

Cuernavaca, Mor., a 7 de **septiembre** de 2021

M.B. DANIEL MORALES GUZMÁN
DRA. CARMEN HENEFF GARCIA ESCOBAR
DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO
ING. LIZETH CONCHA GUZMÁN
DR. NARCIZO MENDOZA AGUERO
P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de: **TESIS**

Titulado:

Construcción y evaluación de un reactor continuo de mezcla completa para la reacción de saponificación a escala laboratorio.

Que presenta (el) o (la) **C. VANESSA GUADALUPE MORENO AYALA**

Del programa educativo de: **INGENIERÍA QUÍMICA**

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
	M.B. DANIEL MORALES GUZMÁN	
	DRA. CARMEN HENEFF GARCIA ESCOBAR	
	DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO	
	ING. LIZETH CONCHA GUZMÁN	
	DR. NARCIZO MENDOZA AGUERO	

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas

VALH/fmg

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2021-09-07 20:15:22 | Firmante

dB+4OIFUKkr3eH9zODfiB4Xd0gKZeAc4I7ZxTDjiiioZQWkxg7DCSgoplkZnpU2CzjdP7rWrSWIBQEY6WAKXfd5+qo+5ABLiQiosNCpi2SSbgXrFZ2lROtZgN9GcGkBZkAg96owgG
OIVLwGxzJkky0qsHLFs6us3lWYFmEb1pxEf4hu+x9xkkZse6TA2P9DUM9QA8dNrs5dRfUHD2yFT8PsTDzb94Mjv748SP8mJ0EUW0OvKgUzehy/QuXBsAfcSy+Nv1FYQlvS2Lniy
1e3maCnlj4w9ONNIffTEKkoEjnadN1bSjuEbQpSjz6K9lwB6hQbe5Q0ndux8LqFpssZcVA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



SVFED1

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/aA0vOAO58vFYPDw44itME1dMOxsolc7B>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO | Fecha:2021-09-08 13:35:34 | Firmante

Bp0vh/XaOEYTp+4c6hJ/hqhtsX33XAt61v5dckQT8QAuQWYnJ1gAmifRFJ0I6ccDVjxo7LFE4vH/Lq9T8QiZK0TVkGH0785Yb+WXIoOgVlienYAcapJ6Yyi3zFHxTkRfL1p31Z7NZHsEQZ2i3u9hjuEzyp6eKVfBmlhv+SoSOObKEtkquO78LnsQ3z5F8nkQadth5PHO2x6zSLsj8f80wnlFclpvQHljbniMr4Ykao45OT6tQmUzomQotxGaf9IbQobuYkw9EKcsK4jOICjWtn37BGi8QMLqcJpEZMRVBUO9swxuPXbOx7EUt2ZKAUQqDpGUdy4n98hurAyg==

NARCIZO MENDOZA AGUERO | Fecha:2021-09-08 16:52:19 | Firmante

vgzT6xo6vl/Wp34uQGFL4uE0UpUQohOXFFX7wUveWo03DmmYv+I98kSHEVR7gnFLEPciV/54SgP9bqJ5DQ2iPKTlPrRpL40fEwPzk4BWP8NSFCqmmy8i0eYnZla/D0y0JACJrDzlgCtQD4RXnyU4g0mqWaO+j1AFbESgLSmAN/bwTYbafseHqOkgimycl2pnAp7FVZDIQB8+8iun9qi0K3fvPXi0Jx7J0lpyFYD6djWOTZb6pM9O6W8Ukq0MGsQnHAjABxdD5wQVYsaZvaD5i2PIVWcBnM2Nz8y7otGiybODEWqPVstz1n998SjrmibV7TZKDSHwOp7Qp5og==

LIZETH CONCHA GUZMAN | Fecha:2021-09-14 10:15:48 | Firmante

OhPjklBeeo8WjwGL3T1c785Aqd9gkr2t0US0UURT51kUaMNj5U5ul+7LUYUhnOFkMDV/P1F6mhVNGNSbqGQfAraUdCyYR9Aro6xK1/093p3qHBMr75bCTdWzvdldGBBIBShoWwkyJsvAKnz883W+Tm7L5bE1GmrfcNd/RbwxyanHWQDsg8/iu30nzzprR1WNkeRBWzXkh6eHsPTbf5YxtLhZygyAkOvylvUgGJtwrlCMNLNu5Bd46t+VM/ddTUnsswK1YvAlDf5XCE9wV8d9a6jHv0/tiTWf+H126dFXRrMaZggCF6HdvlT9vNdUGrgK/capFFPfcvbe0+Zg==

DANIEL MORALES GUZMAN | Fecha:2021-09-20 00:12:41 | Firmante

Te1zf1cZ5RgD57LP8h8tEEJvckqPmZQW4bJQFhmu9WDnxz+bZl+oXBL3DUbPaZHpbHF9r711YHTxq5Uki98hYVM321LOfoUw6MHM5q38jSouSkROe5+T/p3zUvUmLDEdKPHND72N450NYvdmEeJ1cC7+an4Ay0JrfDy+OEEefj11bmPxxgBBzR0F/t+Z3oEiYzds1oQOrEPi+sG4mbnLSr5huaro4z32f0MzluWwxrYVcdxMTOZ3wFf9JmRcPY/XaEEedvknDVT oPw7w/20QfcSTSGeqjzkrUPi3GCnoi2YF306gnIVchtJqAbKatUW5F7IHsgvEshuOIBsEdA==

CARMEN HENEFF GARCIA ESCOBAR | Fecha:2021-09-21 18:22:06 | Firmante

CbTaMowmC7s7JA4zSEsJUQc1TbB4wC4dGTiiUEqJovW6MiQtmzMKIF3GNeDNL2YJObx6pmoTL6vdXTZso2HG2TzPvhvwnmXC19gsFZCaSeq8uKtZu+8EdVmEY2EApd8JT OcoTHMKzjqmyiNBLofrrDFTO6zbe0whiOWppkav9xgSXqkCYk8GO+p86NZJGEE4zspmDgL7nfdCp45OPf5TdV/k1k88qAltDs7i/aXuk6ZMn3P4ff8q/WLITHy/jS5MCbf7m+/iF6Mq7qDmLa/qBW/MPH0NAUp5Ynn/48PIK2IGfifQZTNlbK7vIRnA/4bluH25dcGXwKzAbYyWdmQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



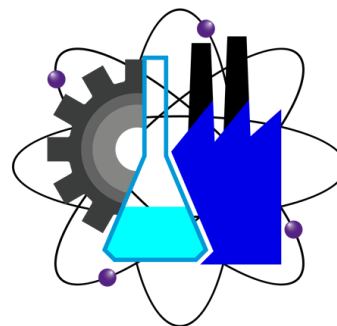
YnchIH

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/2urFveNW1fo1wuA8usWFp6IsacLejZT>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR CONTINUO DE MEZCLA COMPLETA PARA LA REACCIÓN DE SAPONIFICACIÓN A ESCALA LABORATORIO

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:
VANESSA GUADALUPE MORENO AYALA

DIRECTORA DE TESIS: DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO

CUERNAVACA MOR.

SEPTIEMBRE 2021

Agradecimientos

Gracias a mis padres y hermanos por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar cada día en mí y educarme con amor, por la dedicación y paciencia con la que cada día se preocupaban por el avance y desarrollo de esta tesis, por apoyarme en cada decisión y proyecto, a mi madre por acompañarme cada una de las noches largas y agotadoras de estudio, a mi padre por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por sus sabios consejos y cada palabra de aliento.

Gracias a Dios porque cada día bendice mi vida, me permite disfrutar del amor de mi familia y sonreír ante todos mis logros.

Gracias a la vida por esta experiencia, a aquellas personas que me apoyaron incondicionalmente y creyeron en mí y en la realización de esta tesis, a Fernanda Martínez y Earvin Galván por ser personas clave en mi vida, porque los años los convirtieron en mi familia, me dedicaron su tiempo, constante apoyo y me procuraron cada día con mucho amor.

A mis amigos Claudia Morales, Carolina Figueroa, Carlos Millán, Daniela Aldana, Laura López y David Nava que fueron el soporte de mis largos días universitarios, mis amigos del laboratorio de Hidrogeoquímica, Leisbel Cordova, Abel Ruiz, DAngelo Sandoval, Erick Díaz, Suhaila Díaz y Axel Falcón, a quienes tengo mucho cariño, de los que he aprendido mucho y me apoyaron de manera profesional y personal.

Gracias a los Ingenieros Jorge Barreda y Carlos Mercenari y a sus encantadoras esposas por pasar pendientes de mi carrera universitaria y por su constante apoyo.

Gracias a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y especialmente al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias e Ingenierías por la disposición de espacio y material para llevar a cabo los experimentos necesarios, principalmente a mi asesora de Tesis la Dra. Miriam Navarrete por sus conocimientos y asesoría brindada, por su paciencia y dedicación. A los Doctores Roberto Flores y Víctor Velázquez por sus consejos, asesoría, por brindarme sus conocimientos durante toda la carrera universitaria y finalmente a mi comité revisor por dedicar el tiempo necesario para finalizar el desarrollo de este trabajo.

Dedicatoria

Para mami y papi, felices 25 años.

El amor es un acto de fe en otra persona, y su rostro debe estar siempre cubierto por el misterio. Cada momento debe ser vivido con sentimiento y emoción, porque si tratamos de descifrarlo y entenderlo la magia desaparece
Coelho P., 2016.

Pon distancia y trata de mantener la sonrisa. Sintoniza un rock and roll en la radio y ve hacia toda la vida que existe con todo el valor que puedas reunir y toda la fe que logres invocar. Se leal, se valiente, aguanta. El resto es oscuridad.
King S., 1986

Soy polvo de estrellas, Nací de la mano de mi sol del mismo fuego Creación y evolución, Muerte en la oscuridad de un agujero negro Y en el eterno retorno de un nuevo sol Volveré a ser: “ polvo de es trellas”
Brito J., 2016

Índice general

Lista de figuras	vii
Lista de tablas	ix
1. Introducción	1
1.1. Justificación	1
1.2. Objetivo General	2
1.3. Objetivos Específicos	2
2. Marco teórico	3
2.1. Cinética química	3
2.1.1. Método integral	4
2.1.2. Reacciones de orden 0	5
2.1.3. Reacciones de primer orden	5
2.1.4. Reacciones de segundo orden	6
2.1.5. Método diferencial	7
2.1.6. Densidad constante	8
2.2. Reactores Químicos	8
2.2.1. Tipos de Reactores Químicos	8
2.3. Reactor de mezcla completa en estado estacionario (CSTR)	12
2.4. Reacción de Saponificación	14
2.4.1. Determinación del orden de la reacción	15
2.5. Estado del arte	16
3. Metodología	21
3.1. Cinética de la reacción	21
3.1.1. Desarrollo experimental para la constante cinética	22
3.2. Construcción del equipo	25
3.2.1. Calibración de rotámetros	27
3.3. Pruebas en continuo	29
3.3.1. Desarrollo experimental de las pruebas en continuo	30
3.4. Simulador	33
3.4.1. Modelo matemático	33

4. Resultados	35
4.1. Cinética de la reacción	35
4.2. Pruebas en continuo	38
4.2.1. Variación de flujo volumétrico	38
4.2.2. Conversión del reactivo limitante	38
4.3. Condiciones de operación	39
4.4. Verificación del simulador	41
5. Conclusiones	43
A. Nomenclatura	45
B. Práctica de Laboratorio	47
C. Manual de operación para el sistema CSTR	53
D. Manual de instalación y ejecución de simulador de reactor de mezcla completa	59

Índice de figuras

2.1. Ubicación de la cinética química en el estudio de reactores químicos.	4
2.2. Reactor Intermitente	10
2.3. Reactor de Mezcla Completa en Estado Estacionario	11
2.4. Reactor de Flujo Piston	12
2.5. Componentes de un Reactor de Mezcla Completa en Estado Estacionario	14
3.1. Metodología de trabajo	21
3.2. Material, constante cinética	23
3.3. Agua libre de CO_2	23
3.4. Vire de titulación	24
3.5. Diagrama del sistema	27
3.6. Reactor continuo de mezcla completa a escala laboratorio	28
3.7. Rotámetro	30
3.8. Curvas de calibración	31
3.9. Diagrama de flujo	34
4.1. Resultados ajuste metodo integral	37
4.2. Pruebas para el tiempo de residencia	39
4.3. Conversión del reactivo limitante	40
4.4. Diagrama del sistema	41
4.5. Simulador Reactor CSTR	41
4.6. Conversión de NaOH en función del flujo volumétrico para las constantes cinéticas	42
4.7. Conversión de NaOH en función del flujo volumétrico para las concentraciones molares	42
B.1. Diagrama de flujo para un reactor CSTR	48
B.2. Comportamiento de la reacción de saponificación	51
C.1. Reactor continuo de mezcla completa a escala laboratorio	54
C.2. Esquema DTI	55
C.3. Zona de bombas	56
C.4. Zona de flujómetros	56

C.5. Zona de reactor	57
--------------------------------	----

Índice de tablas

2.1. Estado del arte	18
3.1. Materiales y reactivos, constante cinética	22
3.2. Materiales para la construcción de equipo	26
3.3. Nomenclatura del diagrama del sistema	27
3.4. Materiales y reactivos, constante cinética	32
4.1. Resultados de pruebas experimentales 1	36
4.2. Resultados de pruebas experimentales 2	36
4.3. Condiciones de operación	39
4.4. Resultados del simulador	42
B.1. Concentraciones iniciales	50
B.2. Concentraciones iniciales	50

1 Introducción

Un reactor químico se puede definir como un equipo en el cual se forma un producto o productos a partir de dos o más reactantes, por medio de una serie de transformaciones químicas [1]. Un reactor es un componente esencial para efectuar un cambio químico (completo o parcial) y obtener un producto final [2].

En las industrias de procesos, los reactantes químicos se convierten en productos de manera definida y controlada. El descontrol de las reacciones químicas ocurre bajo condiciones anormales, por ejemplo por un mal funcionamiento del sistema de refrigeración, por una carga incorrecta de reactantes o por mal control de la temperatura y/o presión [3].

La dimensión de los reactores depende del flujo de producción deseado y el tiempo de residencia necesario para alcanzar la conversión en el mismo; la variable de diseño normalmente utilizada es el tiempo espacial (cociente entre volumen de reactor y flujo volumétrico de alimentación), que coincide con el tiempo medio de residencia cuando la densidad de la mezcla permanece constante. La disposición puede ser de reactor único o sistemas múltiples de reactores en serie o en paralelo.

Las condiciones operativas del reactor incluyen variables de composición (reactivos, disolventes, catalizadores, aditivos, inertes), el régimen de temperatura y la presión (reactores no isobáricos, pérdidas de carga, gases no ideales), la dispersión o agitación (tipo de mezcla, potencia disipada, fricción), así como otros aspectos de diseño como el bombeo, intercambio de calor, venteo, seguridad, etc [4].

Debido a la importancia de estas unidades de proceso y a lo costoso que implica su estudio a partir de plantas piloto, el presente trabajo establece un modelo para el diseño de reactores de mezcla completa a escala laboratorio, este enfoque considera la cinética del proceso y su control desde el diseño, garantizando que el sistema responderá de manera eficiente a la reacción que le sea adaptada, en este caso particularmente *la reacción de saponificación con acetato de etilo*.

1.1 Justificación

La evolución de los reactores químicos a lo largo de la historia lleva a una mejora sostenible de los rendimientos y las purezas obtenidas en los productos requeridos[5]. El estudio del diseño de los reactores y sus características para conseguir los productos deseados en la proporción adecuada representa una faceta fundamental de las cualidades del *ingeniero químico*, por lo tanto el desarrollo de una herramienta que permita a la comunidad estudiantil del Laboratorio de Ope-

raciones Unitarias (LOU) mejorar sus habilidades, su conocimiento y su destreza en este campo así como practicar de manera presencial a través de experimentación en un reactor de mezcla completa a escala laboratorio las materias de balance de masa, cinética química y diseño de reactores. Contar con un reactor de mezcla completa a escala laboratorio permite que los estudiantes de Ingeniería química desarrollen competencias experimentales.

1.2 Objetivo General

Construir y evaluar un reactor continuo de mezcla completa para la reacción de saponificación a escala laboratorio.

1.3 Objetivos Específicos

- Obtener la constante cinética de la reacción de saponificación del acetato de etilo, mediante experimentos intermitentes.
- Construir un reactor continuo de mezcla completa a escala laboratorio.
- Determinar las condiciones de operación del reactor continuo a escala laboratorio para la reacción de saponificación del acetato de etilo.
- Realizar una práctica de laboratorio utilizando el reactor continuo de mezcla completa.
- Desarrollar un simulador para el reactor continuo de mezcla completa.

2 *Marco teórico*

A continuación se describen los elementos teóricos planteados por diferentes autores [1, 7, 8, 9] que permiten fundamentar el trabajo realizado en los capítulos posteriores. Para el mejor entendimiento del marco teórico se recomienda tener presente el apéndice A de este trabajo, que muestra la nomenclatura y simbología de las variables que conforman las ecuaciones aquí mencionadas.

2.1 Cinética química

La cinética química es una rama de la fisicoquímica que estudia la velocidad de las reacciones químicas, los factores que la afectan y el mecanismo por el cual transcurren. La cinética química es una herramienta fundamental en el diseño de los reactores químicos, en la predicción de su comportamiento y en el desarrollo de nuevos procesos.

El primer paso en el diseño o modificación de un reactor químico es siempre la derivación de expresiones de velocidad de reacción empleando información obtenida experimentalmente.

Los estudios de laboratorio tienen solo un carácter exploratorio en la determinación de la cinética, ya que al menos se requiere estudiar las reacciones a escala laboratorio para obtener el modelo cinético que será aplicado en el diseño de reactores, como se puede ver en la Figura 2.1. El paso del modelo cinético al reactor implica que los modelos físicos que ocurren en el reactor, tales como difusión y distribución del flujo, se conozcan de manera suficiente, puesto que estos impactan en la conversión y en la selectividad de la reacción. Existe una íntima relación entre la termodinámica química y la cinética química, ya que la primera proporciona información sobre la posibilidad de llevar a cabo una reacción y bajo qué condiciones, mientras que la segunda indica tiempo requerido y la ruta detallada por la que transcurre.

En la actualidad no es posible predecir velocidades de reacción sin información experimental, la cual se obtiene preferentemente utilizando reactores a escala.

Dicha velocidad de reacción no se pueden medir directamente, sino que se obtiene mediante la interpretación de datos cinéticos tales como la variación con respecto al tiempo de concentraciones de reactivos o productos, presiones parciales, presión total, entre otras. Para la obtención de la expresión cinética que represente la reacción estudiada se cuenta con diferentes procedimientos que correlacionan los datos experimentales con las variables que los afectan. Existen

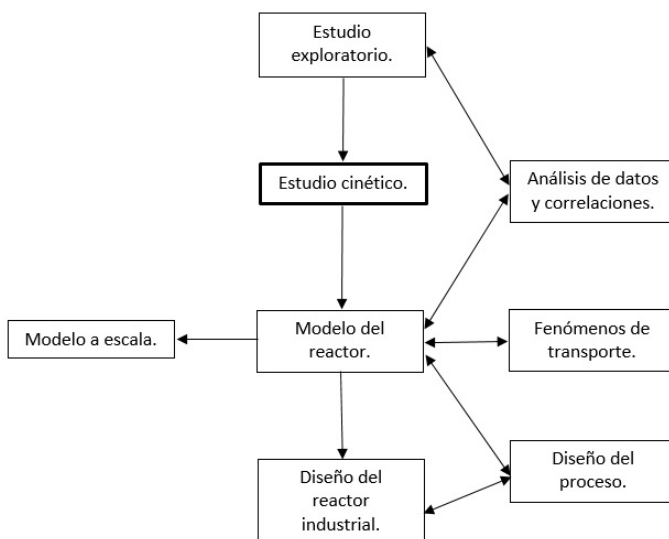


Figura 2.1: Ubicación de la cinética química en el estudio de reactores químicos.

diferentes métodos para el análisis de los datos cinéticos de las reacciones, en las siguientes subsecciones se describen dos de los métodos.

2.1.1 Método integral

Se selecciona una ecuación específica del modelo cinético en base a un orden de reacción supuesto, se integra y si en la representación gráfica del tiempo frente a una función de la concentración los datos experimentales se ajustan a una recta; la constante cinética se evalúa con la pendiente de dicha recta (método gráfico). También se puede obtener esta constante al despejarla directamente del modelo supuesto y calcular sus diferentes valores usando los datos experimentales (método de sustitución o analítico), si la constante cinética presenta valores muy similares sin ninguna tendencia el modelo cinético supuesto es el adecuado.

Para llevar a cabo el método integral en el caso de las reacciones irreversibles es necesario suponer un orden de reacción n . Es recomendable iniciar las iteraciones considerando que la reacción es elemental.

Cuando los órdenes individuales de reacción son iguales a los coeficientes estequiométricos de las mismas especies en una reacción química (Ancheyta J y col., 2002). Ocurre en un solo paso, con un estado de transición y sin algún producto intermedio. Esto significa que todos los enlaces que se rompen y los enlaces nuevos que se forman se deben dar durante una sola colisión [11]

2.1.2 Reacciones de orden 0

Sistemas a densidad constante

Para $n = 0$, la ecuación es:

$$(-r_A) = -\frac{dC_A}{dt} = k \quad (2.1)$$

Integrando desde $t = 0$ y $C_A = C_{A0}$ hasta t y C_A .

$$-\int_{C_{A0}}^{C_A} dC_A = k \int_0^t dt \quad (2.2)$$

$$C_{A0} - C_A = kt \quad (2.3)$$

y en función de la conversión X_A :

$$C_{A0}X_A = kt \quad (2.4)$$

$$C_{A0}X_A = C_{A0} - C_A = kt \quad (2.5)$$

La expresión anterior es la ecuación de una recta con ordenada al origen. La constante cinética k se obtiene directamente de la pendiente de esta ecuación al graficar el tiempo (t) contra (C_{A0}) o $(C_{A0} - C_A)$. La constante cinética k también se puede calcular despejándola de ecuación :

$$k = \frac{C_{A0} - C_A}{t} = \frac{C_{A0}}{X_A}t \quad (2.6)$$

2.1.3 Reacciones de primer orden

Sistemas a densidad constante

Para $n=1$, la ecuación es:

$$(-r_A) = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (2.7)$$

$$-\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} = k \int_0^t dt \quad (2.8)$$

$$\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = kt \quad (2.9)$$

como $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$:

$$\ln \frac{1}{1 - X_A} = kt \quad (2.10)$$

$$\ln \frac{dC_{A0}}{C_A} = \ln \frac{1}{1 - X_A} = kt \quad (2.11)$$

La pendiente de la recta proporciona directamente el valor de la constante k . La constante k se obtiene también con:

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{C_{A0}}{C_A} = \frac{1}{t} \ln \frac{1}{1 - X_A} \quad (2.12)$$

2.1.4 Reacciones de segundo orden

Sistemas a densidad constante.

Para $n=2$, la ecuación es:

$$(-r_A) = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^2 \quad (2.13)$$

separando variables e integrando:

$$-\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A^2} = k \int_0^t dt \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt \quad (2.15)$$

Y en función de la conversión (X_A) es:

$$\frac{1}{C_{A0}} \left(\frac{1}{1 - X_A} - 1 \right) = kt \quad (2.16)$$

$$\frac{X_A}{1 - X_A} = kC_{A0}t \quad (2.17)$$

La pendiente de la ecuación es igual a k , y para la es igual a kC_{A0} . La constante cinética también se evalúa con:

$$k = \frac{1}{t} \left(\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} \right) = \frac{X_A}{C_{A0}t(1 - X_A)} \quad (2.18)$$

Se puede verificar el orden si el orden de la reacción supuesto es el correcto, mediante cualquiera de los siguientes métodos:

- **Método de sustitución analítico.** Despejar y calcular la constante cinética k de la ecuación integrada. Si la constante k presenta valores muy similares sin ninguna tendencia, es decir, las k calculadas muestran valores alternados o sin mucha diferencia entre ellos, el orden de reacción supuesta es el correcto y la constante cinética se evalúa como el promedio de todos los valores calculados.
- **Método gráfico.** Transformar la ecuación integrada a una forma lineal, de tal manera que el eje de las abscisas sea el tiempo (t) y el eje de las ordenadas una función de la concentración o conversión $f(C_A)$ o $f(X_A)$. Graficar los datos experimentales y si estos se ajustan a una recta, el orden de reacción supuesto es el correcto y la constante cinética se obtiene con la pendiente de dicha recta.

2.1.5 Método diferencial

A diferencia del método integral, en el método diferencial de análisis de datos cinéticos no se integra la expresión cinética, si no que se utiliza directamente en forma diferencial y se transforma en una forma lineal mediante el uso de logaritmos. El método diferencial es útil para casos complicados, pero requiere de mayor número de datos para obtener mayor precisión en la estimación de las constantes cinéticas. La ventaja principal sobre el método integral es que proporciona en forma directa los parámetros cinéticos.

Este método emplea directamente la ecuación diferencial a ensayar, evaluando todos los términos de la ecuación incluida la derivada $\frac{dC_i}{dt}$ y se ensaya el ajuste de la ecuación con los datos experimentales.

El procedimiento es el siguiente:

- Derivar numéricamente los datos experimentales para obtener $\frac{dC_i}{dt} = r_A$ a diferentes concentraciones.
- Buscar una expresión de velocidad que represente estos datos de C_A contra r_A

Partiendo de ecuaciones anteriores se pueden obtener las siguientes expresiones generales para la aplicación del método diferencial.

2.1.6 Densidad constante

En función de la concentración:

$$(-r_A) = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^n \quad (2.19)$$

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln k + n \ln C_A \quad (2.20)$$

En función de la conversión:

$$(-r_A) = C_{A0} \frac{dx_A}{dt} = kC_{A0}^n (1 - X_A)^n \quad (2.21)$$

$$\frac{dx_A}{dt} = kC_{A0}^{n-1} (1 - X_A)^n \quad (2.22)$$

$$\ln\left(\frac{dx_A}{dt}\right) = (kC_{A0}^{n-1}) + n \ln(1 - X_A) \quad (2.23)$$

2.2 Reactores Químicos

La ingeniería de las reacciones químicas se basa en los conceptos cinéticos y termodinámicos de la reacción química aplicados a nivel industrial, para diseñar y hacer funcionar correctamente un reactor químico [12].

El reactor químico es el dispositivo donde ocurre un cambio en la composición debido a la reacción química.

Para diseñar un reactor de debe considerar el análisis de costos para determinar el diseño más rentable, introduce nuevos factores tales como los materiales de construcción, la prevención de la corrosión, los requerimientos de operación y mantenimiento [13].

La combinación de los procesos físicos y químicos a los efectos del diseño del reactor se hace recurriendo a las leyes de la conservación de la materia y la energía para cada tipo de reactor [14].

2.2.1 Tipos de Reactores Químicos

Los reactores químicos pueden tener una gran variedad de tamaños, formas y condiciones de operación.

Tres tipos de reactores ideales se consideran en esta sección:

Reactor intermitente isotérmico

El reactor intermitente de tanque agitado es usado a menudo en investigaciones cinéticas dentro del laboratorio; sin embargo, también se le puede encontrar en operaciones industriales[15].

Este reactor presenta las siguientes características principales, debido a la forma en que opera: (la Figura 2.2 muestra de forma esquemática este tipo de reactor)

- El reactor intermitente es un sistema cerrado; por lo tanto la masa total del mismo es constante.
- El tiempo de residencia de todos los elementos del fluido es el mismo.
- Este tipo de reactor opera en estado no estacionario; las concentraciones cambian con el tiempo.
- Debido a la agitación puede asumirse que en un tiempo determinado, dentro del reactor la composición y la temperatura son homogéneas.
- La energía dentro de cada lote cambia (de acuerdo a las condiciones de la reacción).
- Puede adicionarse un intercambiador de calor para controlar la temperatura.

En este tipo de reactor no existen entradas o salidas; por lo tanto el balance es igual a:

$$F_{A0} = F_A = 0 \quad (2.24)$$

La ecuación de balance general se reduce a:

$$\int_0^V r_A dV = \frac{dN_A}{dt} \quad (2.25)$$

Si la mezcla de reacción es perfectamente mezclada:

$$r_A V = \frac{dN_A}{dt} \quad (2.26)$$

Reactor de Mezcla completa en estado estacionario (CSTR)

Debido a las propiedades del flujo, este reactor presenta las siguientes características [15]:

- Dado que se presenta una agitación eficiente y el fluido dentro del recipiente esta uniformemente mezclado (por tanto, todos los elementos de fluido están uniformemente distribuidos), todos los elementos del fluido tienen la misma probabilidad de abandonar el reactor en cualquier tiempo.

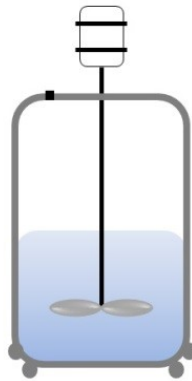


Figura 2.2: Reactor Intermitente

- Existe una distribución de tiempos de residencia (t). Dicha distribución puede apreciarse intuitivamente considerando lo siguiente: (i) Un elemento de fluido puede moverse directamente desde la entrada a la salida puede existir un tiempo de residencia muy corto. (ii) Otro elemento del fluido puede participar en el movimiento de reciclado producto de la agitación y por lo tanto presentar un tiempo de residencia largo. Dicha distribución puede representarse matemáticamente.
- Dado que la densidad en el sistema de flujo no es necesariamente constante, la densidad de las corrientes puede cambiar entre la entrada y la salida.
- Puede adicionarse un intercambiador de calor para controlar la temperatura.

La ecuación de diseño de un reactor de flujo continuo es:

$$F_{A0} - F_A + \int_0^V r_A dV = 0 \quad (2.27)$$

Si la mezcla de reacción es perfectamente mezclada:

$$\int_0^V r_A dV = r_A V \quad (2.28)$$

Dónde:

$$V = \frac{F_{A0} - F_A}{-r_A} \quad (2.29)$$

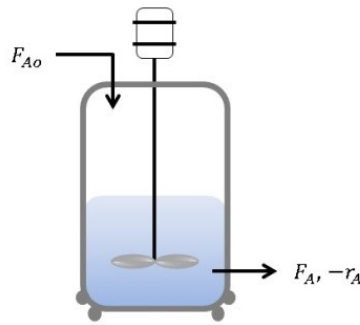


Figura 2.3: Reactor de Mezcla Completa en Estado Estacionario

Reactor de flujo pistón en estado estacionario

El reactor tubular de flujo pistón (PFR) se caracteriza porque el flujo de fluido es ordenado, sin que ningún elemento del mismo sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquel, esto es, no hay mezcla en la dirección de flujo (dirección axial). Como consecuencia, todos los elementos de fluido tienen el mismo tiempo de residencia dentro del reactor.

Los reactores PFR, a menudo se construyen de muchos tubos de pequeños diámetros y de grandes longitudes y se emplean con fluidos a grandes velocidades y pequeños tiempos espaciales. Esto minimiza el mezclado axial del fluido, limita los perfiles radiales de temperatura y provee el área de transferencia de calor necesaria. Los tubos se arreglan en un banco como en los intercambiadores de calor. Si no se desea intercambio calórico en la zona de reacción, puede utilizarse uno o una serie de lechos empacados de diámetros más grandes[16].

Este modelo de reactor presenta las siguientes características:

- No existe mezclado axial del fluido dentro del recipiente.
- La densidad de las corrientes puede cambiar la dirección del flujo.
- Puede existir transferencia de calor a través de las paredes del reactor.
- Todos los elementos de fluido presentan el mismo tiempo de residencia. No existe dispersión en los tiempos de residencia.
- Las propiedades del sistema cambian continuamente en la dirección del flujo.
- El volumen de un elemento no es necesariamente constante cuando circula a lo largo del recipiente. El cambio de volumen puede deberse a los cambios en T, P y el número de moles debido a la reacción.

Un reactor PFR es básicamente un tubo donde se realiza una reacción con cambios axiales en la concentración, la presión y la temperatura. La ecuación de diseño de un reactor tubular es:

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{\tau}{C_{A0}} = \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{-r_A} \quad (2.30)$$

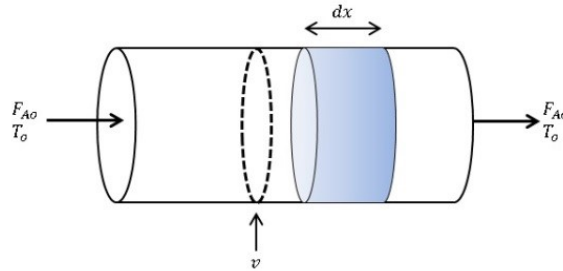


Figura 2.4: Reactor de Flujo Pistón

2.3 Reactor de mezcla completa en estado estacionario (CSTR)

El reactor de tanque agitado continuo (CSTR) consta de un tanque con una agitación casi perfecta, en el que hay un flujo continuo de materia reaccionante y desde el cual sale continuamente el material que ha reaccionado (material producido). La condición de agitación no es tan difícil de alcanzar siempre y cuando la fase líquida no sea demasiada viscosa. El propósito de lograr una buena agitación es lograr que en el interior del tanque se produzca una buena mezcla de los materiales, con el fin de asegurar que todo el volumen del recipiente se utilice para llevar cabo la reacción, y que no existan o queden espacios muertos. Se puede considerar que la mezcla es buena o casi perfecta, si el tiempo de circulación de un elemento reactante dentro del tanque es alrededor de una centésima del tiempo promedio que le toma al mismo elemento para entrar y salir del reactor[6].

La ecuación de diseño para el reactor de tanque agitado se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Velocidad de flujo} \\ \text{del reactivo que} \\ \text{entra al elemento} \\ \text{de volumen.} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Velocidad de flujo} \\ \text{del reactivo que} \\ \text{sale del elemento} \\ \text{de volumen.} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Velocidad de pérdida} \\ \text{de reactivo debida a} \\ \text{la reacción química} \\ \text{dentro del elemento} \\ \text{de volumen.} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{acumulación de} \\ \text{reactivo en elemento} \\ \text{de volumen.} \end{array} \right]$$

Que representa un balance de un componente determinado en un elemento de volumen del sistema. Como la composición es uniforme en todo el reactor el balance puede referirse a todo el volumen del reactor. Seleccionando el reactivo A para considerarlo, la ecuación anterior se transforma en:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Desaparición por reacción} + \text{Acumulación} \xrightarrow{0}$$

Si $F_{A0} = v_0 C_{A0}$ es el caudal molar del componente A que entra al reactor, entonces, considerando el reactor como un todo se tiene:

$$\text{Entrada de A, moles/tiempo} = F_{A0} = F_{A0}(1 - X_{A0})$$

$$\text{Salida de A, moles/tiempo} = F_A = F_{A0}(1 - X_A)$$

$$\begin{array}{l} \text{Desaparición de A} \\ \text{por reacción,} \\ \text{moles/tiempo.} \end{array} = (-r_A)V = \left(\frac{\text{moles de A reaccionados}}{(\text{tiempo})(\text{volumen de fluido})} \right) (\text{volumen de reactor})$$

Introduciendo estos términos se reemplaza lo anterior con la ecuación 2.31:

$$F_{A0}X_A = (-r_A)V \quad (2.31)$$

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{\tau}{C_{A0}} = \frac{\Delta X_A}{-r_A} = \frac{X_A}{-r_A} \quad (2.32)$$

$$\tau = \frac{1}{S} = \frac{V}{\nu_0} = \frac{VC_{A0}}{F_{A0}} = \frac{C_{A0}X_A}{-r_A} \quad (2.33)$$

Donde X_A y r_A se miden en las condiciones de la corriente de salida, que son iguales a las condiciones dentro del reactor. De forma general, si la alimentación en la que se basa la conversión, subíndice 0, entra en el reactor parcialmente convertida, subíndice i, y sale en las condiciones expresadas por el subíndice f, se tiene:

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{\Delta X_A}{(-r_A)_f} = \frac{X_{Af} - X_{Ai}}{(-r_A)_f} \quad (2.34)$$

$$\tau = \frac{VC_{A0}}{F_{A0}} = \frac{C_{A0}(X_{Af} - X_{Ai})}{(-r_A)_f} \quad (2.35)$$

Pese a que el reactor se encuentra completamente mezclado y la temperatura es uniforme en todo el recipiente de la reacción, estas condiciones no implican que la reacción se efectúe isotérmicamente. Hay operación isotérmica cuando la temperatura de alimentación es idéntica a la del fluido dentro del CSTR. La ecuación para un CSTR en el que no hay variación espacial en la velocidad de reacción es[9]:

$$V = \frac{F_{A0}X}{-r_A} \quad (2.36)$$

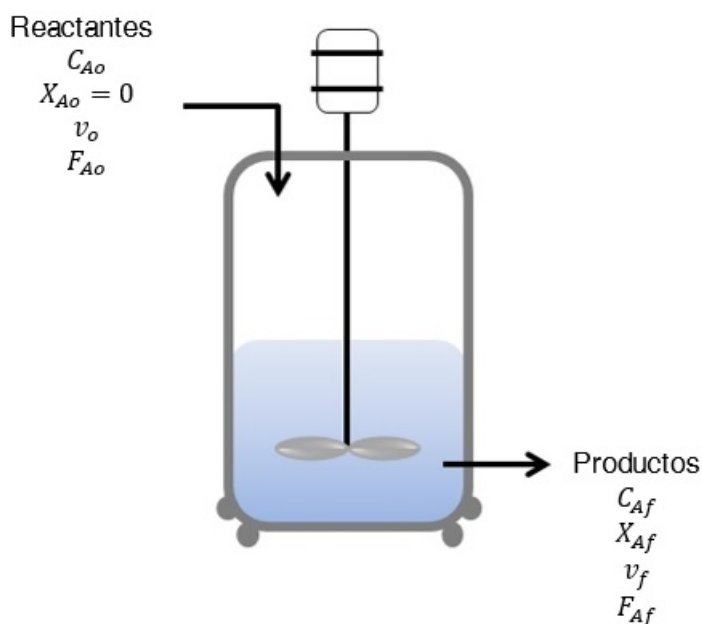
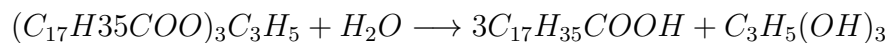


Figura 2.5: Componentes de un Reactor de Mezcla Completa en Estado Estacionario

2.4 Reacción de Saponificación

La saponificación es un proceso químico en el cual un lípido saponificable o ácido graso reacciona con una base o solución alcalina mediante hidrólisis, que genera sales sódicas y potásicas derivadas de los ácidos grasos (jabones) y glicerina [17]

El procedimiento industrial consiste en descomponer o hidrolizar la grasa y neutralizar los ácidos grasos con una solución de sosa caústica después de una separación de la glicerina:



Un proceso químico de gran importancia es la “producción de acetato de sodio”, la cual tiene una alta producción industrial y gran variedad de aplicaciones. La reacción usada a nivel industrial para la producción de acetato de sodio, es la saponificación del acetato de etilo con hidróxido de sodio. Este producto tiene multiplicidad de usos en la industria, ejemplos de ella es la cosmética, también es usado para retirar las sales de calcio insolubles de textiles, intensificar el color de las pinturas y en la industria alimenticia como conservante y como tampón en

hemodiálisis en la industria del cuero y en la neutralización de ácidos minerales [19].

2.4.1 Determinación del orden de la reacción

Específicamente la reacción de saponificación del acetato de etilo es una reacción irreversible que puede representarse del siguiente modo:



La reacción de saponificación se realiza en exceso de acetato de etilo. Por lo tanto, la concentración de acetato de etilo puede suponerse constante durante la reacción.

Esta ecuación cinética puede ser expresada en términos de conversión mediante las siguientes manipulaciones matemáticas:

$$\frac{C_0 - C_f}{C_0} = \frac{C_{0NaOH} - C_{fNaOH}}{C_{0NaOH}} \quad (2.37)$$

Donde

C_{0NaOH} es la concentración inicial C_{fNaOH} es la concentración final

$$X_A = \frac{C_{0NaOH} - C_{fNaOH}}{C_{0NaOH}} \quad (2.38)$$

Para la relación equimolar entre la concentración inicial de acetato de etilo e hidróxido de sodio

$$-r_{NaOH} = kC_{NaOH}C_{A.E} = kC_{0NaOH}^2(1 - X)^2 \quad (2.39)$$

Cabe aclarar que esta reacción se lleva a cabo en fase líquida, por tanto, para estos sistemas la densidad es constante.

El balance molar en cualquier instante para la reacción $aA + bB \longrightarrow rR + sS$ es el siguiente en el que el reactivo limitante es aquella especie química que en una reacción se consume antes de que todos los demás reactivos. Las concentraciones a cualquier tiempo en este sistema a densidad o volumen constante se determina dividiendo las ecuaciones del balance molar entre dicho volumen, lo que proporciona:

$$M_{BA} = \frac{C_{B0}}{C_{A0}} \quad (2.40)$$

$$M_{RA} = \frac{C_{R0}}{C_{A0}} \quad (2.41)$$

$$M_{SA} = \frac{C_{S0}}{C_{A0}} \quad (2.42)$$

Donde las M_{iA} son las relaciones molares de alimentación de B, R y S con respecto al reactivo limitante A.

Considerando la reacción general



Donde las letras en mayúsculas representan las especies químicas y las minúsculas los coeficientes estequiométricos.

$$-r_n = kC_n^n \quad (2.44)$$

$$-r_A = kC_A C_B = kC_A^2 \quad (2.45)$$

En este caso por ser una reacción equimolar

Donde

$-r_A$ Representa la ecuación de velocidad de reacción

K Representa la constante cinética específica de la reacción

C_n Representa la concentración

N Representa el orden de la reacción que se lleva a cabo

2.5 Estado del arte

El dimensionamiento de equipos para diferentes operaciones en las que se llevan a cabo transformación de materias primas mediante procesos físicos, químicos y/o biológicos es una de las múltiples tareas de un Ingeniero Químico (IQ), el lugar en donde se dan estas transformaciones de la materia es el reactor químico, para diseñar un reactor y poder lograr el alcance de la reacción que se requiere y las condiciones de operación necesarias se debe efectuar un adecuado diseño, realizar análisis de costos, materiales de construcción, requerimientos de operación y mantenimientos. Saber llevar a cabo el estudio de estas características representa una rasgo fundamental de un IQ, por ello se han realizado diferentes investigaciones en las que a nivel laboratorio se desarrollan prácticas y mediante el uso de reactores a escala se analiza la cinética de diversas reacciones, esto ayuda a los

estudiantes a entender desde un punto de vista más cercano el funcionamiento de estos equipos y la aplicación de los diversos conocimientos adquiridos durante la formación como IQ [19].

En el año 2011, Mónica de los Ángeles Bayas Manzano y Cristian Fernando Núñez Aguagallo realizaron el estudio denominado “Diseño y construcción de un reactor continuo de mezcla completa”, en donde diseñaron y construyeron un reactor CSTR para poder llevar a cabo estudios experimentales necesarios para la formación de un IQ, seleccionaron este tipo de reactor debido a que es uno de los más usados en la industria de la química y debido a sus factibles condiciones de operación, para comprobar su funcionamiento llevaron a cabo prácticas mediante el uso de acetato de etilo e hidróxido de sodio en los que analizaron los parámetros cinéticos, concentraciones, condiciones de operaciones, etc., con la finalidad de poder utilizar este equipo para diversas prácticas[20].

En 2012 en el “Estudio experimental y simulación de la saponificación del acetato de etilo en tres reactores CSTR en serie” efectuado por Jair Alberto Acosta Mongua y Rolando José Pérez Moreno, presentaron mediante la aplicación de un software de simulación resultados experimentales de tres reactores de agitación continua CSTR en serie para la reacción de saponificación del acetato de etilo, reacción que mencionan poco estudiada en relación a sus condiciones apropiadas de operación, con el objeto de mejorar la eficiencia de este proceso y evitar la generación de residuos, la simulación permitió la variabilidad de concentraciones de los reactivos y flujos de alimentación para poder obtener la mejor combinación utilizando como criterio conversiones $> 90\%$, los resultados presentados en este estudio fueron contrastados mediante pruebas de laboratorio, con el fin de mejorar la producción del acetato de sodio en reactores CSTR en estudios posteriores por su gran importancia en la producción a nivel industrial. [19]

El Ingeniero químico industrial Julio Cesar Coronel Aguilar entre 2013 y 2014 realizó el trabajo “Diseño y construcción de un reactor tipo Batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK” con el propósito de enriquecer el proceso de formación de la comunidad estudiantil en el área de cinética de las reacciones mediante implementación de prácticas de laboratorio para estimular el proceso de enseñanza con fines didácticos y optimizar el aprendizaje práctico por medio de experiencia en laboratorio, se construyó y evaluó el funcionamiento del reactor usando como base la reacción de saponificación[24].

Mientras que en el año 2015, José Luis Núñez Estrella y Teresa de Jesús Udeos Zabala, elaboraron el “Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Batch para Saponificar Acetato de Etilo”, con la finalidad de llevar a cabo prácticas de laboratorio en las que pudiera aplicar el conocimiento adquirido en diversas materias como Ingeniería de las Reacciones Químicas, Cinética Química y Operaciones Unitarias. Se llevó a cabo el diseño y construcción mediante el estudio de

las propiedades más adecuadas para el funcionamiento del reactor, se seleccionó la reacción de saponificación debido a sus apropiadas condiciones de trabajo, se estudió el factor de conversión de la reacción y las concentraciones para poder demostrar la eficiencia del equipo y se realizó un manual de operación para alargar la vida útil del mismo[21].

Tabla 2.1: Estado del arte

Trabajo	Aportación
<p>Bayas M. y Núñez C., 2011 [20] Diseño, construcción y verificación de funcionamiento de un reactor continuo de mezcla completa mediante:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Variables del diseño ▪ Dimensionamiento del reactor ▪ Construcción del equipo ▪ Práctica de laboratorio ▪ Manual de operación 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Construcción de un reactor CSTR de carácter didáctico para llevar a cabo diversas prácticas de laboratorio ▪ Elaboración de práctica de laboratorio ▪ Elaboración de manual de operación
<p>Acosta J. y Pérez R., 2012 [19]</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudio de la reacción de saponificación del acetato de etilo en tres reactores CSTR en serie a escala de laboratorio para su posterior simulación con el software COMSOL Multiphysics ▪ Simulación mediante el software tres reactores CSTR en serie, para la reacción de saponificación del acetato de etilo con hidróxido de sodio ▪ Uso de simulador para predecir comportamientos en el proceso y un mayor control sobre las variables que lo afectan ▪ Obtención de las condiciones más apropiadas de operación 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulación mediante uso de software para optimizar el proceso, disminuir recursos físicos, económicos y energéticos ▪ Poder realizar pruebas con diferentes parámetros de entrada y tipos de reacción

Trabajo	Aportación
Coronel J., 2013-2014 [21]	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diseñar y Construir un reactor batch con agitación para el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK. ▪ Equipo de operación sencilla para los estudiantes, de modo que puedan realizar prácticas con el equipo ▪ Manual para el uso apropiado del equipo, en el cual se establecerán parámetros y rangos de aplicación ▪ Diseño y construcción de reactor batch ▪ Rangos de operación del reactor ▪ Verificación del funcionamiento mediante práctica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluación experimental de cinética de la reacción mediante reactor batch ▪ Diseño y construcción de equipo para disposición de prácticas de laboratorio ▪ Elaboración de práctica de laboratorio para uso de los estudiantes
Núñez J. y Udeos T., 2015 [24]	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diseño, construcción y verificación de un reactor batch para la saponificación de acetato de etilo empleando una solución de hidróxido de sodio. ▪ Variables de diseño de equipo Construcción y cuantificación de materiales ▪ Determinación de constante cinética y orden de reacción ▪ Manual de operación del equipo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Obtención de la constante cinética de la reacción de saponificación ▪ Determinación de condiciones de operación ▪ Elaboración de manual de operación del reactor

3 Metodología

El desarrollo para alcanzar los objetivos de este trabajo, se presenta en la Figura 3.1. Para obtener la constante cinética de la reacción de saponificación se realizaron pruebas por lote usando la metodología propuesta en la sección 3.1, mientras que la sección 3.2 detalla la construcción del sistema del reactor de mezcla completa a escala laboratorio para posteriormente realizar las pruebas en continuo con el objetivo de desarrollar una práctica de laboratorio 3.3 y por último la sección 4.4 muestra el desarrollo del simulador correspondiente al sistema construido.

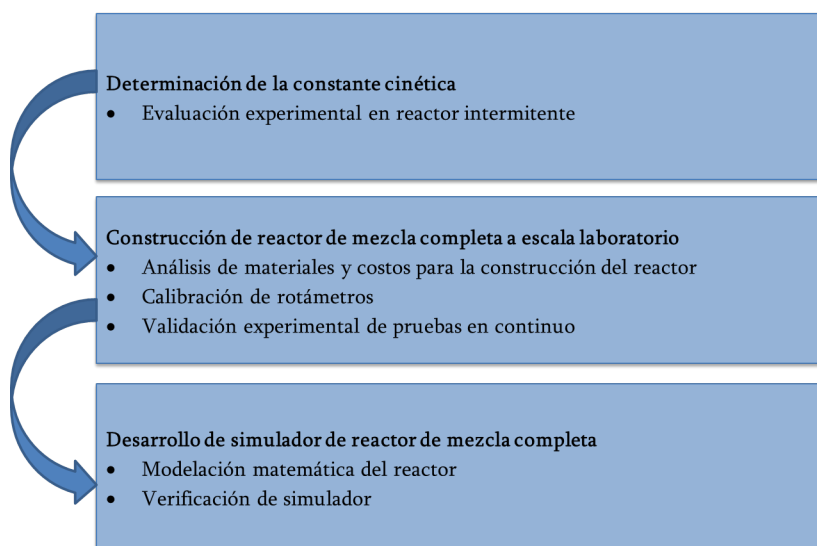


Figura 3.1: Metodología de trabajo

3.1 Cinética de la reacción

En esta sección se presenta la metodología para determinar de manera experimental la constante de velocidad de la reacción entre el acetato de etilo y el hidróxido de sodio en un reactor continuo de mezcla completa a escala laboratorio.

Se eligió la reacción de saponificación del acetato de etilo con el hidróxido de sodio porque se tiene una buena eficiencia de la reacción a condiciones ambientales [22] y los reactivos se encuentran a disposición de los estudiantes en el laboratorio de operaciones unitarias.

El reactor por lotes o intermitente, como se había mencionado anteriormente en la sección 2.2.1, es un reactor donde no existe flujo de entrada ni de salida, es un reactor con agitador que homogeniza la reacción. Para esta serie de reacciones se utilizaron matraces erlenmeyer con agitación magnética.

El estudio cinético de la saponificación del acetato de etilo se realizó empleando concentraciones iniciales de Acetato de Etilo (0.2 M), Hidróxido de sodio (0.2 M) y ácido clorhídrico (0.1 M) para la valoración del hidróxido de sodio. El volumen de reacción fue de 50 mL.

3.1.1 Desarrollo experimental para la constante cinética

Materiales y reactivos

La Tabla 3.1 y la Figura 3.2 muestran los reactivos y materiales requeridos para realizar el desarrollo experimental de las pruebas para la obtención de la constante cinética.

Tabla 3.1: Materiales y reactivos, constante cinética

Materiales y equipo de laboratorio	Reactivos
3 Fiolas de 50 mL	Agua destilada
3 Frascos de reactivo	Hidróxido de sodio
2 Pipetas volumétricas 25 mL	Ácido Clorhídrico
1 Pipetas volumétricas 20 mL	Acetato de etilo
2 Pipetas milimétricas	Fenolftaleína
1 Micropipeta 5 mL	
1 Matraz redondo de base plana	
10 Matraz Erlenmeyer 250 mL	
1 Pinza de nuez	
1 vidrio de reloj	
1 espátula	
1 soporte universal	
1 Balanza	
1 vaso de precipitado de 1L	
1 vaso de precipitado de 50 mL	
1 Pipeta Pasteur	
1 Bureta de 50 mL	
1 Parrilla de agitación magnética	
1 Parrilla de calentamiento	

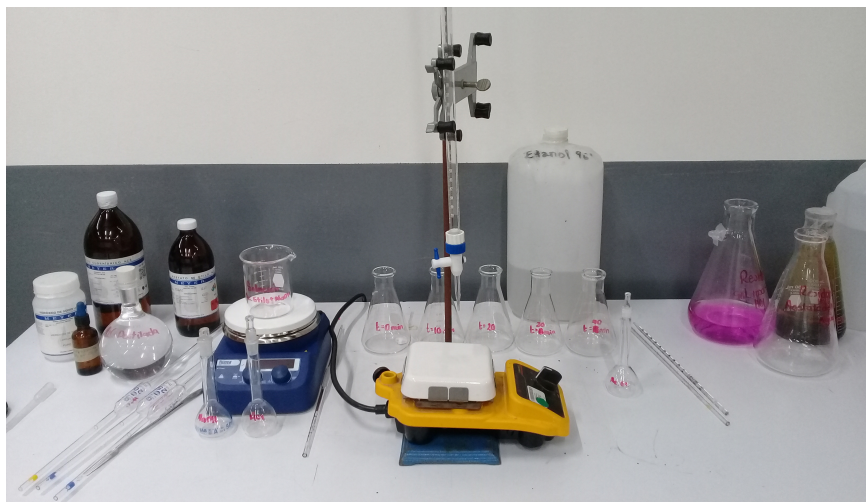


Figura 3.2: Material, constante cinética

Metodología

A continuación se describe la metodología para las pruebas experimentales que determinan la constante cinética de la reacción de saponificación:

- Los materiales deben estar perfectamente lavados y secos, para evitar la reacción del hidróxido de sodio con el dióxido de carbono disuelto en el agua destilada
- Se debe hervir el agua destilada a utilizar para lograr que quede libre de dióxido de carbono y dejar enfriar hasta tenerla a temperatura ambiente (Figura 3.3)

Figura 3.3: Agua libre de CO_2

- Se debe llenar la bureta con la solución del ácido Clorhídrico, (previamente eliminar el aire de la punta y posteriormente colocarla en el soporte universal)

- d) Medir con la pipeta volumétrica seca de 25 mL la solución de hidróxido de sodio y verter totalmente en un matraz erlenmeyer de 250 mL, perfectamente seco, se debe verificar si las pipetas son de vaciado total (con la leyenda PE)
- e) Medir con otra pipeta volumétrica PE, 25 mL de solución de acetato de etilo y verter totalmente en otro matraz Erlenmeyer de 250 mL
- f) Verter la solución de acetato en el matraz de la solución de hidróxido de sodio e inmediatamente accionar el cronometro y registrar la temperatura inicial, se debe colocar la mezcla reaccionante en una parrilla con agitación para mejorar la eficiencia de la reacción
- g) Procedemos a tomar una alícuota de 5 mL de la mezcla reaccionante con una micropipeta y colocarla en una matraz erlenmeyer de 125 mL que haya sido llenado previamente con 20 mL de agua destilada libre de CO_2 y agregar 3 gotas de fenolftaleína, esto se realizara cada 5 minutos transcurridos del inicio de la reacción comenzando con el tiempo 0 hasta el momento en que el gasto del ácido clorhídrico en las titulaciones se muestre constante
- h) Titular rápidamente con la solución estandarizada de ácido clorhídrico hasta el vire de la titulación, de rosa a incoloro, sin detener el cronometro (Figura 3.4)
- i) Registrar en una tabla el volumen de titulante, el tiempo transcurrido, la temperatura inicial y final

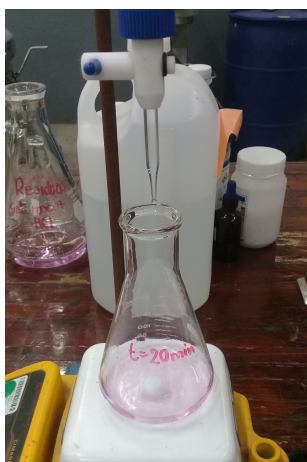


Figura 3.4: Vire de titulación

Una solución es una mezcla homogénea de dos o más sustancias. La sustancia disuelta se denomina soluto y está presente generalmente en pequeña cantidad en

comparación con la sustancia donde se disuelve denominada solvente. En cualquier discusión de soluciones, el primer requisito consiste en poder especificar sus composiciones (las cantidades relativas de los diversos componentes).

La concentración de una solución expresa la relación de la cantidad de soluto a la cantidad de solvente.

Mediante la realización de esta metodología podemos determinar de manera experimental la constante de velocidad de la reacción entre el acetato de etilo y el hidróxido de sodio a escala laboratorio.

Los estudiantes del programa educativo de ingeniería química podrán realizar esta experimentación debido a que se trata de un proceso simple y de gran utilidad para complementarlo con la teoría impartida en la cátedra de ingeniería de reactores.

3.2 Construcción del equipo

Ha sido conveniente crear un equipo que permita a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química realizar estudios en el laboratorio de procesos continuos en donde puedan aprender la asignatura de Ingeniería de reactores de una manera no solamente teórica sino también práctica.

El diseño y construcción de un reactor de mezcla completa a escala laboratorio conlleva a la determinación del material adecuado a utilizar de acuerdo a las condiciones de la reacción y la forma correcta de ser instalado para que sea funcional, generar un prototipo implica recurrir a la aplicación del ingenio y emplear recursos propios; ésta es la etapa de la creatividad en el diseño y construcción de un equipo de laboratorio.

Para la selección de los materiales de construcción se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- **Calidad del material:** El material de construcción del equipo debe ser de un material adecuado y confiable, para evitar la corrosión y pueda cumplir con los requisitos establecidos.
- **Costo del material:** El costo nos indicará si es factible la construcción del equipo requerido. Puede ser que la calidad del material sea la requerida pero el costo es muy excesivo, en dicho caso se deberá tomar una decisión ya sea en invertir en el material de construcción o de escoger otro tipo de material.
- **Disponibilidad de materiales:** Es importante tomar en cuenta que los materiales se encuentren disponibles en el almacén de los laboratorios de operaciones unitarias o bien que se pueda adquirir con algún proveedor autorizado por la universidad.

- Volumen del reactor: A escala laboratorio se trabaja normalmente con volúmenes entre 0.01 y 0.3 litros [23], estos son equipos muy pequeños los cuales pueden tener calentamiento, pero normalmente no se encuentran provistos con un dispositivo de agitación debido a la dificultad de ubicarlo en un volumen tan pequeño.

En la Tabla 3.2 muestra los materiales cuidadosamente seleccionados que se emplearán para la construcción de equipo, en la misma tabla se muestra el costo de cada material utilizado.

En la Figura 4.4 se muestra la instalación experimental del equipo para emplear la reacción de saponificación del acetato de etilo. Los tanques de almacenamiento TK-101 y TK-103 contienen los reactivos para la reacción que son impulsados por las bombas P-101 y P-102 hacia el reactor de mezcla completa R-101 con agitación a temperatura constante a través de las válvulas V-101 y V-102 y de los rotámetros FI-101 y FI-102 que permiten controlar sus flujos volumétrico. Por la parte superior del reactor sale el producto de la reacción hacia el tanque de almacenamiento TK-102. La Tabla 3.3 muestra la nomenclatura de todos los equipos auxiliares que constituyen el reactor de mezcla completa.

Tabla 3.2: Materiales para la construcción de equipo

Materiales	Costo unitario (\$MXN)
Abrazaderas de plástico	120.00
2 Flujómetros	1950.00
10 metros de Tubin 1/4 in	16.00
2 Válvulas de aguja 1/4 in	1507.28
Tapón de corcho # 10	20.00
2 Recipientes contenedores	270.00
2 Bombas sumergibles	4200.00
1 Conexión tipo T, acero inoxidable 1/4 in	480.23
4 Tuercas de acero inoxidable 1/4 in	35.15
4 Barril de acero inoxidable 1/4 in	23.35
2 Reducción de acero inoxidable de 1/2 a 1/4 in	120.00

Tabla 3.3: Nomenclatura del diagrama del sistema

Clave	Equipo
TK-101	Tanque de almacenamiento del reactivo A
TK-102	Tanque de almacenamiento del reactivo B
TK-103	Tanque de almacenamiento del producto
FI-101	Indicador del flujo A
FI-102	Indicador del flujo B
V-101	Válvula de paso del flujo A
V-102	Válvula de paso del flujo B
P-101	Bomba A
P-102	Bomba B
R-101	Reactor de flujo continuo en estado estacionario

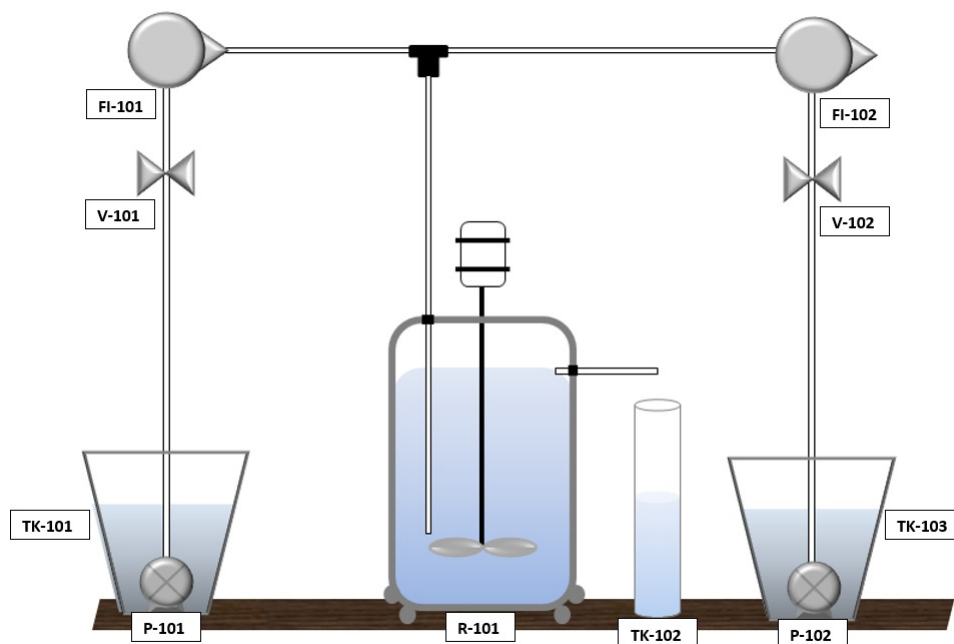


Figura 3.5: Diagrama del sistema

3.2.1 Calibración de rotámetros

Se realizó la calibración de los rotámetros para asegurar su buen funcionamiento durante la reacción en continuo en el reactor construido a escala laboratorio.

El rotámetro consiste de un flotador (indicador) que se mueve libremente dentro de un tubo vertical. El fluido entra por la parte inferior del tubo y hace que el



Figura 3.6: Reactor continuo de mezcla completa a escala laboratorio

flotador suba hasta que el área anular entre él y la pared del tubo sea tal, que la caída de presión de estrechamiento sea lo suficientemente para equilibrar el peso del flotador. El tubo es de vidrio y lleva grabado una escala lineal, sobre la cual la posición del flotador indica el flujo volumétrico.

Como se menciona en la sección 3.2 se cuenta con dos rotámetros idénticos con rango de operación de 10-100 mL/min. La Figura 3.7 muestra los rotámetros

utilizados.

Cada rotámetro fue calibrado mediante el siguiente procedimiento:

- a) Encender la bomba P-101 del equipo y se abre la válvula V-101 para permitir el paso de agua por la tubería y el rotámetro FI-101 hacia un colector de agua que se encuentra a la salida del rotámetro. Para la calibración del rotámetro FI-102, se enciende la bomba P-102 y se abre la válvula V-102.
- b) Ajustar el flujo volumétrico en el valor máximo del rotámetro con ayuda de la válvula V-101.
- c) Colectar agua en un matraz durante cierto tiempo a la salida del rotámetro.
- d) Medir la temperatura del agua colectada y pesar en una balanza digital.
- e) Registrar los datos de masa de agua colectada, tiempo y temperatura.
- f) Repetir los pasos *c* y *d* de este procedimiento por 4 veces más para el mismo flujo.
- g) Investigar la densidad del agua a las temperaturas registradas y se procede a calcular el flujo volumétrico a partir del flujo másico colectado.
- h) Se repiten los pasos *b* – *f* de este procedimiento para los siguientes caudales 90,80,70,60,50,40,30,20 y 10 mL/min.

Con los resultados se gráficán los valores experimentales con respecto a los valores del rotámetro calibrado, para obtener la curva de ajuste del rotámetro. Cada punto de la gráfica se encuentra definido con la variable \mathbf{x} que representa el flujo marcado por el rotámetro, mientras que \mathbf{y} representa el flujo real tomado a partir de las mediciones correspondientes, la recta se encuentra definida por una ordenada al origen \mathbf{b} y una pendiente \mathbf{m} , mediante la ecuación $y = mx + b$.

Los valores experimentales se ajustan correctamente al modelo lineal. De la ecuación se obtienen los valores de la ordenada al origen, la pendiente y el coeficiente de determinación R^2 . Como se puede observar en la Figura 3.8, el coeficiente de determinación es alto lo que nos permite tener un alto nivel de confiabilidad de que los rotámetros.

3.3 Pruebas en continuo

La construcción del reactor de mezcla completa tiene el objetivo de desarrollar una práctica de laboratorio para los alumnos de ingeniería química, en la que puedan experimentar una reacción química a través de un proceso continuo.

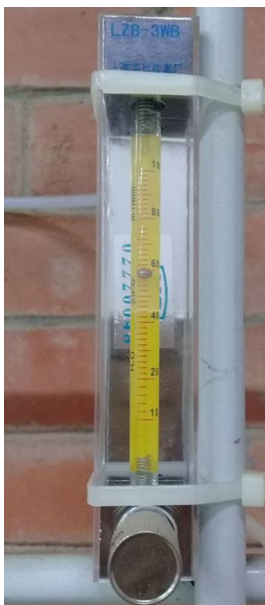


Figura 3.7: Rotámetro

Para verificar el funcionamiento del equipo se experimenta la reacción de saponificación.

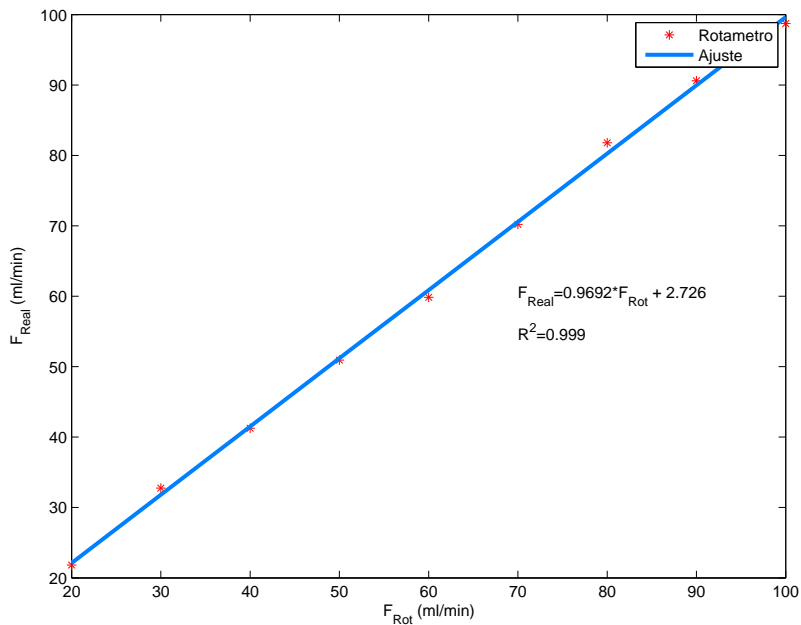
Materiales y reactivos

La Tabla 3.4 muestra los materiales y reactivos utilizados para las pruebas en continuo.

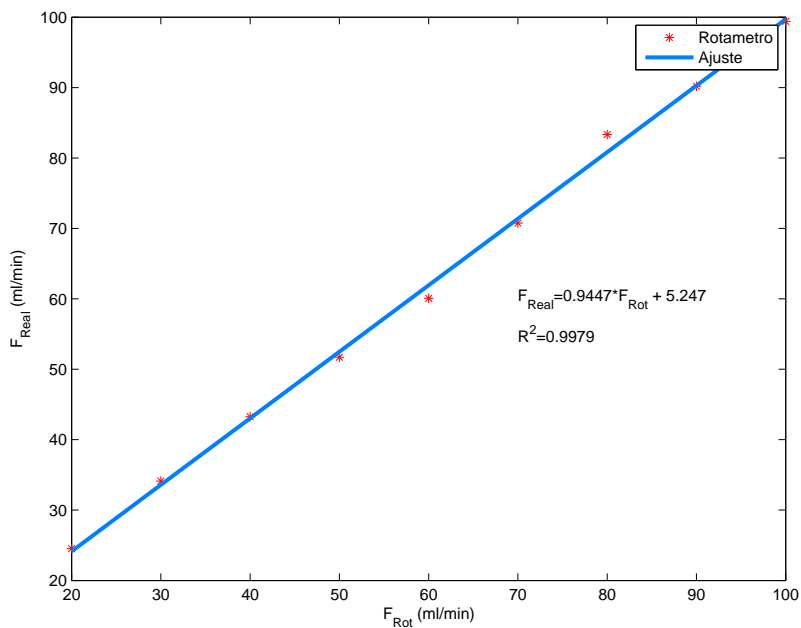
3.3.1 Desarrollo experimental de las pruebas en continuo

La Figura 4.4 muestra un diagrama de flujo general del equipo, donde se observan las partes más importantes y cómo se relacionan entre sí. Para el desarrollo de cada prueba se llevan a cabo los siguientes pasos:

- a) Los materiales deben estar perfectamente lavados y secos, para evitar la reacción del hidróxido de sodio con el dióxido de carbono disuelto en el agua destilada.
- b) Se debe hervir el agua destilada en cantidad necesaria a utilizar para lograr que quede libre de dióxido de carbono y dejar enfriar hasta tenerla a temperatura ambiente.



(a) Rotámetro FI-101



(b) Rotámetro FI-102

Figura 3.8: Curvas de calibración

- c) Se deben realizar los cálculos adecuados para conocer las cantidades a adicionar para realizar las soluciones de hidróxido de sodio y acetato de etilo de acuerdo a las concentraciones que se indiquen.

Tabla 3.4: Materiales y reactivos, constante cinética

Materiales y equipo de laboratorio	Reactivos
5 Vasos de precipitado 50 mL	Agua destilada
2 vasos de precipitado de 1 L	Ácido clorhídrico
1 Fiola de 250 mL	Hidróxido de sodio
2 Frascos de reactivo	Acetato de etilo
2 Probeta milimétrica de 1 L	Fenolftaleína
1 Pipeta volumétrica de 20 mL	
2 Pipetas milimétricas	
1 Micropipeta de 5 mL	
1 Matraz redondo de base plana	
10 Matraz Erlenmeyer de 250 mL	
1 matraz kitazato de 250 mL	
1 Pinza de nuez	
1 vidrio de reloj	
1 espátula	
1 soporte universal	
1 Balanza	
1 Pipeta Pasteur	
Varilla de cristal	
2 Parrilla de calentamiento	
1 Parrilla de agitación magnética	

- d) Se deben llenar los recipientes contenedores de reactivo y posteriormente introducir las bombas de agua que conducirán las soluciones hasta el reactor.
- e) Se debe llenar la bureta con la solución del ácido Clorhídrico (previamente eliminar el aire de la punta y posteriormente colocarla en el soporte universal.
- f) Colocar el reactor (matraz kitazato de 250 mL) llenado aproximadamente hasta los 290 mL de agua destilada, se debe colocar una pastilla de agitación magnética y posteriormente ser tapado.
- g) Accionar las bombas y observar que los flujómetros mantengan el mismo flujo continuo, inmediatamente accionar el cronometro y registrar la temperatura inicial, se debe colocar la mezcla reaccionante en una parrilla con agitación para mejorar la eficiencia de la reacción.
- h) Procedemos a tomar una alícuota de 5 mL de la mezcla reaccionante en la corriente de salida del reactor con una micropipeta y colocarla en una matraz erlenmeyer de 125 mL que contenga 20 ml de agua destilada libre de CO_2 y agregar 3 gotas de fenolftaleína, esto se realizara cada 5 minutos transcurridos del inicio de la reacción comenzando con el tiempo 0 hasta el momento en que el gasto del ácido clorhídrico en las titulaciones se muestre constante.

- i) Titular rápidamente con la solución estandarizada de ácido clorhídrico hasta el vire de la titulación, de rosa a incoloro, sin detener el cronómetro.
- j) Registrar en una tabla el volumen de titulante, el tiempo transcurrido, la temperatura inicial y final.
- k) Se debe analizar el volumen al finalizar la reacción para obtener los resultados correctos en cuanto a la velocidad del flujo registrada.
- l) Apagar correctamente el equipo y recircular agua para limpiar las bombas de cualquier residuo de reactivos.

3.4 Simulador

Matlab es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. Es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje M.

Las GUI (también conocidas como interfaces gráficas de usuario o interfaces de usuario) permiten un control sencillo de las aplicaciones de software, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos a fin de ejecutar una aplicación, las GUI incluyen controles tales como menús, barras de herramientas, botones y controles deslizantes.

Matlab cuenta con el entorno GUIDE para el desarrollo de GUI, proporcionando herramientas para diseñar interfaces de usuario para Apps personalizadas. Mediante el editor de diseño de GUIDE, es posible diseñar gráficamente la interfaz de usuario. GUIDE genera entonces de manera automática el código de MATLAB para construir la interfaz, el cual se puede modificar para programar el comportamiento de la app facilitando todos los pasos del proceso de modelado y la visualización de los resultados.

En este trabajo se desarrollo el simulador en el entorno GUIDE de matlab para el reactor de mezcla completa construido en el laboratorio y así contar con una herramienta para simular la reacción de saponificación.

3.4.1 Modelo matemático

Las ecuaciones del modelo matemático para el reactor de mezcla completa fueron programadas en el entorno GUIDE de Matlab. La Figura 3.9 muestra el diagrama de flujo de manera muy general para la solución del simulador. El software esta diseñado para calcular la conversión del reactivo limitante X_A , el flujo del reactivo limitante F_{A0} o el volumen del reactor V . Los datos necesarios que tiene que intruducir el usuario para la solución de las ecuaciones son:

- La concentración inicial C_{A0} y el flujo F_{A0} del reactivo limitante, así como el volumen del reactor si lo que requiere es *calcular la conversión del reactivo limitante* X_A .
- La concentración inicial C_{A0} y la conversión X_A del reactivo limitante, así como el volumen del reactor si lo que requiere es *calcular el flujo del reactivo limitante* F_{A0} .
- La concentración inicial C_{A0} , el flujo F_{A0} y la conversión X_A del reactivo limitante si lo que desea calcular es el *volumen del reactor* V .

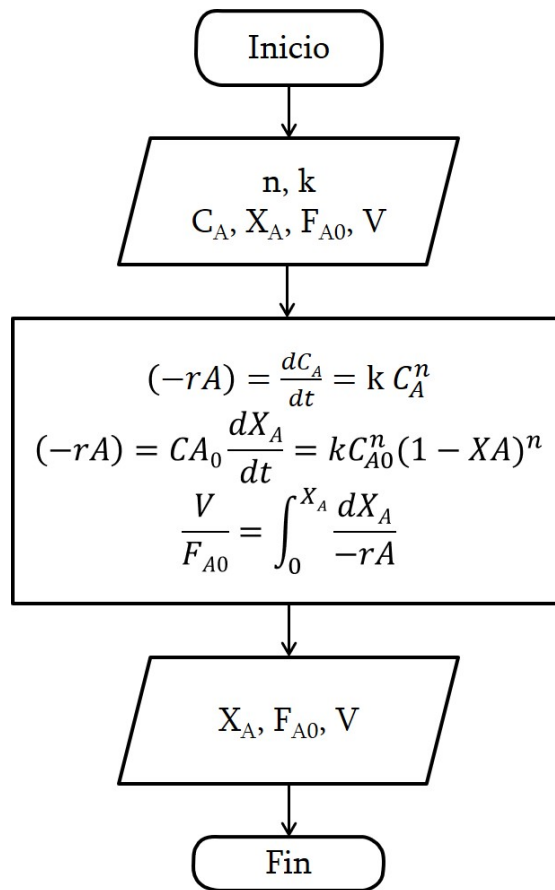


Figura 3.9: Diagrama de flujo

Además para cualquier opción el usuario tiene que seleccionar la cinética de la reacción e introducir el orden de la misma y el valor de la constante cinética.

4 *Resultados*

Como se mencionó en la metodología, se realizaron pruebas de laboratorio para obtener la constante cinética de la reacción de saponificación posteriormente se realizaron pruebas en continuo en el equipo contruido y por último se realizaron unas simulaciones de la misma reacción en el simulador desarrollado este en trabajo.

A continuación se presentarán los resultados de las diversas pruebas experimentales y de las simuladas.

4.1 Cinética de la reacción

Para determinar el orden de reacción es necesario tener datos experimentales sobre la variación de la concentración en función del tiempo. Para determinar el orden de la reacción se puede emplear los métodos integrales y el método diferencial. El método integral gráfico se usa convenientemente en reacciones en las que el mecanismo no se modifica durante el transcurso de la reacción y en consecuencia el ordenes constante, el método se basa en la obtención de líneas rectas a partir de las ecuaciones integradas. Primero se cuantifica la concentración de los reactivos o productos en función del tiempo, se determinan las y para cada orden x , posteriormente se traza la gráfica de la función contra el tiempo y finalmente, se realiza una regresión lineal.

Como se menciona en la sección 2.1.4 para una reacción entre dos componentes con alimentación estequiométrica a densidad constante se procede a calcular la constante cinética k mediante el método integral.

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = kC_A^2 \quad (4.1)$$

En este apartado se presentan por duplicado los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. En las Tablas 4.1, 4.2 el tiempo representa el intervalo en minutos que transcurrió entre cada muestra tomada, el volumen representa los mililitros de titulante gastado, C_A como la nomenclatura lo describe es la concentración de nuestro reactivo, valor que fue utilizado para calcular los resultados de la última columna.

Tabla 4.1: Resultados de pruebas experimentales 1

Tiempo (min)	Volumen (mL)	C_A (M)	$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}}$
0	4.2	0.0800	0.0000
5	1.3	0.0248	27.8846
10	0.9	0.0171	45.8333
15	0.7	0.0133	62.5000
20	0.6	0.0114	75.0000
25	0.6	0.0114	75.0000
30	0.5	0.0095	92.5000
35	0.4	0.0076	118.7500
40	0.6	0.0114	75.0000
45	0.5	0.0095	92.5000
50	0.4	0.0076	118.7500
55	0.3	0.0057	162.5000
60	0.5	0.0095	92.5000

Tabla 4.2: Resultados de pruebas experimentales 2

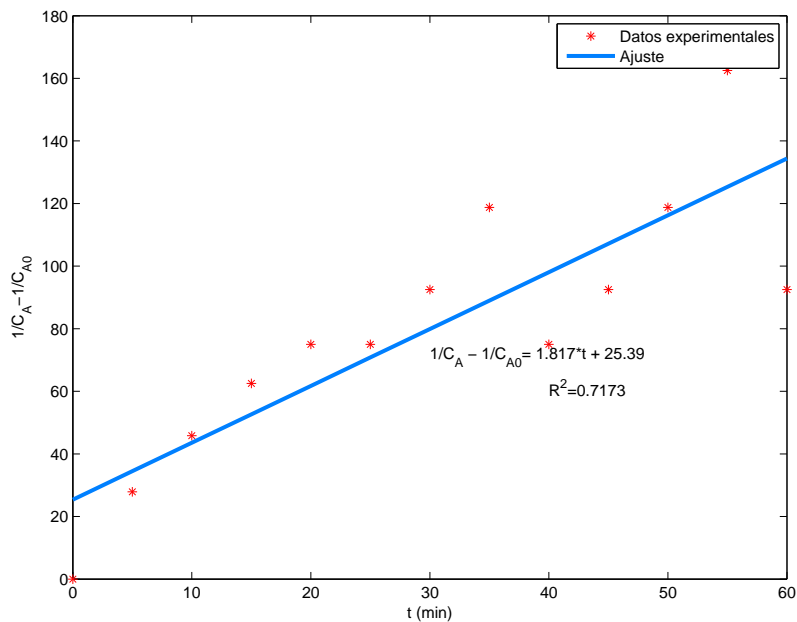
Tiempo (min)	Volumen (mL)	C_A (M)	$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}}$
0	4.2	0.0800	0.0000
5	1.4	0.0267	25.0000
10	0.8	0.0152	53.1250
15	0.7	0.0133	62.5000
20	0.6	0.0114	75.0000
25	0.4	0.0076	118.7500
30	0.5	0.0095	92.5000
35	0.5	0.0095	92.5000
40	0.4	0.0076	118.7500
45	0.5	0.0095	92.5000
50	0.4	0.0076	118.7500
55	0.4	0.0076	118.7500
60	0.4	0.0076	118.7500

El método integral indica que la ecuación linealizada para obtener el parámetro cinético en función de la concentración es la siguiente:

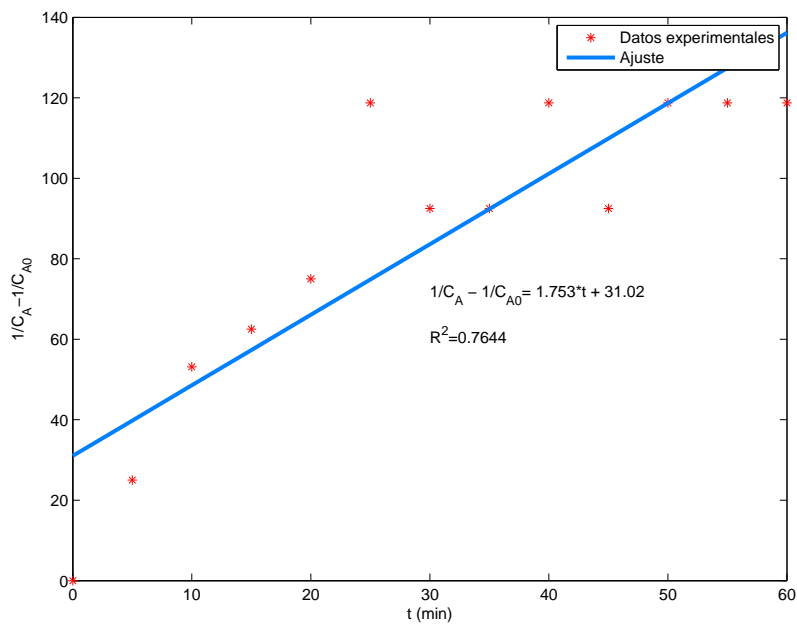
$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt \quad (4.2)$$

De la cual tenemos que $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}}$ representa los datos del eje de las ordenadas y el tiempo t el de las abscisas, con pendiente igual a la constante cinética k , para encontrar este último valor los datos fueron graficados y se presentan en las Figuras 4.1, en donde los puntos rojos representan los datos experimentales obtenidos mientras que la línea azul simboliza el ajuste, los coeficientes de determinación de estos experimentos fueron de 0.7173 y 0.7544. Los valores de las constantes

cinéticas se toman de manera directa de la función de ajuste obtenida, las cuales fueron 1.817 y 1.753.



(a) Experimento 1



(b) Experimento 2

Figura 4.1: Resultados ajuste metodo integral

En las siguientes ecuaciones se presenta el modelo de velocidad de reacción para la reacción de saponificación con acetato de etilo.

$$-r_A = 1.817C_A^2 \quad (4.3)$$

$$-r_A = 1.753C_A^2 \quad (4.4)$$

Las ecuaciones 4.5 y 4.6 representan las ecuaciones para la obtención del tiempo de residencia en función de la concentración o la conversión específica, respectivamente.

$$t = \frac{1}{1.817} \left(\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} \right) \quad (4.5)$$

$$t = \frac{1}{1.817C_{A0}} \left(\frac{X_A}{1 - X_A} \right) \quad (4.6)$$

4.2 Pruebas en continuo

4.2.1 Variación de flujo volumétrico

Los experimentos se realizaron alimentando de forma continua una solución de NaOH al 0.2 M, las pruebas iniciaron con llenado de 290 mL de agua y se fue alimentando la solución con flujo controlado a la salida del reactor se tomaban muestras cada 5 min para determinar la concentración de NaOH, las pruebas terminaban cuando la concentración de NaOH alcanzará la concentración inicial. La Figura 4.2 muestra los tiempos de residencia alcanzados experimentalmente a 3 diferentes flujos volumétricos. Como se tiene esperado; a mayor caudal el tiempo de residencia se alcanza en un menor tiempo y a un caudal bajo el tiempo será mayor. Para el flujo de 27.5 mL/min el tiempo alcanzado de forma experimental fue aproximadamente de 20 min

4.2.2 Conversión del reactivo limitante

La Figura 4.3 muestra el comportamiento de la conversión de los reactivos a la entrada del reactor hasta la salida, se observa que el consumo del hidróxido de sodio por la reacción de saponificación se ve afectado por los flujos volumétricos en el interior del reactor, la conversión del reactivo limitante alcanzada en el reactor es proporcional a dichos flujos, la conversión máxima promedio se alcanza a un mayor flujo. La máxima conversión del hidróxido de sodio en el proceso continuo fue en

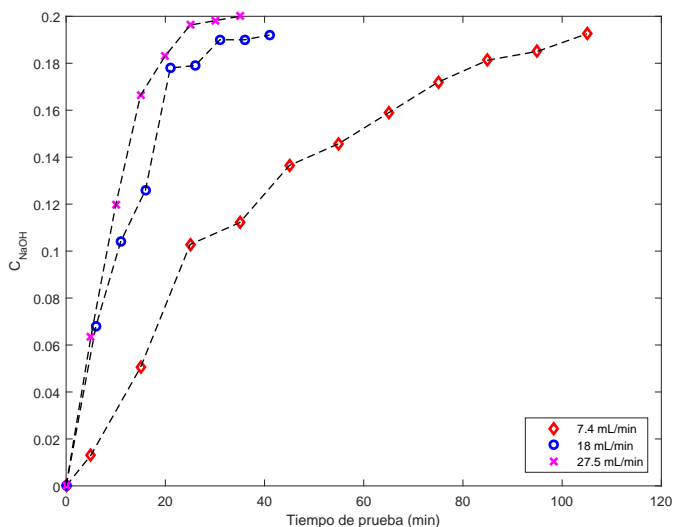


Figura 4.2: Pruebas para el tiempo de residencia

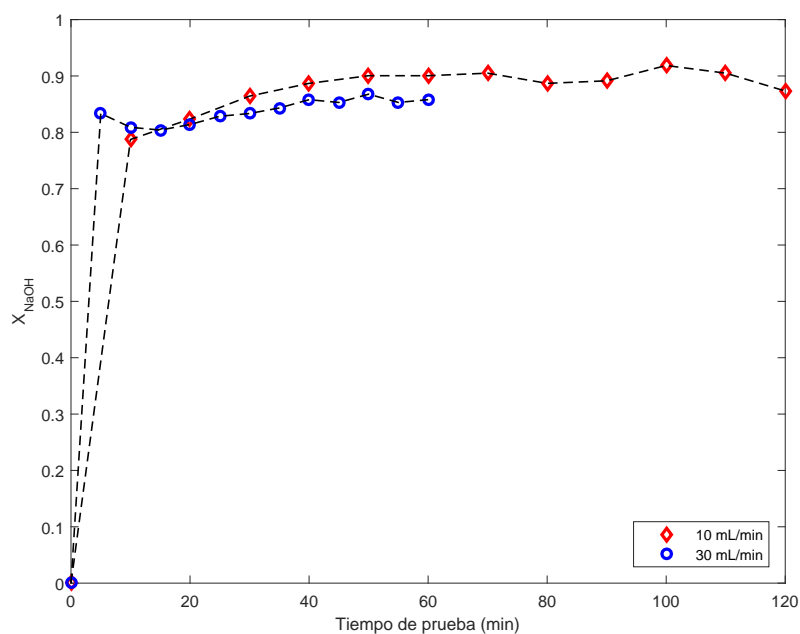
los primeros minutos de monitoreo, para los mayores flujos fue a los 5 minutos y para el menor flujo fue a los 10 minutos, el proceso llega al estado estacionario aproximadamente a los 30 minutos de la prueba para los mayores flujos y para el menor flujo a los 100 minutos de la prueba. La conversión ponderada en el estado estacionario fue del 50% de conversión del reactivo limitante.

4.3 Condiciones de operación

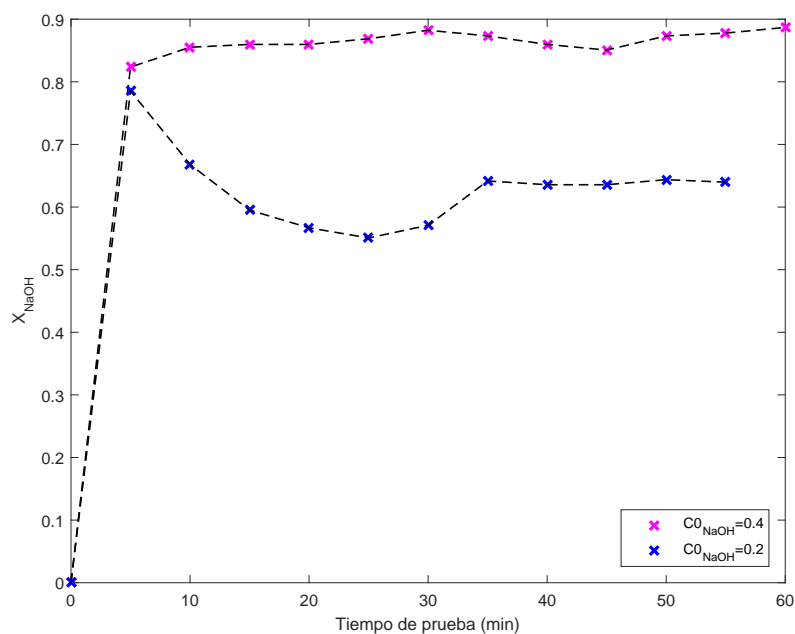
Los factores que se consideran importantes en el proceso están delimitados en la siguiente tabla, para determinar las condiciones de operación más adecuadas se recurrió al análisis de tres diferentes pruebas en las que se varía el flujo volumétrico, obteniendo así gráficos del comportamiento de los experimentos de acuerdo a la manera en la que se operan.

Tabla 4.3: Condiciones de operación

Parámetro	1	2	3
Flujo del reactivo A (mL/min)	8	18	28
Flujo del reactivo B (mL/min)	8	18	28
Temperatura (C_o)	25	25	25
C_A	0.4	0.4	0.4
C_B	0.4	0.4	0.4
Volumen del reactor (mL)	270	270	270



(a) Conversión de NAOH en función de los flujos volumétricos



(b) Conversión de NAOH en función de la concentración del acetato de etilo

Figura 4.3: Conversión del reactivo limitante

Se validó el reactor con tres sistemas equimolares de acetato de etilo e hidróxido

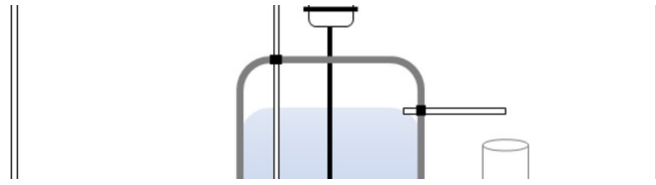


Figura 4.4: Diagrama del sistema

de sodio. El primero fue de 0.038 M. Se realizaron tres corridas. En cada una de ellas se retiró una muestra de cada uno de los seis elementos muestreadores a lo largo del reactor. Se midió la conductividad de cada muestra. 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 tubular ideal. Lo mismo se realizó a concentraciones de 0.03 M y 0.025 M con la única diferencia que se tomaron solamente tres muestras a estas concentraciones, a 1/6, 3/6 y 6/6 del volumen o longitud total del reactor.

4.4 Verificación del simulador

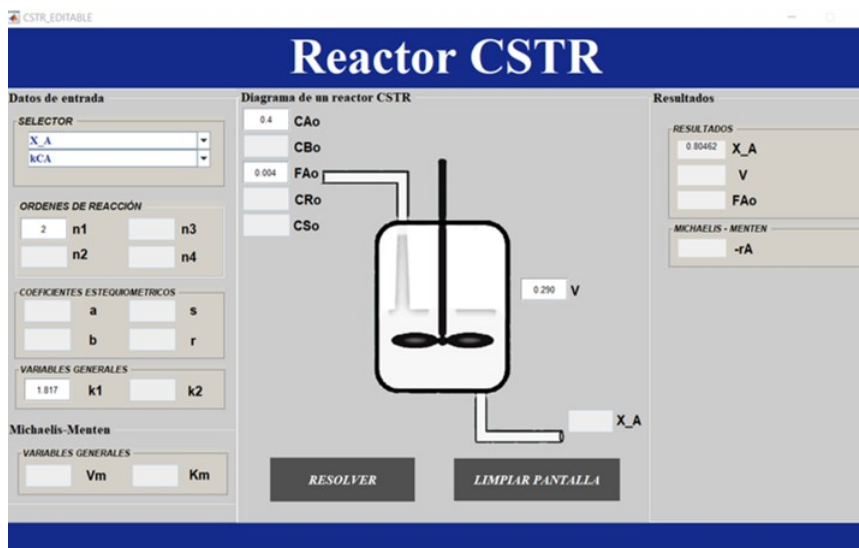


Figura 4.5: Simulador Reactor CSTR

Tabla 4.4: Resultados del simulador

Valores de entrada						
Orden de reacción	2	2	2	2	2	2
Constante cinética k_1	1.753	1.817	1.753	1.817	1.753	1.817
C_{0NaOH}	0.4	0.4	0.2	0.2	0.4	0.4
Flujo de NaOH (mol/min)	0.004	0.004	0.004	0.004	0.012	0.012
Volumen del reactor (L)	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290
Resultados						
X_A	0.80147	0.80462	0.64406	0.64904	0.68265	0.68724

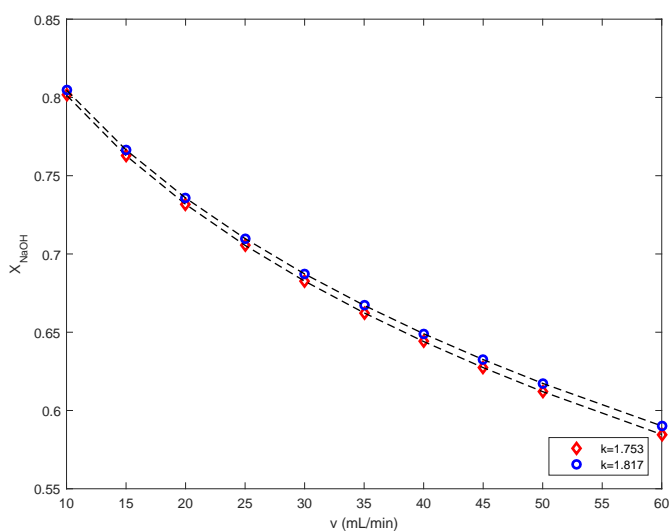


Figura 4.6: Conversión de NaOH en función del flujo volumétrico para las constantes cinéticas

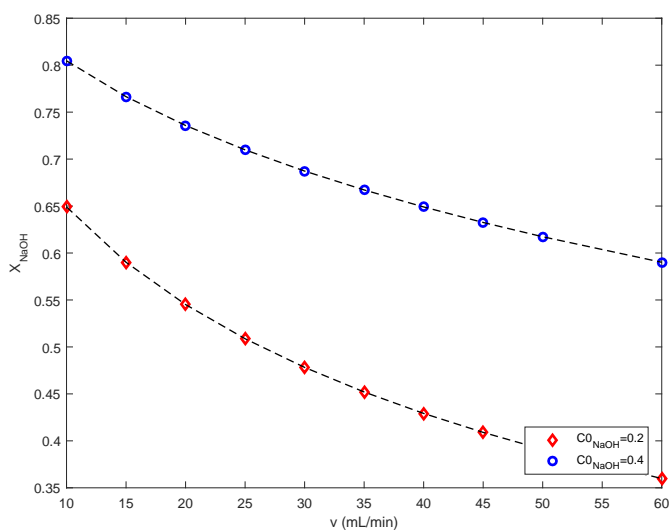


Figura 4.7: Conversión de NaOH en función del flujo volumétrico para las concentraciones molares

5 *Conclusiones*

Se puso en disposición de los estudiantes de la carrera de ingeniería química del Laboratorio de operaciones unitarias un reactor de mezcla completa a escala laboratorio con su respectiva práctica de laboratorio para el fortalecimiento de su formación profesional. Mediante la realización de la práctica de laboratorio con la técnica utilizada podemos determinar de manera experimental la constante de velocidad de la reacción entre el acetato de etilo y el hidróxido de sodio en un reactor de mezcla completa a escala laboratorio

Se construyó un reactor CSTR de mezcla completa con capacidad de 290ml, un sistema de bombeo de flujo de dos reactivos, control de entrada de flujo al reactor, y su respectivo manual de operación.

Además con la realización de la experimentación se determinaron las variables más adecuadas para el funcionamiento óptimo del reactor continuo de mezcla completa cuya función principal es la de realizar prácticas de laboratorio.

Construcción de un equipo de laboratorio, en respuesta a la carencia y utilidad de este, para el fortalecimiento académico e investigativo de los estudiantes de la Facultad de Ciencias Ambientales.

A Nomenclatura

V	Volumen, (mL)
X	Conversión
X^*	Conversión óptima
r	Velocidad de formación
$-r$	Velocidad de desaparición
T	Temperatura absoluta, ($^{\circ}C$)
k	Constante de equilibrio
C	Concentración, (M)
t	Tiempo, (min)
F	Flujo molar, (mol/min)
N	Número de moles
M	Relacion molar de alimentación con respecto al reactivo limitante
S	Velocidad espacial, (s^{-1})
<i>Letras griegas</i>	
τ	Tiempo de residencia
ν	Flujo volumétrico, (mL/min)
<i>Subindices</i>	
n	Orden de reacción
A, B, R, S	Reactivos
HCl	Ácido Clorhídrico
$A.E$	Acetato de Etilo
$NaOH$	Hidróxido de Sodio
F	Final
0	Inicial

B Práctica de Laboratorio

“Balance de materia en un reactor químico”

Introducción

La ingeniería de las reacciones químicas se basa en los conceptos cinéticos y termodinámicos de la reacción química aplicados a nivel industrial, para diseñar y hacer funcionar correctamente aquel equipo donde debe tener lugar, el cual es denominado reactor químico. El reactor químico es el dispositivo donde ocurre un cambio en la composición debido a la reacción química.

Para diseñar un reactor de debe considerar el análisis de costos para determinar el diseño más rentable, introduce nuevos factores tales como los materiales de construcción, la prevención de la corrosión, los requerimientos de operación y mantenimiento, etc.

La combinación de los procesos físicos y químicos a los efectos del diseño del reactor se hace recurriendo a las leyes de la conservación de la materia y la energía para cada tipo de reactor.

Objetivo General:

Desarrollar la reacción de saponificación en un proceso continuo

Objetivos Específicos

- a) Caracterizar la alimentación de cada uno de los reactivos así como la de los productos en el reactor
- b) Monitorear la reacción de saponificación hasta alcanzar la máxima conversión del reactivo limitante
- c) Realizar el balance de materia en el reactor CSTR del laboratorio de transferencia de masa

1. Conceptos de la ciencia o ingeniería

El reactor de tanque agitado continuo (CSTR) consta de un tanque con una agitación casi perfecta, en el que hay un flujo continuo de materia reaccionante y desde el cual sale continuamente el material que ha reaccionado (material producido). La condición de agitación no es tan difícil de alcanzar siempre y cuando la fase líquida no sea demasiado viscosa.

El propósito de lograr una buena agitación es lograr que en el interior del tanque se produzca una buena mezcla de los materiales, con el fin de asegurar que todo el volumen del recipiente se utilice para llevar cabo la reacción, y que no existan o queden espacios muertos.

Se puede considerar que la mezcla es buena o casi perfecta, si el tiempo de circulación de un elemento reactante dentro del tanque es alrededor de una centésima del tiempo promedio que le toma al mismo elemento para entrar y salir del reactor.

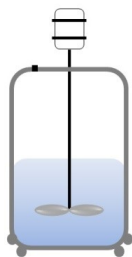


Figura B.1: Diagrama de flujo para un reactor CSTR

2. Preguntas para prueba

Realiza una investigación bibliográfica y responde a lo siguiente:

- a) Investiga y describe la reacción de saponificación
- b) Investiga y describe la ecuación de balance de materia para un proceso reactivo
- c) Investiga los siguientes términos y describe como lograrías obtenerlos a partir de uno de ellos:
 - Flujo másico
 - Flujo molar
 - Flujo volumétrico

3. Materiales, equipo de laboratorio y reactivos

Para la realización de la práctica se requiere lo siguiente:

Materiales y equipo de laboratorio	Reactivo
Reactor CSTR de laboratorio	Agua destilada
10 matraz erlenmeyer (250 ml)	Solución de Hidróxido de sodio
1 bureta	Solución de Ácido Clorhídrico
1 micropipeta (5 ml)	Solución de Acetato de etilo
1 cronómetro	Indicador Fenolftaleína
1 termómetro	
1 parrilla de agitación	

4. Procedimiento experimental:

- Los materiales deben estar perfectamente lavados y secos, para evitar la reacción del hidróxido de sodio con el dióxido de carbono disuelto en el agua destilada.
- Se debe hervir el agua destilada a utilizar para lograr que quede libre de Dioxido de Carbono y dejar enfriar hasta tenerla a temperatura ambiente.
- Se debe llenar la bureta con la solución del Ácido Clorhídrico, no sin eliminar previamente el aire de la punta y colocarla en el soporte universal.
- Medir con la pipeta volumétrica seca de 25 ml la solución de hidróxido de sodio y verter totalmente en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, perfectamente seco, se debe verificar si las pipetas son de vaciado total (con la leyenda PE)
- Medir con otra pipeta volumétrica PE, 25 ml de solución de acetato de etilo y verter totalmente en otro matraz Erlenmeyer de 250ml
- Verter la solución de acetato en el matraz de la solución de hidróxido de sodio e inmediatamente accionar el cronometro y registrar la temperatura inicial, se debe colocar la mezcla reaccionante en una parrilla con agitación para mejorar la eficiencia de la reacción.
- Procedemos a tomar una alícuota de 5ml de la mezcla reaccionante con una micropipeta y colocarla en una matraz Erlenmeyer de 125 ml que haya sido llenado previamente con 20 ml de agua destilada libre de CO₂ y agregar 3 gotas de fenolftaleína, esto se realizara cada 5 minutos transcurridos del inicio de la reacción comenzando con el tiempo 0 hasta el momento en que el gasto del Ácido clorhídrico en las titulaciones se muestre constante.

- h) Titular rápidamente con la solución estandarizada de Ácido clorhídrico hasta el vire de la titulación, de rosa a incoloro, sin detener el cronometro.
- i) Registrar en una tabla el volumen de titulante, el tiempo transcurrido, la temperatura inicial y final.
- j) Los residuos deben colectarse en un vaso de 1L para que al final de la práctica se tiren en el sitio correcto.

5. Resultados y análisis:

Realiza una presentación para mostrar los resultados obtenidos durante la calibración.

- a) Determinar las concentraciones de los reactivos A y B.

Tabla B.1: Concentraciones iniciales

Reactivo	Compuesto químico	Concentración (M)
A		
B		

- b) Monitorear la reacción, caracterizando a la salida del reactor cada 5 min.

Tabla B.2: Concentraciones iniciales

Tiempo <i>min</i>	Volumen HCl <i>ml</i>	Concentración NaOH (M)
0		
5		
10		
15		
20		
25		

- c) Graficar el comportamiento de la reacción como se muestra en la figura 2.
- d) Realizar los balances de materia correspondientes.

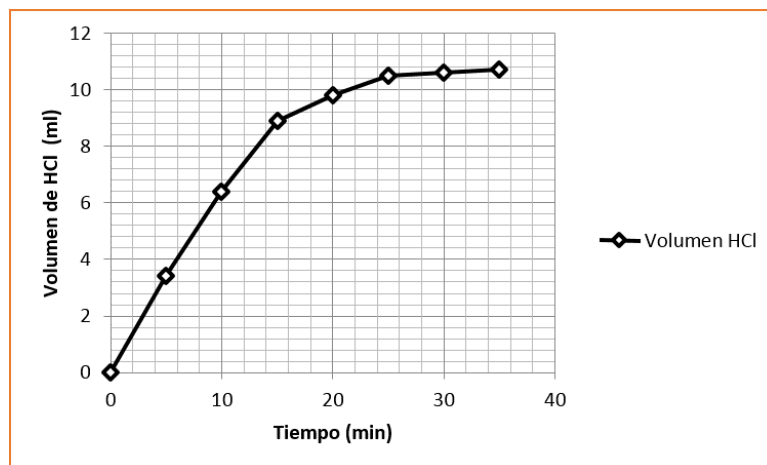


Figura B.2: Comportamiento de la reacción de saponificación

Conclusiones:

Escribe las conclusiones con referencia a los objetivos de la práctica.

Bibliografía

- Himmelbleu D. (1997). Capítulo 5. Balances de energía. En Principios Básicos en Ingeniería Química (pp.408-415). México: Prentice-Hall Hispanoamericana
- Felder R.M., Rousseau R.W., (2004), Principios elementales de los procesos químicos. México DF, México, Limusa
- Reklaitis, G.V., Schneider, R. D. (1986), Balances de Materia y Energía, México DF, México, Nueva Editorial Interamericana

C *Manual de operación para el sistema CSTR*

MANUAL DE OPERACIÓN
PARA EL SISTEMA CSTR.



Introducción

El reactor continuo de mezcla completa a escala laboratorio permite desarrollar reacciones en estado estacionario para reacciones de segundo orden alimentadas estequiométricamente y no estequiométricamente con condiciones de operación: reacción a densidad constante, isotérmicas y a presión atmosférica.

El sistema se encuentra ubicado en el laboratorio de transferencia de masa, del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), con capacidad de flujo de 10-100 ml/min, con recipientes de almacenamiento para los reactivos de 4L y con un volumen de reactor de 290 ml.

El diseño puede adaptarse a reactores de mezcla completa en serie y en paralelo, integrando reactores con la misma capacidad o con mayor capacidad, adquiriendo los accesorios necesarios para su instalación.

El sistema por su flexibilidad de empleo, su rapidez de puesta en funcionamiento, resulta un complemento indispensable para cualquier laboratorio didáctico en procesos químicos.

Composición y descripción

Esquema del sistema real

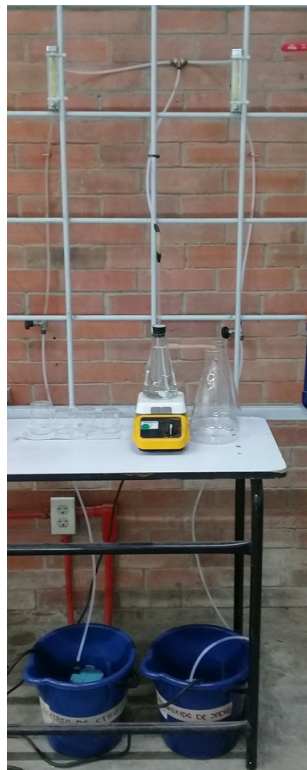


Figura C.1: Reactor continuo de mezcla completa a escala laboratorio

Diagrama de tubería e instrumentación del sistema

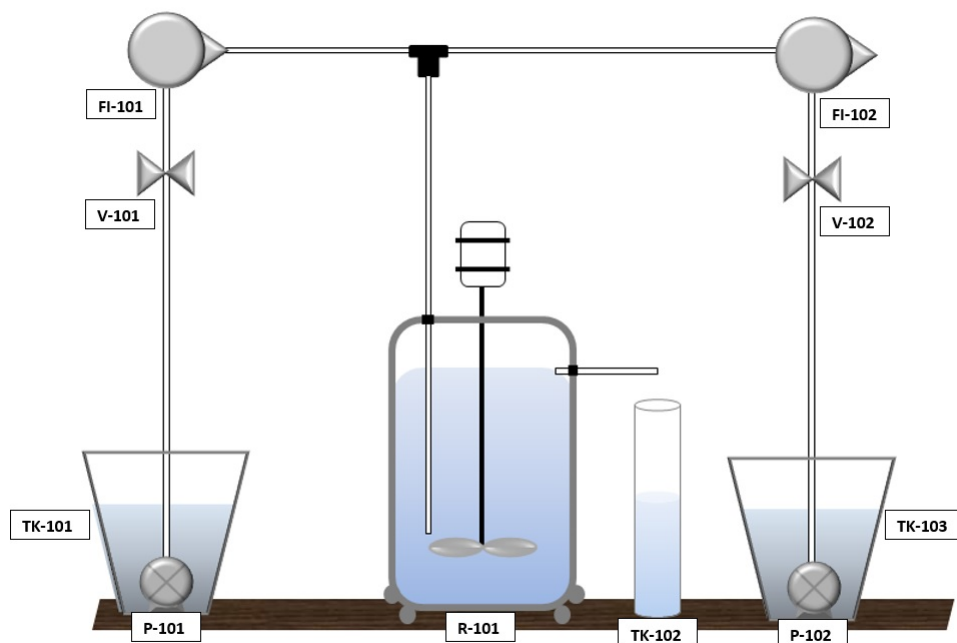


Figura C.2: Esquema DTI

Instalación

Zona de bombas

El área para la instalación de las bombas debe ser seleccionada de tal manera que permita un funcionamiento seguro y continuo que cuente con las siguientes características:

- Ser una zona de fácil acceso a la operación y mantenimiento
- Los recipientes contenedores de las bombas deben asegurar la calidad de fuentes contaminantes del reactivo que se adicione
- Contar con eficiencia hidráulica del sistema de impulsión o distribución.
- Disponibilidad de energía eléctrica.

La superficie representada por las bombas consta de dos recipientes contenedores con capacidad de 4L para cubrir las bombas en su totalidad, compuestas por un material de plástico anticorrosivo, mientras que las bombas sumergibles fabricadas de hierro tienen un tamaño aproximado de 10cm x 15 cm conectadas a un tubin que transporta el líquido directamente hacia los flujómetros.

Zona de Flujómetros



Figura C.3: Zona de bombas

El espacio destinado a la instalación de los flujómetros debe tener en cuenta las siguientes particularidades para evitar los problemas con estos equipos:

- Tener un flujo ascendente, lo que ayuda a evitar que burbujas de aire o gas en el líquido puedan influenciar en la medición
- Tramos de entrada/salida respecto de un elemento de intervención como válvulas, codos, etc.
- Verificar la compatibilidad de los elementos internos del tubo con el fluido de proceso.
- Revisar que la temperatura de proceso sea compatible con el material del flujómetro.
- Considerar un área que no sufra de vibraciones excesivas

El área que constituyen los flujómetros está compuesta por un soporte metálico cuadrado de 2m x 2m en el que se encuentran colocados los dos flujómetros que mantienen calibrado el flujo, estos pueden conducir un flujo de hasta 100ml/min además de que contienen cada uno de ellos una válvula de entrada y una de salida para tener un mayor control del líquido que es conducido directamente hacia el reactor.



Figura C.4: Zona de flujómetros

Zona de reactor

La zona destinada para la colocación del reactor a escala debe presentar los siguientes requerimientos:

- Ser un local amplio y ventilado
- Contar con buena iluminación

La extensión en la que se encuentra ubicado el reactor a escala cuenta con un matraz kitazato con una capacidad de 250ml unido herméticamente por la parte superior con tubin a una T que une a los flujómetros mencionados en la sección de zona de flujómetros y por el orificio de succión a una manguera que dirige el material reaccionante a un vaso de precipitado que funge como contenedor de productos. El reactor se encuentra sobre puesto en una parrilla de agitación magnética para simular la mezcla completa y obtener una mejor calidad en los productos.



Figura C.5: Zona de reactor

Puesta en Funcionamiento

En el momento en el que se dé por terminada la instalación se procede a poner el reactor a escala en funcionamiento.

- a) Llenar el matraz kitazato con 290ml de agua destilada, exactamente en el afore de la sección de succión por donde saldrán los productos y colocar un agitador magnético de media pulgada antes de cerrar con el corcho herméticamente con cinta de aislar.
- b) Colocar el matraz kitazato después de realizar el paso anterior en su totalidad, sobre una parrilla de agitación magnética.
- c) Colocar un vaso de precipitado o un matraz de un 1L exactamente en la zona de descarga de productos para que sean recogidos.
- d) Colocar el flujo preparado de reactivos en cada uno de los recipientes contenedores correctamente etiquetados de las bombas tomando en cuenta que la máxima cantidad de líquido debe ser de 4L.
- e) Colocar las bombas sumergibles dentro de los recipientes contenedores que ya contengan el fluido.
- f) Asegurarse de que los flujómetros y válvulas se encuentren cerrados, para que al accionar las bombas no exista problemas con el fluido.

- g) Conectar las bombas sumergibles y la parrilla de agitación.
- h) Utilizar el regulador para señalar el flujo con el que se requiera trabajar, se debe recordar que solo existe un rango de 10ml/min hasta 100ml/min.

D

Manual de instalación y ejecución de simulador de reactor de mezcla completa

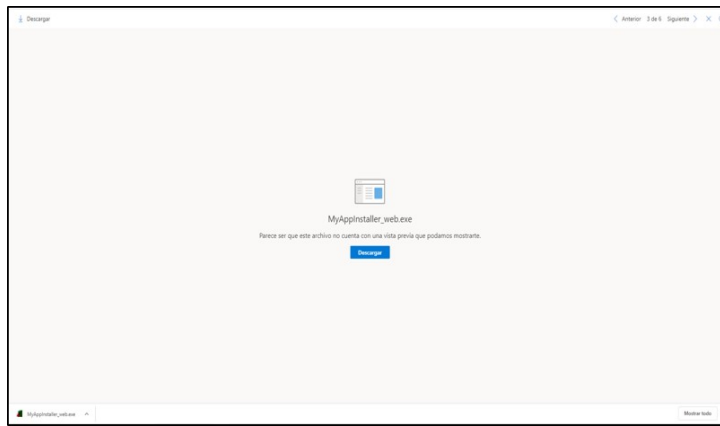
MANUAL DE
INSTALACIÓN Y
EJECUCIÓN DE
SIMULADOR DE REACTOR
DE MEZCLA COMPLETA



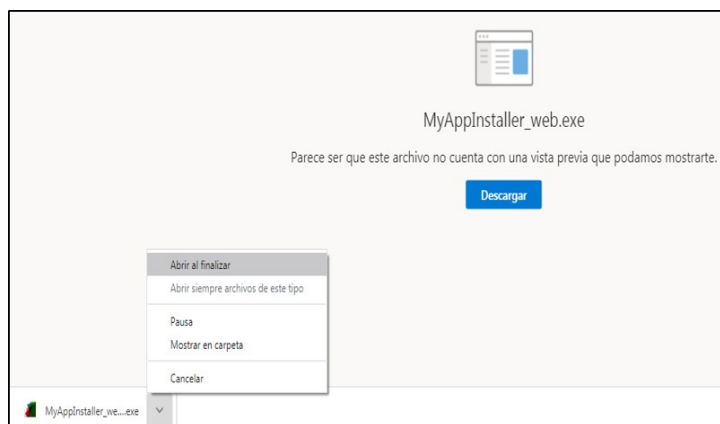
El simulador de reactor de mezcla completa es un programa diseñado para la obtención de parámetros comúnmente utilizados en el diseño de reactores como son la conversión, conversión óptima, volumen del reactor, flujos y/o velocidad de reacción, a partir de la introducción de ciertos parámetros de entrada para diferentes cinéticas de reacción.

Descarga y ejecución

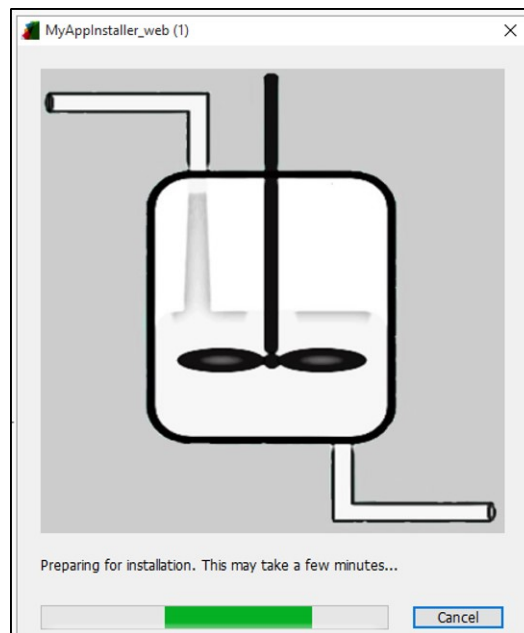
Para poder ejecutar el programa se llevarán a cabo los pasos que a continuación se describen detalladamente. Inicialmente se seleccionará la carpeta *MyAppinstaller_web.exe* y se dará click en la opción *Descargar*.



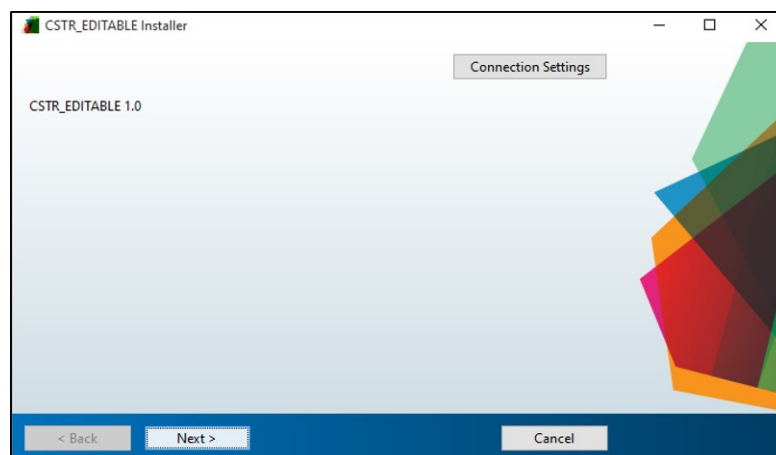
Cuando la descarga del programa finalice se dará click derecho y se seleccionará la opción *Abrir al finalizar*



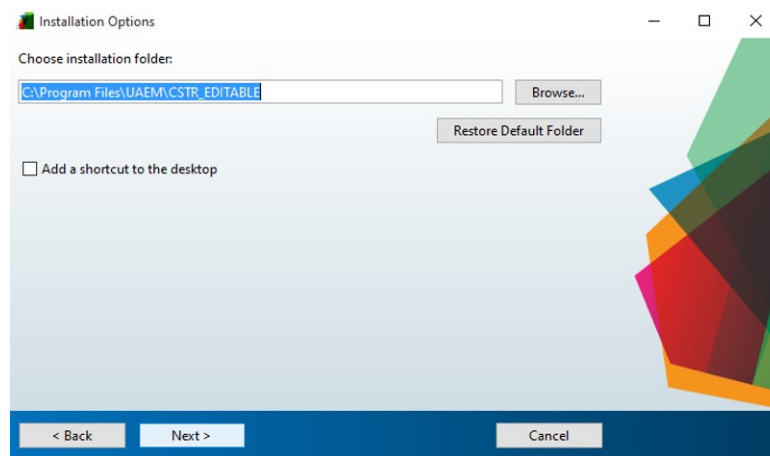
Cuando el programa abra se mostrará la siguiente pantalla, se deberá esperar unos minutos a que la instalación se prepare.



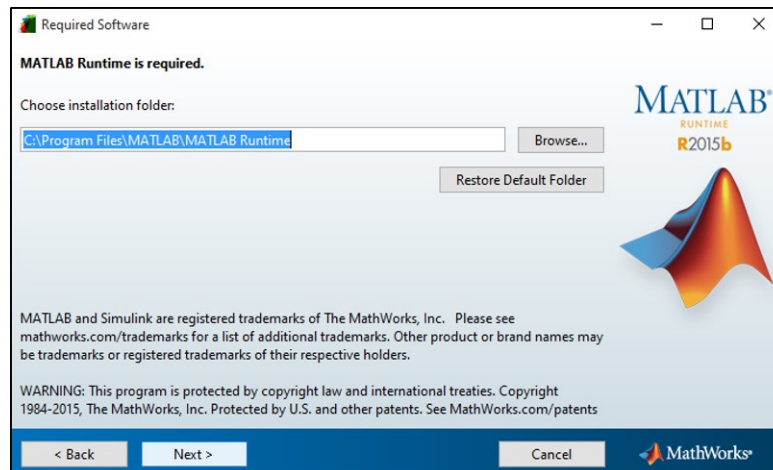
Cuando el programa se encuentre preparado para la instalación se mostrará la siguiente pantalla en la que se dará click en la opción **Next**



A continuación se mostrarán las opciones de instalación, nuevamente se seleccionará la opción *Next* que se muestra en la pantalla.

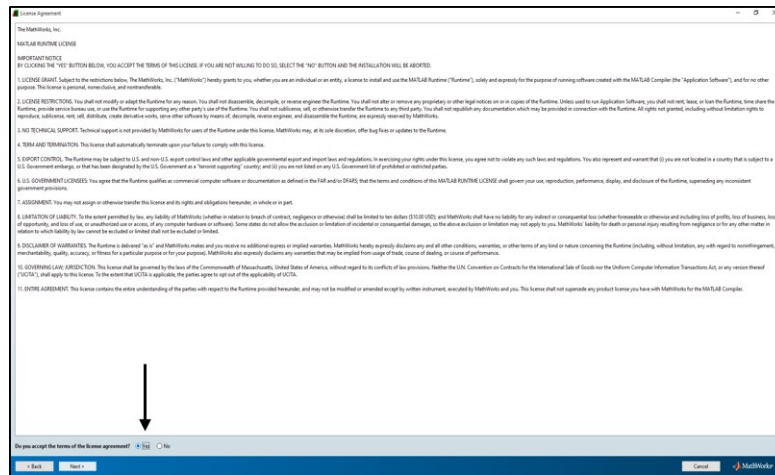


En la siguiente ventana aparecerá un mensaje de requerimiento del software MATLAB durante el tiempo de ejecución del programa por lo que se debe asegurar que se cuenta con el mismo para proceder con la instalación, posteriormente se dará click en *Next*

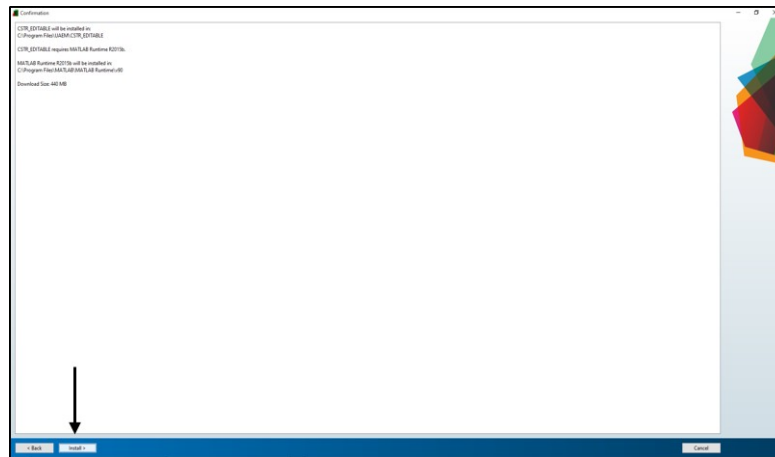


D. Manual de instalación y ejecución de simulador de reactor de mezcla completa

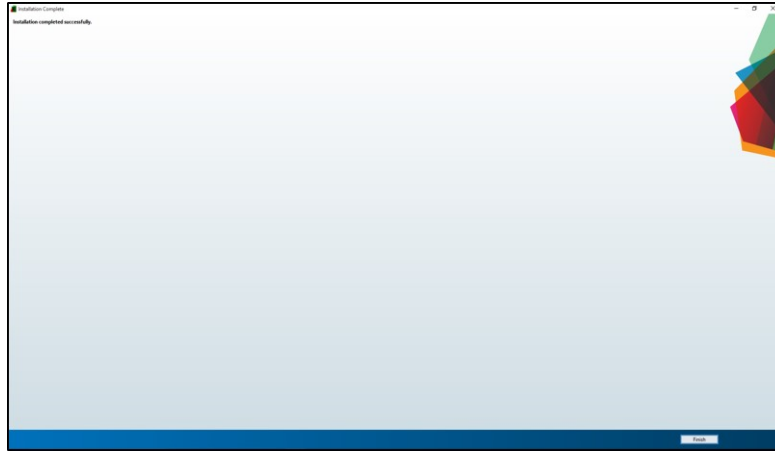
El siguiente paso será aceptar los términos de licencia del programa, para ello se dará click en la opción **Si** en la parte inferior izquierda del recuadro.



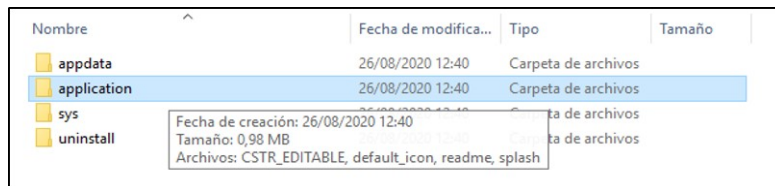
Posteriormente el programa solicitará la confirmación de la instalación, para ello se seleccionará la opción **Install** ubicada en la esquina inferior izquierda de la pantalla.



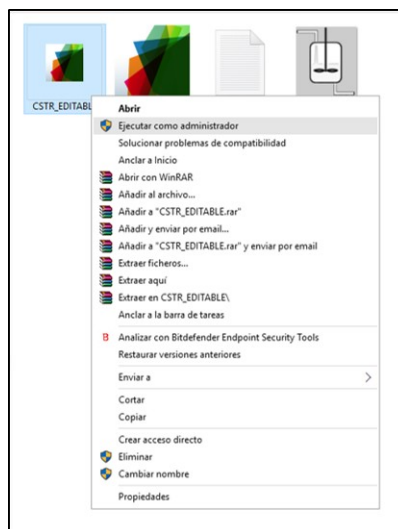
El programa comenzará a instalarse y se requerirán unos minutos para que finalice esta acción, posteriormente se procederá a seleccionar en la siguiente pantalla la opción ubicada en la esquina inferior derecha ***Finish***



Se encontrará la carpeta en la que se instaló el programa y se entrará en la subcarpeta ***application***



Se seleccionará la opción ***CSTR_EDITABLE***, se dará click derecho y se presionará la opción ***Ejecutar como administrador***



Una vez que el programa se ejecute se mostrarán en pantalla del lado izquierdo las opciones para datos de entrada siguientes:

- Selección de cinética de reacción
- Ordenes de reacción
- Coeficientes estequiométricos
- Variables generales
- Variables generales Michaelis - Menten

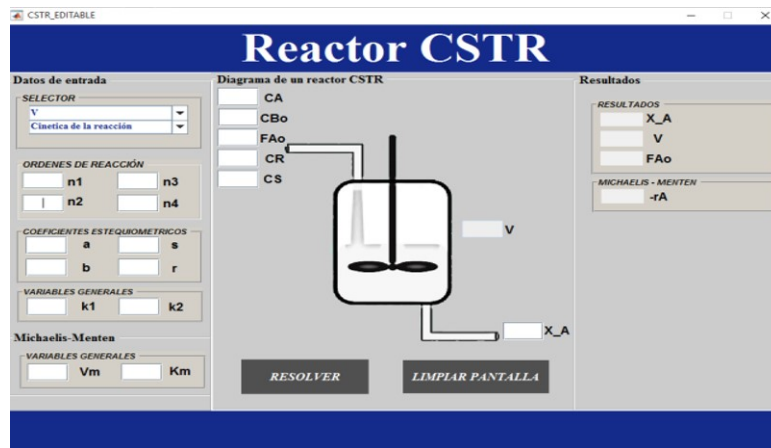
En el centro se presentará el diagrama general de un reactor CSTR, el recuadro en el que aparecerá el volumen calculado, los recuadros con la opción resolver para ser utilizado después de introducir todos los datos requeridos, la opción limpiar pantalla para borrar el contenido de las casillas modificables y comenzar un nuevo cálculo y finalmente las siguientes opciones de entrada:

- Concentración de entrada A
- Concentración de entrada B inicial
- Flujo A inicial
- Concentración de entrada R
- Concentración de entrada S
- Conversión del reactivo A

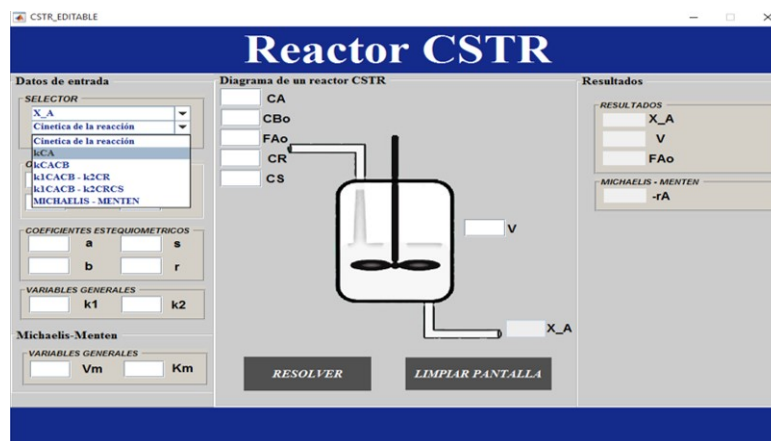
Del lado derecho se mostrarán los resultados correspondientes a las siguientes opciones:

- Conversión
- Volumen
- Flujo
- Velocidad de reacción Michaelis - Menten

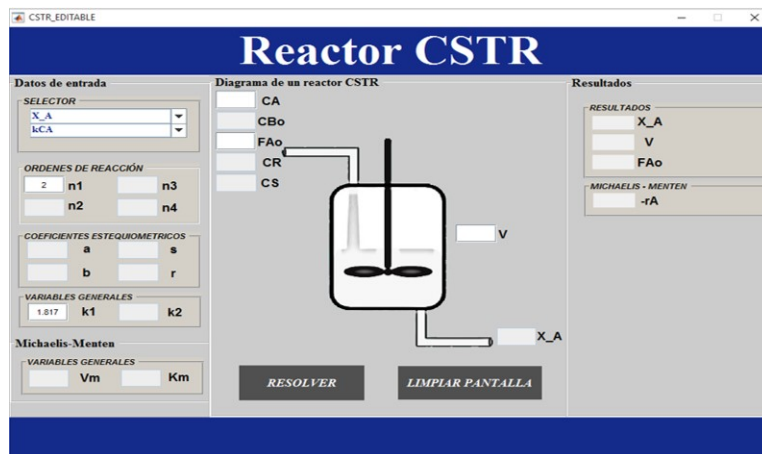
Es importante mencionar que dependiendo del análisis que se desee evaluar con el programa se bloquearán las casillas que no requieran datos de ingreso y tomarán un color gris.



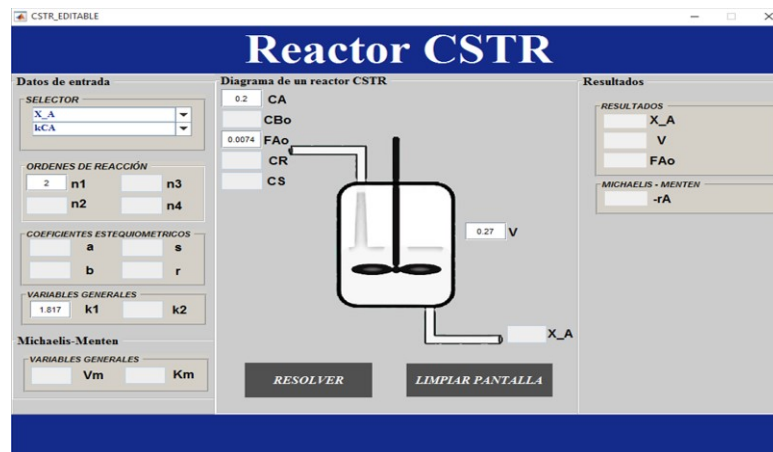
Con respecto a la opción desplegable *Cinética de la reacción*, se pueden seleccionar cinco tipos, para una reacción con un solo reactivo, con dos reactivos, dos reactivos y un producto, dos reactivos y dos productos, y Michaelis Menten.



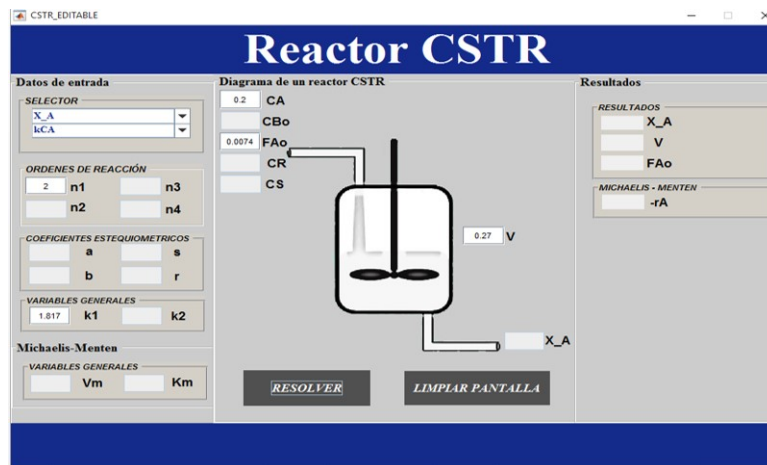
Una vez seleccionada la cinética de la reacción a analizar se procederá a ingresar el *orden de reacción* que dependerá de los reactivos para producir un producto. De igual manera se ingresará el valor de la constante de velocidad de reacción en la caja correspondiente a *datos generales*



EL próximo paso será ingresar los datos de entrada que se soliciten en la parte central del programa denominada *Diagrama de un reactor CSTR* como lo son en el ejemplo que se muestra, la concentración de reactivo A CA y el flujo al que ingresa el reactivo A FAo , de la misma manera se solicita el volumen de entrada al reactor CSTR.



Una vez que los datos se han ingresado se procederá a seleccionar la opción *Resolver* y automáticamente los resultados teóricos se mostrarán en la columna denominada *Resultados*. Para realizar un nuevo ejercicio con el programa únicamente se seleccionará la opción *Limpiar pantalla*.



Bibliografía

- [1] Smith, J. (1991). Ingeniería de la cinética química. 6th ed. México D.F.: McGraw Hill Book Company, p.47.
- [2] Álvarez, J. (2008). La importancia de los reactores químicos en la industria. Cátedra Neal R. Amundson Efectos de escala y geometría en fenómenos de transporte. Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.
- [3] Calvet, S. (1999). NTP 527: Reacciones químicas exotérmicas (I): factores de riesgo y prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. España. Disponible en: https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_527.pdf/4d32ceae-c81f-44c2-97c0-a7a6c736ddb Última consulta: Agosto, 2020.
- [4] Ingeniería de la Reacción Química, 2016, Disponible en https://es.slideshare.net/MadregadasdePoesaPoesa/ingeniera-de-la-reaccin-quimica?from_action=save Última consulta: Junio, 2020.
- [5] García, G. (2016). Chem. Reactor simulator: Herramienta de simulación de CSTR como apoyo a la docencia. Universidad Politécnica de Madrid. España. Disponible en: http://www.industriales.upm.es/estudios/grados/ingenieria_quimica.es.htm. Última consulta: Agosto, 2020.
- [6] Suaña, P. (2014). Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura basado en redes neuronales aplicado a un reactor para el proceso de saponificación (Tesis de grado). Universidad Nacional de Altiplano, Puno, Perú. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2037/>. Última consulta: Agosto, 2020.
- [7] Levenspiel, O. (2004). Ingeniería de las reacciones químicas. 3rd ed. Barcelona: Editorial Limusa S.A. de C.V., pp.240-242.
- [8] Santoyo, A. B., Carrasco, J. L. G., Rodriguez, J. B., & Gómez, E. G. (1985). Estudio experimental del tipo de flujo en un reactor tanque continuo agitado. Anales de la Universidad de Murcia (Ciencias), 125-142

- [9] Ancheyta, J. & Valenzuela, M. (2002). Cinética Química para Sistemas Homogéneos. Instituto Politécnico Nacional. Primera edición, México. Disponible en: https://www.academia.edu/15743956/Cinetica_quimica_para_sistemas_homogeneos. Última consulta: Junio, 2020.
- [10] Shinskey, F. (1988). Process Control Systems Application, Design and Tuning. 3rd ed. E.U.A. Mc Graw Hill Company.
- [11] Khan Academy (2021). Lecciones de química. Unidad: Cinética. Mecanismos de reacción. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/chemistry/chem-kinetics>. Última consulta: Marzo, 2021.
- [12] Aznar, A. & Cabanelas J. Ingeniería de Reacciones. Universidad Carlos III de Madrid, Getafe, España. Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/quimica-ii/material-de-clase-1/MC-F-003.pdf>. Última consulta: Agosto, 2020.
- [13] López, I. & Borzacconi L. (2009). Notas del curso introducción al diseño de reactores. Universidad de la República, Uruguay. Disponible en: <https://www.fing.edu.uy/iiq/maestrias/DisenioReactores/materiales/notas1.pdf> Última consulta: Agosto, 2020.
- [14] López, I. & Borzacconi L. (2003). Notas del curso cinética e ingeniería de reacciones. Universidad de la República, Uruguay. Disponible en: <https://www.fing.edu.uy/iiq/reactores/cursos/irq1/materiales/reactores1.pdf> Última consulta: Agosto, 2020.
- [15] Cuevas, R. (Sin Fecha). Ingeniería de Reactores: Obtención de las ecuaciones de diseño para reactores ideales. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Balancemateria_10657.pdf. Última consulta: Agosto, 2020.
- [16] Freitez, J. (2015). Simuladores de procesos químicos. Disponible en: <https://juanrodriguezcf.files.wordpress.com/2015/11/simulacion-de-procesos-clase-iii-unefa.pptx>. Última consulta: Agosto, 2020.
- [17] López, A. (2003). Practica de reactores químicos. Instituto Tecnológico de Toluca, Metepec, México. Disponible en: <http://www.ittoluca.edu.mx/difusion/practicasquimica/REACTORES/PRACTICA> Última consulta: Agosto, 2020.
- [18] Baldomero, J., Cruz, E., Ponce, G., Rojas, A., Romero, R. & Vázquez, A. (2018). Practica: Determinación del índice de saponificación. Universidad Autónoma del Estado de México, México. Disponible en: https://www.academia.edu/37519452/Saponificacion_practica. Última consulta: Agosto, 2020.

- [19] Acosta, J. & Pérez, R. (2012). Estudio experimental y simulación de la saponificación del acetato de etilo en tres reactores CSTR en serie (Tesis de grado). Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias.
- [20] Bayas, M., & Núñez, C. (2011). Diseño y construcción de un reactor continuo de mezcla completa (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. Disponible en: <https://1library.co/document/y96r67ly-disen0-construccion-reactor-continuo-mezcla-completa.html>. Última consulta: Agosto, 2020.
- [21] Rodríguez, J. (2013-2014). Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK (Tesis de grado). Universidad Internacional SEK, Ecuador. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/> Última consulta: Agosto, 2020.
- [22] Nihal Bursali, Suna Ertunc & Bulent Akay.(2006) Process improvement approach to the saponification reaction by using statistical experimental design.
- [23] Buchi (2013). chemReactors for kilolab and pilot plant Disponible en: <http://www.buchiglas.com/es/productos/reactores-a-presion.html>. Última consulta: Agosto, 2018.
- [24] Nuñez J. & Udeos T., (2015). Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Batch para Saponificar Acetato de Etilo (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Litoral, Guayaquil, Ecuador. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/38218>. Última consulta: Agosto, 2020.

