



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

“DISEÑO, INSTALACIÓN Y PRUEBA DE UN SISTEMA DE REACCIÓN PARA EL LABORATORIO EXPERIMENTAL MULTIDISCIPLINARIO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

GABRIELA LÓPEZ MORENO

JUAN CARLOS MARTÍNEZ MARTÍNEZ

ASESOR: Dr. ELIGIO PASTOR RIVERO MARTÍNEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO.DE MÉX. 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE



ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 26 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

"Diseño, instalación y prueba de un sistema de reacción para el laboratorio experimental multidisciplinario".

que presenta la pasante: Gabriela López Moreno
con número de cuenta: 40306352-9 para obtener el título de :
Ingeniera Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 13 de Agosto de 2009.

PRESIDENTE	<u>O. Celéstino Silva Escalona</u>	
VOCAL	<u>Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez</u>	
SECRETARIO	<u>M.C. Leticia Zúñiga Gómez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>I.O. Elvia Mayen Santos</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>I.O. Paula Álvarez Fernández</u>	



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 26 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

"Diseño, instalación y prueba de un sistema de reacción para el laboratorio experimental multidisciplinario".

que presenta el pasante: Juan Carlos Martínez Martínez
con número de cuenta: 30029064-6 para obtener el título de :
Ingeniero Químico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 13 de Agosto de 2009.

PRESIDENTE	<u>Q. Celéstino Silva Escalona</u>	
VOCAL	<u>Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez</u>	
SECRETARIO	<u>M.C. Leticia Zúñiga Gómez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>I.Q. Elvia Mayen Santos</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>I.Q. Paula Alvarez Fernández</u>	

DEDICATORIA.

Sin duda alguna los mayores agradecimientos serán siempre para mis padres (Raquel Moreno García y José Refugio López Moreno) a ellos les debo todo lo que soy gracias a su esfuerzo, su comprensión y cariño y por enseñarme que debemos tener la fortaleza de continuar hacia adelante no importando las circunstancias que la vida nos presenta.

A mis hermanos (Eduardo, José, Juana Elia, Lorena y Roció) gracias por su cariño y apoyo incondicional sin duda este logro no es solo mío también es de ustedes.

A Juan Carlos Martínez Martínez, compañero de práctica y de memoria y sobre todo un amigo incondicional, gracias por tu cariño, compañía y tolerancia.

A mis compañeros y amigos (Beatriz, Daniel, Gabino, José de Jesús, Jaime) quienes me han ayudado y acompañado en todo momento.

Gabriela López Moreno.

DEDICATORIA.

Dedico esta tesis con mucho cariño a la familia Martínez por ser una familia maravillosa y porque de alguna manera todos trabajamos en ella.

AGRADECIMIENTOS.

Doy gracias a la vida por ponerme en el lugar correcto y permitirme compartir este logro en compañía de mis seres queridos.

A mis padres, que los quiero mucho por confiar en mí y haberme dado las herramientas necesarias para poder lograr esta meta, por su comprensión, esfuerzo y cariño brindado en todo momento, Muchas GRACIAS!

A mis hermanos Leopoldo, Alberto, José Luis, Rufino y Abraham, que siempre han estado con migo y me han apoyado en las buenas y en las malas, por que sin duda alguna han sido ejemplo a seguir, y es un enorme gusto corresponderles con este trabajo.

A mis sobrinos y sobrina que no los nombro por que ya son muchos, pero que los tengo presentes a cada uno, sin duda alguna han venido a dar una chispa de alegría a mi vida.

Lizbeth, que te puedo decir, muchas gracias por todos estos años de conocernos por los buenos momentos compartidos, por ser como eres y ser parte de mi.

A mis amigos Betty, Daniel, Ing. José de Jesus, Gabino, Germán, Jaime con los que compartí las aulas, por los momentos divertidos que no olvidaremos y que nos mantienen unidos. A Gabriela por hacer de este nuestro trabajo y por la tolerancia durante el mismo. Y desde luego a todos CCH'ros de Azcapotzalco.

Juan Carlos Martínez.

INDICE
RESUMEN
INTRODUCCIÓN
OBJETIVOS

CAPITULO 1 “GENERALIDADES”

1.1 CINÉTICA QUÍMICA.....	12
1.2 CLASIFICACIÓN DE REACCIONES.....	13
1.3 VARIABLES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE REACCIÓN.....	13
1.4 ECUACIÓN DE ARRHENIUS.....	16
1.5 VELOCIDAD DE REACCIÓN.....	16
1.6 MÉTODOS EXPERIMENTALES BÁSICOS.....	19
1.7 CLASIFICACIÓN DE LOS REACTORES.....	20
1.7.1 DE ACUERDO AL TIPO DE OPERACIÓN.....	22
1.7.2 DE ACUERDO A LA CONFIGURACIÓN DE FLUJO.....	24
1.7.3 DE ACUERDO A LAS FASES QUE SE PRESENTAN EN EL SISTEMA.....	25
1.7.4 DE ACUERDO A LA FORMA DE CONTACTO ENTRE FASES.....	25
1.7.5 DE ACUERDO AL INTERCAMBIO DE CALOR.....	25
1.8 REACTORES DE LABORATORIO.....	26

CAPITULO 2 “DISEÑO DEL SISTEMA DE REACCIÓN”

2.1 CONCEPCIÓN Y DEFINICIÓN.....	32
2.2 DIAGRAMAS DE FLUJO.....	35
2.3 ESPECIFICACIONES Y DISEÑO DEL EQUIPO.....	37
2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE REACCIÓN.....	37
2.3.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	37
2.4 BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.....	38
2.5 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.....	42
2.5.1 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	42
2.5.2 SERVICIOS AUXILIARES.....	43
2.5.3. LUGAR DE INSTALACIÓN.....	44
2.5.4. INSTRUMENTOS.....	44
2.5.5 EQUIPOS AUXILIARES.....	50

CAPITULO 3 “OPERACIÓN DEL SISTEMA DE REACCIÓN”

3.1 INSTALACIÓN FINAL.....	53
3.2 OPERACIÓN DEL EQUIPO.....	55
3.3 MONTAJE Y DESMONTAJE.....	57
3.4 MANTENIMIENTO.....	57
3.5 NORMAS DE SEGURIDAD EN EL LABORATORIO.....	57
3.5.1. PRECAUCIONES GENERALES.....	58
3.5.2 MANEJO DE REACTIVOS COMERCIALES.....	58
3.5.3 MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA EL MANEJO DEL REACTOR.....	60

CAPITULO 4 “PARTE EXPERIMENTAL”

4.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REACCIÓN.....	62
4.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	62
4.3 PRUEBAS REALIZADAS.....	64

CAPITULO 5 “CONCLUSIONES”.....	92
RECOMENDACIONES.....	93

BIBLIOGRAFÍA.....	94
ANEXOS.....	96

LISTA DE SÍMBOLOS .

Símbolo	Descripción
A	Factor frecuencia
C_{A0}	Concentración de la especie química A a tiempo cero
C_i	Concentración de la especie química i (mol L^{-1})
DC	Reactor de tanque agitado
DI	Diámetro interno (cm)
E_a	Energía de activación (KJ mol^{-1})
GA	Bomba
K	Constante de velocidad (velocidad específica) de reacción ($\text{L mol}^{-1}\text{min}^{-1}$)
M	Motor
n_i	Numero de moles
P	Presión (atm)
Pc	Controlador de presión
R	Constante universal de los gases
r_i	Velocidad de reacción
T	Temperatura
T	Tiempo
$t_{1/2}$	Tiempo de vida media
V	Volumen
Λ	Conductividad molar ($\text{S cm}^{-2} \text{mol}^{-1}$)
V-1	Válvula uno
X	Conversión del reactivo limitante

“DISEÑO, INSTALACIÓN Y PRUEBA DE UN SISTEMA DE REACCIÓN PARA EL LABORATORIO EXPERIMENTAL MULTIDISCIPLINARIO”

RESUMEN.

El objetivo principal de esta tesis, es el diseño de un sistema de reacción para la elaboración de prácticas en el reactor tipo batch instalado en el Laboratorio Experimental Multidisciplinario, dicho sistema debe poseer características de funcionalidad, flexibilidad y estar orientado a la enseñanza, por lo que se proponen y se realizan pruebas para evaluar su funcionamiento.

En el primer capítulo se abordan conceptos fundamentales de la cinética química y la ingeniería de reacciones, que facilitan la comprensión y aplicación de este trabajo; se incluyen los diferentes tipos de reactores, tipo de operación y la selección de un reactor para laboratorio.

En el segundo capítulo se presenta el diseño del sistema de reacción de acuerdo a la infraestructura disponible, costos, tiempo y variables de trabajo en el laboratorio (Volumen, Temperatura y Presión), se incluye diagramas del diseño propuesto y los balances de materia y energía. También se describe de forma detallada cada una de las partes que constituyen el sistema de reacción (tuberías, accesorios, instrumentos y equipos auxiliares al reactor).

En la tercer parte de este trabajo se describe finalmente la adaptación final de nuestro sistema de reacción y se hace mención a las medidas de seguridad para uso del equipo, la forma de operación y mantenimiento del mismo.

Posteriormente se describen las pruebas realizadas en el sistema, para discutir el funcionamiento del equipo. De acuerdo a los resultados obtenidos en la experimentación.

Finalmente concluimos sobre el trabajo y se hacen algunas recomendaciones para futuras mejoras del equipo.

INTRODUCCIÓN.

En la ingeniería de la cinética química, bajo condiciones apropiadas, una sustancia química con propiedades bien definidas puede transformarse en otras que constituyen diferentes especies químicas, es decir una reacción química. Es de suma importancia entender la rapidez con la que pueden ocurrir las reacciones químicas, ya que en nuestra vida cotidiana sabemos de reacciones que ocurren muy rápidamente o muy lentamente y esto nos lleva a preguntarnos las condiciones que afectan la velocidad de la reacción, por ejemplo ¿Qué factores determinan con qué rapidez se descompone un alimento? ¿Cuánto tiempo tarda en degradarse un medicamento en el organismo? ¿Qué determina la rapidez con que se quema el combustible en un motor de automóvil? La cinética química se ocupa de la velocidad de las reacciones químicas y de cómo avanzan desde su inicio hasta su fin. El manejo de reactores químicos, requiere conocer las velocidades de los procesos tanto físicos como químicos además de los que rigen a la cinética química. En la actualidad todavía no es posible predecir con precisión estas velocidades intrínsecas, *por lo que es necesario determinarlas experimentalmente*. Las primeras mediciones cuantitativas de la velocidad de reacciones fueron hechas a mediados del siglo XIX por Wilhelmy, Berthelot y St. Gilles, y Harcourt y Esson.¹ El primer intento para desarrollar una teoría que explicara la forma en la cual las moléculas de una sustancia reaccionan fue el de Arrhenius² en 1889. El postuló la existencia de moléculas inertes y de moléculas activas en los reactantes y que solamente las activas poseían suficiente energía para tomar parte de la reacción. Desde estos desarrollos iniciales ha habido gran número de estudios experimentales de las velocidades de reacción de una amplia gama de reacciones, pero no se logró ningún avance notable en la teoría hasta los trabajos de Eyring y Polanyi³ que empezaron en 1920. Utilizando solamente información fundamental tal como la configuración, dimensiones y fuerzas interatómicas de las moléculas reaccionantes, estos investigadores postularon la teoría del complejo activado para predecir la velocidad de reacción. Si bien estos desarrollos teóricos han sido de gran valor para entender el cómo y el porqué de las reacciones químicas, la *evaluación*

¹ Smith, J. M, "Ingeniería de las Reacciones Químicas", 8ª ed., Ed; Reverte Barcelona 1986. pp 27

² S. Arrhenius, Z. Physik Chem., 4, 226 (1889)

³ H. Eyring y M. Polanyi, Z. Physik Chem. B, 12, 279 (1931)

cuantitativa de la velocidad de reacción sigue siendo un problema experimental. Esto significa que debemos estudiar cuáles son las variables importantes y cómo afectan a la velocidad. En la actualidad todavía no es posible predecir velocidades de reacción por lo que resulta necesario medirlas; para hacer esto es indispensable usar un reactor, *preferiblemente a pequeña escala, como el de un laboratorio.* Las velocidades no pueden medirse directamente si no que se obtienen por medio de la interpretación de datos medidos en un reactor. Por lo general, estos datos consisten en concentraciones de reactantes y productos, y los resultados específicos dependen del tipo de reactor usado. Esto se debe a que las concentraciones suelen ser afectadas por procesos físicos tales como la convección y la propia reacción. Sin embargo el problema se simplifica debido a que el reactor a pequeña escala puede construirse de tal manera que se obtenga la velocidad intrínseca en forma precisa y fácil a partir de las mediciones de concentración. Es decir, podemos eliminar la mayoría de las complejidades que se presentan a causa del acoplamiento de los procesos físicos con la cinética intrínseca, *por medio de un uso adecuado del reactor de laboratorio experimental.*

En la formación del alumno de la carrera de Ingeniería Química, la experimentación y el trabajo en el laboratorio permite visualizar y reafirmar los conocimientos teóricos adquiridos, entre los cuales se encuentra el controlar variables fundamentales como presión y temperatura, interpretar la lectura de los instrumentos de medición además de obtener datos correctos del sistema estudiado, dándole al alumno capacidades para enfrentar problemas reales en la industria.

La rama de la ingeniería química encargada de estudiar las reacciones químicas es la ingeniería de reactores y tiene por objetivo general el diseño y operación adecuada de los reactores químicos. El sistema de reacción diseñado, en este trabajo tiene por objetivo obtener estudios de manera confiable y segura. El término de “diseño” de un sistema reacción se refiere a concebir y especificar un sistema completo que permita las tareas de alimentación de reactivos, inyección de iniciadores, catalizadores o cualquier otra sustancia requerida durante la reacción, calentamiento o enfriamiento de la mezcla de reacción, inertización, desfogue, muestreo, montaje y desmontaje del reactor, limpieza y mantenimiento, etc. El sistema de reacción considera aspectos de funcionalidad,

flexibilidad, facilidad de manejo, seguridad, costo y capacidades didácticas. Es importante mencionar que la parte central del sistema es un reactor de vidrio, el cual está actualmente en el laboratorio instalado parcialmente, por lo que se complementará la instalación y se harán las modificaciones y ajustes necesarios.

OBJETIVOS.

- Generales.
 - ✓ Proponer un sistema experimental de reacción para un reactor de vidrio de manejo práctico y seguro, para el Laboratorio Experimental Multidisciplinario.
 - ✓ El sistema debe poseer características de funcionalidad, flexibilidad y estar orientado a la enseñanza.
 - ✓ Proponer y probar experimentalmente el sistema de reacción
- Particulares.
 - ✓ Obtener datos cinéticos de por lo menos 3 sistemas reacción diferentes.
 - ✓ Comprobar el funcionamiento del sistema experimental.
 - ✓ Proporcionar a los alumnos de la carrera de Ingeniería Química un material de apoyo para el Laboratorio Experimental Multidisciplinario.

CAPITULO 1 “GENERALIDADES”

1.1 CINÉTICA QUÍMICA.

La palabra cinética proviene del griego *kinetikos*= en movimiento o cambio. Los químicos utilizan el término para referirse no solo a los estudios de las velocidades de reacción sino también para la comprensión de los factores que determinan con qué rapidez tienen lugar las reacciones químicas. Por tanto la cinética abarca tanto medidas experimentales como el enfoque empírico y teórico de la interpretación de estas medidas.

Uno de los conceptos básicos en química es el de una reacción química, en el que una sustancia se convierte en otra, y en su estudio surgen dos aspectos importantes: por un lado están los estudios sobre el transcurso de la reacción es decir el alcance de la reacción donde la termodinámica nos ayuda con la predicción de productos cuando se alcanza el equilibrio, en un segundo grupo a los estudios que se refieren a la rapidez con que tiene lugar una reacción química a los cuales se les denomina cinética química.

La parte experimental del tema trata de las formas de medición precisas de la variación en el tiempo de las concentraciones de las sustancias reaccionantes y la interpretación de los resultados experimentales conduce a una mejor comprensión de los mecanismos de las reacciones.

Es muy importante resaltar que la velocidad de reacción se obtiene mediante un estudio puramente empírico y experimental, pues a pesar de la gran cantidad de información teórica, siguen siendo insuficientes para predecir ni siquiera por aproximación la velocidad de una reacción química.

Dado que el modo de expresar las leyes cinéticas depende, en gran parte, del tipo de reacción que se va a efectuar, lo primero que se debe revisar es la clasificación de las reacciones químicas.

1.2 CLASIFICACIÓN DE REACCIONES.

Existen muchas maneras de clasificar las reacciones químicas, en la Ingeniería lo más útil es dividir las, de acuerdo con el número y tipo de fases implicadas: sistemas homogéneos y heterogéneos.

Una reacción es homogénea si se efectúa sólo en una fase, y es heterogénea si, al menos, se requiere la presencia de dos fases para que transcurra a la velocidad que lo hace.

Superpuestas a estos dos tipos de reacciones tenemos las catalíticas cuya velocidad está alterada por la presencia, en la mezcla reaccionante, de materiales que no son reactantes ni productos. Estos materiales, denominados catalizadores, no necesitan estar presentes en grandes cantidades. Los catalizadores actúan, en cierto modo, como mediadores retardando o acelerando la reacción.

En la Tabla 1.1 se puede ver una clasificación general de reacciones químicas distinguiendo entre sistemas homogéneos y heterogéneos, junto con la posibilidad de que las reacciones sean catalizadas o no.

Tabla 1.1 Clasificación de las reacciones químicas empleadas para el diseño de reactores.

	<i>No catalizadas</i>	<i>Catalizadas</i>
<i>Homogéneas</i>	La mayor parte de las reacciones en fase gaseosa	La mayor parte de las reacciones en fase líquida
<i>Heterogéneas</i>	Combustión de carbón	Síntesis de amoníaco
	Tostación de minerales	Oxidación de amoníaco para dar ácido nítrico
	Ataque de sólidos por ácidos	Cracking del petróleo
	Absorción gas-líquido con reacción	Oxidación de SO ₂ a SO ₃
	Reducción de minerales de hierro a hierro y acero.	

Además de la clasificación anterior se puede establecer otro tipo de clasificaciones atendiendo a diferentes criterios como las siguientes:

- De acuerdo a la forma de su ecuación cinética:

Elementales: Concentraciones de los reactantes con exponentes iguales a los coeficientes estequiométricos.

No elementales: Concentraciones de los reactantes con exponentes diferentes a los coeficientes estequiométricos.

- En función de su complejidad:

Simples: Una sola ecuación estequiométrica, $A + B \longrightarrow R$

Múltiples: Complejas, no basta una sola ecuación estequiométrica. Pueden ser en:

Serie $A \longrightarrow R \longrightarrow S.$

Paralelo $A \longrightarrow R; A \longrightarrow S.$

Serie-Paralelo $A + B \longrightarrow R; B + R \longrightarrow S.$

- En relación al equilibrio:

Irreversible: Conversión total.

Reversible: Se llega al equilibrio antes de que se alcance el 100% de conversión.

1.3 VARIABLES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE REACCIÓN.

Existen varios factores que afectan la velocidad de una reacción química: la concentración de los reactivos, la temperatura, la existencia de catalizadores y la superficie de contactos tanto de los reactivos como del catalizador.

- Concentración de los reactivos

La mayoría de las reacciones son más rápidas cuanto más concentrados se encuentren los reactivos. Cuanta mayor concentración, mayor frecuencia de colisión.

Hay casos en que la velocidad de reacción no es función de la concentración, en estos casos la cinética de la reacción está condicionada por otros factores del sistema.

- Presencia de un catalizador

Los catalizadores aumentan la rapidez de una reacción sin transformarla, además mejoran la selectividad del proceso, reduciendo la obtención de productos no deseados. Los catalizadores actúan modificando el mecanismo de reacción, empleando pasos elementales con menor energía de activación.

Existen catalizadores homogéneos, que se encuentran en la misma fase que los reactivos y catalizadores heterogéneos, que se encuentran en distinta fase.

Los catalizadores también pueden llegar a retardar reacciones, no solo acelerarlas, en este caso se suelen conocer como inhibidores.

- Estado Físico de los Reactivos

Si en una reacción interactúan reactivos en distintas fases, su área de contacto es menor y su velocidad también es menor. En cambio, si el área de contacto es mayor, la velocidad será mayor. No cabe duda de que una mayor área de contacto reduce la resistencia al transporte, pero también son muy importantes la *difusividad* del reactante en el medio, y su solubilidad, dado que ésta es el límite de la concentración del reactante, y viene determinada por el equilibrio entre las fases.

- Temperatura

El concepto de que la velocidad de reacción química a una temperatura dada depende de la concentración fue generalizada por Guldberg y Waage quienes, en 1863, establecieron la *Ley de Acción de Masas*. En términos modernos, ésta establece que *la velocidad a la que se produce una reacción química es proporcional a la concentración de cada uno de los reactivos*. Esta ley establece una base cuantitativa para las investigaciones cinéticas.

La rapidez de reacción aumenta con la temperatura porque al aumentarla incrementa la energía cinética de las moléculas. Con mayor energía cinética, las moléculas se mueven más rápido y chocan con más frecuencia y con más energía.

A temperatura constante, la velocidad de reacción depende de las concentraciones de los reactivos, aun cuando no siempre es directamente proporcional a ellos.

El comportamiento de la constante de velocidad o coeficiente cinético frente a la temperatura a menudo sigue la ecuación de Arrhenius.

1.4 ECUACIÓN DE ARRHENIUS.

En general, la velocidad de una reacción química aumenta al aumentar la temperatura. Este efecto suele representarse en función de la variación de la constante de velocidad, K , con la temperatura, variación que a menudo sigue la ecuación de Arrhenius:

$$K = Ae^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (1.1)$$

Una forma alternativa de esta ecuación se obtiene tomando, logaritmos en ambos miembros.

$$\ln K = \ln A - \frac{Ea}{RT} \quad (1.2)$$

Esta ecuación implica que el logaritmo de la constante de velocidad sea una función lineal del inverso de la temperatura. Este tipo de representación suelen denominarse gráficos de Arrhenius.

Donde K es la constante de la velocidad, A es el factor de frecuencia, Ea es la energía de activación necesaria, R es la constante universal de los gases y T es la temperatura.

1.5 VELOCIDAD DE REACCIÓN.

La velocidad de reacción homogénea se define como el cambio del número de moles (debido a la reacción) de un reactante o un producto, por unidad de tiempo y unidad de volumen de la mezcla reaccionante:

$$r_i = \frac{1}{V} \frac{dn_i}{dt} = \frac{dC_i}{dt} \quad (1.3)$$

Donde n_i y C_i son números de moles y la concentración de la especie química i .

- Leyes que rigen la velocidad de reacción.

Las leyes de velocidad para los distintos órdenes de reacción, son ecuaciones diferenciales ya que todas incluyen el término dx/dt para representar la velocidad de reacción (donde x representa la concentración de producto formado o reactivo consumido al tiempo t)

- Reacciones de orden cero.

Se dice que una reacción es de orden cero cuando la velocidad de reacción es independiente de la concentración, puede presentarse en dos situaciones: cuando la velocidad es intrínsecamente independiente de la concentración y cuando la especie es de tal manera abundante que su concentración es prácticamente constante durante la reacción. En este último caso, es imposible detectar la dependencia de la velocidad con respecto a la concentración y prevalece un orden cero aparente, es decir cuando:

$$-\frac{dC_A}{dt} = K \quad (1.4)$$

Integrando desde una condición inicial $C_A = C_{A0}$ se obtiene

$$C_A - C_{A0} = -Kt \quad (1.5)$$

Este resultado muestra que la característica distintiva de una reacción de orden cero consiste en que la concentración del reactante disminuye linealmente con el tiempo.

Las dimensiones de K son concentración / tiempo, o sea, $\text{mol L}^{-1} \text{s}^{-1}$.

- Reacciones de primer orden.

Estas reacciones son muy comunes y frecuentemente se observan en soluciones donde el disolvente es uno de los reactivos.

$$-\frac{dC_A}{dt} = KC_A \quad (1.6)$$

Si la condición inicial es $C_A = C_{A0}$, la integración nos da:

$$-\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = Kt \quad (1.7)$$

El valor de K depende sólo de la relación entre las dos concentraciones. Las dimensiones de K son la recíproca del tiempo, o sea s^{-1} .

- Reacciones de pseudo-primer orden.

Estas son reacciones bimoleculares en las que un componente se halla presente en gran exceso, por ejemplo, si el disolvente es uno de los reactivos. Aunque la reacción es bimolecular, los resultados experimentales seguirán una ley de primer orden, ya que resulta imposible detectar el cambio de concentración producido por la reacción del componente en exceso.

- Reacciones de segundo orden.

Este es el orden de reacción más común, y en general, puede afirmarse, que siempre una reacción ocurra en una sola etapa y que los reactivos estén presentes en concentraciones aproximadamente iguales.

Existen dos tipos de reacciones de segundo orden:



$$-\frac{dC_A}{dt} = KC_A^2 \quad (1.8)$$

La integración nos da:

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = Kt \quad (1.9)$$



$$-\frac{dC_A}{dt} = KC_A C_B \quad (1.10)$$

Las dimensiones de K son $l \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

- Reacciones de tercer orden.

Las reacciones de este orden son poco frecuentes. Existen órdenes fraccionarios cuando la reacción representa una secuencia de varias etapas elementales. Los procedimientos para establecer el orden y las constantes de velocidad para estos casos son similares a los que se acaban de explicar. Los datos experimentales que sugieren ecuaciones de velocidad de orden fraccionario deben examinarse cuidadosamente en cuanto al efecto de las resistencias físicas. Algunas veces sucede que estos efectos, y no la secuencia de etapas elementales, son la causa del orden fraccionario.

1.6 MÉTODOS EXPERIMENTALES BÁSICOS.

Los procedimientos de análisis pueden englobarse en dos grupos: métodos químicos y métodos físicos.

- Métodos químicos

En los métodos químicos se separa una cantidad de sustancia del reactor para su análisis. Para que los métodos químicos sean eficaces, deben ser rápidos en relación a la reacción a estudiar, en caso contrario la reacción se ha de frenar mientras transcurre el proceso de análisis. Las formas en las que podemos detener el avance de la reacción son diversas, dependiendo de cada sistema:

- ✓ Disminuyendo la temperatura de reacción
- ✓ Eliminando el catalizador.
- ✓ Añadiendo un inhibidor al sistema.
- ✓ Eliminando alguno de los reactivos.

- Métodos Físicos

En los métodos físicos se mide una propiedad física de la mezcla que cambie a lo largo de la reacción. Son rápidos y evitan tener que sacar muestras del reactor, por lo que en general son más indicados para el estudio cinético de una reacción. Los métodos físicos más frecuentes son:

- ✓ Medida de la presión en reacciones gaseosas.
- ✓ Métodos dilatométricos (cambio en el volumen).
- ✓ Métodos ópticos (polarimetría, índice de refracción, colorimetría, espectrofotometría).
- ✓ Métodos eléctricos (conductimetría, potenciometría, polarografía).

En contraposición a los métodos químicos que dan medidas absolutas de la concentración, los métodos físicos dan medidas relativas y en general se necesita una curva de calibrado de la propiedad física a medir en función de la concentración.

Como hemos visto el estudio experimental de las velocidades de reacción se reduce a la medida de las concentraciones en función del tiempo a determinadas temperaturas.

1.7 CLASIFICACIÓN DE LOS REACTORES.

Los reactores químicos pueden tener una gran variedad de tamaños, formas y condiciones de operación, desde el más común, un pequeño matraz o vaso que se usa en el laboratorio químico para las reacciones en fase líquida hasta los utilizados en los procesos industriales que cuentan con una gran variedad, ya que incluso una misma reacción se puede llevar a cabo en reactores de diferente diseño. Sin embargo, las mejores condiciones de operación requieren características específicas del equipo y operación como se muestra en el siguiente esquema:

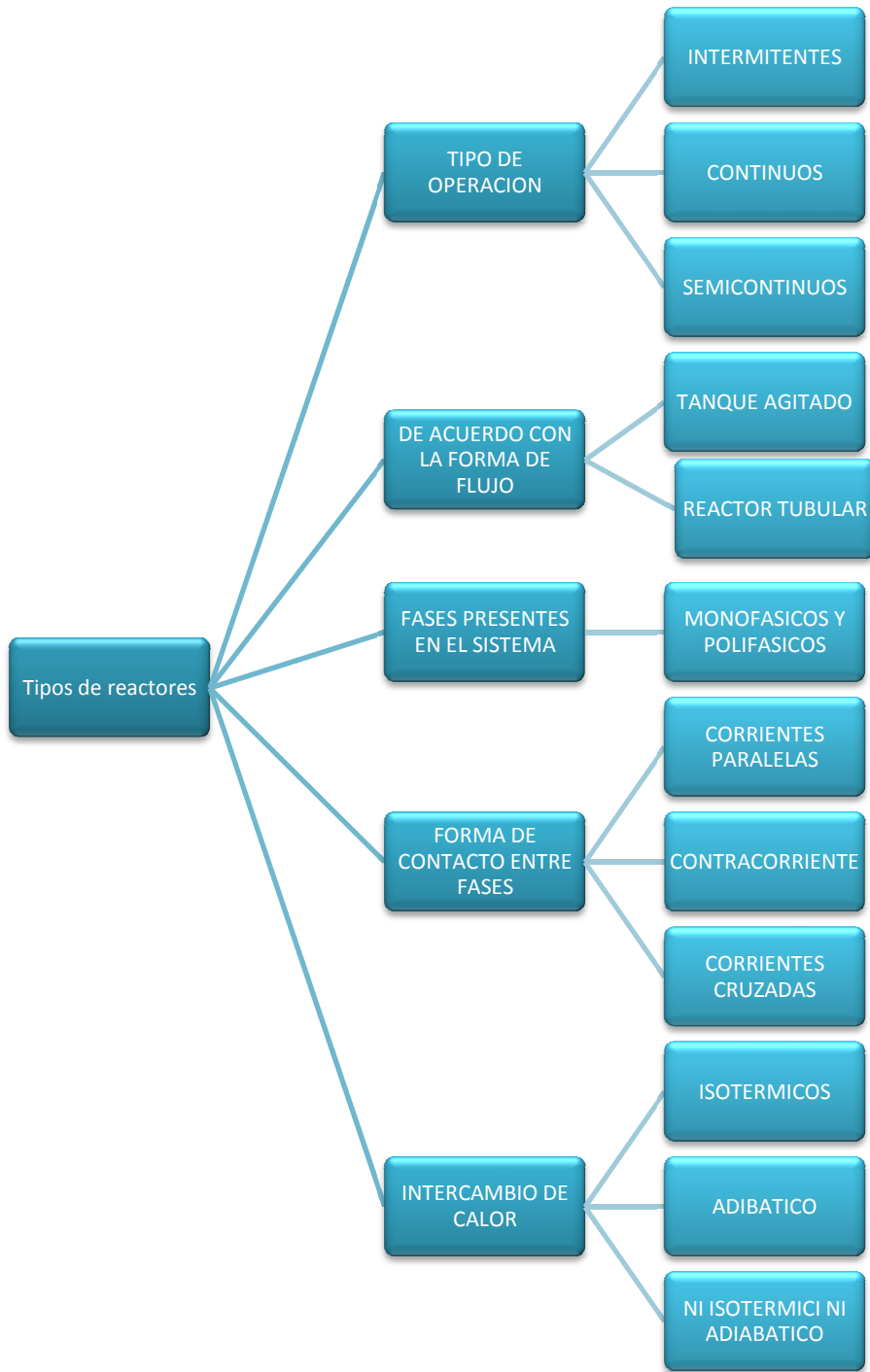


Figura 1.1 Esquema de tipos de reactores

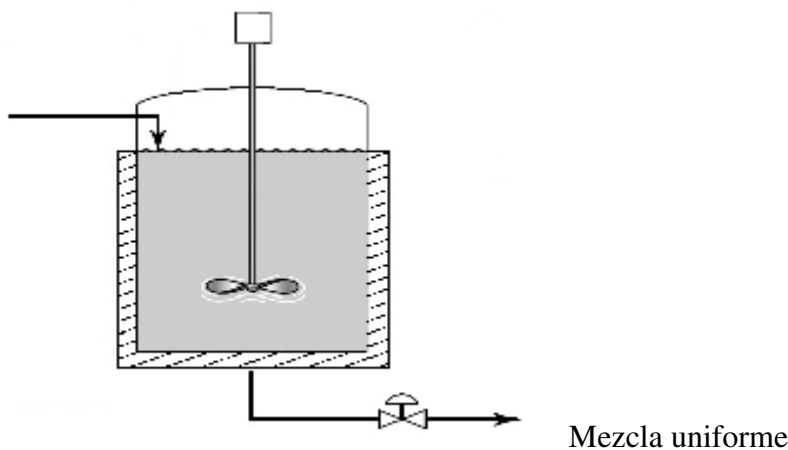
1.7.1 DE ACUERDO CON EL TIPO DE OPERACIÓN.

- Reactores intermitentes o discontinuos.

En este tipo de reactores todos los reactivos se introducen al principio de la operación y se procesan el tiempo necesario para obtener la conversión química deseada, sin agregar o extraer materiales del reactor mientras dura la reacción.

La composición de la mezcla y la velocidad de reacción cambian con respecto al tiempo.

Este tipo de reactor es no estacionario. El reactor es, generalmente, un tanque agitado de manera que el mezclado es adecuado para que las composiciones y temperaturas sean las mismas en cualquier parte del reactor a un tiempo dado y por tanto los balances de materia y calor se pueden extender a todo el volumen del reactor.



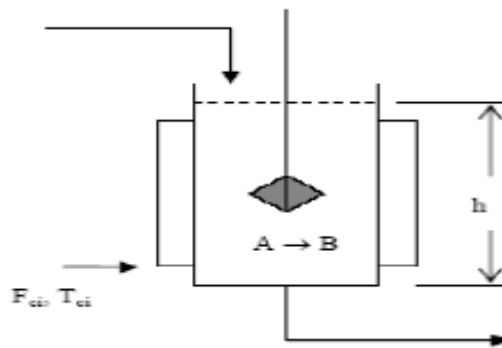
[Fig. 1.2 Reactor discontinuo.](#)

- Reactores continuos.

Los reactores continuos son recipientes agitados, ya sea de modo simple o en cascada, con tuberías de flujo de descarga. En este tipo de reactores, los reactivos son continuamente cargados y los productos son continuamente descargados, se caracterizan por trabajar en condiciones estacionarias, en las que tanto el calor generado y la composición permanecen constantes durante la operación.

Los procesos continuos tienen una principal ventaja, la economía de escala. La producción en gran volumen de un producto estándar generalmente proporciona una buena recuperación del capital invertido. Dado que los requerimientos de productos no cambian significativamente, el proceso necesitará mínimas modificaciones durante su vida de trabajo para mantenerse competitivo, además de las siguientes ventajas.

- ✓ Requiere menos espacio.
- ✓ Requiere menos material.
- ✓ Necesita menos volumen que un proceso discontinuo.



[Fig. 1.3 Reactor continuo](#)

- Reactores semi-intermitentes o semicontinuos.

Este tipo de reactores representan una condición intermedia con respecto a las condiciones de flujo entre los reactores descritos anteriormente. Pueden operarse de dos maneras distintas:

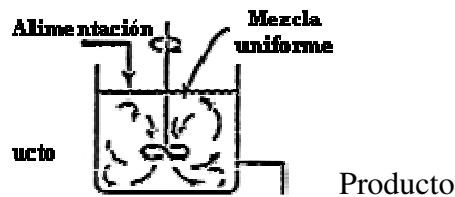
- Al principio de la reacción se coloca primero sólo un reactivo en el reactor y después, durante el proceso, se agrega continuamente el otro (u otros) reactivo (s) de acuerdo con un programa dictado por las necesidades de la reacción química.
- Se colocan todos los reactivos a un tiempo y se extraen de forma continua uno de los productos durante el tiempo que dure el proceso.

En este tipo de reactores, que usualmente son tanques agitados, la composición varía con el tiempo de manera similar a los reactores discontinuos o intermitentes.

1.7.2 DE ACUERDO A LA CONFIGURACIÓN DE FLUJO.

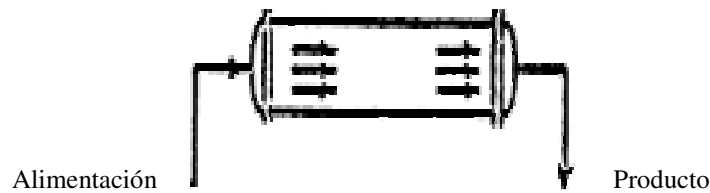
Los reactores se clasifican en:

- *Reactor continuo de tanque agitado (reactor mezcla perfecta)*: Se trata esencialmente de un tanque adecuadamente agitado de manera que la concentración y temperatura de reactivos y productos dentro del reactor sea totalmente uniforme y por tanto la misma que en la corriente de salida.



[Fig. 1.4 Reactor tanque agitado.](#)

- *Reactor tubular (reactor flujo pistón)*: Recibe este nombre porque se considera que los elementos de fluidos circulan a través del reactor con un frente plano, como si fuera un pistón, de forma que se caracteriza porque todos los elementos de fluido permanecen el mismo tiempo en el interior del reactor.



[Fig.1.5 Reactor tubular.](#)

Los dos reactores considerados presentan condiciones extremas de operación en lo referente al mezclado de las corrientes que se ponen en contacto. En el reactor tubular flujo pistón no hay mezcla axial y las condiciones en cada sección del tubo son uniformes y estacionarias aunque la composición varía con respecto a la posición en el reactor, sin embargo, en el tanque agitado la mezcla es completa y la concentración es uniforme en todo el reactor.

1.7.3. DE ACUERDO A LAS FASES QUE SE PRESENTAN EN EL SISTEMA.

- *Monofásicos*: La reacción se lleva a cabo en una sola fase.
- *Polifásicos*: La reacción presenta más de dos fases.

1.7.4 DE ACUERDO A LA FORMA DE CONTACTO ENTRE FASES.

- *Corrientes paralelas*: Si las fases tienen el mismo sentido de circulación.
- *Contracorriente*: Si las fases tienen sentido de circulación opuestos.
- *Corrientes cruzadas*: Cuando las direcciones de circulación de las fases son perpendiculares entre sí.

1.7.5 DE ACUERDO AL INTERCAMBIO DE CALOR.

- *Isotérmico*: Si la mezcla de reacción se mantiene a temperatura constante.
- *Adiabático*: El reactor se recubre con un aislante de manera que no hay intercambio de calor con el exterior.
- No isotérmico ni adiabático: Cuando el reactor no cae en uno de los casos anteriores.

Según el intercambio de calor

- *Interior*: Si el sistema de intercambio de calor (en general un serpentín) se introduce en el interior del reactor.
- *A través de las paredes*: el fluido de intercambio de calor está en contacto directo con la pared externa del reactor (doble camisa).
- *Exterior*: El intercambio de calor se realiza en un intercambiador de calor externo al reactor.

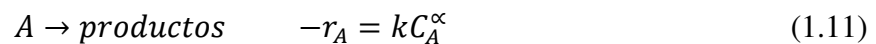
1.8 REACTORES DE LABORATORIO.

- Interpretación de datos.

El ingeniero químico necesita una ecuación numérica para la velocidad intrínseca y poder diseñar un reactor de escala comercial. Por lo general, la información disponible son los datos a escala de laboratorio de concentraciones en función del tiempo. Estos datos casi siempre requieren un procedimiento de prueba y error comparando diversas ecuaciones de velocidad propuestas con los datos, el problema de determinar una función de concentración adecuada es mucho más simple que determinar su mecanismo para la reacción, además de que este no es un requisito para el diseño del reactor. Considerando que todos los datos en este trabajo están limitados a reacciones homogéneas por lotes a volumen constante, los métodos de análisis de datos más utilizados son:

a) Método diferencial de análisis de velocidad.

En muchos casos es posible determinar el orden de reacción y la constante de velocidad para una reacción *reversible* diferenciando numéricamente los datos de concentración contra tiempo. Este método aplica para cuando las condiciones de reacción son tales que la velocidad es esencialmente función de la concentración de un solo reactivo. (Reacción de descomposición)



Delineando el procedimiento tenemos que se cambia el balance de moles por la ley de velocidad y se le aplica el logaritmo natural a ambos miembros de la ecuación donde la pendiente es igual al orden de reacción y la $-dC_A/dt$ se obtiene a través de un método gráfico o numérico.

b) Método integral.

En este método se establece el orden de reacción y se integra la ecuación diferencial que se usa en el sistema por lotes si el orden que expusimos es correcto, la grafica será lineal este método es empleado con mayor frecuencia cuando se conoce el orden de la reacción y se desea evaluar las constantes de velocidad de reacciones específicas a diferentes temperaturas además de las energías de activación en este método de análisis de datos se busca la función apropiada correspondiente a una ley de velocidad específica lineal con respecto al tiempo la mayoría de estos casos son: cero, primero y segundo orden. Los cuales se detallaron en la sección 1.5.

c) Método de velocidades iniciales.

Uno de los problemas para el análisis de órdenes y velocidades de reacción puede ser la presencia de una reacción reversible significativa lo cual hace ineficaz los métodos anteriores. En este método se efectúa diferentes experimentos a concentraciones iniciales y se determina la velocidad de reacción inicial para cada experimento esto se hace diferenciando los datos y extrapolando hasta tiempo cero. Si la ley de velocidad tiene la forma.

$$-r_{A0} = kC_{A0}^{\alpha} \quad (1.12)$$

La pendiente de la grafica del $\ln(-r_{A0})$ contra $\ln C_{A0}$ dará el orden de reacción.

d) Método de vida media.

La vida media de una reacción $t_{1/2}$ se define como el tiempo que debe transcurrir para que la concentración del reactivo se consuma a la mitad de su valor inicial y si se calcula la vida media de una reacción en función de la concentración inicial se puede calcular el orden y la velocidad de reacción, lo que se busca es acomodar la ley de velocidad en forma de:

$$-r_A = kC_A^{\alpha} \quad t = t_{\frac{1}{2}} \text{ cuando } C_A = \frac{1}{2} C_{A0} \quad (1.13)$$

Sustituyendo C_{A0} e integrando en la ecuación 11 y obteniendo logaritmo natural de ambos miembros de la ecuación se obtiene:

$$\ln t_{\frac{1}{2}} = \ln \frac{2^{\alpha-1} - 1}{(\alpha - 1)k} + (1 - \alpha) \ln C_{A0} \quad (1.14)$$

- Evaluación de reactores de laboratorio.

La mayoría de las reacciones químicas industriales son ampliadas y puestas en producción sin un conocimiento detallado de la cinética química y química física que afectan a las reacciones. La cinética y el diseño de reactores son aspectos importantes que deben considerarse para la selección de un reactor. El personal a cargo del equipo debe ser capaz de analizar, estimar y explicar los datos obtenidos. El artículo de V. W. Weekman de mobil oil⁴ ofrece una excelente estrategia para la selección de reactores y sus parámetros cinéticos de un sistema de reacción específico, a continuación se muestra los criterios empleados para evaluar un reactor de laboratorio

Tabla 1.2 Criterios para evaluación de reactores

CRITERIOS EMPLEADOS PARA EVALUAR REACTORES DE LABORATORIO

- 1.-Facilidad de muestreo y análisis del producto.*
 - 2.-Grado de isothermicidad.*
 - 3.-Eficacia de contacto entre catalizador y el reactivo.*
 - 4.-Manejo de la descomposición del catalizador.*
 - 5.-Costo y construcción del reactor.*
-

Las calificaciones hechas en distintos reactores sobre los criterios propuestos son los siguientes:

⁴ V. W. Weekman, AIChE J., 20, 833 (1974)

Tabla 1.3 Resumen de clasificaciones de reactores.

Tipo de reactor	Muestreo Y Análisis	Isotermicidad	Contacto Fluido-sólido	Catalizador inestable	Facilidad de Construcción
Diferencial	<i>D-R</i>	<i>R-B</i>	R	D	B
Lecho fijo	<i>R</i>	<i>D-R</i>	R	D	B
Por lotes con agitación	<i>R</i>	<i>B</i>	B	D	B
Tanque con agitación Continua.	<i>R</i>	<i>B</i>	R-B	R-B	D-R
Transporte recirculante	<i>R-B</i>	<i>B</i>	B	R-B	D-R

B, Bueno; R, Regular; D, Deficiente

- Planificación experimental.

Hasta ahora solo se ha hecho mención de los métodos para analizar datos de velocidad y la selección de reactores, pero no se ha mencionado como abordar la metodología experimental, una buena heurística es la propuesta por ⁵Box y Hunter para proyectos experimentales la cual se resume en el siguiente diagrama.

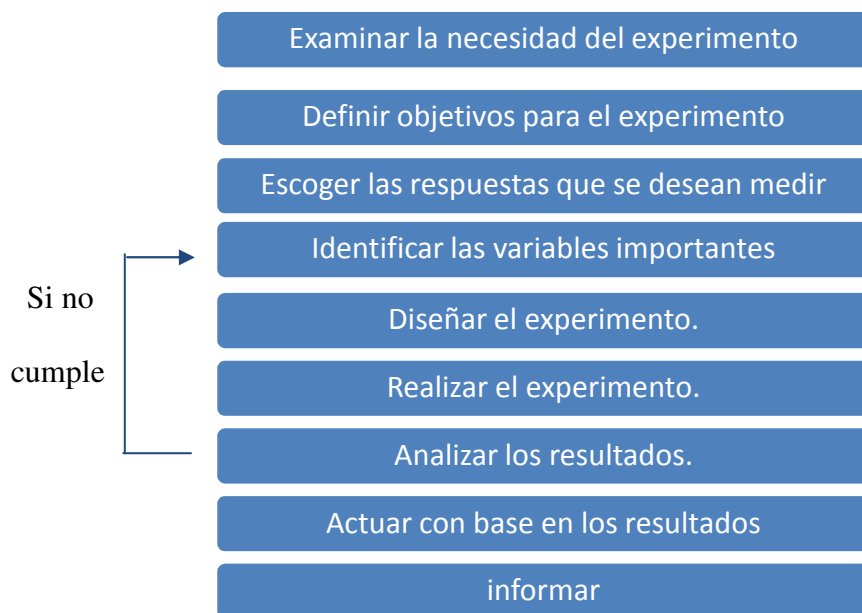


Fig. 1.6 Diagrama de flujo para proyectos experimentales

⁵G.E.P. Box, W. G. Hunter y J.S. Hunter. *Statistics for esperimenters; and Introduction to design, data Analisis and Model Bulding*. Nueva York. 1978



En dicho método podemos plantear un programa para experimentos, al que desde luego se pueden hacer modificaciones sobre la marcha de la experimentación.



El éxito en el diseño de reactores radica primordialmente en la confiabilidad de los parámetros determinados experimentalmente. Por tanto es indispensable diseñar equipo y experimentos que generen datos exactos y significativos. Lamentablemente no existe un solo reactor de laboratorio que se pueda usar para todo tipo de reacciones por lo que se debe tener un buen criterio para emplear un reactor de laboratorio.

- Reactores comerciales.

Actualmente existen empresas que se encargan de la fabricación y distribución de equipo diseñado para laboratorios o plantas piloto, a continuación se enlistan algunas empresas y los tipos de reactores que proveen:

Tabla. 1.4 Reactores comerciales.

EMPRESA	TIPO DE REACTOR	CARACTERISTICAS
<p>TRALLERO AND SCHLEE, S.L. (Reactores Quirolab)</p>		<p>Reactores químicos con capacidad de 2 a 20 litros, agitación mecánica, estructura autoportante, configurable para diferentes aplicaciones y fácil de limpiar</p>
<p>PARR STIRRED REACTORS</p>	<p>REACTOR DE POLIMERIZACION</p> 	<p>MODELO 4532</p> <p>Capacidad de 1 y 2 litros puede ser suministrado con auto-sellado, O-anillo de cierre para temperaturas de trabajo hasta 225 ° C, o con un plano, Junta de PTFE para temperaturas más altas a 350 ° C. presión de operación máxima de 1900 psi (130 bar)</p>

<p>ARMFIELD</p>	<p>REACTOR DE TANQUE AGITADO CONTINUO.</p> 	<p>ESPECIFICACIONES DE PEDIDO. Tanque agitado con volumen ajustable de 0.4 a 1.5 L. Velocidad del agitador variable de 0 – 230 rpm. Recipiente construido a partir de boro silicato, vidrio y pvc, variación de la conversión con residencia de tiempo, Es posible operar a temperaturas por debajo de la temperatura ambiente</p>
<p>ARMFIELD</p>	<p>REACTOR TUBULAR</p> 	<p>Dependiendo el tipo de operación puede diseñarse como reactor CSTR, Batch o reactor tubular. Incluye tanques de alimentación con bombas de velocidad variable, agitador con variador de velocidad, circulación de agua caliente, controlador de temperatura automático y sensor de conductividad con pantalla y equipo de salida. La base esta diseñada para montar sobre una mesa.</p>

Dichos prototipos nos proporcionaran una visión en la variedad de reactores de laboratorio lo cual nos ayudara en el diseño de nuestro sistema de reacción, como se describe en el siguiente capítulo.

CAPITULO 2 “DISEÑO DEL SISTEMA DE REACCIÓN”

2.1 CONCEPCIÓN Y DEFINICIÓN

El problema consiste en instalar un reactor a escala, destinado al Laboratorio Experimental Multidisciplinario de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan, que cumpla con un conjunto de requisitos predefinidos (ver tabla 2.1) y que permita llevar a cabo síntesis de productos y reacciones químicas simples como: Hidrólisis, Redox, Saponificación, Polimerización, etc; comprendidas en una sola fase del tipo:

- *Reacciones reversibles* $A \rightleftharpoons B$
- *Reacciones consecutivas o sucesivas* $A \rightarrow B \rightarrow C$
- *Reacción de síntesis* $A+B \rightarrow AB$
- *Reacción de descomposición* $AB \rightarrow A+B$

Donde se puedan obtener datos cinéticos de manera precisa y confiable, en un equipo fácil de manejar que permita la obtención de balances de materia y energía de sistemas reaccionantes establecidos, y/o poder optimizar las condiciones de reacción, además del estudio y análisis de reactores por lotes (batch).

Finalmente se buscará que el equipo cuente con las medidas de seguridad requeridas para el trabajo de los alumnos en sus prácticas.

Tabla 2.1 Tabla de especificaciones, aplicadas al análisis de sistema de reacción

Especificaciones	Forzoso	Deseable	Incierto
Capacidad de 2 a 3 L		X	
Presión máxima de 2.5 atm	X		
Operación isotérmica	X		
Amplios Rangos de temperatura (-10 a 100°C)		X	
Material que permita observar el seguimiento de la reacción		X	
Hermético para fases líquidas y gases		X	
Capaz de manejar líquidos semejantes al agua y gases semejantes al aire, H ₂ y N ₂ .			X
Material de construcción disponible.		X	
Material de construcción barato.		X	
Tiempos de carga y descarga mínimos	X		
Agitación mecánica.	X		
Dispositivo de agitación, debe ser seguro y con distintas velocidades		X	
Contar con instrumentos de medición (manómetro, válvulas, toma de muestra, etc.)	X		
Material de construcción resistente al ataque químico.	X		
Material de construcción resistente a impactos.		X	
Contar con dispositivos para vaciar el reactor.		X	
Contar con sistemas de seguridad.	X		
Sistema automático de registro de temperatura.		X	
Sistema automático de adquisición de datos experimentales.		X	
De fácil mantenimiento y limpieza.		X	
Mínimo espacio de instalación.			X
Tiempo de instalación (< a 6 meses).			X

En la actualidad no existe ningún método directo para diseñar equipos en los que se pueda desarrollar una reacción química. Esto implica que el diseño correcto será aquel que cumpla con los requerimientos previamente establecidos, por lo que se consideraron las siguientes alternativas (en todos los casos se busca cubrir las características mencionadas):

1. Adquirir un modelo apropiado con distribuidores calificados de equipo químico.
2. Encargar el diseño con las características que requerimos en el laboratorio.
3. Adaptar un reactor disponible.
4. Diseñar y construir el prototipo.

Para poder elegir la mejor opción se usaron los criterios que mas restringen el diseño como son:

- Costo.
- Tiempo.
- Flexibilidad de adaptación.
- Variables requeridas por el laboratorio (V, T, P,)

En la siguiente tabla se muestra la variación de las opciones mencionadas con respecto a los criterios.

TABLA 2.2 SELECCIÓN DE LA OPCIÓN MÁS VIABLE

Alternativas	Costo	Tiempo	instalación	Capacidad
1.-Adquirir un modelo apropiado con distribuidores calificados de equipo químico.	D	B	R	B
2.-Encargar el diseño con las características que requerimos en el laboratorio.	D	D	B	B
3.-Adaptar un reactor disponible.	B	R	B	B
4.-Diseñar y construir el prototipo.	D	D	R	B

B=BUENO=DEFICIENTE, R=REGULAR

De la tabla anterior se puede observar que la opción más apropiada en este caso es la opción 3 “adaptar un reactor disponible”, por lo que es conveniente en esta parte presentar un diagrama de flujo con las características deseadas y poder identificar las áreas en las cuales falte información tales como, propiedades físicas, el modelo experimental de reacción, ecuaciones de velocidad etc. Y poder generar condiciones de operación ideales que favorezcan un alto rendimiento.

2.2 DIAGRAMA DE FLUJO

Con base en lo establecido en la sección anterior, se propone el siguiente arreglo, el cual consta básicamente del reactor como equipo central, sus recipientes de reactivos, su intercambiador de calor y las líneas de alimentación. El diagrama de flujo sugerido se muestra en la figura 2.1

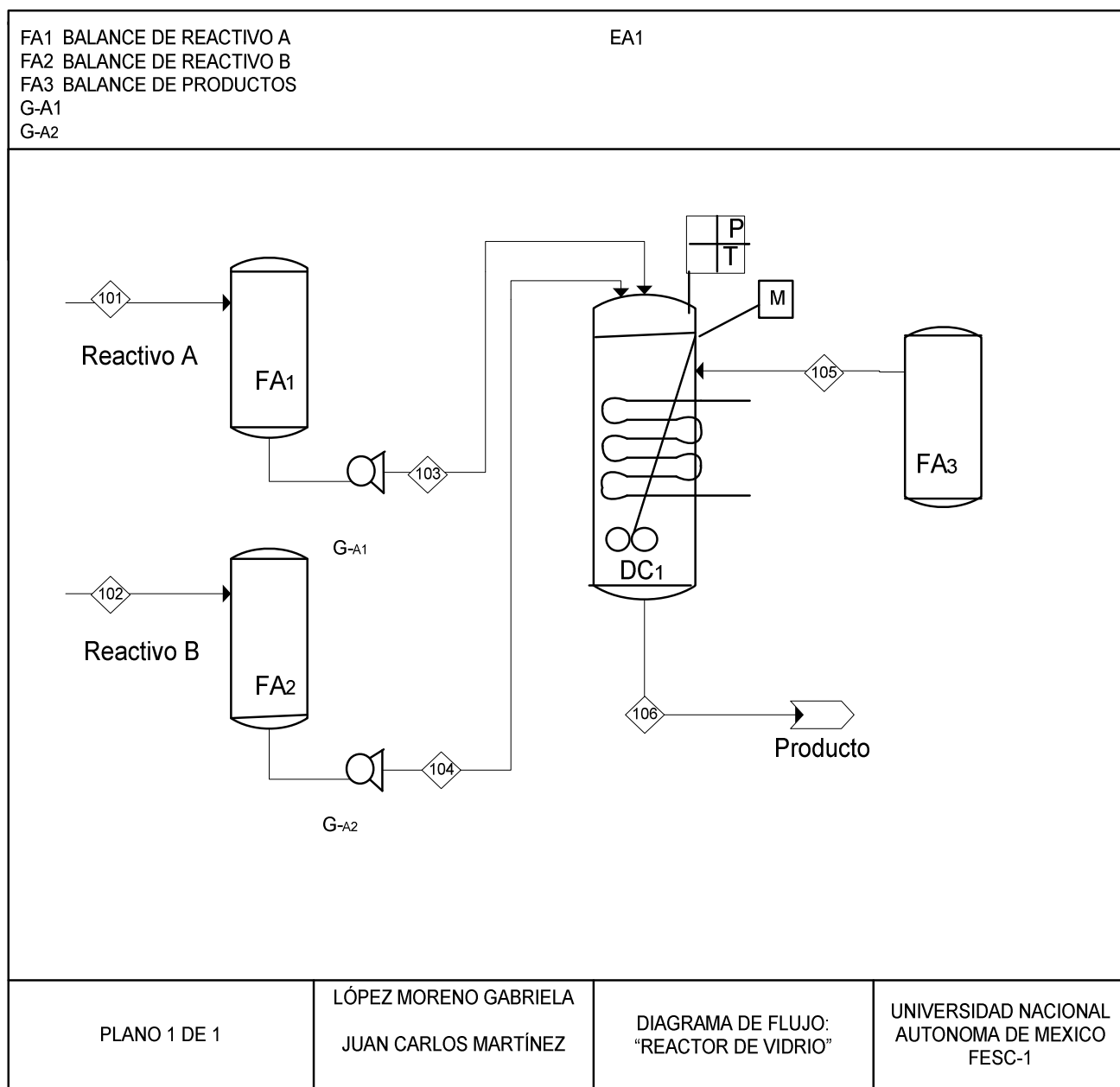


Figura 2.1 Diagrama de flujo.

Con base al diagrama de flujo se realizó el DTI correspondiente:

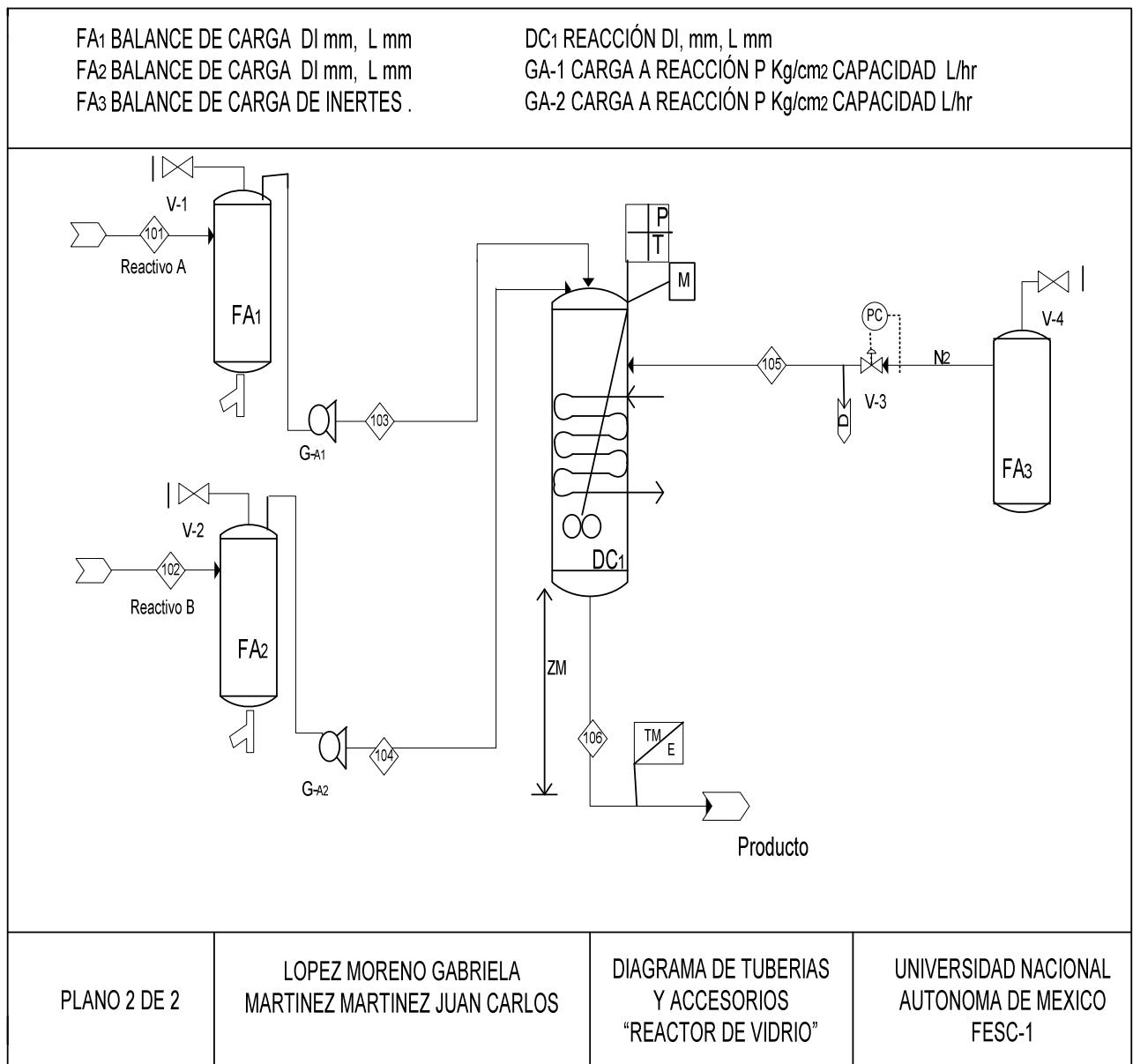


Figura 2.2 Diagrama de tuberías e instrumentos.

2.3 ESPECIFICACIONES Y DISEÑO DEL EQUIPO.

2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE REACCIÓN.

Las reacciones a realizar en el reactor se llevaran a cabo en fase líquida, las cuales pueden ser del tipo:

- Endotérmica y exotérmicas.
- Reacciones catalíticas o no (que se lleven en fase líquida)

Por seguridad todas las reacciones a realizar, deberán requerir presiones bajas y que no desprendan vapores tóxicos.

2.3.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN.

En los procesos industriales esta parte es crucial ya que de acuerdo a la reacción a realizar, se analizan las condiciones de operación particulares que permitan obtener el mejor rendimiento y calidad del producto al menor costo. En nuestro caso se pretende que el diseño permita llevar a cabo reacciones químicas de manera didáctica es decir que el alumno pueda plantear su reacción proponer sus condiciones de trabajo (reactivos, concentraciones, tiempos, temperatura, presión, etc.) y establecer sus análisis cinéticos, propiamente en un reactor químico por lo que se proponen condiciones de operación moderadas y seguras. Las condiciones propuestas que reúnen estos requisitos, se muestran en la tabla 2.2.

TABLA 2.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL SISTEMA DE REACCIÓN.

Variable	Rango de operación	Observaciones
Temperatura	-10 a 100°C	Para realizar reacciones endotérmicas y exotérmicas y poder trabajar a diferentes temperaturas.
Presión	2 Kg/cm ²	Presión moderada por seguridad y suficiente para trabajar diferentes reacciones.
Volumen	2L	Volumen suficiente para este tipo de reacciones.
Intercambio de calor	Isotérmico	El reactor podrá operar de manera isotérmica.

El reactor deseado debe ser de fácil operación, que no requiera mantenimiento especializado, que trabaje a volumen constante con agitación perfecta y donde el cambio de temperatura sea despreciable ya que las reacciones a realizar serán reacciones diluidas preparadas en el laboratorio.

Lo que se pretende es buscar las condiciones ideales de trabajo por lo que proponemos un *reactor intermitente de agitación* recomendado para uso académico por su fácil manejo y diversidad en las aplicaciones.

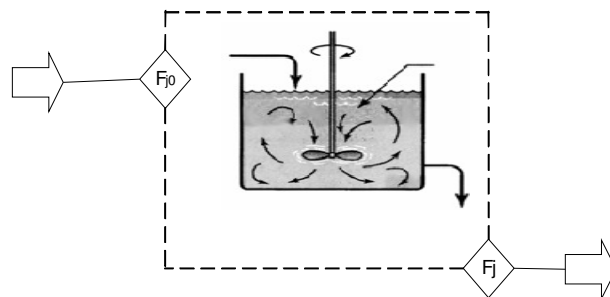
2.4 BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.

Hasta ahora se ha especificado, tamaño, temperatura, presión, y la forma de operación del reactor con lo que se puede plantear las ecuaciones de balance de materia y energía.

Los balances de materia y energía se plantean basados en las siguientes suposiciones:

- ✓ Reactor de mezcla perfecta y con pérdidas de calor hacia el exterior despreciables.
- ✓ El calor debido a la agitación es despreciable.
- ✓ El calor específico y la densidad son constantes.
- ✓ La variación del volumen del contenido del reactor es despreciable para el caso de un reactor intermitente.

- Balance de materia:



[Figura 2.3esquema de reacción.](#)

Para realizar el balance de moles se especificaran las fronteras del sistema llamando *volumen del sistema* al volumen encerrado por dichas fronteras:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad de flujo } j \\ \text{(entrada)} \left(\frac{\text{moles}}{\text{tiempo}} \right) \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de generacion de } j \\ \text{por reaccion quimica} \left(\frac{\text{moles}}{\text{tiempo}} \right) \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad de flujo } j \\ \text{desde el sistema} \left(\frac{\text{moles}}{\text{tiempo}} \right) \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad de acumulacion} \\ \text{de } j \text{ dentro del sistema} \left(\frac{\text{moles}}{\text{tiempo}} \right) \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Entrada} \\ F_{j0} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Generacion} \\ G_j \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Salida} \\ F_j \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Acumlación} \\ \frac{dN_j}{dt} \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

Donde N_j representa el número de moles de la especie j en el sistema en el tiempo, si todas las variables del sistema (temperatura, concentración, actividad catalítica) son espacialmente uniformes dentro de todo el volumen del sistema, la velocidad de generación de la especies j , G_j , será solo el producto del volumen de reacción de V , por la velocidad de formación de la especie j , r_j , el termino de generación G_j está definido por la siguiente ecuación

$$G_j = r_j \cdot V \quad (2.2)$$

Suponiendo que la velocidad de la formación de la especie j para la reacción varía con la posición del volumen del sistema al igual que la velocidad de reacción tenemos:

$$\Delta G_{j1} = r_{j1} \cdot \Delta V_1 \quad (2.3)$$

La velocidad total de generación dentro del volumen del sistema es la suma de todas las velocidades de generación en cada uno de los subvolúmenes:

$$G_j = \sum_{i=1}^M \Delta G_{i1} = \sum_{i=1}^M r_{ji} \Delta V_i \quad (2.4)$$

Tomando los límites apropiados e integrando se escribe la ecuación de la siguiente forma:

$$G_j = \int_{V_0}^V r_j dV \quad (2.5)$$

En esta ecuación tenemos que r_j es función indirecta de la posición, puesto que las propiedades de los materiales que reaccionan, por ejemplo (concentración, temperatura) pueden tener diferentes valores en los diferentes puntos del reactor por lo que sustituimos G_j de la ecuación 2.1

$$F_{j0} - F_j + G_j = \frac{dN_j}{dt} \quad (2.6)$$

Integrando se obtiene la ecuación general de balance de moles para cualquier especie química j que este entrando, saliendo, reaccionando y/o acumulándose dentro de cualquier volumen del sistema V .

$$F_{j0} - F_j + \int_{V_0}^V r_j dV = \frac{dN_j}{dt} \quad (2.7)$$

A partir de esta ecuación general se podrá desarrollar la ecuación de diseño del tipo de reactor que seleccionamos. Para un reactor por lotes donde no hay flujo de entrada ni de salida mientras la reacción se efectúa, el balance general se expresaría de la siguiente manera:

$$\frac{dN_j}{dt} = \int_{V_0}^V r_j dV \quad (2.8)$$

Si la mezcla de reacción es homogénea en todo momento el balance quedaría de la forma:

$$\frac{dN_j}{dt} = r_j V \quad (2.9)$$

- Balance de energía.

Al igual que el balance de masa se puede escribir un enunciado general para la conservación de la energía:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{flujo de calor} \\ \text{del entorno} \\ \text{al sistema} \\ \dot{Q} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Tasa de trabajo} \\ \text{efectuado por} \\ \text{el sistema sobre} \\ \text{el entorno} \\ \dot{W} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Tasa de adición} \\ \text{de energía al} \\ \text{sistema por flujo} \\ \text{de} \\ \text{masa hacia} \\ \text{dentro del sistema} \\ F_{ent}E_{ent} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Tasa de pérdida de} \\ \text{energía del sistema} \\ \text{por} \\ \text{flujo de masa fuera} \\ \text{del sistema} \\ F_{sal}E_{sal} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de energía dentro} \\ \text{del sistema} \\ \frac{dE_{sis}}{dt} \end{array} \right\}$$

La ecuación general para un estado no estacionario.

$$\dot{Q} - \dot{W}_s + \sum_{i=1}^n F_i H_i I_{entr} - \sum_{i=1}^n F_i H_i I_{sal} = \left(\frac{dE_{sis}}{dt} \right) \quad (2.10)$$

Para el caso de los reactores por lotes donde generalmente están bien mezclados, se desprecian las variaciones de temperatura y concentración de las especies.

El balance de energía para este reactor se obtiene haciendo $F_{A0} = 0$.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q} - W_s + (-\Delta H_{RX})(-r_A V)}{\sum N_i C_{pi}} \quad (2.11)$$

En términos de conversión, la ecuación de balance de energía queda:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q} - W_s + (-\Delta H_{RX})(-r_A V)}{N_{A0}(\sum \Theta_i C_{pi} + \Delta C_p X)} \quad (2.12)$$

Para el caso de una operación adiabática en un reactor por lotes donde ($\dot{Q} = 0$), ($F_{i0} \equiv 0$) y cuando se puede despreciar el trabajo realizado por el agitador ($W_s \cong 0$), la ecuación se puede escribir de forma:

$$-\Delta H_{RX}(T)(-r_A V) = N_{A0}(C_{ps} + \Delta C_p X) \frac{dT}{dt} \quad (2.13)$$

Donde: $C_{ps} = \sum \Theta_i C_{pi}$

2.5 ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO.

En esta parte se especifican y establecen, la geometría, volumen y las características físicas del reactor, comenzando con los materiales de construcción, accesorios, instrumentos y equipos auxiliares al reactor de acuerdo a las características previamente establecidas.

2.5.1 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

- *Cuerpo del reactor.*

El cuerpo del reactor está construido en vidrio atemperado. El material es ideal para observar el transcurso de las reacciones químicas con la ventaja de resistir la temperatura y presión establecida previamente (tabla 2.2)

- *Geometría del reactor.*

La geometría del cuerpo del reactor es de forma cilíndrica simple, con tapa plana ya que esta forma geométrica ayuda a que la agitación de los reactivos sea uniforme, además de facilitar la labor de limpieza, el cuerpo del reactor estará en posición vertical, paralela a la flecha del reactor como se indica a continuación:

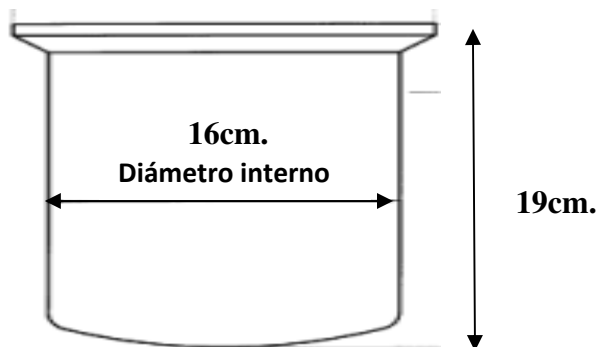


Figura 2.4 Dimensiones del cuerpo del reactor.

- *Accesorios, tuberías y tapa del reactor.*

Para la tapa del reactor, válvulas, tuberías y todas las piezas de metal que estén en contacto con la mezcla reaccionante se propone acero inoxidable 316, debido a la resistencia al calor y la corrosión, a los ataques químicos.

Para las tuberías externas se selecciono Cobre, debido a que resiste perfectamente las presiones de trabajo constante, resiste la corrosión de los fluidos a conducir, flexibilidad, su larga vida útil y su menor costo comparado con el acero inoxidable. Cabe mencionar que la tubería que conduce inertes es de acero inoxidable.

- Volumen.

Debido a que el reactor está destinado para uso de laboratorio, se requiere un volumen de reactivos mínimo, disminuyendo el consumo de reactivo. De este modo, se propone que el volumen a trabajar sea de un litro.

2.5.2 SERVICIOS AUXILIARES.

Los servicios auxiliares requeridos son:

- Aire comprimido.

La presión de servicio suministrada por el compresor y que existe en las tuberías que alimentan al laboratorio de LEM es de 103 psig con lo que garantiza un funcionamiento confiable y preciso del motor de trabajo.

- Energía eléctrica.

Dado que el reactor no requiere suministro eléctrico solo se requerirá de un suministro eléctrico a 120v/60Hz a 30 amperios para el funcionamiento de los equipos auxiliares (baño de temperatura, espectrofotómetro, etc.).

- Tanque de inertes

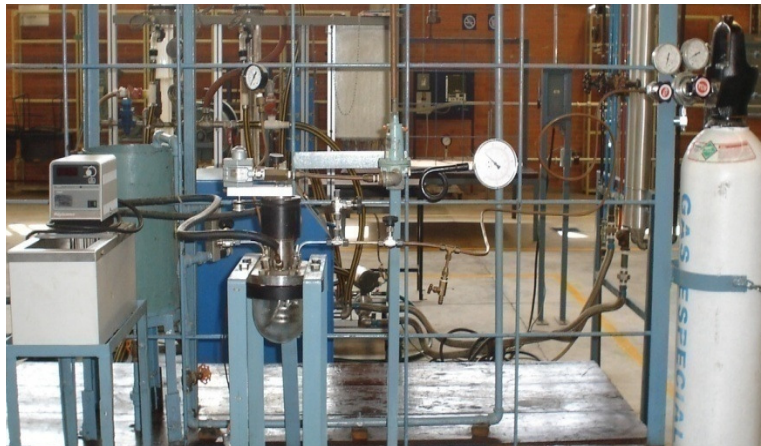
En la tapa del reactor una boquilla estará destinada a la entrada de gas inerte los más comunes son el nitrógeno y gases nobles. Se selecciono el nitrógeno debido a que no tiene olor, color, ni sabor. No tóxico.

2.5.3 LUGAR DE INSTALACIÓN.

El laboratorio de LEM cuenta con mesas de trabajo las cuales disponen de los servicios requeridos (aire comprimido, energía eléctrica) para el funcionamiento de los equipos, por lo que la instalación se llevará a cabo en una de las mesas de trabajo de dicho laboratorio.

2.5.4 INSTRUMENTOS.

De acuerdo al sección 2.2, la opción más viable para disponer de un equipo donde se pueda estudiar un sistema de reacción, es la de “adaptar un reactor disponible”, el cual se encuentra en el LEM, parcialmente instalado.



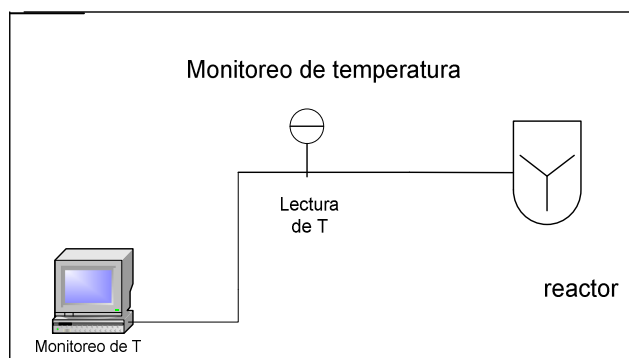
[Figura 2.5 Reactor parcialmente instalado.](#)

A dicho equipo se le realizaron algunas modificaciones, para optimizar su funcionamiento de acuerdo al diseño previamente propuesto.

Básicamente se buscó la adaptación de instrumentos auxiliares que permitan obtener datos experimentales de manera automática (temperatura, concentración), por lo que se propusieron y realizaron algunas modificaciones al equipo. Como se describe a continuación.

- Temperatura.

Uno de los principales instrumentos con los que debe contar el reactor sin lugar a duda es aquel que permita medir la temperatura interna del reactor es decir que esté en contacto con las sustancias reaccionantes; por lo que se instalará un termopar para censar la temperatura en todo momento y dicho elemento mande la señal a un equipo que mediante un display nos muestre la lectura. El modelo se describe en la siguiente figura:



[Figura 2.6 Monitoreo de la temperatura.](#)

El termopar recomendado para esta operación es el tipo J, debido a que cubre el rango de temperatura requerido, resistente a la corrosión y es barato. A continuación se describen las especificaciones de los tipos más comunes de termopares.

TABLA 2.4 ESPECIFICACIONES DE LOS DIFERENTES TIPOS DE TERMOPARES

TERMOPAR		TIPO J
ENTRADAS	Voltaje	120 v
	Termopares	±10 VDC Tipo J: -58 a 1382°F (-50 a 750°C) Tipo K: -58 a 2300°F (-50 a 1260°C) Tipo T: -292 a 700°F (-180 a 371°C) Tipo E: -58 a 1578°F (-50 a 870°C)
Resolución		Proceso: hasta tres lugares decimales Temperatura: 1°F/C
Exactitud		Proceso: ±0.05% del termopar calibrado
Display		Eficacia de cuatro cifras.
Condiciones Ambientales	Temperatura	0 a 65°C con 0 to 90% RH
Recubrimiento		1/8 DIN resistente a Fuertes impactos, NEMA 4X, IP65
Dimensiones		8cm X 5 cm X 4 cm

- Presión.

La presión máxima de trabajo es de 2 Kg/cm², moderada por ser un reactor de uso para laboratorio y donde las condiciones de trabajo no son agresivas, se propone un manómetro sencillo con las siguientes características:

- ✓ Tipo Bourdon en C
- ✓ Caratula de 2" de diámetro.
- ✓ Diámetro de conexión 1/4 NPT.
- ✓ Conexión de latón, uso aire, agua, gas, máxima temperatura de fluido 80°C
- ✓ Presión Positiva hasta 7 kg/cm²

- ✓ Doble escala en kg/cm^2 y psi.

El modelo propuesto es: Metrón 51100

- Calentamiento.

Para cumplir con la demanda del calentamiento de las reacciones a diferentes temperaturas y obtener mejores análisis cinéticos, se cuenta con un serpentín como medio calefactor el cual está en contacto con la mezcla reaccionante para transferir el calor requerido para llevarse a cabo la reacción. El serpentín instalado cuenta con las siguientes características:

- ✓ Tubo de acero inoxidable de 1/4" de diámetro
- ✓ Forma en espiral
- ✓ 2 roscas de macho de 1/4"
- ✓ 3 giros al eje de la pópela.
- ✓ Diámetro exterior: 8 cm
- ✓ Diámetro interior: 7.4 cm.
- ✓ Altura hasta las tuercas: 7 cm.
- ✓ Longitud: 80 cm.



[Figura 2.7 Serpentín](#)

- Agitador mecánico.

Las reacciones que se efectuarán, requieren agitación durante todo momento del proceso por lo que se cuenta con una flecha y aspas instaladas para esta función, fabricadas de acero inoxidable debido a que están en contacto directo con la mezcla, dicho dispositivo se cuenta con las siguientes características:

- ✓ Flecha de 20 cm de largo y 1/8" de grosor.
- ✓ Con 3 aspas, tipo propela marina, ideal para agitación.

- Toma de muestra.

El reactor cuenta con una tapa con 8 respiraderos, uno de ellos está destinado a la toma de muestra la cual consta de una tubería de acero inoxidable con un regulador de flujo.

- Tapa del reactor

Originalmente la tapa del reactor es plana de acero inoxidable 316 con espesor de $\frac{3}{4}$ ", está unida al recipiente de cristal mediante una brida empleando 8 tornillos de $\frac{1}{4}$ " de cabeza hexagonal, cuenta con 8 boquillas en las cuales se encuentran la entrada para la carga de reactivos y las conexiones de equipos auxiliares al reactor como se muestra a continuación:

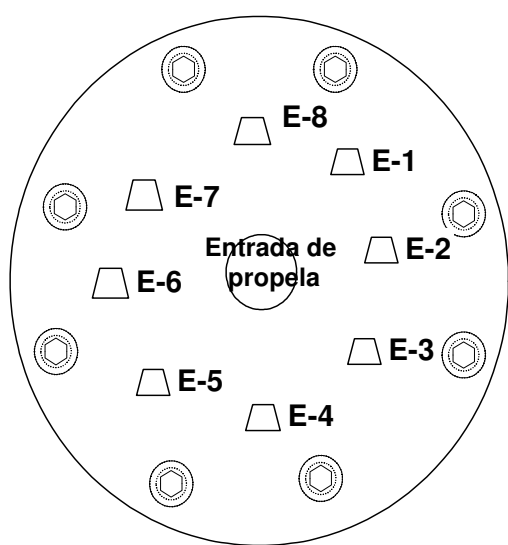


Tabla 2.5 Servicios en las entradas del reactor.

Entrada	Servicio
E-1	Entrada Líquido calefactor
E-2	Alimentación de reactivos
E-3	Inertes
E-4	Adición de reactivos 2
E-5	Retorno de líquido calefactor
E-6	Termopar
E-7	Toma de muestra
E-8	Manómetro

[Fig.2.8 Tapa del reactor.](#)

Para automatizar el funcionamiento del reactor se realizaron algunas modificaciones a dos de las boquillas disponibles en una de ellas se instaló un termopar tipo j, con el cual se obtiene el registro constante de la temperatura de reacción.

La segunda boquilla se barreno con el propósito de aumentar el diámetro interno, el objetivo era introducir un electrodo de pH o de conductividad y mantenerlo fijo durante el transcurso de la experimentación y de tal forma obtener datos continuos durante el

transcurso de la reacción, debido al poco diámetro disponible no se logro obtener el diámetro requerido por los electrodos disponibles en el Laboratorio Experimental Multidisciplinario.

- Válvulas:

Por lo general la válvula de aguja se emplea para el control en instrumentos ya que permiten estrangulación exacta de volúmenes pequeños con un funcionamiento sencillo y de fácil manejo. La válvula de aguja seleccionada cuenta con las siguientes características:

Estrangulación suave, con extremos roscados para volúmenes pequeños controla el paso de aire y liquido permitiendo la circulación en un sentido y controlando el opuesto, con una temperatura de servicio máxima de 260°C, los datos de funcionamiento se describen en la siguiente tabla.

TABLA 2.6 ESPECIFICACIONES DE LA VALVULA.

DATOS DE FUNCIONAMIENTO				
MARCA	Modelo	Material	Conexión	Capacidad de presión
Vayremex	HH	Acero inoxidable AISI 316	1/4"	210 kg/cm ²

- Válvula de seguridad:

Para proteger el sistema contra alta presión, se propone un dispositivo automático para permitir el escape de cualquier exceso de presión, dicha válvula se describe en la siguiente tabla:

TABLA 2.7 ESPECIFICACIONES DE LA VALVULA DE SEGURIDAD.

DATOS DE FUNCIONAMIENTO				
MARCA	Modelo	Material	Dimensión	Presiones
Vayremex	632	Acero inoxidable	1/4"	Desde 0.5 kg/cm ² hasta 281 kg/cm ²

2.5.5 EQUIPOS AUXILIARES.

- Motor.

Para cubrir el esfuerzo mecánico para la agitación se dispone de un motor de aire, ya que se cuenta con este servicio en el laboratorio por lo cual nos resulta más económico con respecto a un motor eléctrico y de mayor seguridad, no requiere mantenimiento especializado y cubre la demanda mecánica requerida además de ser ligero y de pequeñas dimensiones, el motor cumple con las siguientes características:

TABLA 2.8 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR.

DATOS DE FUNCIONAMIENTO						MAXIMO PAR		
MARCA	Modelo	Max velocidad (rpm)	Potencia De Salida (hp/kw)	Par (lbin/Nm)	Consumo De aire Máximo (cfm/m ³ /h)	Velocidad Máxima (rpm)	Lb.in	Nm
Haskel	NL32	2,000	0.42/0.21	13.5/1.5	30/51	300	21	2.5

El regulador de velocidad del motor se ajusta en función de la presión de servicio deseada, por medio de un elemento manual o automático.

- Baño de temperatura.

Para cubrir con los requerimientos de calentamiento/enfriamiento se instaló un nuevo baño de temperatura el cual se encargara de suministrar o remover el calor necesario para que las reacciones se lleven a cabo. Su instalación requirió en una superficie plana cerca de una corriente eléctrica y del reactor con el propósito de disminuir la longitud de las tuberías encargadas de suministrar el flujo refrigerante al reactor. El modelo instalado se describe a continuación.

TABLA 2.9 CARACTERÍSTICAS DEL BAÑO DE TEMPERATURA.

DATOS DE FUNCIONAMIENTO							
MARCA	Modelo	Rango de temperatura baja	Rango de temperatura alta	Controlador	Temperatura De Estabilidad.	Capacidad	Peso
Brookfield	TC-502D	- 20°C	150°C	Digital	0.05°C	6.0 Lt	76 lbs.

- Tanques de alimentación.

Tanques cilíndricos verticales de fondo plano diseñados para el almacenamiento de los reactivos a presión atmosférica o presiones relativamente bajas. Con material de polietileno, capacidad de 3000 mL, y conexiones roscadas de salida de 1/4”, incluye entrada y salida para reactivos, el modelo propuesto sería el siguiente:



Fig.2.9 Tanques de alimentación de reactivos

- Bombas.

Para la alimentación de los reactivos al reactor, se usa de bombas peristálticas marca “Aqua Medic” modelo SP 3000 con las siguientes características:

TABLA 2.10 ESPECIFICACIONES DE LAS BOMBAS.

Marca	Modelo	Potencia	Consumo de potencia	Caudal máx.	Conexiones	Motor	Velocidad
Aqua medic	SP 3000	230 V/50Hz	4.5 watts	3L/hr 50ml/min	1/4”	Sincrónico	20 rpm

- Equipos para seguir la reacción.

El seguimiento de las reacciones se hace con equipos auxiliares, los cuales están disponibles en el laboratorio para conocer el funcionamiento y sus características se anexan tablas de cada uno de ellos.

- ✓ Celda de conductividad (Anexo II)
- ✓ pH-metro. (Anexo III)
- ✓ Espectrofotómetro. (Anexo V)

CAPITULO 3 “OPERACIÓN DEL SISTEMA DE REACCIÓN”

3.1 INSTALACION FINAL.

Se presenta a continuación una descripción general del sistema de reacción instalado en el Laboratorio Experimental Multidisciplinario. En esta primera etapa de la instalación no se incluyen los tanques y las bombas de alimentación, las cuales podrán ser instaladas posteriormente. Debido a esta limitación, el reactor tendrá que ser alimentado de forma manual, como se describirá posteriormente en el mismo capítulo.

Finalmente el equipo quedo instalado de la siguiente manera, en la tabla 3.1 se menciona cada una de las partes que componen al sistema, el material, los instrumentos de medición y los servicio auxiliares requeridos para su funcionamiento.

TABLA 3.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA DE REACCIÓN.

DISEÑO : “REACTOR DE VIDRIO”	
LUGAR: FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN C-1	INSTALACION: LABORATORIO EXPERIMENTAL MULTIDISCIPLINARIO
MATERIALES	
<ul style="list-style-type: none"> • CUERPO DEL REACTOR: VIDRIO TEMPLADO DE ½” DE ESPESOR • VÁLVULAS , ACCESORIOS Y TUBERÍAS : ACERO INOXIDABLE 316 • TUBERIA EXTERNA: COBRE 1/4” Y ACERO INOXIDABLE 316 • TAPA DEL REACTOR: ACERO INOXIDABLE 316 • FLECHA: ACERO INOXIDABLE 316, 20 cm L, 1/4” • ASPAS : ACERO INOXIDABLE 316, TIPO MARINAS 	
GEOMETRÍA DEL REACTOR	
<ul style="list-style-type: none"> • CILINDRO EN POSICIÓN VERTICAL • TAPA : PLANA CON 8 RESPIRADEROS • CAPACIDAD : 1L 	
SERVICIOS AUXILIARES	
<ul style="list-style-type: none"> • AIRE COMPRIMIDO: 103 Psig • ENERGIA ELECTRICA: 120V/60Hz a 30 amperes • GAS INERTE: N₂, cilindro de 20 Kg (99.5%) 	
INSTRUMENTOS	
<ul style="list-style-type: none"> • TERMOPAR TIPO J: T427-JA • MANÓMETRO : Metrón 51100 • SERPENTÍN: acero inoxidable 316 40cm L, 1/8” con 3 giros. 	<ul style="list-style-type: none"> • VÁLVULAS: Vayremex HH
EQUIPOS AUXILIARES	
<ul style="list-style-type: none"> • MOTOR DE AIRE HASKEL MODELO: NL32 • BAÑO DE TEMPERATURA: Brookfield TC-502D 	

Diagrama de DTI del equipo instalado.

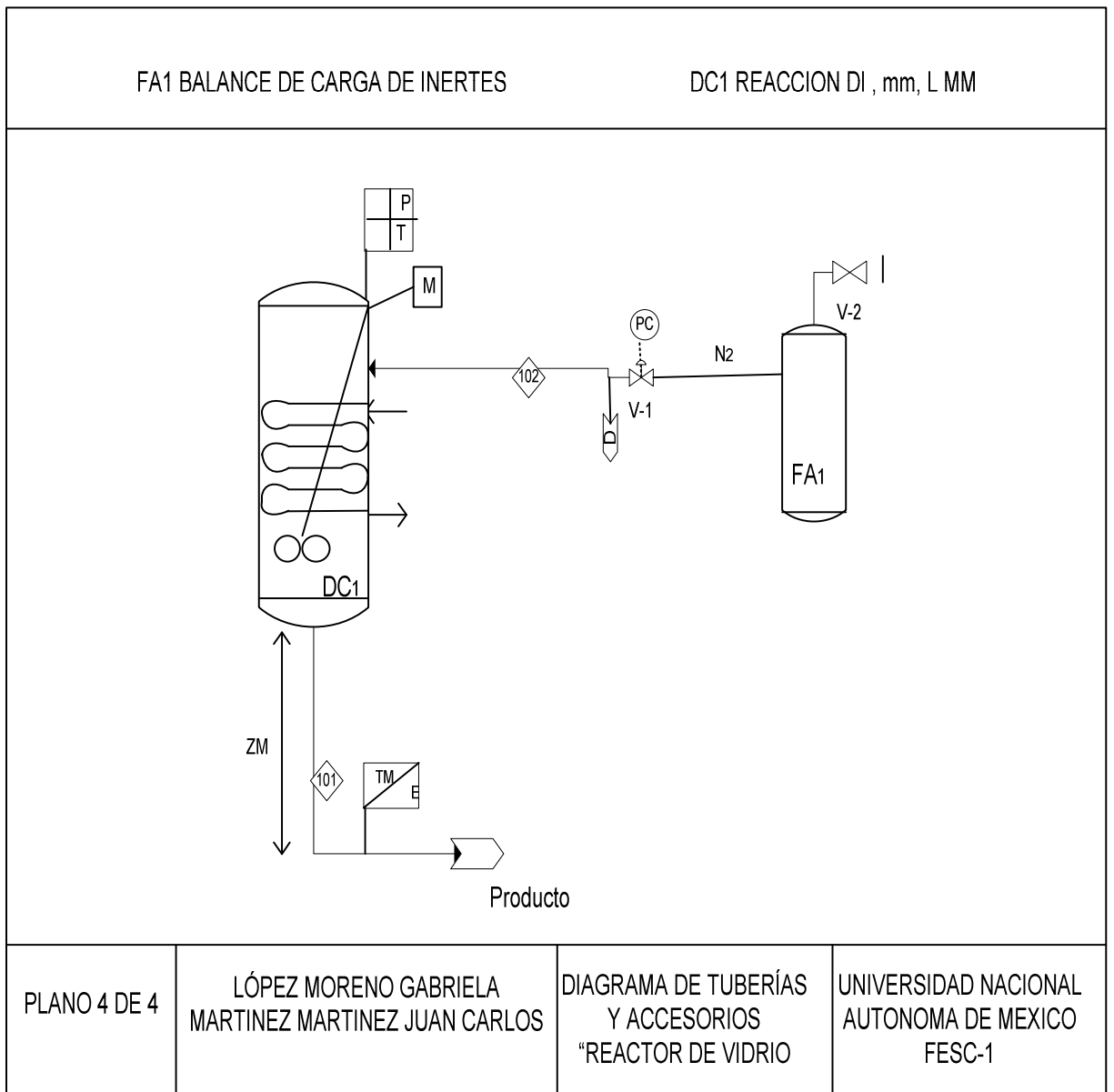


Fig.2.10 Diagrama de tuberías e instrumentos instalado.

3.2 OPERACIÓN DEL EQUIPO.

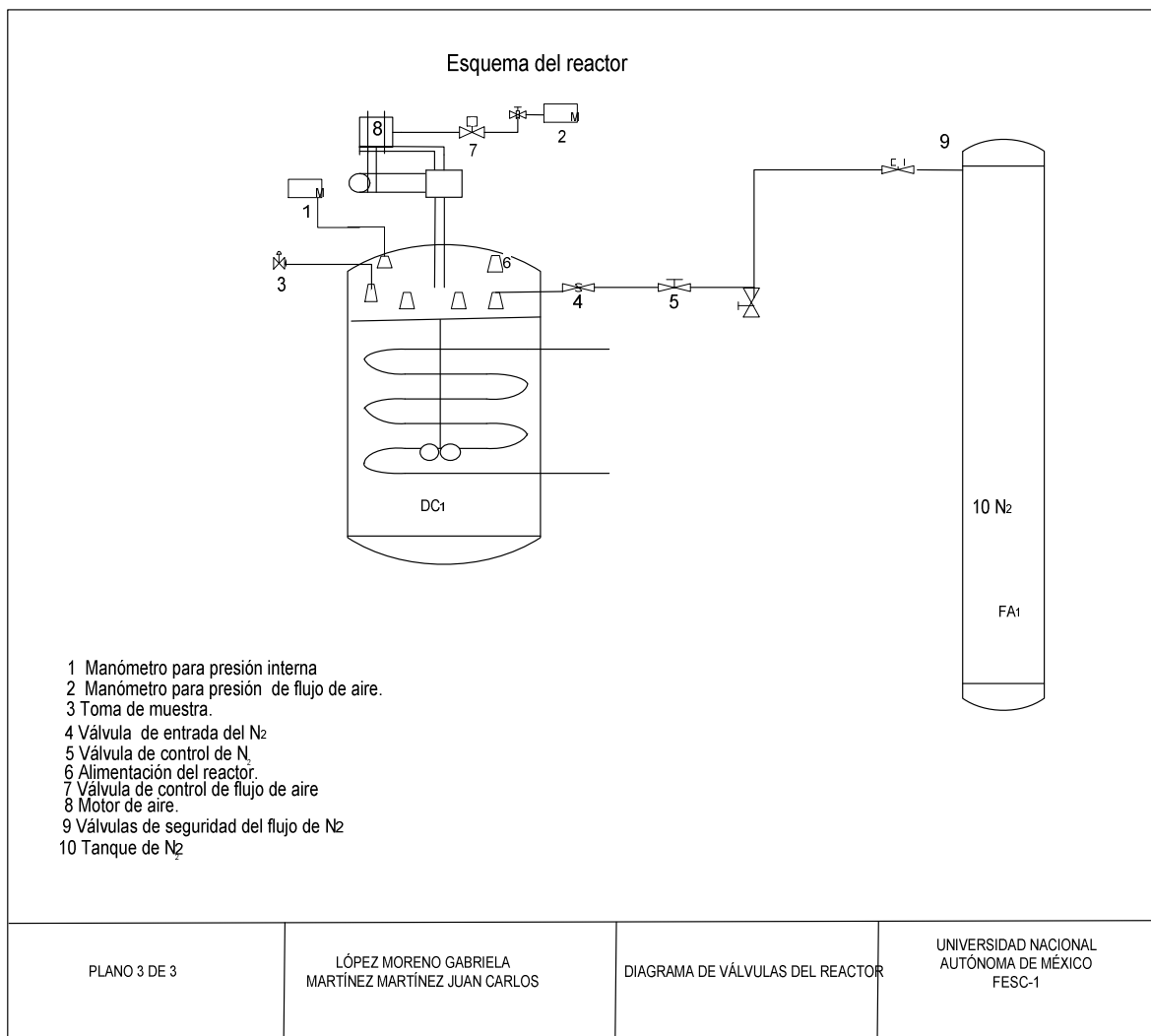
Una vez conocidas las partes que integran el reactor, el procedimiento de operación se facilita se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Verificar que el equipo se encuentre en condiciones de trabajo satisfactorias es decir que se encuentre limpio, que los servicios de energía eléctrica y aire comprimido se encuentren disponibles, además de contar con todo el material de trabajo necesario para efectuar la sesión de laboratorio.
- Antes de realizar cualquier actividad en el equipo verificar que todas las válvulas se encuentren cerradas.
- Dependiendo el tipo de operación a realizar, el reactor puede ser cargado directamente desde la entrada E-2 con la ayuda de un embudo (ver fig. 2.8), o desmontar completamente el cuerpo del reactor para realizar la carga por lotes (ver sección 3.3)
- Una vez cargados los reactivos arrancar la agitación abriendo la válvula de aire comprimido controlando la velocidad de agitación con la válvula V7 (Ver fig. 3.1)
- Es importante que en esta parte se tenga listo y previamente calibrado el equipo con el cual se seguirá la reacción (espectrofotómetro, colorimétrico, pH metro etc.)
- Para tomar muestras de la mezcla de reacción se debe aumentar la presión en el reactor, abriendo la válvula de seguridad del tanque de nitrógeno y la válvula V5 (ver fig. 3.1), cuidando que la presión no exceda de 1.5 kg/cm^2 , cerrar la V5 y abrir la V3 (Ver fig. 3.1) para tomar la muestra, una vez tomada la muestra asegurarse de cerrar la válvula del nitrógeno.
- Si la reacción se realiza a una temperatura diferente a la temperatura ambiente, encender el baño y ajustar a la temperatura requerida, esto debe hacerse 10 min. Antes de cargar el reactor.
- Para monitorear la temperatura de la mezcla al interior del reactor se debe encender el display que va unido al termopar instalado en el reactor. De ser necesario calibrar previamente.
- Esperar el tiempo de residencia estimado revisando constantemente que las condiciones de presión y temperatura no cambien.

- Dejar enfriar los productos y una vez fríos descargarlos.
- Lavar perfectamente el reactor con agua.

Nota: Se recomienda que la carga de reactivos y la puesta en marcha de la agitación se realicen de manera rápida, para una buena obtención de datos experimentales.

Se debe tener práctica para poder obtener la muestra del reactor y poder analizarla en un tiempo no mayor a 15 seg. Para la confiabilidad de los datos a obtener.



[Fig.3.1 Esquema del equipo.](#)

3.3 MONTAJE Y DESMONTAJE.

En caso de ser necesario desmontar el recipiente de vidrio de la base metálica, deben seguirse los siguientes pasos:

1. Asegurar la unidad de cristal en una base amortiguadora.
2. Retirar los tornillos que sujetan el recipiente de vidrio con la tapa de metal
3. Bajarlo lentamente y una vez realizada la limpieza u operación necesaria, colocarlo de nuevo a la base amortiguadora y subirlo.
4. Asegurarse de que el recipiente de vidrio quede bien unido a la tapa de metal colocando los tornillos que fueron retirados.

3.4 MANTENIMIENTO

- Para una correcta operación del equipo es indispensable revisar el buen funcionamiento de los instrumentos (indicador de temperatura, indicador de presión, etc.) antes y después de la operación
- Revisar que las válvulas y la toma de muestra este libre de obstrucción debido a encrustamiento de sólidos empleados en la práctica.
- Revisar periódicamente la banda del motor particularmente cuando la propela no funcione correctamente a la velocidad deseada.
- Para garantizar un buen funcionamiento del equipo y obtener buenos resultados del proceso, se recomienda lavar el reactor después de cada operación.

3.5 NORMAS DE SEGURIDAD EN EL LABORATORIO.

Un laboratorio químico puede y debe ser un lugar seguro para trabajar. Ahora bien, se pueden generar accidentes de diferente índole, algunos de poca importancia, pero otros de considerable gravedad. Estos accidentes ocurren por descuidos o faltas de atención en el trabajo. Para evitar accidentes se debe trabajar con cautela y seguir las normas básicas de seguridad personal y colectiva.

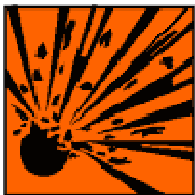
3.5.1 PRECAUCIONES GENERALES.

- Nunca trabaje en el laboratorio solo, un accidente puede carecer de importancia si es ayudado por alguien, pero podría ser de gravedad si se encontrara solo.
- No varíe sin consultar las condiciones de la experimentación o las concentraciones de los reactivos.
- Mantenga su lugar de trabajo limpio y ordenado.
- Usar zapatos cerrados para proteger los pies.
- Utilice siempre un bata para proteger la ropa.
- Antes de manejar, pesar, abrir una botella de reactivo, etc. Lea cuidadosamente la etiqueta del recipiente que lo contenga. Etiquete cualquier reactivo que se prepare.
- Nunca maneje productos químicos con las manos, utilice siempre espátulas, pinzas o el material adecuado.
- Los disolventes además de ser inflamables suelen ser tóxicos.
- Las manos representan un riesgo de contaminación, algunos vapores se absorben rápidamente a través de la piel y terminar en la boca. Por lo cual después de manejar alguna sustancia, debe lavarse cuidadosamente las manos y antes de salir del laboratorio.
- Para diluir soluciones concentradas con agua añádalas en pequeñas cantidades sobre el agua y nunca al revés.
- Antes de abandonar el laboratorio compruebe que todos los servicios estén cerrados.

3.5.2 MANEJO DE REACTIVOS COMERCIALES.

Además del nombre y las características del reactivo, en la etiqueta aparece la información sobre las precauciones de manipulación del mismo. Esta información aparece de dos formas:

Pictogramas: símbolos que por medio de imágenes sencillas destacan rápidamente la información, los más importantes son los que aparecen en las siguientes figuras y clasifican a los productos químicos fundamentalmente en:



Explosivo (E): Sustancias y preparados que pueden explotar bajo el efecto de una llama o que son mas sensibles a los choques o a la fricción que el dinitrobenceno.



Comburente (O): Sustancias y preparados que en contacto con otros, particularmente con los inflamables, originan una reacción fuertemente exotérmica.



Inflamables (F): Se clasifican en inflamables, fácilmente inflamables y extremadamente inflamables (F+)



Tóxicos (T): Sustancias o preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea puede entrañar riesgos graves, agudos o crónicos e incluso la muerte. Si estos riesgos son extremadamente graves se denomina muy toxico (T+).



Nocivos (Xn): Sustancias o preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea se pueden entrañar riesgos de gravedad limitada.

Irritantes (Xi): Sustancias o preparados no corrosivos que por contacto inmediato, prolongado o repetido con la piel o mucosa puede provocar una reacción inflamatoria.



Corrosivos (C): Sustancias o preparados que en contacto con los tejidos vivos pueden ejercer sobre ellos una acción destructiva.



Peligroso para el medio ambiente (N): Las sustancias o preparados que, en caso de contacto con el medio ambiente, presenten o puedan presentar un peligro inmediato o futuro para una o más componentes del medio ambiente.

Se ha de tener cuidado de no contaminar los reactivos de las botellas, para ello:

- Nunca devuelva el reactivo sobrante a la botella de donde lo ha tomado.
- No introducir pipetas, espátulas u otros materiales directamente en los recipientes en donde estén contenidos los reactivos.
- No dejar la tapa de una botella boca abajo en contacto con la mesa de trabajo, se puede manchar y contaminar posteriormente el reactivo al volver a cerrar la botella.

Antes de iniciar una práctica el alumno debe:

- Conocer la teoría de la misma.
- Contar con el material y reactivos necesarios.

Si por cualquier causa debe suspenderse la sección experimental debe asegurarse de que no se producirán reacciones secundarias o de descomposición antes de volver a reanudar la práctica.

3.5.3 MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA EL MANEJO DEL REACTOR.

Las medidas de seguridad que se deben tomar en cuenta principalmente al operar el equipo de reacción son las siguientes:

Operador: La operación segura de cualquier parte del equipo a presión depende sobre todo de las personas que lo manipulan. Su trabajo se debe planear cuidadosamente antes de la operación. Las cantidades de todos los reactivos deben ser cuidadosamente calculadas, particularmente en reacciones desconocidas.

Inspección y ensamble: asegurarse que el reactor no este dañado o fracturado, de lo contrario se romperá con una fuerza menor. Fije el tazón en un amortiguador suave al subirlo o bajarlo de la base que lo sujeta.

Prueba de presión del recipiente: los tazones hidrostáticos se pueden probar periódicamente. La presión estándar de los tazones de cristal tiene una presión de funcionamiento de 200 PSI.

CAPITULO 4 “PARTE EXPERIMENTAL”

A continuación se describen tres pruebas para evaluar el funcionamiento del reactor, proponiendo la metodología experimental que permita la obtención de datos experimentales, de acuerdo a las condiciones permitidas por el reactor y el laboratorio.

4.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REACCION.

Debido a que la mayoría de las prácticas conducen a resultados cuantitativos basados en medidas experimentales, es indispensable elegir el mejor equipo que nos permita seguir la reacción de manera confiable.

Al seleccionar una prueba en el laboratorio, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Revisar que las condiciones experimentales de operación no rebasen los rangos máximos de los equipos disponibles.
- En particular se buscaron pruebas con tiempos de reacción inferior a 3 horas (Tiempo promedio de una sesión de laboratorio experimental)
- Revisar que los reactivos y equipos estén disponibles en el laboratorio.
- La accesibilidad, costo y toxicidad de reactivos.
- Elegir un experimento para probar el sistema instalado y que permita ser utilizado para la realización de prácticas en los cursos del laboratorio.

4.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

El formato para cada una de las pruebas presentadas en este trabajo presenta la siguiente estructura:

- a) **Título del problema:** Es la presentación racional de lo que se va a investigar, de forma rápida, sintética, clara y precisa del problema tratar.
- b) **Introducción:** La introducción contiene los antecedentes teóricos sobre el evento en cuestión, Menciona la importancia del experimento y sus aplicaciones a nivel industrial.

- c) **Problema experimental:** Determinar constantes cinéticas y poner a prueba el reactor experimental.
- d) **Desarrollo experimental:** Se menciona la serie de pasos a seguir, proporcionando las instrucciones necesarias para su desarrollo. En esta parte se introducen notas de relevancia necesarias para la realización experimental de la técnica, el número de repeticiones realizadas y la identificación de las variables de trabajo.
- e) **Tablas de resultados:** Sirven de apoyo para la recolección y registro de la información obtenida durante la experimentación, facilitando la corroboración de datos experimentales obtenidos
- f) **Análisis de resultados:** A partir de las tablas y graficas presentadas en los resultados se verifica si el comportamiento de los datos experimentales corresponden a los que se reportan en la literatura se anotan posibles desviaciones y las causas que lo originaron.
- g) **Conclusiones:** En este punto se menciona si se cumplieron los puntos planteados en el experimento, en caso contrario justificar el porqué no se cumplieron.

4.3 PRUEBAS REALIZADAS.

PRUEBA 1

DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN EN LA DEGRADACIÓN DE LA FENOLFTALEÍNA

La fenolftaleína se encuentra como ingrediente activo en algunos laxantes, pero el uso más frecuentemente es emplearla como indicador ácido-base para determinar el punto de equivalencia en una titulación.

Debido al decoloramiento de la fenolftaleína en la solución alcalina puede servir como la base para un experimento que ilustra la cinética de pseudo primer-orden. El procedimiento es simple durante la prueba, es viable ya que los reactivos son comunes y arrojan excelentes resultados.

PROBLEMA.

Determinar el orden de reacción y la constante cinética en la degradación de la fenolftaleína (Ph), haciendo uso de un reactor intermitente, siguiendo la reacción espectrofotométricamente, proponiendo tiempos de residencia y concentración de reactivos.

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

- 1) Preparar 500 ml de de NaOH 0.05M. la solución se carga al reactor con agitación continua, cuidando que la temperatura permanezca constante a 23°C.
- 2) Calibrar el espectrofotómetro con agua destilada a una longitud de onda de 550 nm.
- 3) Encender el reactor y agregar 5 gotas de fenolftaleína tomando lecturas de absorbancia al inicio y cada 2 min. durante el tiempo en se efectúa la reacción.
- 4) Enjuagar la celda después de cada muestra con agua destilada para que no interfieran los residuos de la muestra anterior con la lectura.
- 5) Tomar lecturas de absorbancia hasta que el último valor permanezca casi constante.

RESULTADOS.

Los resultados obtenidos mediante la experimentación arrojaron los siguientes datos:

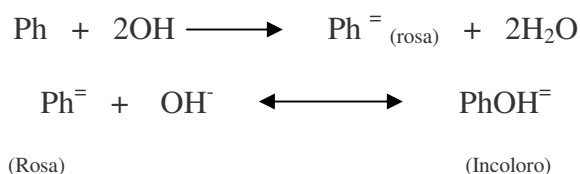
Tabla 4.1 Resultados a 23°C

Tiempo (min)	Absorbancia (nm)
0	0.058
2.01	0.056
4.06	0.053
6.13	0.051
8.00	0.049
10.03	0.046
12.02	0.044
14.04	0.043
16.03	0.040
18.03	0.038
20.04	0.037
22.08	0.036
24.04	0.035
26.01	0.033
28.11	0.030
32.10	0.028

ANALISIS DE RESULTADOS.

Cuando se combina el ion hidróxido con cualquier indicador de pH alcalino, este se irá decolorando lentamente, cuando la fenolftaleína (Ph) se añade a una solución alcalina, en primer lugar sufre una conversión rápida e irreversible en su forma quinoide (Ph⁻) adquiriendo una coloración rosa. La forma quinoide reacciona después lenta y reversiblemente con el ion hidróxido para formar el carbinol no resonante (PhOH⁻) el cual retorna a incoloro.

Las reacciones involucradas son las siguientes:



Dado que el hidróxido de sodio tiene una concentración mayor, comparada con la fenolftaleína y este no presenta cambio significativo en su concentración, la ley de rapidez puede expresarse como la de una *reacción de pseudo primer orden*.

$$\text{Si } [\text{OH}^-] \gg \gg \gg [\text{Ph}^-] \qquad [\text{OH}^-] = \text{Constante.}$$

Donde: $\frac{d[\text{Ph}^-]}{dt} = K''[\text{Ph}^-]$

Donde $K'' = K [\text{OH}^-]$

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis experimental se construyen los siguientes gráficos para poder definir el orden de reacción empleando las expresiones matemáticas del método diferencial.

Análisis de resultados para la temperatura de **23°C**

Para orden cero $x = kt$ (4.1)

Para conocer la concentración de la fenolftaleína a diferentes tiempos se empleo la siguiente formula.

$$X = A_0 - At \qquad (4.2)$$

Donde A_0 = la concentración o el valor de absorbancia al inicio.

A_t = concentración o absorbancia en el transcurso del tiempo.

$$x = 0.058 - 0.56 = 2 * 10^{-3}$$

Para orden uno $\ln \frac{A_0}{A_0 - x} = kt$ (4.3)

Ejemplo:

$$\ln \frac{0.058}{0.058 - 2 * 10^{-3}} = Kt$$

Y = mX

Considerando el orden dos.

$$\frac{x}{A_0(A_0 - x)} = kt \quad (4.4)$$

Ejemplo:

$$\frac{2 * 10^{-3}}{0.058(0.058 - 2 * 10^{-3})} = kt$$

$$Y = mX$$

Los valores obtenidos se representan en la siguiente tabla:

Tabla 4.2 Valores calculados para los diferentes ordenes de reacción

Tiempo (min)	Absorbancia (nm)	Orden cero X	Orden uno $\ln \frac{A_0}{A_0 - x} = kt$ Y = mX	Orden dos $\frac{x}{A_0(A_0 - x)} = kt$ Y = mX
0	0.058	0	0	0
2.01	0.056	$2 * 10^{-3}$	0.035	0.6157
4.06	0.053	$5 * 10^{-3}$	0.0901	1.6265
6.13	0.051	$7 * 10^{-3}$	0.1286	2.3664
8.00	0.049	$9 * 10^{-3}$	0.1686	3.1667
10.03	0.046	0.012	0.2318	4.4977
12.02	0.044	0.014	0.2762	5.4858
14.04	0.043	0.015	0.2992	6.0144
16.03	0.040	0.018	0.3715	7.7586
18.03	0.038	0.02	0.4228	9.0744
20.04	0.037	0.021	0.4495	9.7856
22.08	0.036	0.022	0.4769	10.536
24.04	0.035	0.023	0.505	11.33
26.01	0.033	0.025	0.5639	13.061
28.11	0.030	0.028	0.6592	16.091

Las graficas correspondientes a estos valores se muestran a continuación:

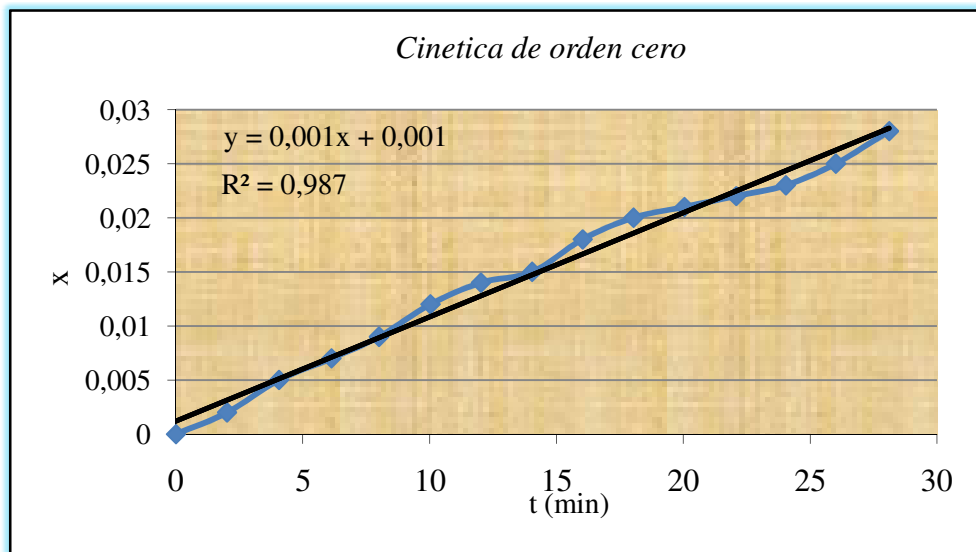


Figura 4.1 Grafica de orden cero para la reacción de degradación de la fenolftaleína a 25°C

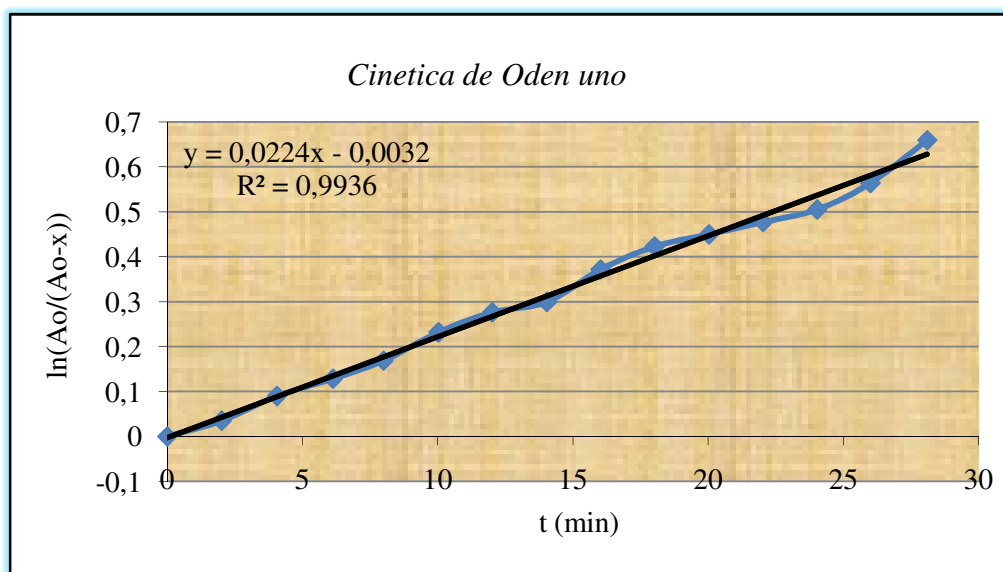


Figura 4.2 Grafica de orden uno para la reacción de degradación de la fenolftaleína a 25°C

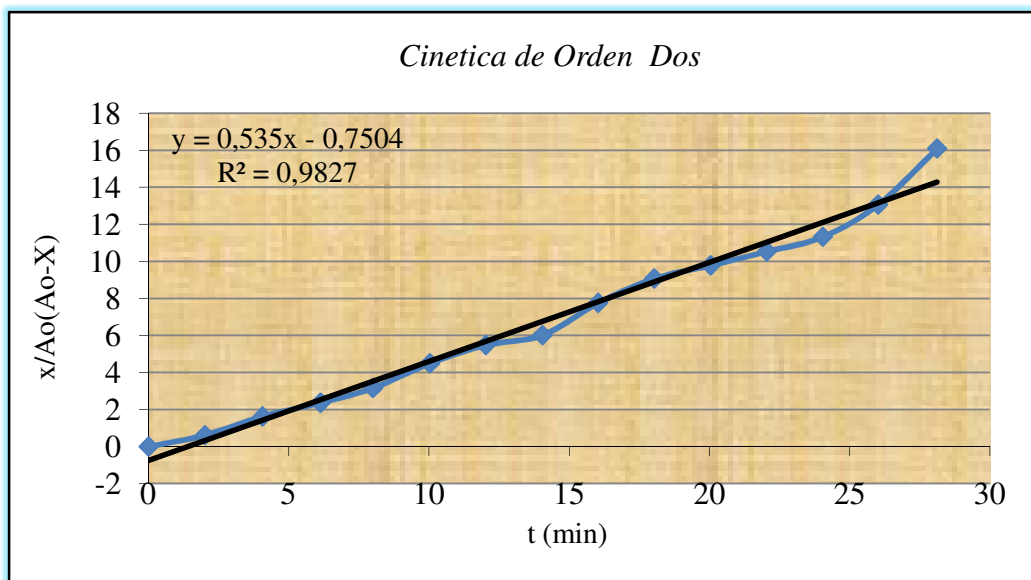


Figura 4.3 Grafica de orden dos para la reacción de degradación de la fenolftaleína a 25°C

Como se puede observar la mejor correlación la presenta la ecuación que corresponde a orden uno, por lo tanto se puede deducir para este caso que la reacción sigue una cinética de primer orden:

Por lo tanto $K=0.0224\text{min}^{-1}$

CONCLUSIONES:

Mediante la experimentación se pudo estudiar la degradación de fenolftaleína en un medio alcalino, y se determinó que el funcionamiento del reactor es aceptable ya que no se presento problema alguno durante la experimentación, el equipo respondió de manera satisfactoria a las condiciones de trabajo utilizadas en dicha prueba y los datos obtenidos son suficientes para poder utilizar el método integral grafico y obtener la cinética de reacción empleando las ecuaciones matemáticas correspondientes y así conocer el orden de reacción.

A través de las graficas se puede observar, que la reacción corresponde a una reacción de primer orden global con una $R^2=0.9936$, lo cual es aceptable para datos experimentales.

De acuerdo a lo reportado en la literatura a la misma temperatura de trabajo, el orden de reacción que sigue este tipo de reacciones en donde uno de los reactivos tiene mayor concentración que el otro, se establece como una reacción de pseudo primer orden. Esto se debe a que el orden de reacción reportado corresponde al orden global de la reacción y si expresamos la ley de rapidez como una *reacción de pseudo primer orden*. Donde:

$$\text{Si } [\text{OH}^-] \gg \gg \gg [\text{Ph}^-] \qquad [\text{OH}^-] = \text{Constante.}$$

Se tiene: $\frac{d[\text{Ph}^-]}{dt} = K''[\text{Ph}^-]$

Donde $K'' = K [\text{OH}^-]$

Esta simplificación nos lleva a una ecuación de primer orden que corresponde a lo reportado inicialmente donde el valor de la pendiente es igual a $K [\text{OH}^-]$.

- El orden de reacción $n=1$ global.
- Y de pseudo primer orden con respecto a la fenolftaleína.
- La $K=0.0224\text{min}^{-1} [\text{Ph}^-]$.

PRUEBA 2

ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE OXIDACIÓN DE ETANOL POR Cr (VI).

La oxidación de alcoholes por acción del Cr (VI) es utilizada, por ejemplo, en los dispositivos empleados para el control de la alcoholemia en el aire exhalado de los conductores de vehículos.

Aunque la mayoría de las reacciones entre iones son muy rápidas, hay algunas que ocurren a velocidades fácilmente medibles.

Un ejemplo de ello es la oxidación de alcoholes por un agente oxidante, como el cromato. El progreso de la reacción puede ser medido espectrofotométricamente debido a que el color de la disolución cambia de amarillo naranja (HCrO_4^-) a verde (Cr_3^+).

La disminución de la absorbancia del cromato es una medida directa de la variación de la cantidad de alcohol presente en la mezcla.

PROBLEMA.

Obtener el orden de reacción y el valor de la constante de velocidad de la reacción de oxidación del alcohol por acción del Cr (VI), en un reactor intermitente por espectrofotometría.

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

1. Preparar 250 ml de una disolución de HCl 3.6 M
2. Preparar 250 ml de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ $4 \cdot 10^{-3}$ M., aforando con el $[\text{HCl}] = 3.6$ M
3. Preparar 500 ml de dicromato 10^{-3} M por disolución de la primera solución de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.
4. Encender el espectrofotómetro a una longitud de onda de 411 nm y calibrar a una absorbancia de cero utilizando como blanco ácido clorhídrico 3.6 M
5. Transferir la solución de dicromato 10^{-3} M al reactor y comenzar la agitación.

6. Agregar 20 ml de etanol, encender el cronometro en ese momento.
7. Tomar inmediatamente una muestra en una celda para medir la absorbancia y tomar el tiempo en el momento de hacer la lectura.
8. Regrese la muestra al medio de reacción.
9. Tomar las siguientes muestras cada cinco minutos y leer su absorbancia.
10. Seguir la cinética durante 60 min.
11. Repetir a partir del punto 3 para una temperatura de 30°C.

Nota:

La longitud de onda del ion cromato HCrO_4^- se obtiene midiendo la absorbancia de la solución de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ con concentración de $4 \cdot 10^{-3}$ M en un intervalo de 350 hasta 620 nm y determinando la longitud de onda de máxima absorción.

RESULTADOS:

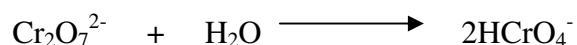
Durante la experimentación se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 4.3 Resultados a las diferentes temperaturas.

Temp=25°C		Temp=30°C	
t (min.)	λ	t (min.)	λ
0	0.91	0.15	0.63
4.47	0.903	5.21	0.618
10.12	0.898	10.15	0.593
15.03	0.847	14.55	0.581
21.49	0.825	20.46	0.561
26.49	0.799	25.18	0.534
31.49	0.779	30.02	0.515
36.38	0.754	35.21	0.5
41.22	0.725	40.22	0.481
45.4	0.729	45.05	0.46
		0.693	0.433
		55.3	0.414
		60.1	0.394

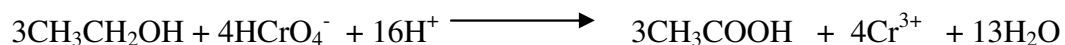
ANALISIS DE RESULTADOS:

Existen dos reacciones que se llevan a cabo en la experimentación, la primera reacción balanceada es la disolución de dicromato de potasio diluida en medio ácido:



Donde el ion HCrO_4^- esta en equilibrio en medio ácido con el ion dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)

La reacción química balanceada que representa la oxidación del alcohol por acción del Cr (VI) es la siguiente:



Las expresiones matemáticas para obtener el orden de reacción son las siguientes.

Orden cero: $X=kt$ (4.5)

Para conocer el valor de X el cual esta representando la concentración del etanol a diferentes tiempos se empleo la siguiente formula.

$$X=A_0-At$$
 (4.6)

Donde A_0 = la concentración o el valor de absorbancia al inicio.

At = concentración o absorbancia en el transcurso del tiempo.

Ejemplo:

$$X = 0.910 - 0.903 = 7 * 10^{-3}$$

Primer Orden:

$$\ln \frac{A_0}{A_0 - X} = Kt$$
 (4.7)

Segundo Orden: $\frac{X}{A_0(A_0 - X)} = kt$ (4.8)

Tabla 4.4 Valores calculados para los diferentes ordenes de reacción a 25°C

TEMP = 25°C				
t (min.)	Absorbancia (nm)	Orden cero X	Orden uno $\ln \frac{A_0}{A_0 - x} = kt$ y = mX	Orden dos $\frac{x}{A_0(A_0 - x)} = kt$ Y = mX
0	0.910	0	0	0
4.47	0.903	$7 \cdot 10^{-3}$	$7.722 \cdot 10^{-3}$	$8.51786 \cdot 10^{-3}$
10.12	0.898	0.025	0.02785	0.03104
15.03	0.847	0.063	0.0717	0.08173
21.49	0.825	0.085	0.0980	0.11322
26.49	0.799	0.111	0.1300	0.15266
31.49	0.779	0.131	0.1554	0.18479
36.38	0.754	0.156	0.1880	0.22735
41.22	0.732	0.178	0.2176	0.26721
45.40	0.725	0.185	0.2272	0.2804
50.40	0.693	0.214	0.2680	0.33788

Con los datos obtenidos se realizan los gráficos para conocer la mejor correlación lineal y así obtener el orden de reacción.

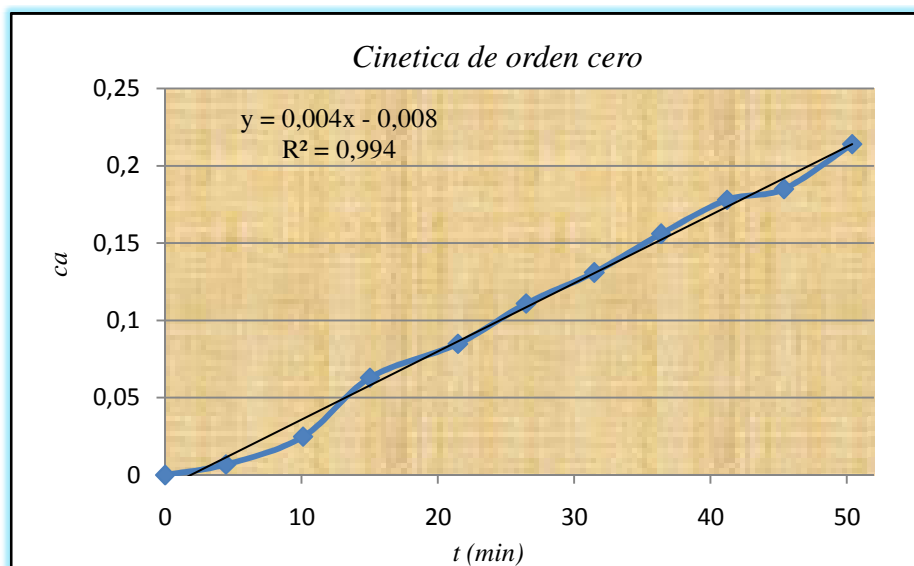


Figura 4.4 Grafica de orden cero para la reacción de la oxidación de etanol por Cr(IV) a 25°C

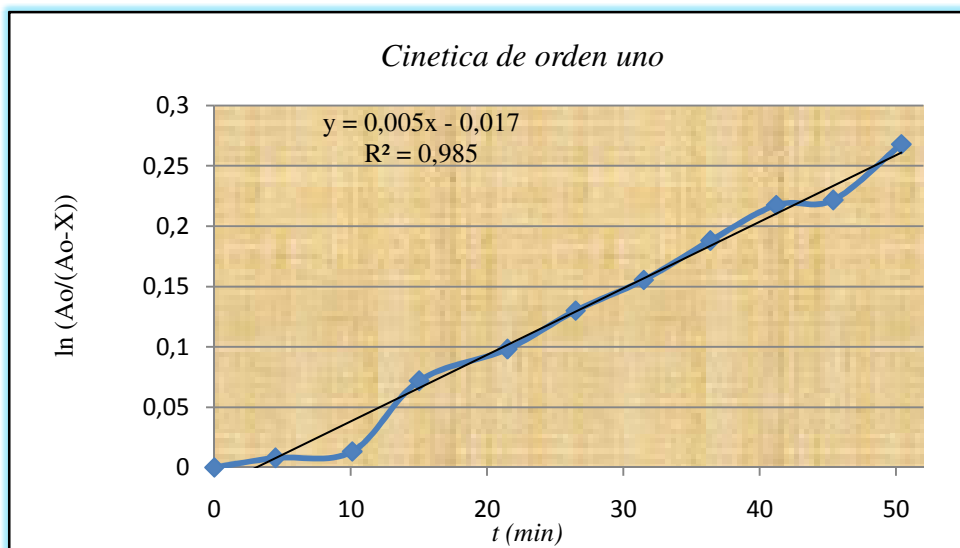


Figura 4.5 Grafica de orden uno para la reacción de la oxidación de etanol por Cr(IV) a 25°C

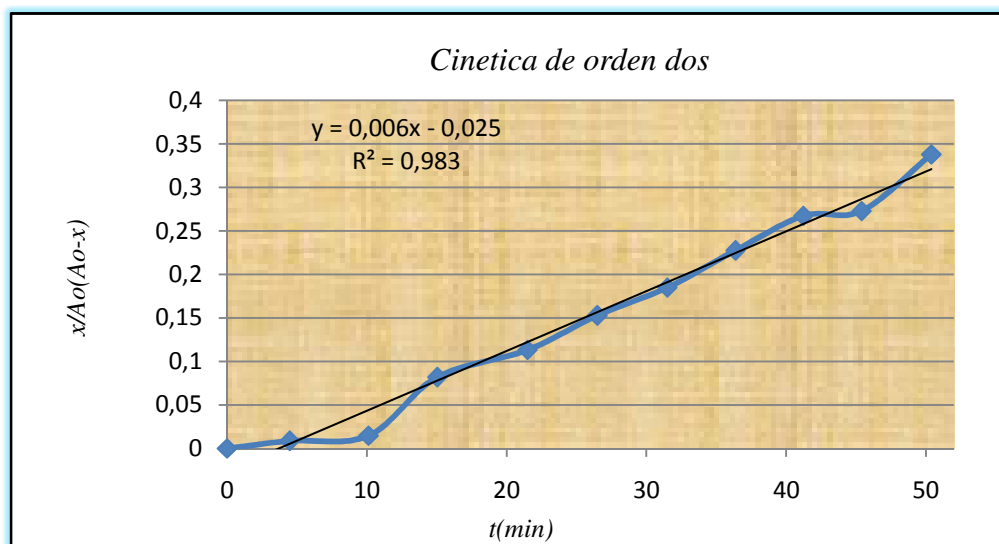


Figura 4.6 Grafica de orden dos para la reacción de la oxidación de etanol por Cr(IV) a 25°C

La mejor correlación corresponde al grafico de orden cero con un valor de $R^2 = 0,994$ por lo tanto este caso que la reacción sigue una cinética de orden cero con un valor de $K = 0,004 \text{ mol L}^{-1} \text{ min}^{-1}$

Tabla 4.5 Valores calculados para los diferentes ordenes de reacción a 30°C

TEMP = 30°C				
t (min.)	Absorbancia (nm)	X	Orden uno $\ln \frac{A_0}{A_0 - x} = kt$ y = mX	Orden dos $\frac{x}{A_0(A_0 - x)} = kt$ Y = mX
0.15	0.630	0	0	0
5.21	0.618	0.012	0.01923	0.0308
10.15	0.593	0.037	0.06052	0.0990
14.55	0.581	0.049	0.08096	0.1338
20.46	0.561	0.069	0.11599	0.1952
25.18	0.534	0.096	0.16532	0.2853
30.02	0.515	0.115	0.20155	0.3544
35.21	0.500	0.13	0.23111	0.4126
40.22	0.481	0.149	0.26985	0.4917
45.05	0.460	0.17	0.31449	0.5866
50.55	0.433	0.197	0.3749	0.7221
55.30	0.414	0.216	0.41985	0.8281
60.10	0.394	0.236	0.4696	0.9507

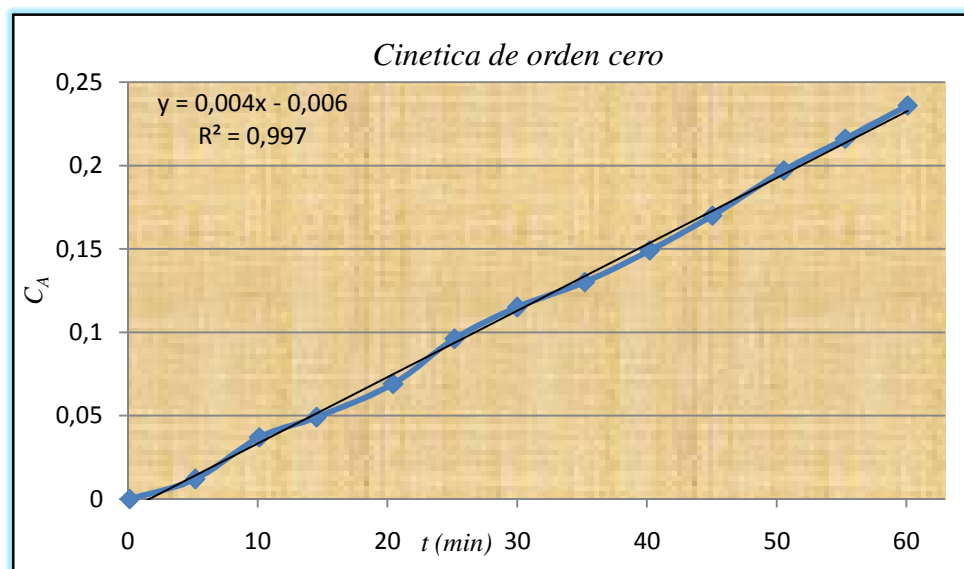


Figura 4.7 Grafica de orden cero para la reacción de la oxidación de etanol por Cr(IV) a 30°C

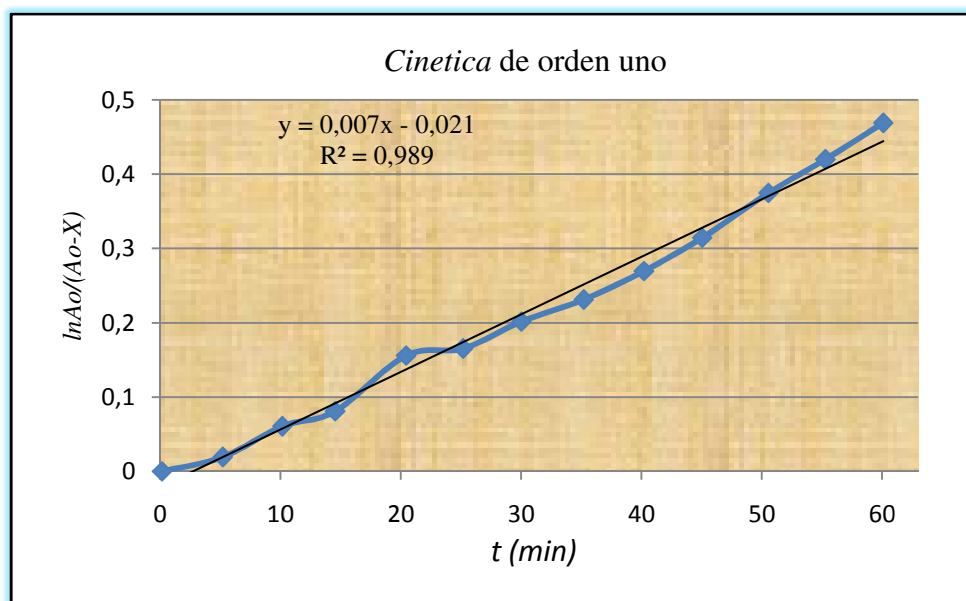


Figura 4.8 Grafica de orden uno para la reacción de la oxidación de etanol por Cr (IV) a 30°C

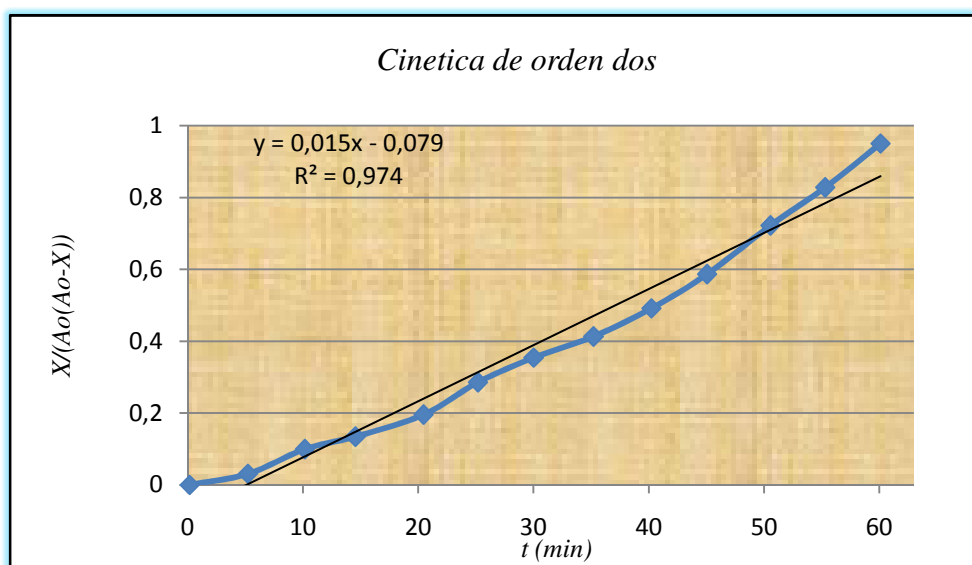


Figura 4.9 Grafica de orden dos para la reacción de la oxidación de etanol por Cr (IV) a 30°C

De acuerdo a las graficas obtenidas para esta temperatura la mejor correlación corresponde al grafico de orden cero con un valor de $R^2 = 0.9977$

Por lo tanto $k = 0.004 \text{ mol L}^{-1} \text{ min}^{-1}$

CONCLUSIONES:

De acuerdo a la experimentación se dice que la reacción de oxidación del etanol por Cr (IV), corresponde a una cinética de orden cero, a ambas temperaturas de trabajo.

De acuerdo a los gráficos obtenidos y a al valor de las correlaciones se puede observar que la oxidación del etanol presenta una buena opción para realizarla a nivel laboratorio ya que se obtienen valores de R^2 hasta de 0.9977 lo que nos indica que puede ser reproducible.

PRUEBA 3

NEUTRALIZACION DE ACIDO ACETICO CON TABLETAS COMERCIALES ANTIACIDO

El pH del líquido estomacal humano es aproximadamente de uno. Este pH tan ácido se debe al HCl secretado por miles de células de la pared del estómago que se especializan en transportar H_3O^+ (ac) y Cl^- (ac) de la sangre. El propósito principal de este ácido es suprimir el crecimiento de bacterias y ayudar a la digestión de ciertos alimentos.

Los antiácidos son medicamentos cuya finalidad es aliviar las molestias originadas por un exceso de ácido en el estómago. Realizan su función, reaccionando con el ácido clorhídrico del estómago para formar sal y agua, según una reacción de neutralización, reduciendo de esta forma la acidez gástrica.

El mecanismo genérico de cualquier antiácido es el estómago es el siguiente:



En este transcurso las bases contenidas en los antiácidos actúan sobre el ácido en un proceso de neutralización para dar una sal neutra.

PROBLEMA.

Determinar la constante de reacción en un sistema ácido-base por lo menos a tres diferentes temperaturas, empleando una tableta comercial antiácido para la neutralización de ácido acético, la reacción es seguida con un pH-metro digital en el reactor experimental.

DESARROLLO EXPERIMENTAL:

1. Preparar una solución con 25 ml de Ácido acético (vinagre comercial) y aforar a 500 ml con agua destilada.
2. Calibrar el electrodo con solución buffer a pH=6.
3. Introducir una tableta antiácida al reactor.

4. Verter la solución de ácido acético y activar el sistema de agitación.
5. Tomar muestras de la solución en un vaso de pp de 50 ml y anotar la lectura de pH. La muestra se tomara cada 2 min. Por un lapso de media hora aproximadamente o hasta que el valor de pH sea constante.
6. Lavar perfectamente el equipo y repetir el mismo procedimiento a temperaturas de 30 y 35 °C, la primera experimentación se llevara acabo a temperatura ambiente.

Nota:

1. Se sugiere improvisar una toma de muestra con un popote, en una de las entradas al reactor sellando con cinta de aislar. Esto debido a que se está trabajando con un sólido el cual obstruye la toma de muestra que tiene el reactor impidiendo un buen desempeño.
2. Se toma la muestra en un vaso de pp. de 50 ml, una vez registrada la lectura de pH, se regresa al reactor para seguir reaccionando.
3. Con el fin de reducir el tiempo de respuesta del electrodo cuando se trabaja temperaturas diferentes a la del ambiente se sugiere mantener el electrodo a la misma temperatura de trabajo, calentando o enfriando la solución que contenga al electrodo, para una mejor respuesta.
4. Tener cuidado de tomar la lectura siempre a la misma temperatura.

RESULTADOS:

Los datos que se obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.6 Resultados experimentales a diferentes temperaturas.

T=25°C		T=30°C		T=35°C	
t (min.)	pH	t (min.)	pH	t (min.)	pH
0	3.61	0	3.60	0	3.57
1.39	3.66	2.10	3.71	2.00	3.73
6.09	3.71	4.05	3.81	3.33	3.80
9.02	3.79	5.00	3.84	4.43	3.82
13.54	3.82	6.40	3.95	6.18	3.90
16.27	3.86	8.09	3.92	8.22	3.98
18.52	3.91	9.03	4.06	10.29	4.03
22.04	3.94	10.04	4.07	11.59	4.07
25.46	3.97	13.25	4.12	14.04	4.11
32.26	4.01	15.41	4.18	17.44	4.13
35.52	4.05			21.26	4.16
				25.40	4.23
				30.20	4.28
				35.30	4.31

ANALISIS DE RESULTADOS:

La reacción que se esta llevando a cabo en la operación es una reacción de neutralización del ácido acético con una base débil en este caso un ion carbonato ($\text{CO}_3^{=}$), la reacción representativa de este sistema es la siguiente:



Para conocer la constante de reacción se recurrió al método diferencial ya que se cuenta con datos experimentales de diferenciación de concentración en función del tiempo. Las ecuaciones empleadas son las siguientes:

Orden Cero. El orden cero significa que la velocidad es independiente de la concentración, esto puede presentarse en dos situaciones: cuando la velocidad es intrínsecamente independiente de la concentración y cuando la especie es de tal manera abundante que su

concentración es prácticamente constante durante la reacción; la ecuación se representa de la siguiente manera:

$$-\frac{dC_A}{dt} = k \quad (4.9)$$

Integrando obtenemos lo siguiente:

$$(C_{A0} - C_A) = Kt \quad (4.10)$$

Primer Orden: Para una velocidad de primer orden se tienen las siguientes ecuaciones:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (4.11)$$

Integrando se obtiene:

$$\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = Kt \quad (4.12)$$

Segundo Orden: En caso de que la reacción fuera de segundo orden se hará uso de las siguientes ecuaciones:

$$-\frac{dC_A}{dt} = KC_A^2 \quad (4.13)$$

Integrando la ecuación se tiene:

$$\left[\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} \right] = Kt \quad (4.14)$$

Para conocer la concentración de los protones causantes de la acidez en el medio se hace uso de la siguiente ecuación:

$$pH = -\log[H^+] \quad (4.15)$$

Despejando a la concentración se tiene lo siguiente:

$$[H^+] = 10^{-pH} \quad (4.16)$$

El valor de C_{A0} se tomo como la primera lectura de pH antes de empezar a reaccionar con la tableta.

Aplicando las ecuaciones anteriores para cada orden de reacción se analizaron los resultados obteniendo lo siguiente:

Análisis de resultados a 25°C:

En las columnas se anota únicamente el valor correspondiente a Y ya que el tiempo (X) permanece constante.

Tabla 4.7 Valores calculados para los diferentes ordenes de reacción a 25°C

t (min.)	pH	C_A	Orden cero $(C_{A0}-C_A)=Kt$ y =mX	Primer orden $\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = Kt$ y =mX	Segundo orden $\left[\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} \right] = Kt$ y =mX
0	3.61	$2.4547 \cdot 10^{-4}$	0	0	0
1.39	3.66	$2.1877 \cdot 10^{-4}$	$2.67 \cdot 10^{-5}$	0.1151	-497.193
6.09	3.71	$1.9498 \cdot 10^{-4}$	$5.049 \cdot 10^{-5}$	0.2302	-1054.91
9.02	3.79	$1.6218 \cdot 10^{-4}$	$8.329 \cdot 10^{-5}$	0.41446	-2092.17
13.54	3.82	$1.5135 \cdot 10^{-4}$	$9.412 \cdot 10^{-5}$	0.48357	-2533.38
16.27	3.86	$1.3803 \cdot 10^{-4}$	$1.0744 \cdot 10^{-4}$	0.5757	-3170.98
18.52	3.91	$1.2302 \cdot 10^{-4}$	$1.2245 \cdot 10^{-4}$	0.6908	-4054.94
22.04	3.94	$1.1481 \cdot 10^{-4}$	$1.3066 \cdot 10^{-4}$	0.7598	-4636.22
25.46	3.97	$1.0715 \cdot 10^{-4}$	$1.3832 \cdot 10^{-4}$	0.8289	-5258.89
32.26	4.01	$9.7723 \cdot 10^{-5}$	$1.47747 \cdot 10^{-4}$	0.9510	-6159.18
35.52	4.05	$8.9125 \cdot 10^{-5}$	$1.56345 \cdot 10^{-4}$	1.0131	-7146.37

Con los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones correspondientes se realizan las siguientes graficas para obtener la correlación lineal para cada orden de reacción determinar a que orden pertenece.

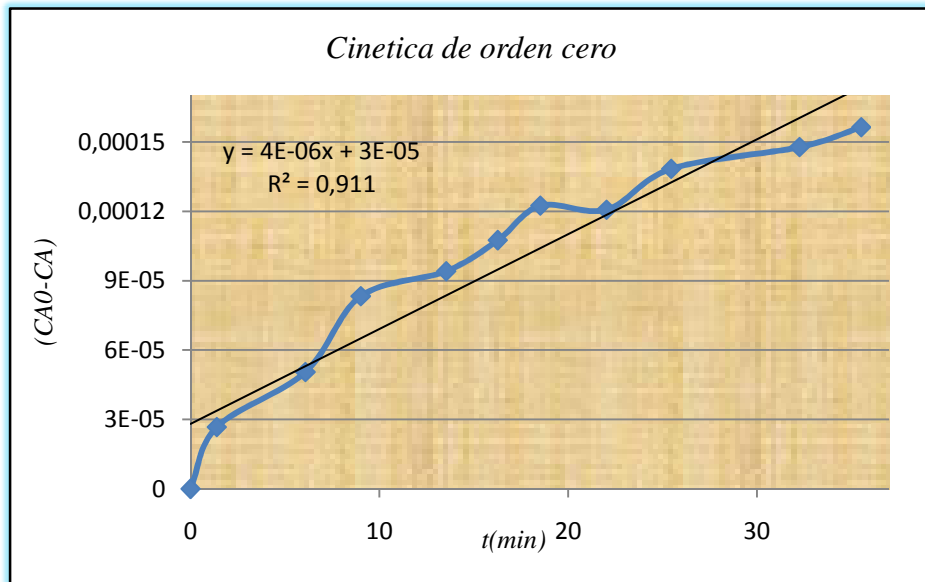


Figura 4.10 Grafica de orden cero para la neutralización de CH₃COOH a 25 °C

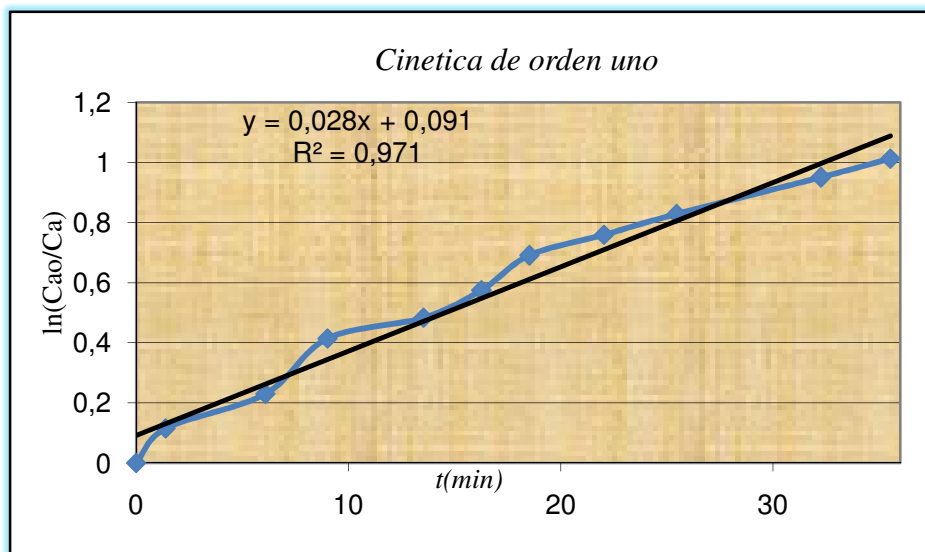


Figura 4.11 Grafica de orden uno para la neutralización de CH₃COOH a 25 °C

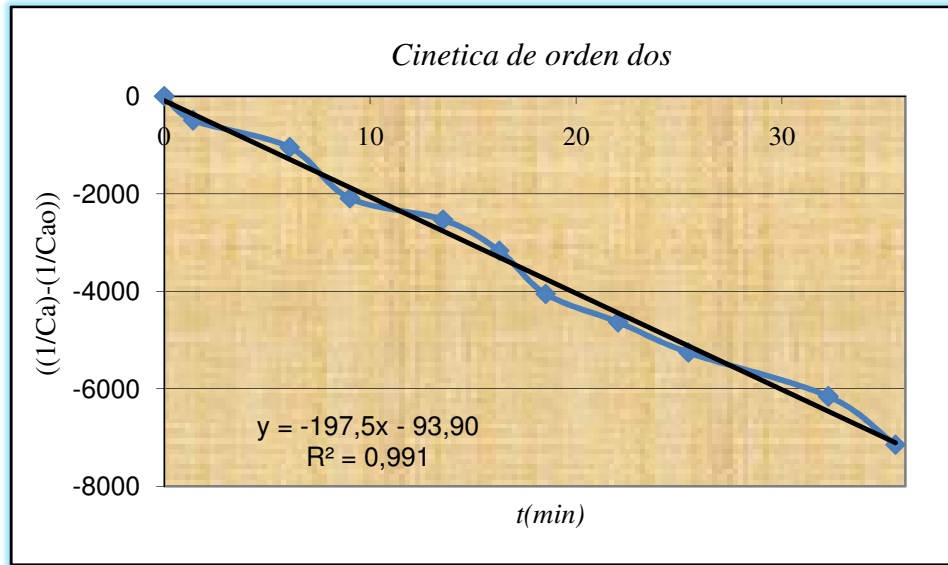


Figura 4.12 Grafica de orden dos para la neutralización de CH₃COOH a 25 °C.

Como se puede observar a través de los gráficos para esta temperatura la reacción es de segundo orden con base en el mayor coeficiente de correlación con un valor encontrado de $r^2 = 0.9919$ y el valor de la constante $K = -197.5 \text{ L mol}^{-1} \text{ min.}^{-1}$

Análisis de resultados a 30°C

Tabla 4.8 Valores calculados para los diferentes ordenes de reacción a 30°C

t (min.)	pH	C _A	Orden cero (C _{A0} -C _A)=KT Y =mX	Primer orden $\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = Kt$ Y =mX	Segundo orden $\left[\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} \right] = Kt$ Y =mX
0	3.60	2.5118*10 ⁻⁴	0	0	0
2.10	3.71	1.9498*10 ⁻⁴	5.62*10 ⁻⁵	0.25327	-1147.52
4.05	3.81	1.5488*10 ⁻⁴	9.63*10 ⁻⁵	0.48351	-2475.40
5.00	3.84	1.4454*10 ⁻⁴	1.0664*10 ⁻⁴	0.55261	-2937.29
6.40	3.95	1.1220*10 ⁻⁴	1.3898*10 ⁻⁴	0.80588	-4931.44
8.09	3.92	1.2022*10 ⁻⁴	1.3096*10 ⁻⁴	0.73684	-4336.87
9.03	4.06	8.7096*10 ⁻⁵	1.6408*10 ⁻⁴	1.05915	-7500.37
10.04	4.07	8.5113*10 ⁻⁵	1.6606*10 ⁻⁴	1.08219	-7767.87
13.25	4.12	7.5857*10 ⁻⁵	1.7532*10 ⁻⁴	1.19731	-9201.49
15.41	4.18	6.6069*10 ⁻⁵	1.8511*10 ⁻⁴	1.3354	-11154.48

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a los valores calculados

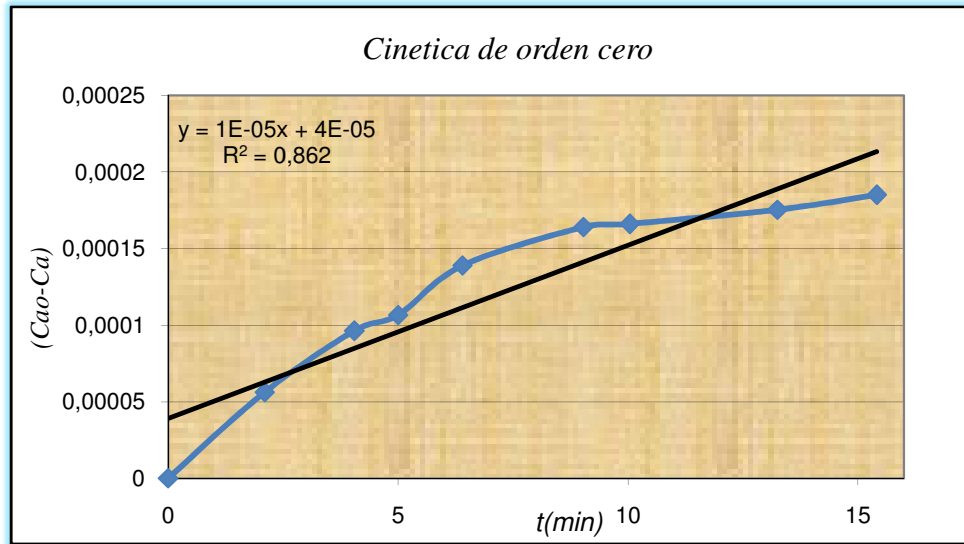


Figura 4.13 Gráfica de orden cero para la neutralización de CH_3COOH a 30°C

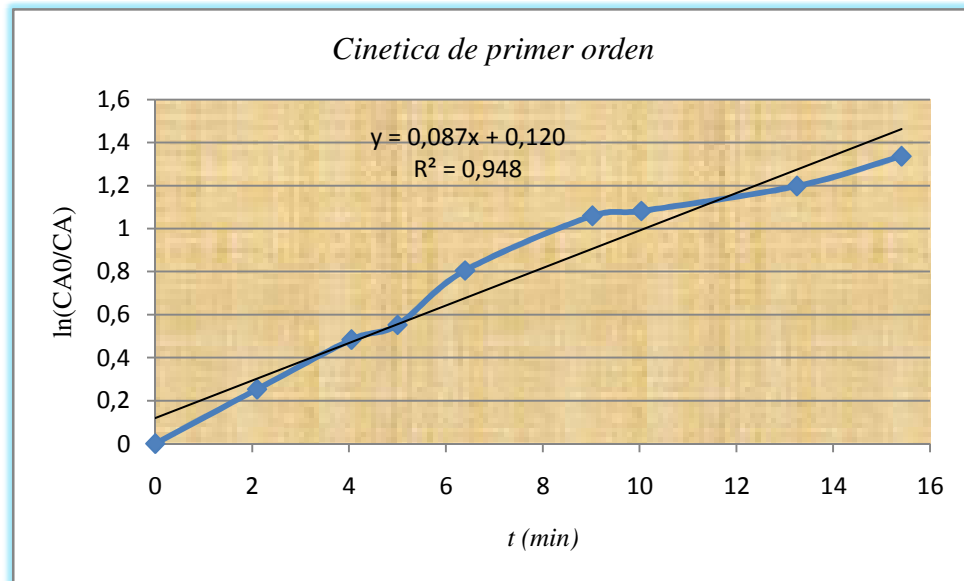


Figura 4.14 Gráfica de orden uno para la neutralización de CH_3COOH a 30°C

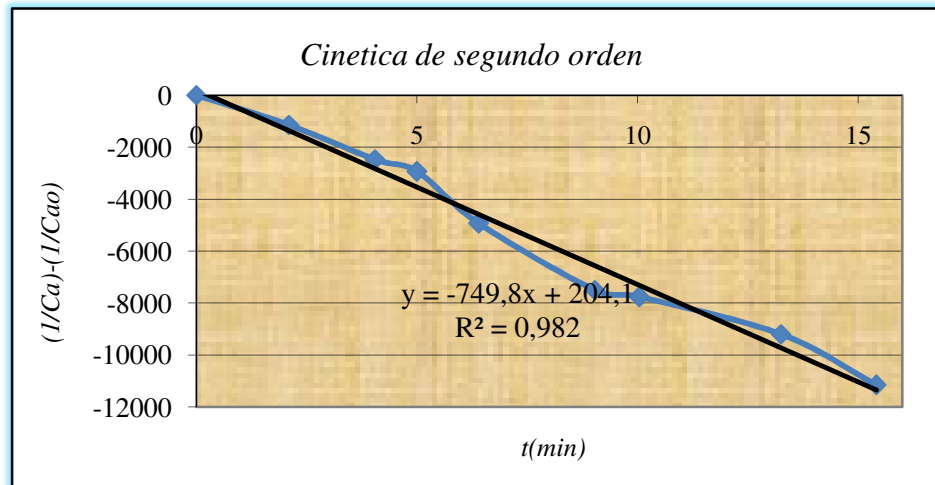


Figura 4.15 Grafica de orden dos para la neutralización de CH₃COOH a 30 °C

La mejor correlación la presenta la ecuación que corresponde a orden dos con una $r^2=0.9825$ y un valor de $K=-749.89 \text{ L mol}^{-1} \text{ min}^{-1}$

Análisis de resultados para 35°C

Tabla 4.9 Valores calculados para los diferentes ordenes de reacción a 35°C

t (min.)	pH	C _A	Orden cero (C _{A0} -C _A)=KT Y =mX	Primer orden $\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = Kt$ Y =mX	Segundo orden $\left[\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} \right] = Kt$ Y =mX
0	3.57	2.6915*10 ⁻⁴	0	0	0
2.00	3.73	1.8620*10 ⁻⁴	8.295*10 ⁻⁵	0.3684	-1655.16
3.33	3.80	1.5848*10 ⁻⁴	1.1067*10 ⁻⁴	0.5296	-2594.54
4.43	3.82	1.5135*10 ⁻⁴	1.178*10 ⁻⁴	0.5756	-2891.80
6.18	3.90	1.2589*10 ⁻⁴	1.4326*10 ⁻⁴	0.7598	-4228.04
8.22	3.98	1.0471*10 ⁻⁴	1.6444*10 ⁻⁴	0.9440	-5834.78
10.29	4.03	9.3325*10 ⁻⁵	1.7582*10 ⁻⁴	1.0591	-6999.84
11.59	4.07	8.5113*10 ⁻⁵	1.8403*10 ⁻⁴	1.1528	-8033.68
14.04	4.11	7.7624*10 ⁻⁵	1.9152*10 ⁻⁴	1.2433	-9167.21
17.44	4.13	7.4131*10 ⁻⁵	1.95019*10 ⁻⁴	1.2894	-9774.23
21.26	4.16	6.9183*10 ⁻⁵	1.9996*10 ⁻⁴	1.3585	-10739.01
25.40	4.23	5.8884*10 ⁻⁵	2.1026*10 ⁻⁴	1.5196	-13267.14
30.20	4.28	5.2480*10 ⁻⁵	2.1667*10 ⁻⁴	1.6348	-15339.47

35.30	4.31	$4.8977 \cdot 10^{-5}$	$2.2017 \cdot 10^{-4}$	1.7039	-16702.34
-------	------	------------------------	------------------------	--------	-----------

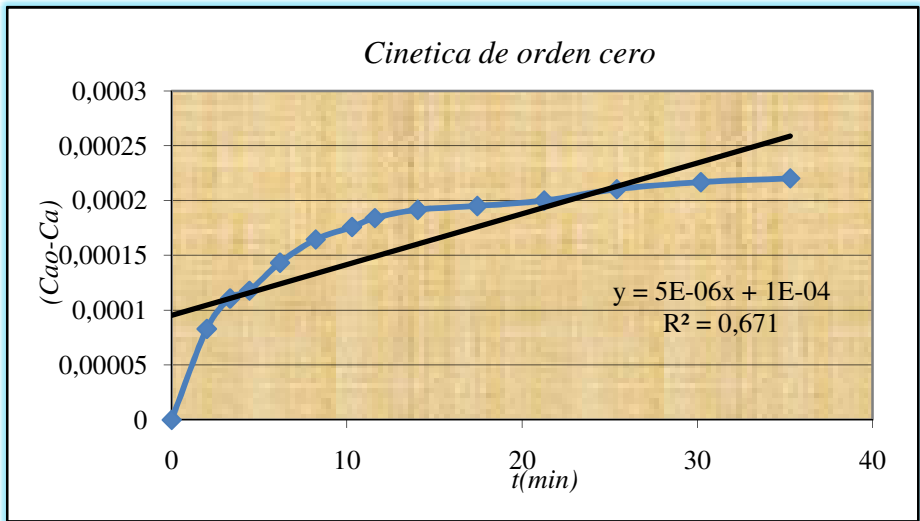


Figura 4.16 Grafica de orden cero para la neutralización de CH_3COOH a $35\text{ }^\circ\text{C}$

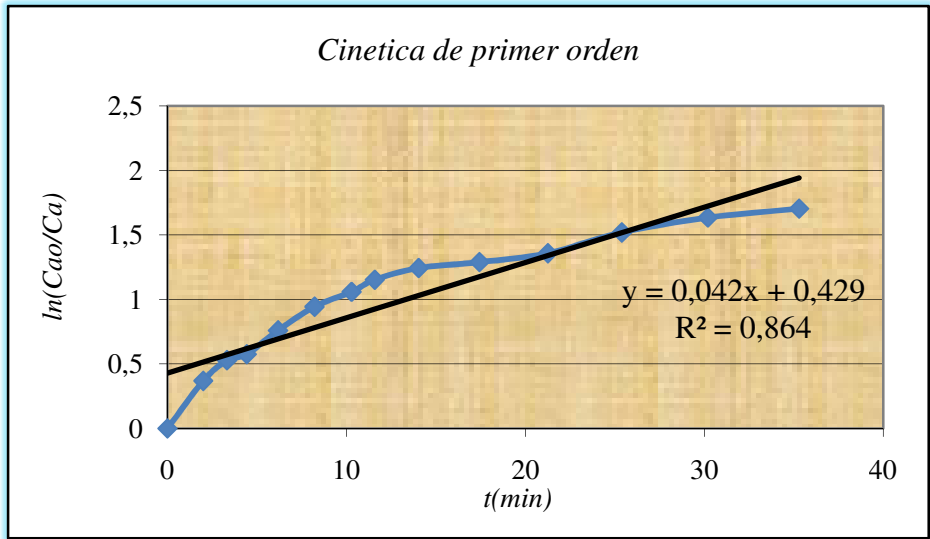


Figura 4.17 Grafica de orden uno para la neutralización de CH_3COOH a $35\text{ }^\circ\text{C}$

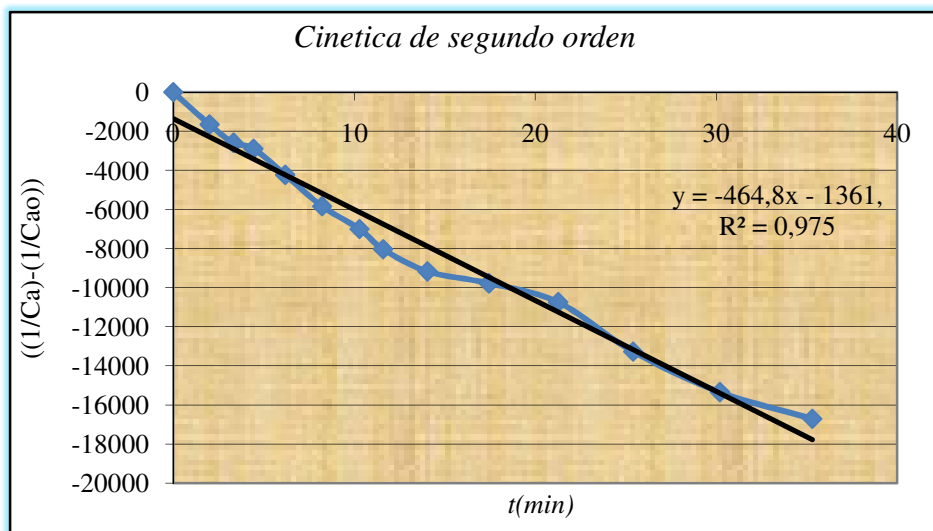


Figura 4.18 Grafica de orden dos para la neutralización de CH₃COOH a 25 °C

Para esta temperatura la mejor correlación se presenta en las ecuaciones de segundo orden con un valor de $R^2 = 0.9753$ y un valor de $K = -464.82 \text{ L mol}^{-1} \text{ min.}^{-1}$

Efecto de la temperatura-ecuación de Arrhenius.

La variación del orden de reacción solo se ha estudiado hasta este punto únicamente considerando la influencia de la concentración sobre la velocidad.

Para muchas reacciones la expresión de velocidad puede escribirse como producto de un factor dependiente de la temperatura que se ajusta a la ecuación de Arrhenius.

$$K = A[\text{reactivos}] \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4.17)$$

Aplicando logaritmo natural a la ecuación tenemos:

$$\ln K = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (4.18)$$

Los valores de K se conocen de las ecuaciones anteriores por lo que se puede obtener un gráfico de lnK vs 1/T.

Tabla 4.10 Valores para Ec. De Arrhenius

K (L mol ⁻¹ min ⁻¹)	T°C	lnK	1/T
-197.5	298	5.2857	3.3557*10 ⁻³
-749.89	303	6.6199	3.300*10 ⁻³
-464.82	308	6.1416	3.2467*10 ⁻³

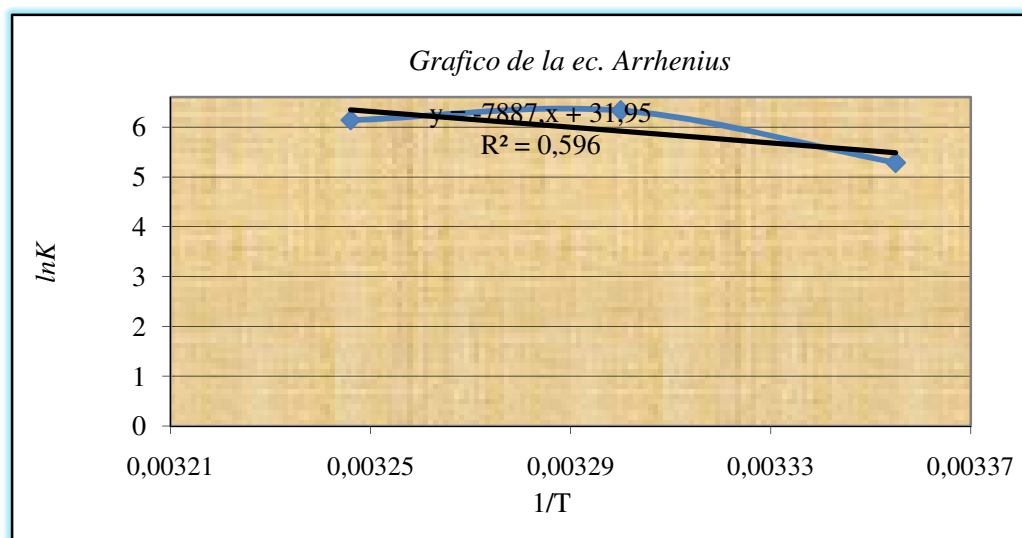


Figura 4.19 Gráfico de Arrhenius para la reacción de neutralización de CH₃COOH.

CONCLUSIONES:

Mediante la experimentación se pudo observar que el estudio de la cinética de reacción involucrando el método de pH es viable ya que no presenta gran dificultad en la toma de lectura, el único inconveniente que se puede presentar, es que se está trabajando con un sistema en el cual este involucrado un reactivo sólido el cual pueda obstruir la toma de muestra evitando así la salida del liquido, este inconveniente se puede resolver fácilmente improvisando una toma de muestra.

Se determino que la constante de reacción para este sistema acido-base corresponde a orden dos alas tres temperaturas propuestas, con buenas correlaciones experimentales de .9919, 9825y 0.975.

La reacción seguida con un pH-metro digital en el reactor experimental no presento dificultad alguna durante la experimentación, solo se sugiere mantener el electrodo a la temperatura de trabajo para reducir el tiempo de repuesta.

En el estudio de la neutralización del ácido acético (vinagre), se pudo observar que algunos productos efervescentes reaccionan de manera muy rápida por lo que es complicado medir el tiempo de reacción, por lo cual se recomienda utilizar tabletas masticables antiácido que proporcionan un tiempo razonable de reacción.

CAPITULO 5 “CONCLUSIONES”

Al concluir este trabajo de titulación, podemos decir que se cumplieron los objetivos planteados inicialmente, ya que se realizó un diseño para el reactor de vidrio y se aplicó al equipo que se encontró parcialmente instalado y con un mínimo de modificaciones se logro optimizar su funcionamiento, para el desarrollo de prácticas experimentales.

El prototipo habilitado servirá a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química que cursan las asignaturas del Laboratorio Experimental Multidisciplinario para la realización de diversas prácticas de laboratorio en un mismo equipo empleando diversas técnicas analíticas, en un reactor experimental confiable y seguro.

Para comprobar que el equipo instalado funcionara correctamente, se propusieron y se adaptaron 3 pruebas experimentales para el reactor, en donde se pudo comprobar un buen funcionamiento de los equipos instalados como el baño de temperatura y el termopar, además de un buen desempeño del motor y los equipos auxiliares para el seguimiento de la reacción. Esto se vio reflejado en los resultados de las pruebas, ya que se obtuvieron buenas correlaciones lineales.

Se obtuvieron datos cinéticos de las tres pruebas realizadas en el reactor en las cuales el orden de reacción experimental coincide con el orden de reacción teórico, aunque el valor de la constante no es el mismo debido a que las condiciones de trabajo son diferentes a las empleadas en la literatura.

Finalmente queda abierta la opción de seguir mejorando el equipo, como se mostró en el diseño del capítulo 2, debido a que por falta de tiempo no se desarrollaron en este trabajo.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda en un futuro la instalación de los tanques de alimentación junto con sus bombas dosificadoras para obtener un proceso automatizado, como se pretendió en el diseño propuesto en el capítulo 2 de este trabajo.
- ✓ Se recomienda la adquisición de una celda de conductividad con electrodo delgado, que permitan adaptarse la boquilla modificada del reactor con el propósito de obtener mejores resultados experimentales.
- ✓ Si bien el reactor es seguro no excediendo las condiciones de trabajo máximas, es importante la instalación de la válvula de seguridad para seguridad del usuario.
- ✓ La adquisición de equipos diferentes a los disponibles en el laboratorio (espectrofotómetros, absorción atómica, cromatografos, etc.), que permitan diversificar las técnicas analíticas empleadas para la obtención de los datos experimentales en el reactor.
- ✓ Antes de que se realice un proyecto experimental en el reactor es importante hacer un estudio de disponibilidad y costos de reactivos, equipos auxiliares disponibles en el laboratorio y condiciones experimentales de trabajo.
- ✓ Para que el reactor no presente problemas se recomienda contar con un programa semestral de mantenimiento preventivo de acuerdo al uso del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chang, R., W. College, "Química", 7ª ed., Ed; McGraw Hill, pp. 510-511
2. Denbigh, K. G., J. C. R. Turner, "Introducción a la Teoría de los Reactores Químicos", Ed; Limusa México 1990, pp. 133-136
3. Flogler Scott, "Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas", 3ª ed., Ed; Prentice Hall México 2001, pp. 6-10
4. Gonzales, P., M. C. San Martín, "Operaciones Básicas de Laboratorio", Ed; Grijalba, pp. 9-14
5. Laidler, Kerth., J. H. Meiser, "Fisicoquímica", Ed; CECSA México 2002, pp. 353-361.
6. Levenspiel O, "Ingeniería de las Reacciones Químicas", 8ª ed., Ed; Reverte Barcelona 1986, pp. 84-86
7. McCabe, W., J. C. Smith, "Operaciones Básicas de Ingeniería Química", 4ª ed., Ed; McGraw-Hill, pp. 246-246
8. Perry, R., D. W. Green., J. O. Maloney, "Manual del Ingeniero Químico", 6ª ed., Ed, McGraw –Hill México 2001, pp. 4-4 a 4-7
9. Russell, T.W.F., M. M. Denn "Introducción al análisis en Ingeniería Química", Ed; Limusa México 1976, pp. 189
10. Smith, J.M, "Ingeniería de la Cinética Química", 6ª ed., Ed, Continental México D.F 1991, pp. 26,27,61-73, 110
11. Cornely, K., E. Crespo., M. Earley., R. Kloter., A. Levesque. and M. Pickering, "Kinetic of Papain", Journal of Chemical Education, 76 **th**, 5, May 1991, pp. 644-645.
12. Finlayson, M.E. and D.G. Lee, "Oxidation of Ethanol by Chromium (VI), a kinetics experiment for freshmen", Journal of Chemical Education, 48 **th**, 7, July 1971, pp. 473-474.
13. Hurst, M.O. and J.W. Hill, "Kinetics of the reaction on p-Nitrobenzyl Chloride with Cyanide ion", Journal of Chemical Education, 77 **th**, 5 May 1993, pp. 429-431.

14. Mendez, A. M., L.M. Madeira., F. D. Magalhaes, J. M. Sausa, "Chemical reaction engineering lab experiment", Chemical Engineering Education, summer 2004, pp. 228-234.
15. Mowry. S. and P. J. Ogren, "Kinetics of methylene blue reduction by ascorbic acid", Journal of Chemical Education, 76 th, 7 July 1999, pp. 970-974.
16. Nicholson L., "Kinetics of the fading of phenolphthalein in alkaline solution", Journal of Chemical Education, 66 th. 9 September 1989, pp. 725-726.
17. Nowicki, W. and G. Nowicka, "Coagulation kinetics", Journal of Chemical Education, 68 th, 6 June 1991, pp. 523-525
18. Sanders, S.A. and J.T. Sommerfeld, "A laboratory experiment on combined mass transfer and kinetic", Chemical Engineering Education, spring 1989, pp. 86-91.
19. Shaker, H. and C. Erkey, "Kinetics of Hydrolysis of Acetic Anhydride by In-situ Ftir Spectroscopy", Chemical Engineering Education, winter 2005, pp. 56-61.
20. Picciotti, M. and F. Picciotti, "Selecting Laboratory Reactors" CEP, August 2007, pp. 41-44.

REFERENCIAS ELECTRONICAS.

21. Trallero and shlee. Fabricación y suministro de aparatos de laboratorio. 02 Febrero 2009. http://www.tralleroschlee.com/reactores_quirolab.
22. Parr Instrument Company. 02 de Febrero 2009. <http://www.parrinst.com/>
23. Engineering Teaching & Research Equipment.21 Febrero 2009. http://www.perrytecheducational.com/index.php?cPath=29_42
24. Organización en Válvulas, S.A de C.V. 11 Marzo 2009. www.oval.com.mx/vayremex.htm.
25. Motores y motorreductores de Aire Comprimido. 18 Marzo 2009.
26. <http://www.haskel.es/motores.htm>
27. Brookfiel Catalogo 2009.18 Marzo 2009. <http://www.brookfielengineering.com/products/accessories/index.asp>.

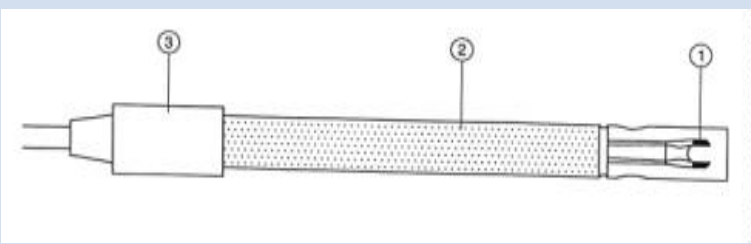
ANEXOS

I.- FICHA DEL BAÑO DE TEMPERATURA (Brookfield modelo TC-502D).....	96
II.- FICHA DE ESPECIFICACIONES DEL ELECTRODO DE CONDUCTIVIDAD....	97
III.- FICHA DE ESPECIFICACIONES DEL ELECTRODO DE pH.....	98
IV.- ESPECIFICACIONES DEL REACTOR DE VIDRIO COREGIDO.....	99
V.- ESPECIFICACIONES DEL ESPECTROFOTÓMETRO (Spectronic 20 Genesys).	100
VI.- FICHA DE SEGURIDAD DEL ETANOL.....	101
VII.- FICHA DE SEGURIDAD DEL HIDROXIDO DE SODIO.....	102
VIII.- FICHA DE DICROMATO DE POTASIO.....	103
I X.- FICHA DE SEGURIDAD DEL ACIDO ACETICO.....	104
X.- FICHA DE SEGURIDAD DEL ACIDO CLORHIDRICO.....	105

ANEXO I FICHA DEL BAÑO DE TEMPERATURA (Brookfield modelo TC-502D)

EQUIPO: BAÑO DE TEMPERATURA	
Brookfield modelo TC-502D	
DATOS BASICOS	
Rango de temperatura	
De -20 a 150°C	
Estabilidad de temperatura	
0.05°C	
Dimensiones:	
41x42x39cm	
Control: Digital	
Capacidad 6 litros	
Alimentación eléctrica	
220v 50/60 Hz	
Peso:	
34 Kg	

ANEXO II FICHA DE ESPECIFICACIONES DEL ELECTRODO DE CONDUCTIVIDAD

Equipo: Electrodo de conductividad	
Escala: 0 a 19.99 mS/cm ²	
Escala de Temperatura	
-10 a 110°C	
Intervalos:	
Deriva térmica a 0.03%	
Alimentación:	
220 v ± 10% A.C. 50/60 Hz	
Dimensiones: 13cm largo	
Peso: 15g	
<p>Descripción de la celda:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 Placas de medida, platino recubierto o grafito. 2 Cuerpo: Vidrio 3 Cabezal 	
<p>Precauciones:</p> <p>Periodos cortos: mantener la celda sumergida en agua destilada.</p> <p>Periodos largos: mantener en seco y en soporte.</p>	

ANEXO III FICHA DE ESPECIFICACIONES DEL ELECTRODO DE pH.

Equipo: Electrodo Ph	
<p>Resolución:</p> <p>0.001 pH, 0.1 mV</p>	
<p>Sensor de temperatura integrado. (0 a 80°C)</p>	
<p>Rango de Ph</p> <p>0 a 12</p>	
<p>Alimentación:</p> <p>220 V ± 10% A.C. 50/60 Hz</p>	
<p>Dimensiones: 20 cm largo</p>	
<p>Peso:200g</p>	
<p>Descripción del electrodo:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.- Membrana 2.-Líquido interno 3.-Diafragma 4.- Elemento de referencia 5.-Electrolito de referencia. 	
<p>Precauciones:</p> <p>Antes de medir o calibrar, se debe enjuagar el electrodo con agua destilada. Nunca debe tocarse el electrodo con los dedos, papel ni otra cosa que no sea agua.</p>	

ANEXO IV ESPECIFICACIONES DEL REACTOR DE VIDRIO.

Equipo: Reactor de vidrio “Cemco”		
<p>Datos Básicos:</p> <p>Material: Vidrio Orientación: Vertical Número de boquillas: 8</p>		
<p>Designación Servicio</p> <p>E-2 Alimentación de reactivos E-3 Inertes E-4 Adición de reactivos 2 E-5 Retorno de líquido calefactor. E-6 Termopar E-7 Toma de muestra E-8 Manómetro</p>		
<p>Accesorios:</p> <p>Manómetro Termopar</p>		
<p>Datos de operación:</p> <p>Volumen: 1 L Rango de temperatura: 0 – 100°C Presión (psi):200 Reacción: Fase líquida Líquido calefactor: Agua</p>		
<p>Calidad de agitación: Buena</p>		
<p>Precauciones:</p> <p>No rebasar Temperatura y Presión indicada.</p>		

ANEXO V ESPECIFICACIONES DEL ESPECTROFOTÓMETRO (Spectronic 20 Genesys)

Equipo: Espectrofotómetro Spectronic 20 Genesys	
Ancho de ranura espectral: 8 nm	
Sistema óptico: Rejilla de difracción 1200 líneas/nm	
Longitud de onda: Rango: 325 a 1100nm Exactitud: ± 2.0 nm	
Pantalla: Cristal liquido, 20 caracteres, 2 líneas.	
Fotométrico: Rango: 0 a 125% T -0.1 a 2.5 A 0 a 1999 C Exactitud: 0.003 A desde 0.0 a 0.3 A 3	
Dimensiones: 30cm x 33cm x 19 cm	
Peso: 4.5 KG	

ANEXO VI FICHA DE SEGURIDAD DEL ETANOL

TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes fuertes.	Polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades, dióxido de carbono.
EXPLOSION 	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
INHALACION	Tos, somnolencia, dolor de cabeza, fatiga.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo.
PIEL	Piel seca.	Guantes protectores	Quitar las ropas contaminadas, aclarar y lavar la piel con agua y jabón.
PROPIEDADES FISICAS	Punto de ebullición: 79°C Punto de fusión: -117°C Densidad relativa (agua = 1): 0.8 Solubilidad en agua: Miscible Presión de vapor, kPa a 20°C: 5.8 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.6	Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.03 Punto de inflamación: 13°C (c.c.) Temperatura de autoignición: 363°C	

ANEXO VII FICHA DE SEGURIDAD DEL HIDROXIDO DE SODIO



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<p>INCENDIO</p> 	<p>No combustible. El contacto con la humedad o con el agua, puede generar el suficiente calor para producir la ignición de sustancias combustibles.</p>		<p>En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores</p>
<p>EXPOSICIÓN</p>		<p>¡EVITAR LA DISPERSION DEL POLVO! ¡EVITAR TODO CONTACTO!</p>	<p>¡CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS!</p>
<p>INHALACION</p>	<p>Corrosivo. Sensación de quemazón, tos, dificultad respiratoria.</p>	<p>Extracción localizada o protección respiratoria</p>	<p>Aire limpio, reposo, posición de semi incorporado, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica.</p>
<p>PIEL</p>	<p>Corrosivo. Enrojecimiento, graves quemaduras cutáneas, dolor.</p>	<p>Guantes protectores y traje de protección.</p>	<p>Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica.</p>
<p>PROPIEDADES FISICAS</p>	<p>Punto de ebullición: 1390°C</p> <p>Punto de fusión: 318°C</p> <p>Densidad relativa (agua = 1): 2.1</p>	<p>Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 109</p> <p>Presión de vapor, kPa a 739°C: 0.13</p>	

ANEXO VIII DICROMATO DE POTASIO

TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible pero facilita la combustión de otras sustancias.	NO poner en contacto con sustancias inflamables.	En caso de incendio en el entorno: agua en grandes cantidades.
EXPLOSIÓN	Riesgo de incendio y explosión en contacto con sustancias combustibles.		
INHALACION	Sensación de quemazón. Tos. Dolor de garganta. Sibilancie.	Sistema cerrado y ventilación.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
PIEL	Enrojecimiento. Sensación de quemazón.	Guantes protectores. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón. Proporcionar asistencia médica.
PROPIEDADES FISICAS	Se descompone por debajo del punto de ebullición a 500°C Punto de fusión: 398°C	Densidad: 2.7 g/cm ³ Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 12	

ANEXO IX ACIDO ACETICO

TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Inflamable. El calentamiento intenso puede producir aumento de la presión con riesgo de estallido.	Evitar llama abierta, NO producir chispas y NO fumar.	Pulverización con agua, espuma resistente al alcohol, dióxido de carbono. Los bomberos deberían emplear indumentaria de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración.
EXPLOSIÓN	Por encima de 39°C: pueden formarse mezclas explosivas vapor/aire.	Por encima de 39°C: sistema cerrado, ventilación y equipo eléctrico a prueba de explosiones.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones por pulverización con agua.
INHALACION	Dolor de garganta, tos, jadeo, dificultad respiratoria. (Síntomas de efectos no inmediatos: véanse Notas).	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semi incorporado y someter a atención médica.
PIEL	Enrojecimiento, dolor, graves quemaduras cutáneas.	Guantes protectores, traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y solicitar atención
PROPIEDADES FISICAS	Punto de ebullición: 118°C Punto de fusión: 16°C Densidad relativa (agua = 1): 1.05 Solubilidad en agua: miscible Presión de vapor, kPa a 20°C: 1.6	Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.07 Punto de inflamación: 39°C Temperatura de autoignición: 427°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 4.0-17 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.31 - 0.17	

ANEXO X ACIDO CLORHIDRICO



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible.		En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.
EXPOSICIÓN		¡EVITAR TODO CONTACTO!	¡CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS!
INHALACION	Corrosivo. Sensación de quemazón, tos, dificultad respiratoria, jadeo, dolor de garganta. (Síntomas no inmediatos: véanse Notas).	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semiincorporado, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica.
PIEL	Corrosivo. Quemaduras cutáneas graves, dolor.	Guantes protectores y traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica.
PROPIEDADES FISICAS	Punto de ebullición a 101.3 kPa: -85°C Punto de fusión: -114°C Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 72	Solubilidad en agua: Elevada Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.3	