esperada (%).
- $\bar{X}$  = es la conversión promedio de las repeticiones (%).
- $b$  = es la conversión teórica esperada al volumen de reactor (%).

Sustituyendo valores para las conversiones obtenidas con concentraciones iniciales de 0.01 M para el acetato de etilo e hidróxido de sodio y un volumen igual a 0,75 L se obtiene:

$$E_x = \frac{|32,47-35,00|}{35} * 100$$

$$E_x = 7,23 \%$$

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 15. Manual operativo para el reactor de tanque agitado



Antes de realizar cualquier trabajo con el reactor, lea el manual de operación completamente, por su seguridad y para evitar daños en el equipo.

- Contenido
  - Componentes del reactor
  - Diagrama del reactor
  - Componentes de control de bombeo y agitación
  - Datos técnicos del equipo
  - Limitaciones del equipo
  - Mantenimiento

Continuación del apéndice 15.

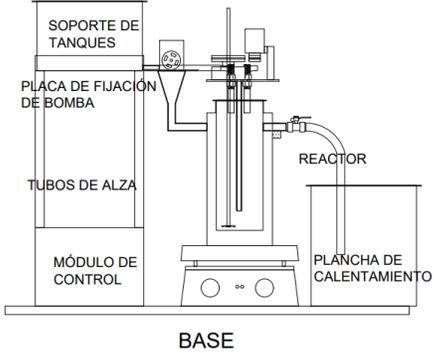
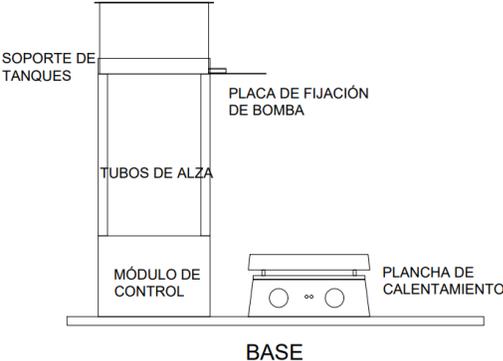
- Componentes del módulo y reactor

Tabla A1. **Componentes del módulo del reactor**

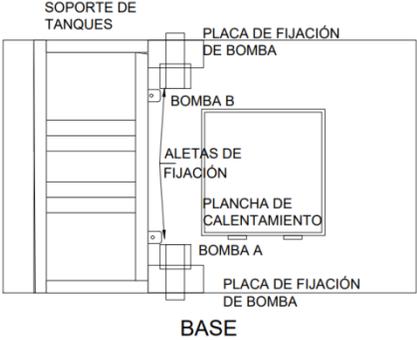
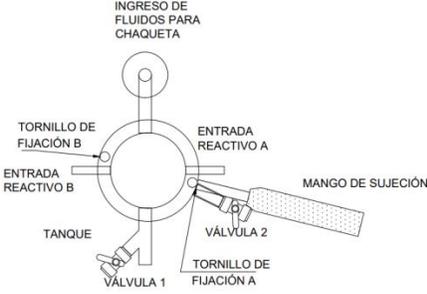
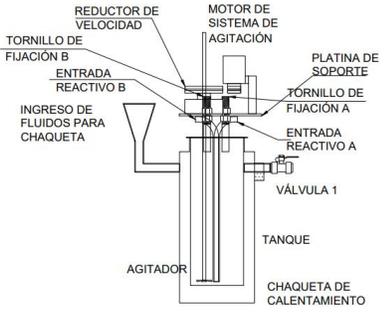
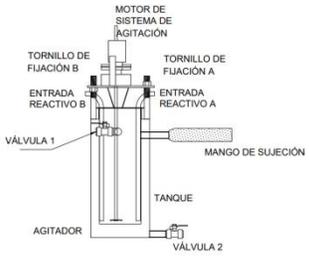
Componente	Parte
<b>Módulo</b>	Base módulo
	Aletas de fijación
	Plancha de calentamiento
	Caja de herramientas
	Módulo de control
	Tubos de alza
	Soporte de tanques
	Placas de fijación de bombas
	Tanque de reactivo A
	Tanque de reactivo B
	Tanque de productos
	Bomba A
	Bomba B
<b>Reactor</b>	Tanque
	Válvula 1
	Válvula 2
	Mango de sujeción
	Tornillo de fijación A
	Tornillo de fijación B
	Entrada reactivo A
	Entrada reactivo B
	Ingreso de fluidos para chaqueta
	Chaqueta de calentamiento
<b>Sistema de agitación</b>	Platina de soporte
	Reductor de velocidad
	Motor del sistema de agitación
	Agitador

Continuación del apéndice 15.

- Diagrama del reactor

Tipo de vista	Plano
<p><b>Vista, elevación frontal, módulo y reactor de tanque agitado</b></p>	 <p>Diagrama de vista frontal completa del reactor. El sistema está montado sobre una <b>BASE</b>. A la izquierda se encuentra el <b>MÓDULO DE CONTROL</b> con un panel de botones. Encima de él está el <b>SOPORTE DE TANQUES</b> que sostiene un tanque vertical. Una <b>PLACA DE FIJACIÓN DE BOMBA</b> conecta el tanque con el <b>REACTOR</b> central. El reactor tiene un eje vertical con un agitador y está conectado a un sistema de <b>TUBOS DE ALZA</b>. A la derecha del reactor se encuentra una <b>PLANCHA DE CALENTAMIENTO</b> que proporciona calor al sistema.</p>
<p><b>Vista, elevación frontal, módulo</b></p>	 <p>Diagrama de vista frontal del módulo. Muestra el <b>SOPORTE DE TANQUES</b> y el <b>MÓDULO DE CONTROL</b> sobre la <b>BASE</b>. La <b>PLACA DE FIJACIÓN DE BOMBA</b> y los <b>TUBOS DE ALZA</b> también son visibles.</p>
<p><b>Vista, elevación posterior, módulo</b></p>	 <p>Diagrama de vista posterior del módulo. Muestra el <b>SOPORTE DE TANQUES</b> y la <b>PLACA DE FIJACIÓN DE BOMBA</b> sobre la <b>BASE</b>. Se ven también los <b>TUBOS DE ALZA</b>, la <b>PLANCHA DE CALENTAMIENTO</b> y una <b>CAJA DE HERRAMIENTAS</b> ubicada debajo del módulo.</p>

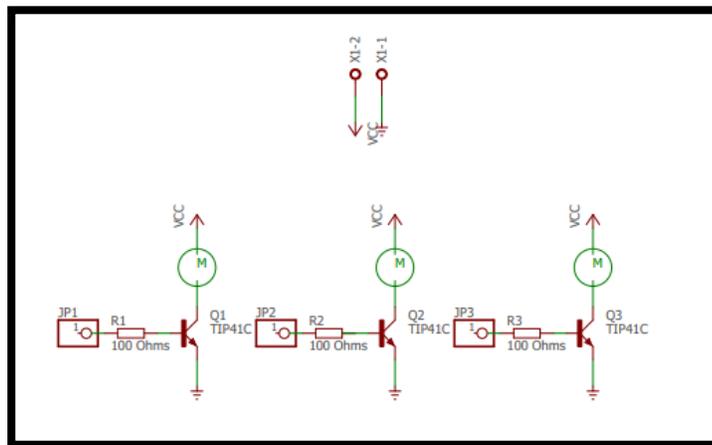
Continuación del apéndice 15.

<p><b>Vista de planta, módulo</b></p>	 <p>Diagram showing the top view of the module. Components labeled include: SOPORTE DE TANQUES (Tank support), PLACA DE FIJACIÓN DE BOMBA (Pump mounting plate), BOMBA B (Pump B), ALETAS DE FIJACIÓN (Mounting tabs), PLANCHA DE CALENTAMIENTO (Heating plate), BOMBA A (Pump A), and PLACA DE FIJACIÓN DE BOMBA (Pump mounting plate). The entire assembly is mounted on a BASE (Base).</p>
<p><b>Vista de planta, reactor</b></p>	 <p>Diagram showing the top view of the reactor. Components labeled include: INGRESO DE FLUIDOS PARA CHAQUETA (Fluid inlet for jacket), TORNILLO DE FIJACIÓN B (Mounting screw B), ENTRADA REACTIVO B (Reactive B inlet), TANQUE (Tank), VÁLVULA 1 (Valve 1), VÁLVULA 2 (Valve 2), TORNILLO DE FIJACIÓN A (Mounting screw A), ENTRADA REACTIVO A (Reactive A inlet), and MANGO DE SUJECCIÓN (Clamping handle).</p>
<p><b>Vista, elevación posterior, reactor</b></p>	 <p>Diagram showing the rear elevation of the reactor. Components labeled include: REDUCTOR DE VELOCIDAD (Speed reducer), MOTOR DE SISTEMA DE AGITACIÓN (Agitation system motor), PLATINA DE SOPORTE (Support plate), TORNILLO DE FIJACIÓN A (Mounting screw A), ENTRADA REACTIVO A (Reactive A inlet), VÁLVULA 1 (Valve 1), TANQUE (Tank), CHAQUETA DE CALENTAMIENTO (Heating jacket), AGITADOR (Agitator), INGRESO DE FLUIDOS PARA CHAQUETA (Fluid inlet for jacket), ENTRADA REACTIVO B (Reactive B inlet), and TORNILLO DE FIJACIÓN B (Mounting screw B). The reactor is labeled REACTOR.</p>
<p><b>Vista, elevación frontal, reactor</b></p>	 <p>Diagram showing the front elevation of the reactor. Components labeled include: MOTOR DE SISTEMA DE AGITACIÓN (Agitation system motor), TORNILLO DE FIJACIÓN B (Mounting screw B), ENTRADA REACTIVO B (Reactive B inlet), VÁLVULA 1 (Valve 1), AGITADOR (Agitator), TANQUE (Tank), VÁLVULA 2 (Valve 2), TORNILLO DE FIJACIÓN A (Mounting screw A), ENTRADA REACTIVO A (Reactive A inlet), and MANGO DE SUJECCIÓN (Clamping handle). The reactor is labeled REACTOR.</p>

Continuación del apéndice 15.

- Componentes de control de bombeo y agitación

Figura A1. **Diagrama, circuito, control de bombeo y agitación**



Fuente: elaboración propia.

Tabla A2. **Nomenclatura**

Código	Componente
R1	Resistencia 100 $\Omega$
R2	Resistencia 100 $\Omega$
R3	Resistencia 100 $\Omega$
JP1	Pin 1
JP2	Pin 2
JP3	Pin 3
Q1	Transistor tip41c
Q2	Transistor tip41c
Q3	Transistor tip41c
X1-1	Bornera

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 15.

Tabla A3. **Código de programación del microcontrolador**

```
#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>
#include "inc/hw_ints.h"
#include "inc/hw_memmap.h"
#include "inc/hw_types.h"
#include "driverlib/gpio.h"
#include "driverlib/interrupt.h"
#include "driverlib/pin_map.h"
#include "driverlib/sysctl.h"
#include "driverlib/uart.h"
#include "driverlib/pwm.h"

//*****Definiciones*****//
#define Frequency 200
#define CLOCK 8000000

//*****Variables*****//
volatile uint32_t LoadDC;
volatile uint32_t PWMClock;
volatile uint8_t Duty_Cycle=80;
volatile uint32_t Switch;

volatile char estado;//esta variable indica en cual pwm se hara el cambio de ciclo de trabajo.
volatile char nuevo_ciclo; //esta variable almacena las actualizaciones en los ciclos de trabajo
del PWM
int estado1;
int bandera =0;
int bandera1=0;
int bandera2=0;
int bandera3=0;

//*****Metodos*****//
```

Continuación del apéndice 15.

```
void UARTIntHandler(void){
    uint32_t ui32Status;

    if (bandera==0){
        ui32Status = UARTIntStatus(UART0_BASE, true); //Obtiene el estado de la
interrupción
        UARTIntClear(UART0_BASE, ui32Status); //limpia la interrupción
        estado = UARTCharGet(UART0_BASE);
        SysCtlDelay(1000);
        bandera = 1;
        if (estado == 'x'){

            estado1 =1;
        }
        else if (estado == 'y'){

            estado1 =2;
        }
        else if (estado == 'z'){

            estado1 = 3;
        }
        else if (estado == 'o'){
            GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE,
GPIO_PIN_1|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_3,2);

            if (bandera1 ==0){
                PWMOutputState(PWM0_BASE, PWM_OUT_1_BIT, true);
                bandera1 =1;
            }else {
                PWMOutputState(PWM0_BASE, PWM_OUT_1_BIT, false);
                bandera1 = 0;
            }
        }
    }
}
```

## Continuación del apéndice 15.

```
    }  
  
        bandera = 0;  
    }  
    else if (estado == 'p'){  
        GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_3,4);  
  
        if (bandera2 == 0){  
            PWMOutputState(PWM0_BASE, PWM_OUT_4_BIT, true);  
            bandera2=1;  
        } else {  
            PWMOutputState(PWM0_BASE, PWM_OUT_4_BIT, false);  
  
            bandera2=0;  
        }  
  
        bandera = 0;  
    }  
    else if (estado == 'q'){  
        GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_3,8);  
  
        if (bandera3 == 0){  
            PWMOutputState(PWM1_BASE, PWM_OUT_2_BIT, true);  
            bandera3 = 1;  
        } else {  
            PWMOutputState(PWM1_BASE, PWM_OUT_2_BIT, false);  
            bandera3 =0;  
        }  
  
        bandera = 0;  
    }  
    else {  
        bandera =0;  
    }  
}
```

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 15.

- Datos técnicos del equipo
  - 4.1 Curvas de calibración

Fuente: elaboración propia.

Tabla A3. **Curva de calibración de agitador, análisis estadístico y generación de modelo matemático**

Análisis de regresión:  $f/(rpm)$  vs.  $\%W$ ;  $\%W^2$ ;  $\%W^3$

Análisis de varianza

Fuente valor p	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajuste.	MC Ajust.	Valor de F
Regresión	3	3 304 480	98,26 %	3 304 480	1 101 493	1 434,47
%W	1	3 275 365	97,40 %	49 676	49 676	64,69
$\%W^2$	1	820	0,02 %	26 998	26 998	35,16
$\%W^3$	1	28 295	0,084 %	28 295	28 295	36,85
Error	76	58 358	1,74 %	58 358	768	
Falta de ajuste	12	21 844	0,65 %	21 848	1 821	3,19
Error puro	64	36 510	0,109 %	36 510	570	
Total	79	3 362 838	100,00 %			

Observación: el modelo podría ser aún más parsimonioso, al observar la contribución de los términos cuadrático y cúbico, pero se ajusta mejor en la tendencia suavizada.

Continuación del apéndice 15.

Tabla A4. Resumen del modelo

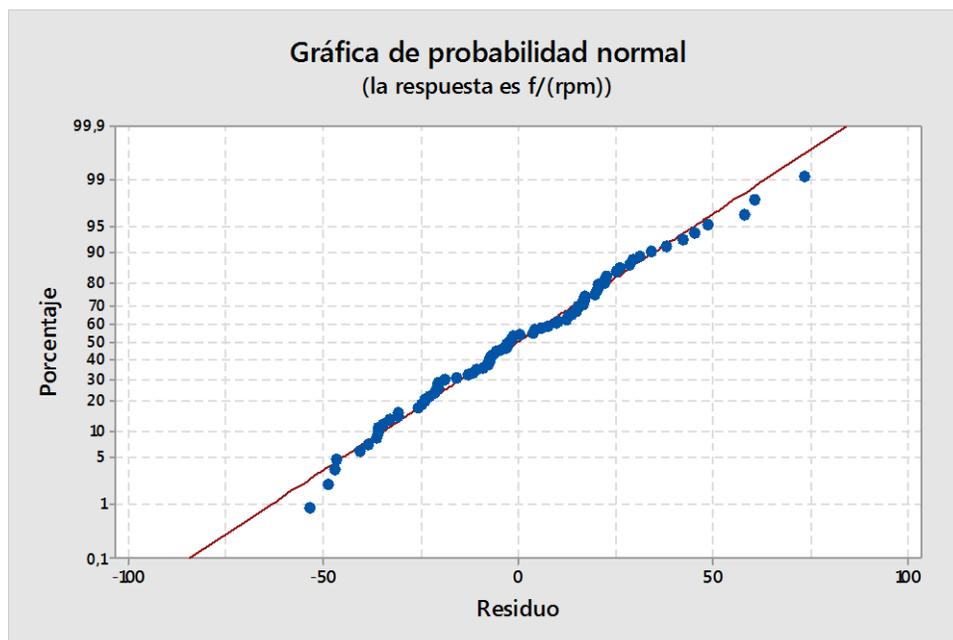
S	R-cuad.	R-cuad. ajustado	press	R-cuad. (pred)
27,7105	98,263 %	98,20 %	65 462,7	98,05 %

Observación: el R<sup>2</sup> indica que el modelo explica un 98,2 % (en forma ajustada) de la variación que presenta la frecuencia del agitador. S es el error típico conjunto.

Ecuación de regresión, agitador

$$f/(rpm) = -491,2 + 30,06 \%W - 0,3801 \%W^2 + 0,002077 \%W^3$$

Figura A2. Gráfica normal de residuos para f/(rpm)

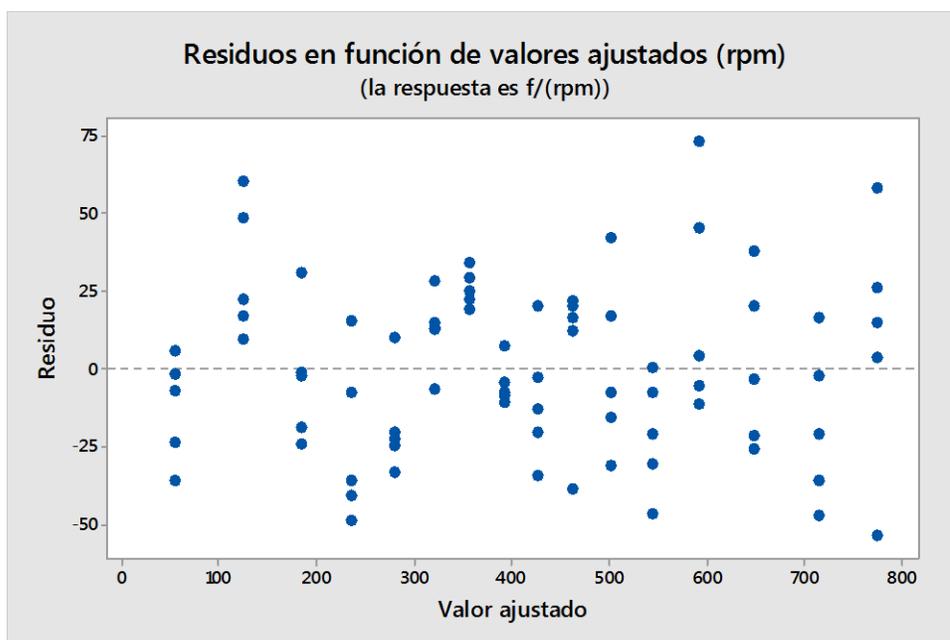


Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 15.

La gráfica muestra un ajuste aceptable a la distribución normal, esto indica que el ajuste perfecto (residuo igual a cero) es el más probable.

Figura A3. **Residuos vs. Ajustes para  $f/(rpm)$**

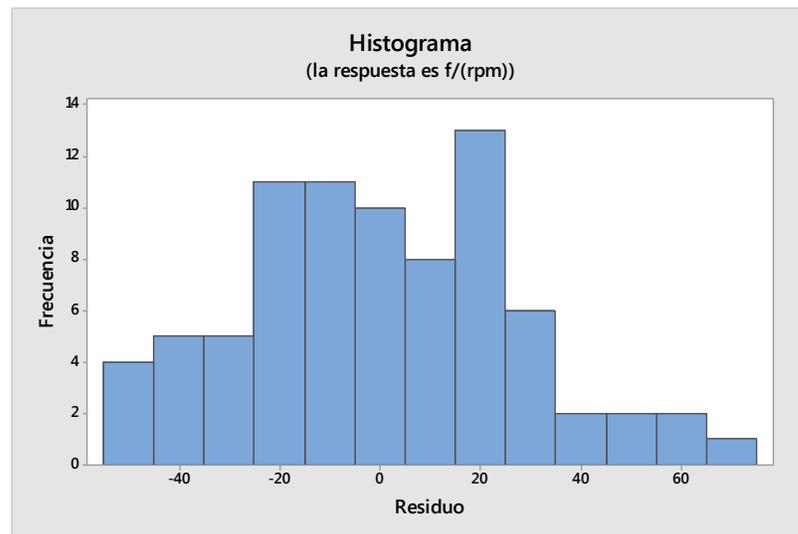


Fuente: elaboración propia.

Al no observarse un patrón en esta gráfica, se puede inferir que no existe un error causado por algún factor principal asociado que no se haya tomado en cuenta.

Continuación del apéndice 15.

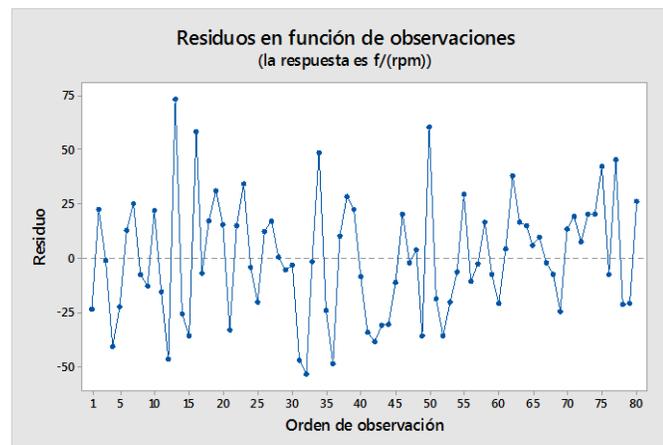
Figura A4. **Histograma de residuos para  $f/(rpm)$**



Fuente: elaboración propia.

La forma del histograma confirma lo que se dijo en la primera gráfica.

Figura A5. **Residuos vs. Orden para  $f/(rpm)$**



Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 15.

Al no observarse un patrón en esta gráfica se puede inferir que no existe un error sistemático significativo y la variación no controlada se debe a factores aleatorios.

Tabla A5. **Curva de calibración, bomba A, análisis estadístico y generación de modelo matemático**

Análisis de regresión:  $m/(g/s)$  vs.  $\%W$ ;  $\%W^2$

Análisis de varianza

Fuente Valor p	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajuste.	MC Ajust.	Valor de F
<b>Regresión</b>	2	4 392,52	99,34 %	4 392,52	2 196,26	3 365,82
<b><math>\%W</math></b>	1	4 295,58	97,14 %	408,78	408,78	626,47
<b><math>\%W^2</math></b>	1	96,95	2,19 %	96,95	96,95	148,57
<b>Error</b>	45	29,36	0,66 %	29,36	0,65	
<b>Falta de Ajuste</b>	13	19,92	0,45 %	19,92	1,53	5,19
<b>Error puro</b>	32	9,44	0,21 %	9,44	0,3	
<b>Total</b>	47	4 421,89	100,00 %			

Fuente: elaboración propia.

Tabla A6. **Resumen del modelo**

S	R-cuad.	R-cuad. Ajustado	press	R-cuad. (pred)
0,807786	99,34 %	99,31 %	34,4789	99,22 %

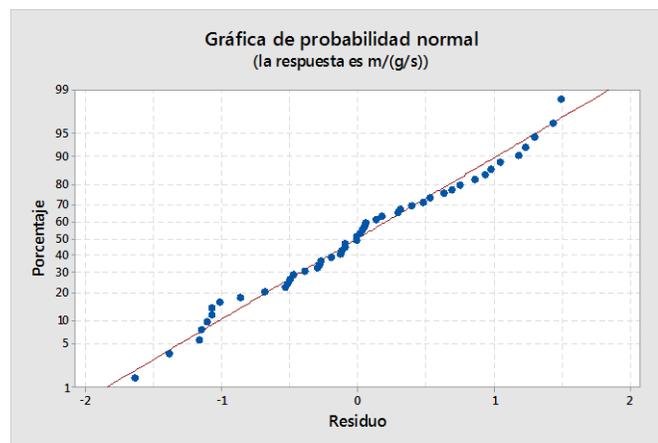
Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 15.

Ecuación de regresión, bomba A

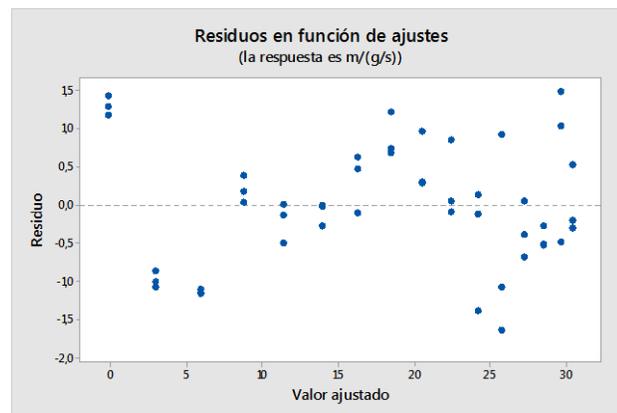
$$m/(g/s) = -18,115 + 0,7938 \%W - 0,003063 \%W^2$$

Figura A6. **Gráfica normal de residuos para m/(g/s)**



Fuente: elaboración propia.

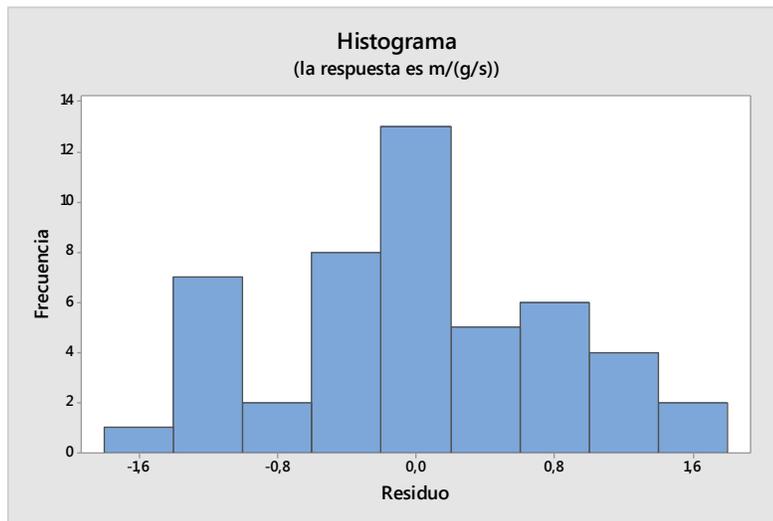
Figura A7. **Residuos vs. Ajustes para m/(g/s)**



Fuente: elaboración propia.

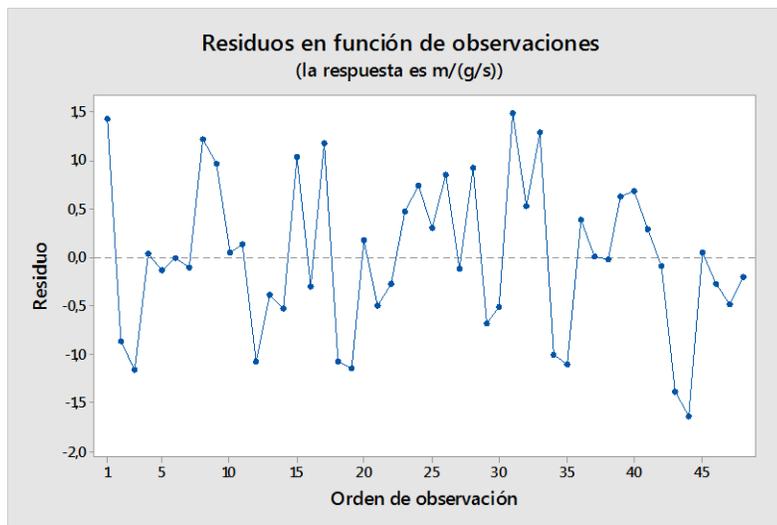
Continuación del apéndice 15.

Figura A8. **Histograma de residuos para m/(g/s)**



Fuente: elaboración propia.

Figura A9. **Residuos vs. orden para m/(g/s)**



Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 15.

Tabla A7. **Curva de calibración, bomba B, análisis estadístico y generación de modelo matemático**

Análisis de regresión:  $m/(g/s)$  vs.  $\%W$ ;  $\%W^2$

Análisis de varianza

Fuent Valor p	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajuste.	MC Ajust.	Valor de F
Regresión	2	3239,66	98,75 %	3 239,66	1 619,83	1 782,33
%W	1	2939,14	89,59 %	665,47	665,47	732,22
$\%W^2$	1	300,52	9,16 %	300,52	300,52	330,67
Error	45	40,9	1,25 %	40,9	0,91	
Falta de ajuste	13	38,51	1,17 %	38,51	2,96	39,77
Error puro	32	2,38	0,07 %	2,38	0,07	
Total	47	3280,56	100,00 %			

Fuente: elaboración propia.

Tabla A8. **Resumen del modelo**

S	R-cuad.	R-cuad. Ajustado	press	R-cuad. (pred)
0,953326	98,75 %	98,70 %	49,5136	98,49 %

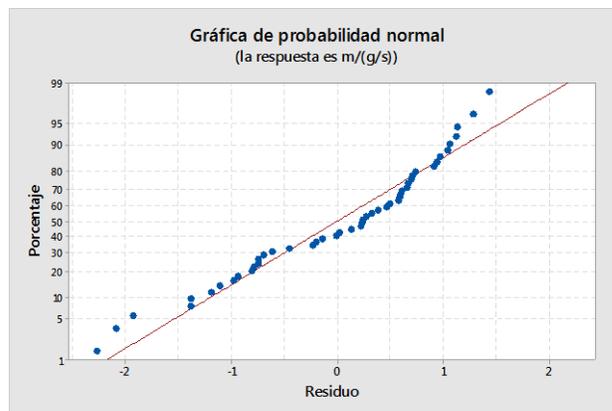
Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 15.

- Ecuación de regresión, bomba B

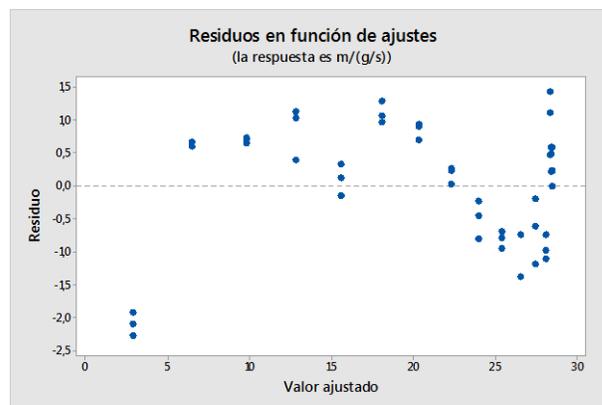
$$m/(g/s) = -19,06 + 1,0128 \%W - 0,005393 \%W^2$$

Figura A10. **Gráfica normal de residuos para m/(g/s)**



Fuente: elaboración propia.

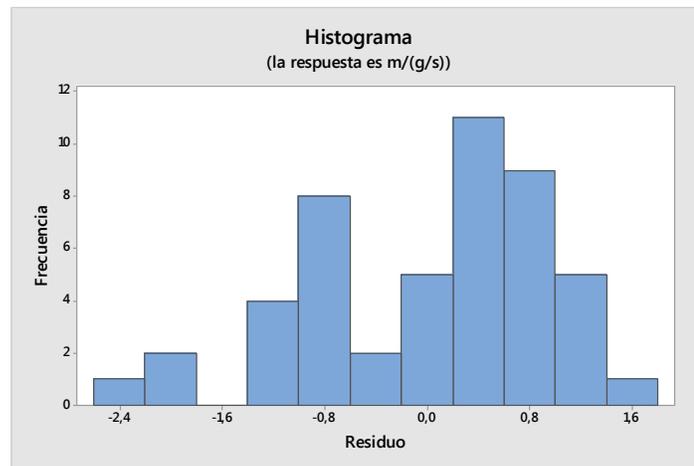
Figura A11. **Residuos vs. Ajustes para m/(g/s)**



Fuente: elaboración propia.

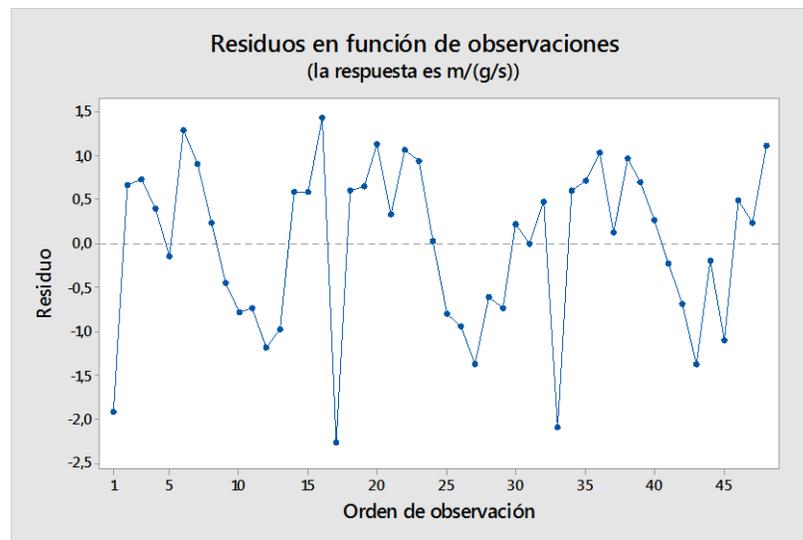
Continuación del apéndice 15.

Figura A12. **Histograma de residuos para m/(g/s)**



Fuente: elaboración propia.

Figura A13. **Residuos vs. Orden para m/(g/s)**



Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 15.

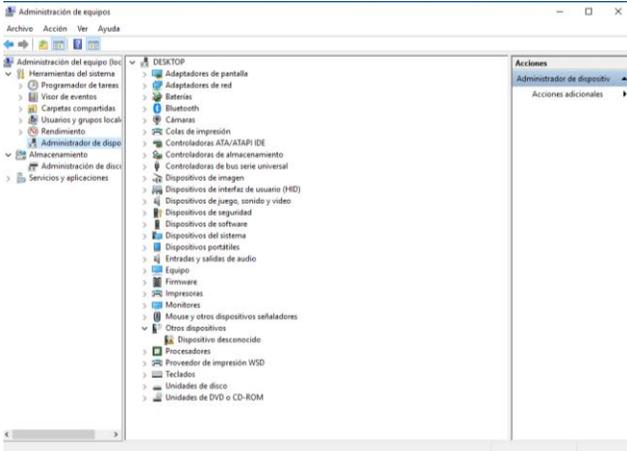
- Algoritmo arranque del equipo
  - Colocación de mangueras, bombas y agitador
- Conectar Mangueras, bombas y agitador

A continuación, se observa la correcta colocación de mangueras del equipo y la conexión de bombas y del agitador, por lo que el equipo debe ser armado de esta manera.

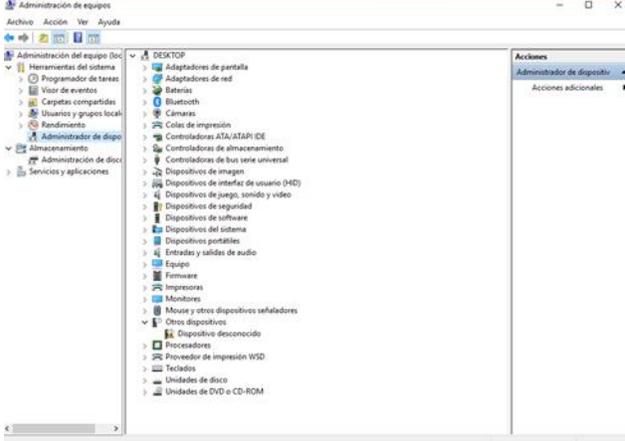
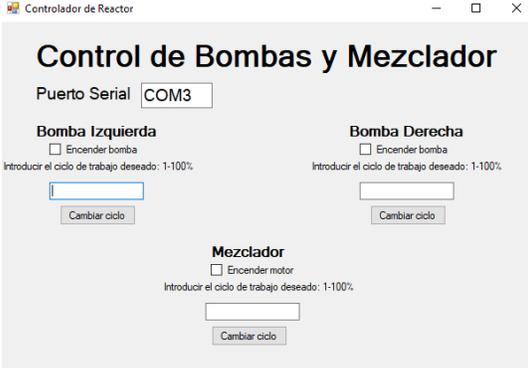
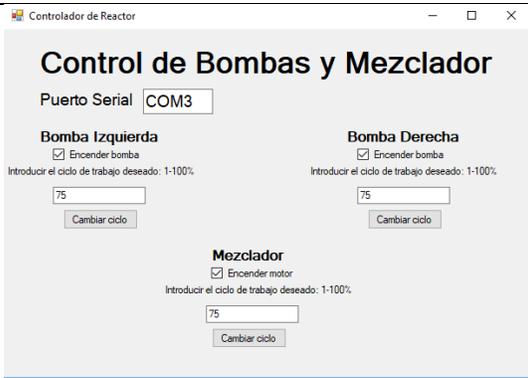
Tabla A9. **Ejecución del programa del módulo**

Primer paso: obtener el programa.	
Conecta el cable USB del módulo a la computadora y prender el modulo.	

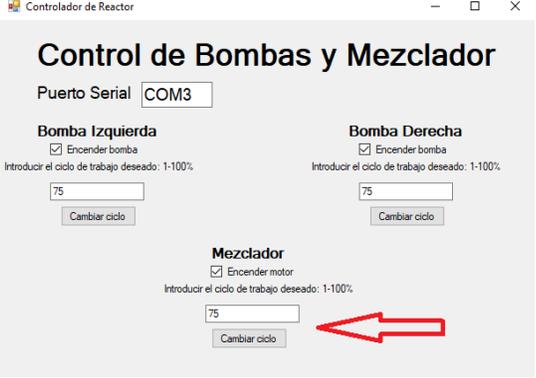
Continuación del apéndice 15.

<p>Segundo paso: ejecutar el programa.</p>	
<p>Determinar el puerto serial (es importante mencionar que esta aplicación está diseñada para Windows 10); para ello se procede a dar click derecho sobre el icono de equipo, seguido administrar obteniendo la siguiente ventana:</p>	

Continuación del apéndice 15.

<p>Al tener esta ventana, se procede a buscar el puerto COM el cual está conectado el equipo, como se muestra.</p>	
<p>Ingresar el nombre del puerto COM al programa.</p>	
<p>Asignar valores de potencia a los dispositivos según los modelos determinados y encender cuando se desea ejecutar el equipo.</p>	

Continuación del apéndice 15.

<p>Si se desea cambiar la potencia suministrada se corrige el dato en el programa y se da click izquierdo en “Cambiar ciclo”</p>	
--	--

Fuente: elaboración propia.

Nota: es muy importante utilizar las bombas y el agitador con líquidos, de lo contrario, puede causar desperfectos en el equipo.

Continuación del apéndice 15

- Limitaciones del equipo

Tabla A10. **Limitaciones y cuidado de los componentes y materiales**

Componente	Descripción	Cuidado	Limitación
<b>Bomba A y B</b>	Bomba utilizada para el trasegado del tanque A y B.	No utilizar este equipo sin un fluido.	No funcionan con fluidos cuya viscosidad sea mayor a $10^4$ cP.  No utilizar fuentes mayores de 12 V.
<b>Motor agitador</b>	Motor utilizado para la agitación del sistema.	No permitir que el motor tenga contacto con líquidos.  Siempre utilizar el equipo con un fluido dentro.	No funcionan con fluidos cuya viscosidad sea mayor a $10^4$ cP.  No utilizar fuentes mayores de 12 V.
<b>Reactor</b>	Equipo donde sucede la reacción química.	No utilizar compuestos que reaccionen con el acero inoxidable.	No utilizar temperaturas mayores al punto de fusión del acero inoxidable serie 316.

Continuación del apéndice 15.

- Mantenimiento

Mantenimiento preventivo

Tabla A11. **Actividades de mantenimiento preventivo**

Actividad	Equipo	Procedimiento
<b>Inspección</b>	Reactor y tanques	Verificar que no se dejó ningún producto dentro del equipo.
	Bombas y agitador	Verificar que esté conectada correctamente y evitar que los lagartos tengan contacto.
	Módulo de Control	Verificar que todo el módulo esté conectado correctamente y que no exista algo que obstruya la entrada de aire al módulo.
<b>Limpieza</b>	Reactor	Limpiar después de su uso con jabón y agua.
	Tanques	Limpiar después de su uso con jabón y agua
	Bombas	Limpiar periódicamente de partículas con un limpiador de contactos eléctricos, limpiar después de su uso.
	Agitador	Limpiar periódicamente de partículas con un limpiador de contactos eléctricos.
	Módulo de control	Limpiar periódicamente de partículas con un limpiador de contactos eléctricos.

Continuación del apéndice 15.

- Mantenimiento correctivo

Este mantenimiento se realiza luego que ocurra una falla o avería en el equipo; por su naturaleza no pueden planificarse en el tiempo, pues puede implicar el cambio de algunas piezas del equipo en caso de ser necesario.

Fuente: elaboración propia.