



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas.**

**Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales.**

**“Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Batch para Saponificar  
Acetato de Etilo”**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**Presentada por:**

**José Luis Nuñez Estrella**

**Teresa de Jesús Udeos Zabala**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2015**

# AGRADECIMIENTO

A mis padres, José y Miroslava, por el apoyo que siempre me dieron de forma incondicional para llegar a la culminación de mis estudios a pesar de mis tropiezos.

A mis hermanas, por su apoyo y por ser un ejemplo para mí, a mi novia por la espera y brindarme su ayuda.

Definitivamente ustedes padres están en mi corazón y nunca terminaré de agradecer a Dios por darme unos padres tan buenos y ejemplares, ustedes me han dado todo lo que soy como persona. Gracias por creer en mí.

José Nuñez Estrella

# AGRADECIMIENTO

A mis padres por brindarme su apoyo tanto moral como económico para terminar mis estudios y ser un orgullo para ellos, por todo el amor incondicional entregado y por la lucha constante en sacar una hermosa familia adelante.

A Dios por darme la oportunidad de cumplir este gran sueño, al Ing. Pablo Tejada y al Sr. Arturo Palacios por compartir sus conocimientos y contribuir con la realización de la presente tesis.

A la vida por darme una madre luchadora que me enseñó a no rendirme, por darme también un padre ejemplar, gracias por ser tan maravillosos y los mejores padres, Olguita y Eduardo los amo infinitamente.

Teresa Udeos Zabala

# DEDICATORIA

A Dios, a nuestros padres y familiares, que permitieron que culminemos esta etapa de nuestra vida con amor y éxito.

A nuestro director de Tesis, Msc. Pablo Tejada Hinojosa, por su guía, sus enseñanzas y dedicación.

Al Sr. Arturo Palacios, por su apoyo incondicional y amistad sincera que nos brindó durante y después de la elaboración de este proyecto de graduación.

A nuestros profesores y todos los que conforman el DCQA por el soporte brindado no sólo en lo profesional sino también en lo personal.

## **TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

---

PhD. Francisco Torres  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

---

Msc. Pablo Tejada Hinojosa  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Bernardo Mora  
VOCAL PRINCIPAL

# DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

---

José Luis Nuñez Estrella

---

Teresa de Jesús Udeos Zabala

## RESUMEN

El presente proyecto de graduación tiene como finalidad el diseño y construcción de un reactor batch de carácter didáctico y piloto en el cual se podrá llevar a cabo diversas prácticas de laboratorio en la cátedra de Ingeniería de las Reacciones Químicas, Cinética Química y Operaciones Unitarias.

El reactor fue diseñado en acero inoxidable 304 por sus propiedades anticorrosivas, con una capacidad de operación de hasta doce galones, en el cual se saponificará Acetato de Etilo empleando Hidróxido de Sodio ambos con una concentración de 0.1M. De acuerdo a variación de parámetros encontrados en la literatura y mediante pruebas experimentales realizadas a nivel laboratorio detalladas en la sección 3.4, previo a la construcción del reactor se decidió que las condiciones apropiadas de trabajo son: temperatura de  $(27,5 \pm 2,5)$  °C, una agitación de 500 rpm, aproximadamente por 45 minutos hasta que la reacción alcance su estado estacionario, es pertinente recalcar que el tiempo de reacción es de aproximadamente 10 minutos , el resto de tiempo es de estabilización y no es necesario emplear calentamiento, debido a que al trabajar con revoluciones en un rango de 200 rpm a 400 rpm no se puede ver gráficamente que siga una cinética de segundo orden como en la gráfica realizada a 500 rpm, la conversión de Acetato de Sodio va aumentando con el

tiempo y esta conversión es más rápida si se aumenta la temperatura, para un mejor estudio tomamos la temperatura de 25 °C para apreciar de una forma más pausada los cambios de conductividad eléctrica.

Bajo las condiciones de trabajo previamente mencionadas se obtuvo que el factor de conversión fue del 83% y su concentración final de 0,0179 M con lo cual quedó demostrada la eficiencia del equipo.

Para alargar la vida útil del equipo se recomienda leer el manual de operación adjunto.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL .....	X
ABREVIATURAS.....	XIII
SIMBOLOGÍA.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XVI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVII
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	XVIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XX
CAPÍTULO 1 .....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación Técnica.....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.4. Estructura de la Tesis.....	4
CAPÍTULO 2 .....	8
2. MARCO TEÓRICO .....	8
2.1. Reactor Químico.....	8
2.2. Clasificación de los Reactores .....	11
2.3. Tipos de Procesos .....	15
2.4. Orden de Reacción.....	18
2.5. Saponificación.....	19
2.6. Acetato de Etilo .....	21
2.7. Hidróxido de Sodio.....	24

2.8.	Elección del tipo de reactor .....	26
2.9.	Diseño de Reactores .....	27
2.10.	Reactor Batch.....	29
2.11.	Agitación .....	35
2.12.	Fenómenos de transporte que rigen la agitación .....	35
2.13.	La agitación como operación unitaria .....	37
2.14.	Tipos de Agitadores .....	39
2.15.	Conformación del Reactor tipo batch .....	43
CAPÍTULO 3 .....		47
3.	PARTE EXPERIMENTAL PREVIA.....	47
3.1.	Técnica utilizada para Demostrar el Funcionamiento del Reactor .....	47
3.2.	Métodos.....	48
3.3.	Curva de Calibración para un reactor batch a 0.1M de Acetato de Etilo y 0.1M de Hidróxido de Sodio .....	50
3.4.	Descripción de los ensayos a nivel laboratorio .....	53
3.5.	Determinación de la constante cinética para una reacción de saponificación en un reactor batch.....	54
3.6.	Datos adicionales.....	61
3.7.	Datos experimentales .....	64
CAPÍTULO 4 .....		66
4.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR BATCH.....	66
4.1.	Cálculo para el Diseño del Reactor .....	66
4.2.	Cálculos para el sistema de agitación.....	74
4.3.	Cálculo de la potencia para accionar el eje .....	77
4.4.	Cálculo de la masa de reactivos cargados al reactor y la masa de los productos.....	78
4.5.	Balance de energía .....	80
CAPÍTULO 5 .....		82

5.	PUESTA EN MARCHA DEL REACTOR BATCH.....	82
5.1.	Obtención de datos de la reacción de Saponificación de Acetato de Etilo con Hidróxido de Sodio en el Reactor Batch. ....	82
5.2.	Constante teórica de velocidad de saponificación del Acetato de Etilo con Hidróxido de Sodio en el reactor batch .....	85
5.3.	Cálculo de la constante de velocidad de reacción experimental en el reactor batch. ....	87
5.4.	Cálculo de la conversión de Hidróxido de Sodio y Acetato de Etilo en el reactor .....	89
5.5.	Cálculo del tiempo de vida media.....	90
5.6.	Cálculo del porcentaje de desviación .....	91
5.7.	Cálculo de la energía de activación.....	92
5.8.	Análisis y discusión de resultados.....	95
	CAPÍTULO 6 .....	97
6.	DIAGRAMA DE INSTALACIÓN DEL REACTOR BATCH.....	97
6.1.	Esquema del reactor batch.....	97
6.2.	Materiales usados en la construcción .....	98
6.3.	Descripción del Diagrama de Instalación .....	100
	CAPÍTULO 7 .....	102
7.	COSTOS Y MATERIALES.....	102
7.1.	Requerimiento presupuestario .....	102
	CAPÍTULO 8 .....	105
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	105
8.1.	Conclusiones.....	105
8.2.	Recomendaciones .....	107
	ANEXOS.....	109
	BIBLIOGRAFÍA .....	146

## ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
BTU	British Thermal Units
pH	Potencial de Hidrógeno
PM	Peso Molecular
PSIA	Pounds per Square Inch Absolute
PSI	Pounds per Square Inch
PVC	Policloruro de Vinilo
rpm	Revoluciones por Minuto

# SIMBOLOGÍA

G	Gramos
Cp	Centipoise
Cc	Centímetros Cúbicos
Gal	Galones
L	Litro
M	Molar
Kg/m <sup>3</sup>	Kilogramos por metro cúbico
°C	Grados Centígrados
K	Grados Kelvin
°F	Grados Fahrenheit
g/ml	Gramos por mililitro
nm	Nanómetro
mm de Hg	Milímetros de mercurio
J/mol-K	Joules por mol Kelvin
mPa-s	Milipascales segundo
nNaOH	Número de moles de Hidróxido de sodio
nAcEt	Número de moles de Acetato de sodio
CH <sub>3</sub> -COO-CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	Acetato de Etilo
NaOH	Hidróxido de sodio
NaC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	Acetato de sodio
CH <sub>3</sub> -COOH	Ácido Acético

Atm	Atmósfera
Re	Número de Reynolds
Pr	Número de Prantl
$\mu$	Viscosidad Dinámica
$\rho$	Densidad
g	Gravedad
h	Altura
L	Longitud
Q	Calor
Cp	Calor Específico a Presión Constante
$\Delta T$	Diferencia de Temperatura
N	Velocidad de giro del agitador
$d_i$	Diámetro Tubería Interna
Dt	Diámetro del reactor
Da	Diámetro del agitador
Np	Número de Potencia

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. Tipos de reactores ideales.....	11
FIGURA 2.2. Tipos de procesos.....	15
FIGURA 2.3. Mecanismos de reacción para la saponificación del Acetato de Etilo .....	20
FIGURA 2.5. Reactor intermitente de tanque agitado.....	29
FIGURA 2.6. Tanque agitado con un serpentín helicoidal acoplado al sistema.....	36
FIGURA 2.7. Agitadores de paletas.....	40
FIGURA 2.8. Hélices de mezcla.....	41
FIGURA 2.9. Rodetes de agitadores de turbina.....	42
FIGURA 4.1. Esquema del cilindro. ....	67
FIGURA 4.2. Dimensiones del tanque .....	69
FIGURA 6.1. Esquema del reactor batch .....	97

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. Ventajas y Desventajas de un reactor batch.....	31
TABLA 3.1. Datos para la curva de calibración de NaOH a $(27,5 \pm 2,5)^{\circ}\text{C}$ en diferentes concentraciones.....	51
TABLA 3.2. Preparación de Soluciones de NaOH a diversas concentraciones para realizar la curva de calibración .....	57
TABLA 3.3. Datos adicionales del Acetato de Etilo .....	61
TABLA 3.4. Datos adicionales del Hidróxido de Sodio.....	61
TABLA 3.5. Datos Adicionales de la capacidad calorífica de los reactivos y productos.....	62
TABLA 3.6. Análisis físicos de la solución preparada de NaOH 0.1M a $25^{\circ}\text{C}$ .....	63
TABLA 3.7. Análisis físicos de la solución preparada de acetato de etilo 0.1M a $25^{\circ}\text{C}$ .....	63
TABLA 3.8. Datos obtenidos simulando el proceso en el laboratorio a $25^{\circ}\text{C}$ .....	65
TABLA 5.1. Datos obtenidos a $25^{\circ}\text{C}$ .....	83
TABLA 5.2. Datos para la determinación de la constante de velocidad a $25^{\circ}\text{C}$ .....	87
TABLA 5.3. Datos obtenidos en las diferentes pruebas realizadas .....	92
TABLA 7.1. Costo de recursos Materiales.....	102
TABLA 7.2. Costo de recursos Humanos.....	103
TABLA 7.3. Costo de recursos Totales.....	104

# ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. Orden de reacción.....	18
ECUACIÓN 2. Balance de materia.....	33
ECUACIÓN 3. Velocidad de reacción.....	33
ECUACIÓN 4. Ecuación de la recta para valores de conductividad a $(27,5 \pm 2,5)^{\circ}\text{C}$ .....	53
ECUACIÓN 5. Volumen de alimentación de la Solución de NaOH 0,1M. ....	58
ECUACIÓN 6. Volumen de alimentación de la Solución de Acetato de Etilo.....	59
ECUACIÓN 7. Volumen del cilindro del reactor.....	66
ECUACION 8. Volumen del casquete esférico.....	70
ECUACIÓN 9. Equilibrio térmico.....	70
ECUACIÓN 10. Transferencia de energía en un intercambiador.....	70
ECUACIÓN 11. Flujo calórico (Empleando Entalpías).....	73
ECUACIÓN 12. Densidad de la mezcla.....	75
ECUACIÓN 13. Viscosidad de la mezcla.....	76
ECUACIÓN 14. Número de Reynolds .....	76
ECUACIÓN 15. Potencia del motor requerida para accionar el eje .....	77
ECUACIÓN 16. Balance de energía en un reactor batch .....	80
ECUACIÓN 17. Velocidad de Saponificación del Acetato de Etilo con Hidróxido de Sodio....	86
ECUACIÓN 18. Conversión de Hidróxido de Sodio y Acetato de Etilo. ....	89
ECUACIÓN 19. Tiempo de vida media.....	90
ECUACIÓN 20. Porcentaje de Desviación .....	91
ECUACIÓN 21. Ecuación de Arrhenius. ....	93

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 3.1 Curva de Calibración del NaOH a $(27,5 \pm 2,5)^\circ\text{C}$ en diferentes concentraciones . .....	52
GRÁFICA 5.1. .Datos para una Cinética de Segundo orden a $25^\circ\text{C}$ .....	88
GRÁFICA 5.2. LN VS $1/T$ .....	93

# INTRODUCCIÓN

El dimensionamiento de los equipos para una serie de operaciones donde ocurre la transformación de ciertos insumos o materias primas mediante procesos físicos, químicos y algunos biológicos es una de las múltiples tareas del Ingeniero Químico, el corazón de los procesos en los que se dan transformaciones químicas y/o bioquímicas de la materia es el reactor químico; para diseñar un reactor se debe tener en cuenta el tipo de equipo que se necesita en base a la utilidad que queremos darle para lograr el alcance de la reacción requerida y las condiciones de operación necesarias.

Para cumplir con estos parámetros se efectuará el diseño previo del proceso de un reactor, el análisis de costos para determinar la viabilidad y rentabilidad de su posterior construcción; otros factores a considerar en el diseño son los materiales de construcción, los requerimientos para su operación

mantenimiento, además de sus accesorios y técnicas de control; todo esto en conjunto debe proporcionar menor costo y mayor eficacia, sin pasar por alto que no debe producir impacto ambiental significativo durante su operación.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Antecedentes

El diseño y puesta en marcha de equipos para facilitar las diferentes Operaciones Unitarias existentes ha sido de suma importancia en la Ingeniería Química aún desde sus principios, por tal razón en la actualidad las industrias buscan constantemente mejorar sus operaciones conforme a las exigencias del mercado en el cual se desenvuelven, y el gran avance y modernización que han tenido los reactores con el paso de los años no podía ser la excepción; su estructura y composición eran básicas si se le compara con los reactores actuales existentes en el mundo, basando su construcción y seguridad en sólidas paredes de ladrillos de grafito.

Los tipos de reactores, tamaños y formas han sido desarrollados para fines específicos ejecutados por pequeñas y grandes industrias que se enfocan en satisfacer sus necesidades de crecimiento y desarrollo; la necesidad de implementar reactores para efectuar ciertos procesos ha ido creciendo y perdurará por un tiempo indefinido.

## **1.2. Justificación Técnica**

La experimentación dentro de la rama de Ingeniería Química juega un papel importante, no solo como parte de la formación de profesionales competitivos, si no en muchos procesos que involucran reacciones químicas y requieren durante su desarrollo pruebas a nivel de planta piloto o de laboratorio para pulir y mejorar los equipos y procesos antes de plasmarlos de forma definitiva, así se evita costos innecesarios y se garantiza operaciones eficientes.

Basándose en el diseño del tipo de reactor de acuerdo a las necesidades se eligió un reactor batch; es uno de los más usados en la industria química por alcanzar una elevada conversión por cada unidad de volumen en cada etapa, además de operar de forma sencilla su costo inicial es menor que el de los reactores continuos.

Para comprobar el funcionamiento del reactor a escala piloto se llevará a cabo la reacción de saponificación de Acetato de Etilo con Hidróxido de Sodio, sin embargo en el reactor se podrá realizar prácticas que no involucren solo estos reactivos dándole versatilidad al equipo. Además el equipo presenta un serpentín en su interior, brindando el plus de poder manejar flujo calórico que pueden beneficiar ciertas reacciones químicas.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

- Diseñar, construir y verificar el funcionamiento del reactor batch para la saponificación de acetato de etilo empleando una solución de hidróxido de sodio.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Definir las variables del diseño del equipo.
- Efectuar los cálculos de dimensionamiento del reactor batch.

- Construir el reactor batch y cuantificar la cantidad necesaria de materiales requeridos.
- Determinar experimentalmente la constante cinética y determinar el orden de la reacción (a temperatura ambiente).
- Elaborar el manual de operación del equipo.

#### **1.4. Estructura de la Tesis**

La tesis está desarrollada en 8 capítulos los cuales son:

##### *Capítulo 1: Generalidades*

Para este capítulo se revisa en términos generales la importancia del diseño de equipos dentro de la ingeniería Química, los objetivos tanto generales como específicos que se espera obtener después de la construcción del reactor en cuestión.

##### *Capítulo 2: Marco teórico*

Dentro de este capítulo se darán a conocer conceptos básicos que serán necesarios para la comprensión y desarrollo del presente

trabajo, así como la elección del tipo de reactor de acuerdo a nuestras necesidades.

### *Capítulo 3: Parte experimental previa*

Mediante este capítulo se dan a conocer dos métodos para obtener la concentración de uno de los reactantes a lo largo del tiempo; se describe el procedimiento a seguir para efectuar la reacción de saponificación de Acetato de Etilo, a su vez se detalla la preparación de las diferentes soluciones involucradas en la reacción a estudiar.

### *Capítulo 4: Diseño y construcción del reactor batch*

Dentro de este capítulo se calculan las medidas del reactor, tales como la altura, diámetro etc, de igual forma las de sus accesorios para su posterior y correcta operación; se calcula la constante teórica de velocidad de saponificación del Acetato de Etilo con Hidróxido de

Sodio para compararla con la constante teórica y obtener el porcentaje de conversión de Acetato de Sodio (producto).

#### *Capítulo 5: Puesta en marcha del reactor batch*

Aquí se desarrollan las pruebas tanto a temperatura ambiente como con calentamiento, empleando el serpentín de cobre, para demostrar el funcionamiento del equipo.

#### *Capítulo 6: Diagrama de instalación del reactor*

En este capítulo se detalla el diagrama de la instalación del reactor, partes principales, principio de funcionamiento etc.

#### *Capítulo 7: Costos y materiales*

En este capítulo se evalúan los requerimientos para la construcción del reactor tales como: requerimiento presupuestario, los recursos materiales, los recursos humanos entre otros.

### *Capítulo 8: Recomendaciones y Conclusiones*

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos después de la puesta en marcha y se verifica el cumplimiento de los objetivos.

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Reactor Químico

El reactor químico es un recipiente donde se llevan a cabo procesos de transformación, ejecutándose una o varias reacciones químicas; por lo tanto, es cualquier recipiente cerrado donde ocurren las mismas; debe ser construido de tal forma que no se involucre en la reacción química. Tienen una amplia variedad de tamaños, formas y modos de operación; están diseñados para maximizar la conversión y selectividad de la reacción con el menor costo, tiempo, y mayor eficiencia posibles. [1]

### **2.1.1. Funciones principales de un Reactor Químico**

Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del equipo, con el fin de conseguir la mezcla deseada de las fases presentes.
  - Proporcionar suficiente tiempo de contacto entre las sustancias y con el catalizador, de ser el caso, para conseguir la extensión de la reacción deseada.
  - Permitir condiciones de temperatura, presión y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, cumpliendo con los aspectos termodinámico y cinético de la reacción.
- [2]

### **2.1.2. Clases de Reacciones Químicas Típicas en un Reactor Químico**

- Reacciones Homogéneas: Cuando solamente se presenta una fase, ya sea líquida o gaseosa.
- Reacciones Heterogéneas: En este tipo de reacciones se requiere la presencia de por lo menos dos fases para obtener la reacción a una velocidad deseada.

- Reacciones Catalíticas: Requieren de una sustancia adicional (sin que aparezca en el balance global) para poder modificar la velocidad de reacción; esta sustancia solo por su presencia provoca la reacción química, caso contrario la reacción es lenta.
- Reacciones no catalíticas: Los materiales reactivos no necesitan ninguna sustancia extra para llevar a cabo la reacción química
- Reacciones auto catalíticas: Uno de los productos formados en la reacción actúa como catalizador, participando en el proceso en otra etapa donde la velocidad de reacción es más rápida que en la primera.
- Reacciones enzimáticas: Utilizan proteínas con alto peso molecular (catalizadores biológicos), trabajan a bajas temperaturas y poseen centros biológicos.
- Reacciones endotérmicas: Son aquellas que adsorben calor del exterior.
- Reacciones exotérmicas: Son aquellas que liberan calor hacia el exterior. [3]

### 2.1.3. Variables de proceso

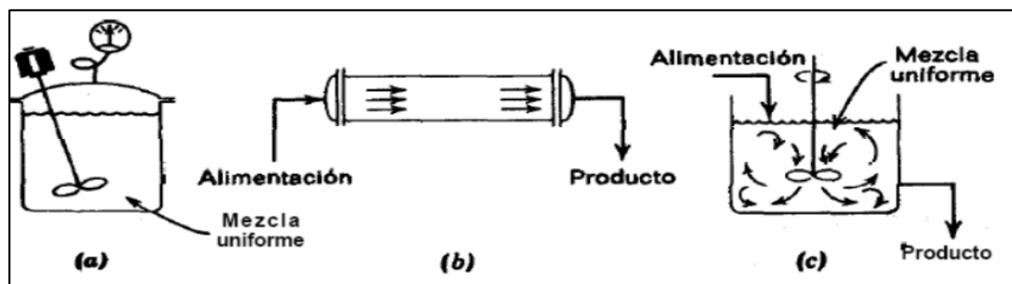
Las variables clave que participan en el proceso son:

- Volumen (V)
- Tiempo de retención (t)
- Presión (P)
- Temperatura (T)
- Concentración de las especies químicas ( $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ )

## 2.2. Clasificación de los Reactores

### 2.2.1. Reactores Ideales

Existen tres tipos de reactores ideales, como se representa en la fig2.1



**Figura 2.1** Tipos de reactores ideales[3].

**Fuente:** Ingeniería de las Reacciones Químicas Levenspiel, O. (1987).

a) El primero se trata de un reactor discontinuo en donde los reactantes son introducidos en el reactor, se mezclan, posteriormente se dejan reaccionar en un tiempo determinado y finalmente la mezcla resultante es descargada.

Ésta es una operación no estacionaria en la que la composición va variando con el tiempo, aunque en es uniforme en todos los puntos del reactor para cualquier intervalo de tiempo.

b) El primero de los dos reactores ideales de flujo estacionario, es el reactor de flujo en pistón, este reactor se caracteriza porque el flujo del fluido perpendicular a una sección transversal es ordenado, sin que ningún elemento del mismo sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquél; en realidad, en este reactor puede haber mezcla lateral de fluido, pero nunca ha de existir mezcla o difusión a lo largo de la trayectoria de flujo. La condición necesaria y suficiente para que exista flujo en pistón es que el tiempo de residencia en el reactor sea el mismo para todos los elementos del fluido”.

c) El otro reactor ideal de flujo estacionario, se denomina reactor de mezcla completa, y como su nombre lo indica, el contenido del reactor está perfectamente agitado y su composición en cualquier instante es la misma en todos los puntos del reactor. Por consiguiente, la corriente de salida de este reactor tiene la misma composición que la del fluido contenido en el mismo. [4]

### **2.2.2. Reactor Semicontinuo**

En la mayoría de reactores químicos la fuerza conductora de un proceso espontáneo disminuye exponencialmente con el tiempo. La capacidad de enfriamiento y calentamiento debe ser diseñada para el momento en que se dé la máxima producción de calor por la reacción, y por lo tanto es infrutilizada durante la mayor parte de tiempo de proceso.

Esta utilización puede ser incrementada aplicando la técnica de un reactor semicontinuo, por ejemplo manteniendo la velocidad de reacción neta constante y manipulando la velocidad de adición de uno de los reactivos.

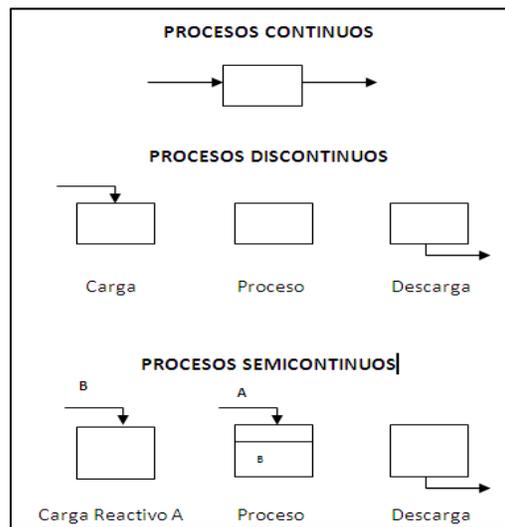
Este sistema permite operar con capacidades de enfriamiento y calentamiento máximas (manteniéndose en una zona segura) y por tanto, incrementar la productividad significativamente. Por este motivo esta técnica es ampliamente utilizada en diversas industrias químicas (principalmente reacciones de fermentación). Por otra parte la mayoría de reacciones industriales son exotérmicas, y por este motivo este sistema está limitado por la posibilidad de sobredosificación que podría provocar una reacción fuera de control.

### **2.2.3. Reactor Discontinuo**

Los reactores discontinuos son sencillos de operar e industrialmente se utilizan cuando se han de tratar pequeñas cantidades de sustancias, en estos los reactantes se introducen el reactor, se mezclan y se dejan reaccionar en un tiempo determinado. [5]

### 2.3. Tipos de Procesos

- Procesos Continuos
- Procesos Semicontinuos
- Procesos Discontinuos



**Figura 2.2** Tipos de procesos.

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T

#### 2.3.1. Procesos Continuos

Los procesos continuos se los suele realizar en recipientes agitados, ya sea de modo simple o en cascada, con tuberías de flujo de descarga. En estos sistemas todos los reactivos son continuamente cargados al reactor y los productos son continuamente descargados.

Los procesos continuos se caracterizan por trabajar en condiciones estacionarias, en las que tanto el calor generado como la composición permanecen constantes durante la operación.

Los procesos continuos tienen una principal ventaja, que es la producción en gran volumen de un producto estándar que 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.

### **2.3.2. Procesos Semicontinuos**

El funcionamiento en semicontinuo, consiste en introducir un reactivo de forma discontinua (todo de una vez), y añadir el segundo reactivo de forma continua durante el período de reacción. En este caso la masa total de la mezcla de reacción no se mantiene constante.

Según la forma de efectuar la mezcla entre reactivos y productos la clasificación distingue el reactor tanque agitado, en el que la mezcla se puede considerar perfecta en el caso ideal, o el reactor tubular en el que la mezcla es nula (flujo de pistón) en el caso ideal.

### **2.3.3. Procesos Discontinuos**

Un proceso discontinuo o por lotes se da cuando los reactivos son precargados y se vacían cuando la reacción se ha completado. La ventaja clave de este tipo de procesos es la flexibilidad. Por eso se utilizan mayoritariamente en la industria química, alimentaria o farmacéutica, donde es muy importante ofrecer una gran variedad de productos e introducir otros nuevos muy rápidamente, ya que estos sectores industriales operan en mercados altamente competitivos. Los equipos de procesos discontinuos se diseñan para manejar un rango de operaciones y productos.

La flexibilidad permite manufacturar nuevos productos sin tener que construir una nueva planta o sin tener que hacer grandes cambios de equipo.

## 2.4. Orden de Reacción

Frecuentemente encontramos que la velocidad con que transcurre una reacción en la que intervienen las sustancias  $A, B, \dots, D$  puede darse mediante una expresión del tipo siguiente:

$$-r_A = kC_A^a C_B^b \dots C_D^d, \quad a+b+\dots+d = n \text{ Ecuación 1.}$$

La dependencia de la velocidad de reacción ( $-r_A$ ) respecto a las concentraciones de las especies presentes, se determina en prácticamente todos los casos por observación experimental.

Los exponentes de las concentraciones de la ecuación 1 dan pie al concepto de orden de reacción. El orden de reacción se refiere a las potencias a las que las concentraciones se elevan en la ley de velocidad cinética. Así, la reacción anterior es de:

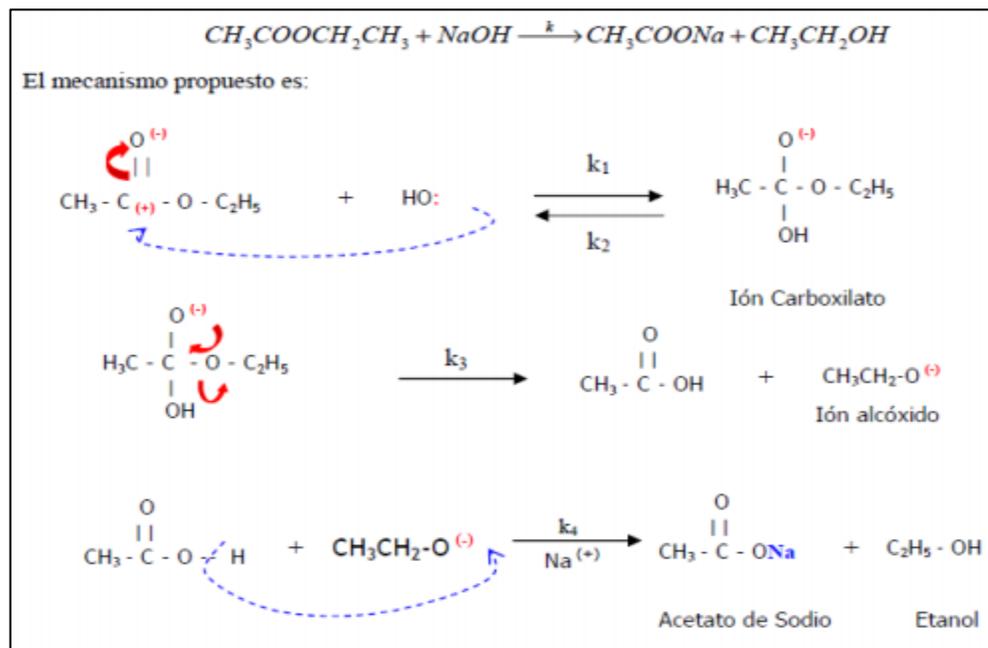
- Ordena con respecto a A
- Orden b con respecto a B
- Orden global n

Como el orden de reacción se determina experimentalmente, no tiene por qué ser un número entero. [6]

## 2.5. Saponificación

La saponificación es una reacción química entre un ácido graso (o un lípido saponificable, portador de residuos de ácidos grasos) y una base o alcalino, en la que se obtiene como principal producto la sal de dicho ácido.

Estos compuestos tienen la particularidad de ser anfipáticos, es decir tienen una parte polar y otra apolar (o no polar), con lo cual pueden interactuar con sustancias de propiedades dispares. Por ejemplo, los jabones son sales de ácidos grasos y metales alcalinos que se obtienen mediante este proceso. El método de saponificación en el aspecto industrial consiste en hervir la grasa en grandes calderas, añadiendo lentamente sosa cáustica (NaOH), agitando continuamente la mezcla hasta que comienza a ponerse pastosa.



**Figura 2.3** Mecanismo de reacción para la saponificación de Acetato de Etilo

**Fuente:** BIANCA, T. Mecanismos de Reacción en Química Orgánica

### 2.5.1. Tensión superficial

Las moléculas de un líquido se atraen entre sí, de ahí que el líquido esté "cohesionado". Cuando hay una superficie, las moléculas que están justo debajo de la superficie sienten fuerzas hacia los lados, horizontalmente, y hacia abajo, pero no hacia arriba, porque no hay moléculas encima de la superficie. El resultado es que las moléculas

que se encuentran en la superficie son atraídas hacia el interior de éste, como consecuencia la superficie del líquido se comporta como una película elástica fina que permite soportar una fuerza externa. Se puede observar, por ejemplo, cuando ciertos insectos se sostienen sobre la superficie del agua e igual ocurre con algunos objetos, como una hoja de afeitar colocada horizontalmente sobre la superficie del líquido, aunque sean más densos que el agua y no pueden flotar. [7]

## **2.6. Acetato de Etilo**

### **2.6.1. Generalidades**

El acetato de etilo es un éster de fórmula  $\text{CH}_3\text{-COO-CH}_2\text{-CH}_3$ . Su nombre antiguo es éter de vinagre.- El acetato de etilo es un líquido incoloro con olor a frutas, inflamable, menos denso que el agua y ligeramente miscible con ella. Sus vapores son más densos que el aire.

El acetato de etilo es un líquido incoloro, característico de los ésteres, no residual.

Es miscible con hidrocarburos, cetonas, alcoholes y éteres y poco soluble en agua.

Se obtiene por destilación lenta de una mezcla de ácido acético, alcohol etílico y ácido sulfúrico, o bien, a partir de acetaldehído anhidro en presencia de etóxido de aluminio.

Se usa en esencias artificiales de frutas, como disolvente de nitrocelulosa, barnices y lacas, en la manufactura de piel artificial, películas, placas fotográficas, seda artificial, perfumes y limpiadores de telas, entre otros.

### **2.6.2. Propiedades Físicas y Termodinámicas**

- Punto de ebullición: 77 °C a P=1 atm
- Punto de fusión: - 83 °C a P=1 atm
- Índice de refracción: 1.3719 (20 °C)
- Densidad relativa : 0.902 (20 °C respecto al agua a 4 °C), 0.898 (25 °C respecto al agua a 25 °C).
- Límites de explosividad (% en volumen en el aire): 2.5-11.5
- Presión de vapor (mm de Hg): 100 (a 27 °C)
- Punto de inflamación (Flash point): -4 °C
- Temperatura de autoignición: 426 °C

- Solubilidad: 1 ml es miscible con 10 ml de agua (a 25 °C), su solubilidad aumenta al bajar la temperatura. Forma azeótropo con agua (6.1 % peso/peso) con punto de ebullición de 70.4 °C y con etanol y agua (9 % y 7.8 % peso/peso, respectivamente) que ebulle a 70.3°C.
- Miscible en etanol, acetona, cloroformo y éter.

### **2.6.3. Usos y Manipulación**

El acetato de etilo es comúnmente utilizado en esencias naturales de frutas, como solvente de nitrocelulosa, barnices y lacas, en la manufactura de piel artificial, películas y placas fotográficas, seda artificial, perfumes y limpiadores de telas, entre otros.

Para el uso de este producto es necesario un lugar bien ventilado, utilizando bata, lentes de seguridad y, si es necesario, guantes de hule natural o neopreno (no usar PVC), para evitar un contacto prolongado con la piel.

Debe ser almacenado alejado de fuentes de ignición y de luz directa del sol, en un área bien ventilada. Grandes cantidades de este producto deben almacenarse en tanques metálicos conectados a tierra. [8]

## **2.7. Hidróxido de Sodio**

### **2.7.1. Generalidades**

El hidróxido de sodio es un sólido blanco e industrialmente se utiliza como disolución al 50 % por su facilidad de manejo. Es soluble en agua, desprendiéndose calor. Absorbe humedad y dióxido de carbono del aire y es corrosivo de metales y tejidos. Es usado en síntesis, en el tratamiento de celulosa para hacer rayón y celofán, en la elaboración de plásticos, jabones y otros productos de limpieza, entre otros usos. Se obtiene, principalmente por electrólisis de cloruro de sodio, por reacción de hidróxido de calcio y carbonato de sodio y al tratar sodio metálico con vapor de agua a bajas temperaturas.

### 2.7.2. Propiedades Físicas y Termodinámicas

- Punto de ebullición: 1388°C (a 760 mm de Hg)
- Punto de fusión: 318.4 °C
- Índice de refracción a 589.4nm: 1.433 ( a 320 °) y 1.421 (a 420 °C)
- Presión de vapor: 1mm (739 °C)
- Densidad: 2.13 g/ml (25 °C) 13
- Solubilidad: Soluble en agua, alcoholes y glicerol, insoluble en acetona (aunque reacciona con ella) y éter, 1 g se disuelve en 0.9 ml de agua, 0.3 ml de agua hirviendo, 7.2 ml de alcohol etílico y 4.2 ml de metanol.
- pH de disoluciones acuosas (peso/peso): 0.05 %:12; 0.5 %: 13 y 5 %: 14.

### 2.7.3. Usos y manipulación

El hidróxido de sodio se usa para fabricar jabones, crayón, papel, explosivos, pinturas y productos del petróleo. También se usa en el procesamiento de textiles de algodón, lavandería y blanqueado, revestimiento de óxidos, galvanoplastia y extracción electrolítica. Se

encuentra comúnmente en limpiadores de desagües y hornos.

Además este producto se usa como desatascador de cañerías.

Para el manejo del NaOH es necesario el uso de lentes de seguridad, bata y guantes de neopreno, nitrilo o vinilo. Siempre debe manejarse en una campana y no deben utilizarse lentes de contacto al trabajar con este compuesto. En el caso de trasvasar pequeñas cantidades de disoluciones de sosa con pipeta, utilizar una pera, nunca aspirar con la boca. [9]

## **2.8. Elección del tipo de reactor**

La selección del tipo de reactor tiene como finalidad maximizar el rendimiento del material y el energético. Para ello hay que considerar:

**1.-Las características de la reacción:** Las reacciones químicas varían radicalmente según el número de las fases presentes, el mecanismo de reacción (una o varias etapas), la existencia de equilibrios, los efectos térmicos y la sensibilidad a las condiciones físicas (presión, temperatura, agitación).

Estas características imponen serias dificultades en el diseño del reactor, principalmente cuando se quiere preservar la seguridad y el medio ambiente y optimizar el rendimiento y los costes.

Por ejemplo si la reacción es exotérmica es indispensable prever una refrigeración adecuada para evitar la aceleración incontrolada del reactor.

**2.-Aspectos técnicos** (agresividad del medio, naturaleza de los materiales).

**3.-Económicos** (materiales disponibles en el mercado, producción, costes de la energía). Teniendo en cuenta que para grandes producciones se recomienda unidades continuas y para pequeñas producciones unidades discontinuas. [10]

## **2.9. Diseño de Reactores**

El diseño de reactores se enfoca en conocer el tamaño y tipo de reactor, así como que método de operación es el mejor para un fin determinado, pues esto podría requerir que las condiciones en el reactor varíen con la posición y el tiempo. El diseño de reactores no es

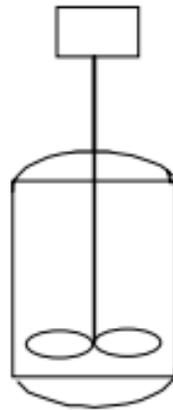
una tarea rutinaria, ya que para el mismo proceso es posible proponer varias soluciones.

En la búsqueda del diseño óptimo no es solo el costo del reactor lo que debe reducirse al mínimo, puede ocurrir que para un diseño en particular el costo de construcción del reactor resulte bajo, pero los materiales que salen de la unidad podrían hacer que su tratamiento resulte mucho más costoso que en otros diseños. De esta manera, es necesario considerar los aspectos económicos en su totalidad.

Para el diseño de reactores se utiliza información, conocimiento y experiencia de varios campos: mecánica de fluidos, transferencia de calor, transferencia de masa, termodinámica, cinética química y economía. La ingeniería de las reacciones químicas es la síntesis de todos estos factores, con el propósito de diseñar el mejor reactor químico. Con el fin de averiguar lo que es capaz de hacer reactor, se necesita conocer su cinética, la ecuación de diseño y el modelo de contacto. [11]

## 2.10. Reactor Batch

En el reactor batch no hay flujo de entrada ni de salida, el reactor se carga por la parte superior para su posterior operación. Es aquel en el que los únicos cambios químicos y térmicos son con respecto al tiempo; en otras palabras, el reactor opera uniforme espacialmente



**Figura 2.5.** Reactor intermitente de tanque agitado (batch).

**Fuente:** DR. Rogelio Cuevas García "Introducción a los reactores químicos".

Los reactores batch se utilizan con mayor frecuencia para capacidades de producción bajas y para producciones de corto plazo donde el costo de la mano de obra y otros aspectos de las operaciones están a menor de costo de capital en comparación a los nuevos equipos, este tipo de reactor permite una alta conversión, que puede obtenerse dejando el reactivo dentro del reactor por periodos prolongados. [12].

### 2.10.1. Ventajas y desventajas de un reactor batch

**Tabla 2.1.** Ventajas y desventajas de un reactor batch

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Se pueden alcanzar altas conversiones dejando los reactantes por largos periodos de tiempo de reacción.	Requiere un ciclo de operación complicado
Bajo costo inicial	Mayor costo de operación
Puede ser usado para varias reacciones consecutivamente.	Difícil producción a gran escala
Buenos para obtener datos cinéticos y mientras se está en una etapa de testeo	Largos períodos de tiempo muerto
Su operación es sencilla	Elevados costos de mano de obra
Fácil de parar y limpiar	La calidad del producto es más variable

**Fuente:** Universidad Tecnológica Nacional de Argentina. Ingeniería de las Reacciones. [13]

### 2.10.2. Usos Industriales

- Síntesis de químicos finos, ejemplo: síntesis de mentol
- Optimización y desarrollo de procesos
- Reacciones que impliquen una alta presión como la síntesis de polímeros y la hidrogenación.
- Reacciones que ocurren en paralelo
- Control de cristalización, ejemplo: producción de ácido láctico.
- Control de la contaminación en el tratamiento de aguas residuales, ejemplo: Tratamiento de aguas residuales por lodos activados.
- Investigaciones cinéticas a pequeña escala previas dentro del laboratorio, ejemplo: Saponificación de acetato de etilo.
- Tratamiento de los residuos que se generan en la industria del recubrimiento metálico, ejemplo: biosorción de Cromo VI
- En ciertos procesos de la industria textil, ejemplo: para la elaboración de tejidos para asientos de automóvil. [14]

### 2.10.3. Ecuaciones de Diseño

En un reactor ideal discontinuo se supone que la mezcla de reacción está perfectamente agitada, por lo que no existe variación en la velocidad de reacción a lo largo de volumen del reactor.

Partiendo de la ecuación de balance de materia:

Entrada – Salida + Generación – Consumo = 0 Ecuación 2.

$$0 - 0 + \text{Generación} - \text{Consumo} = 0$$

$$(-r_A V) - \frac{dN_A}{dt} = 0$$

Dónde:

**V**= Volumen del fluido en el reactor

$(-r_A)$  = Velocidad de reacción para el componente limitante.

Evaluando los términos de la ecuación anterior se puede calcular el tiempo de residencia necesario para alcanzar la conversión deseada.

[15]

$$(-r_A V) = \frac{dN_A}{dt} \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$(-r_A V) = N_{A0} \frac{dX_A}{dt}$$

$$\int_0^{X_A} \frac{N_{A0}}{-r_A V} dX = t$$

Dónde:

X= Conversión lograda (está relacionada con la concentración).

$$C_{A0} X_A = C_{A0} - C_A$$

X toma un valor entre 0 y 1

#### **2.10.4. Relación de la conductividad eléctrica con la concentración de la reacción Química.**

La saponificación del acetato de etilo a 25° C transcurre de forma rápida acuerdo con la reacción:



La reacción puede seguirse conductimétricamente gracias a que la conductividad disminuye a lo largo de la reacción. Esto es posible porque la conductividad molar del ión OH<sup>-</sup> es mayor que la del ión acetato y éstos van sustituyendo a los OH<sup>-</sup> durante la reacción.

El acetato de etilo y el alcohol que no son iónicos, no afectan a las medidas de conductividad, y al ser una reacción que se comporta como irreversible, los productos no afectan a la velocidad de la reacción. [16]

## **2.11. Agitación**

La agitación se puede definir como el movimiento inducido a un fluido dentro de un contenedor (fundamentalmente de forma circular) en donde se fomenta la aparición de vórtices que promueven el mezclado.

## **2.12. Fenómenos de transporte que rigen la agitación**

### **2.12.1. Potencia de Agitación**

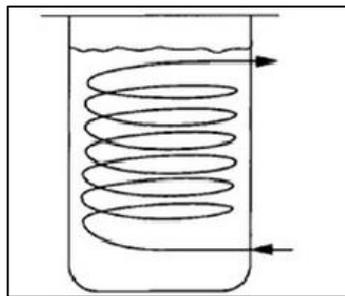
Un factor trascendental en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia necesaria para mover el impulsor; la potencia requerida no puede predecirse desde la teoría sino por relaciones empíricas. Hallar la potencia requiere de la definición del número de Reynolds y su aplicación en gráficas de origen experimental.

Las variables que pueden ser controladas y que influyen en la Potencia consumida por el agitador son:

- Dimensiones principales del tanque y del rodete: Diámetro del tanque ( $D_t$ ), diámetro del rodete ( $D_a$ ), altura del líquido ( $H$ ), ancho de la placa deflectora ( $J$ ), distancia del fondo del tanque hasta el rodete ( $E$ ), y dimensiones de las paletas.
- Viscosidad ( $\mu$ ) y densidad ( $\rho$ ) del fluido.
- Velocidad de giro del agitador ( $N$ ).

### 2.12.2. Transferencia de calor

En reactores batch, uno de los sistemas más utilizados es el serpentín, el cuál proporciona un área de transferencia grande debido a sus vueltas y a un bajo costo.



**Figura 2.6.** Tanque agitado con un serpentín helicoidal acoplado al sistema.

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T.

Para el cálculo del calor transferido al sistema, deben identificarse los diferentes elementos que forman parte del sistema y que están involucrados en la transferencia de calor; uno de los más importantes es por ejemplo el vapor que circula por el interior del tubo.

### **2.12.3. Transferencia de Masa**

El balance de materia correspondiente se lleva a cabo como función del tiempo, debido a que se puede considerar un tanque de mezcla perfecta, y por lo tanto la composición no cambia con la posición.

### **2.13. La agitación como operación unitaria**

El objetivo de la operación unitaria agitación es el de incrementar el transporte de materia y energía, que conlleva a mezclar; un ejemplo donde se emplea esta operación unitaria es en la suspensión de compuestos como en mezclas de jugo y leche.

Generalmente el equipo consiste en un recipiente cilíndrico (cerrado o abierto), y un agitador mecánico, montado en un eje y accionado por un motor eléctrico. Las proporciones del tanque varían ampliamente, dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. El fondo del

tanque debe ser redondeado, con el fin de eliminar los bordes rectos o regiones en las cuales no penetrarían las corrientes del fluido. La altura del líquido, es aproximadamente igual al diámetro del tanque.

Sobre un eje suspendido desde la parte superior, va montado un agitador. El eje está accionado por un motor, conectado a veces, directamente al mismo, pero con mayor frecuencia, a través de una caja de engranajes reductores.

El agitador crea un cierto tipo de flujo dentro del sistema, dando lugar a que el líquido circule por todo el recipiente y vuelva de vez en cuando al agitador. [17]

El diseño del dispositivo agitador, también permitirá la realización de la reacción química, sin la formación de espuma.

### **2.13.1. Propósitos de la Agitación**

Los propósitos de la agitación pueden ser:

- Mezcla de dos líquidos miscibles (ej.: alcohol y agua).
- Disolución de sólidos en líquido (ej.: azúcar y agua).
- Mejorar la transferencia de calor (en calentamiento o enfriamiento).

- Dispersión de un gas en un líquido (oxígeno en caldo de fermentación).
- Dispersión de partículas finas en un líquido.
- Dispersión de dos fases no miscibles (grasa en la leche)

#### **2.14. Tipos de Agitadores**

Los agitadores se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del agitador y los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros se llaman agitadores de flujo axial y los segundos agitadores de flujo radial.

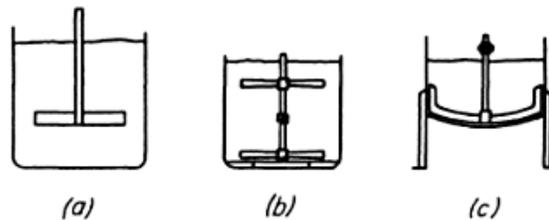
Los tres tipos principales de agitadores son, de hélice, de paletas, y de turbina. Cada uno de estos tipos comprende muchas variaciones y subtipos que no consideraremos aquí. En algunos casos también son útiles agitadores especiales, pero con los tres tipos antes citados se resuelven, quizás, el 95% de los problemas de agitación de líquidos.

### 2.14.1. Agitador de paletas

Para problemas sencillos, un agitador eficaz está formado por una paleta plana, que gira sobre un eje vertical. Son corrientes los agitadores formados por dos y 3 paletas.

Las paletas giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque, impulsando al líquido radial y tangencialmente, sin que exista movimiento vertical respecto del agitador, a menos que las paletas estén inclinadas. Las corrientes de líquido que se originan se dirigen hacia la pared del tanque y después siguen hacia arriba o hacia abajo.

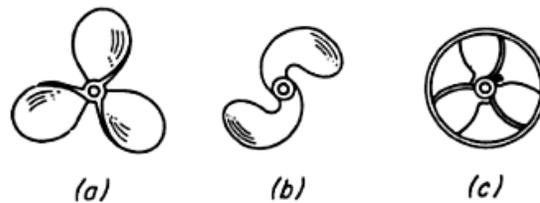
[18]



**Figura 2.7.** Agitadores de paletas: (a) Paletas planas, (b) Paletas inclinadas, (c) Agitador de ancla.

### 2.14.2. Agitador de hélices

Un agitador de hélice, es un agitador de flujo axial, que opera con velocidad elevada y se emplea para líquidos pocos viscosos. Los agitadores de hélice más pequeños, giran a toda la velocidad del motor, unas 1.150 ó 1.750 rpm; los mayores giran de 400 a 800 rpm. Las corrientes de flujo, que parten del agitador, se mueven a través del líquido en una dirección determinada hasta que son desviadas por el fondo o las paredes del tanque.[19]



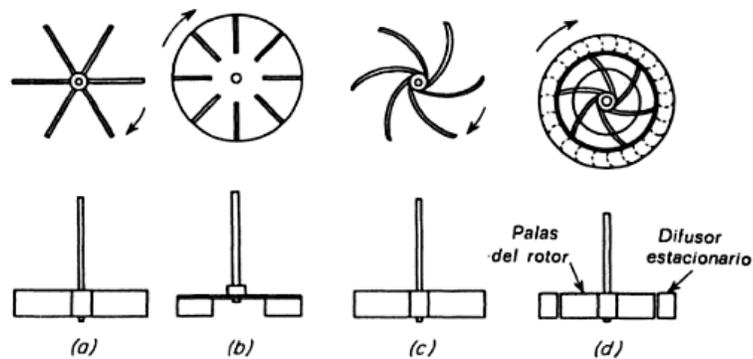
**Figura 2.8.** Hélices de mezcla: (a) Normal de 3 palas, (b) De cuchilla, (c) Protegida.

### 2.14.3. Agitador de turbinas

La mayor parte de ellos se asemejan a agitadores de múltiples y cortas paletas, que giran con velocidades elevadas sobre un eje que

va montado centralmente dentro del tanque. Las paletas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El rodete puede ser abierto, semicerrado o cerrado. El diámetro del rodete es menor que en el caso de agitadores de paletas, siendo del orden del 30 al 50% del diámetro del tanque.

Los agitadores de turbina son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades; en líquidos poco viscosos, producen corrientes intensas, que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado. [20]



**Figura 2.9.** Rodetes de agitadores de turbina: (a) Abierto de palas verticales, (b) De disco con álabes, (c) De paletas verticales curvas, (d) Cerrado de paletas curvas con un anillo difusor. [20]

## 2.15. Conformación del Reactor tipo batch

### 2.15.1. Transferencia de calor en un reactor

La conducción en la cual el calor se transmite de partícula a partícula, es decir es propia de los sólidos y la convección que consiste en la transferencia de calor por la diferencia de densidades; es propia de los líquidos.

Independientemente del tipo de mecanismo de transporte de energía para que se lleve a cabo la transferencia de calor, el flujo del mismo se rige por:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Dónde:

Q= Flujo de calor que se transmite.

U= Coeficiente global de transferencia de calor.

A= Área de Transferencia.

$\Delta T$ = Gradiente de temperatura.

### 2.15.2. Diferencia de la temperatura media logarítmica

La media logarítmica de temperatura es el valor que permite determinar la fuerza que impulsa la transferencia de calor en sistemas de flujo, en la etapa correspondiente con base a las temperaturas extremas del sistema.

La media logarítmica queda expresada con la siguiente ecuación:

$$MLDT = \frac{(\Delta T1 - \Delta T2)}{\ln \frac{\Delta T2}{\Delta T1}}$$

Al utilizar la media logarítmica en la ecuación de transferencia de calor nos queda:

$$Q=U*A*MLDT$$

Donde

Q= Flujo de calor que se transmite.

U= Coeficiente global de transferencia de calor.

A= Área de Transferencia.

MLDT= Media Logarítmica de Temperatura.

### 2.15.3. Transferencia de calor en tanques agitados

Las correlaciones de transferencia de calor para soluciones agitadas en el interior de un recipiente y las paredes de la chaqueta viene dada por:

$$\frac{U\emptyset}{k} = a * (Nre)^b * Np^{\frac{1}{3}} * \frac{\mu^m}{\mu_w}$$

$$Nre = \frac{Dt^2 * t * \rho}{\mu}$$

$$Np_1 = \frac{Cp * \mu}{k}$$

$Dt$ =Diámetro interno del tanque (m)

$k$  = Conductividad térmica (J/msK)

$Nre$  = Número de Reynolds

$Da$ = Diámetro del agitador

$N$  = Velocidad del eje de agitación

$\rho$  = Densidad del fluido Kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  = Viscosidad del fluido Pa.S

$Np_1$  = Número de Pranttt

$C_p$  = Capacidad calorífica ( $\frac{J}{kgK}$ )

$\mu_w$  = Viscosidad del fluido a la temperatura de la pared Pa.S

a,b,m= Constantes según el tipo de agitador.

**Serpentín de Calentamiento.**- El serpentín de cobre proporciona uno de los medios más baratos para obtener superficies de transferencia de calor, para el diseño de los mismo se debe determinar el área de transferencia de calor necesario. [21]

# CAPÍTULO 3

## 3. PARTE EXPERIMENTAL PREVIA

### 3.1. Técnica utilizada para Demostrar el Funcionamiento del Reactor

Para verificar el funcionamiento del equipo se escogió la saponificación de Acetato de Etilo con Hidróxido de Sodio que al reaccionar dan como producto el Acetato de Sodio y el Etanol; son reactivos comunes y se obtuvieron en el laboratorio de Química Orgánica de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas.

## **3.2. Métodos**

Los métodos son procedimientos generales que tienen en común todas las ciencias; para el estudio de la reacción de saponificación existen básicamente dos métodos:

- Método Químico
- Método Físico

### **3.2.1. Método Químico**

#### **Titulación Ácido/Base**

Este método consiste en poner en contacto los reactivos en el reactor batch y extraer muestras a intervalos de tiempo específicos del sistema para determinar la concentración del Hidróxido de Sodio a medida que la reacción transcurre. Para asegurarse de que las medidas sean precisas se interrumpe la reacción vertiendo cada muestra en un exceso de ácido valorado; la concentración de álcali se determina mediante titulación por retorno de ácido. Este es un método visual en el que se emplea fenolftaleína como indicador, considerando el punto final de la titulación cuando la coloración de la muestra

permanece constante por más de un minuto. De esta manera se miden directamente la concentración y el tiempo.

### **3.2.2. Método Físico**

#### **Método Físico (Conductivimetría)**

Este método es aplicable cuando la reacción involucra iones, ya que la concentración varía con el tiempo y por lo tanto también varía la conductividad de la solución. La conductividad de un ión depende de la movilidad iónica, que a su vez depende del tamaño del ión; desde el momento en que los reactivos se mezclan, la conductividad a lo largo de la reacción irá disminuyendo en el transcurso de la misma. Como el Hidróxido es un electrolito fuerte, su conductividad puede considerarse proporcional a su respectiva concentración. Haciendo uso de esta característica se pueden calcular concentraciones a partir de la Conductividad. [22]

### **3.3. Curva de Calibración para un reactor batch a 0.1 M de Acetato de Etilo y 0.1 M de Hidróxido de Sodio**

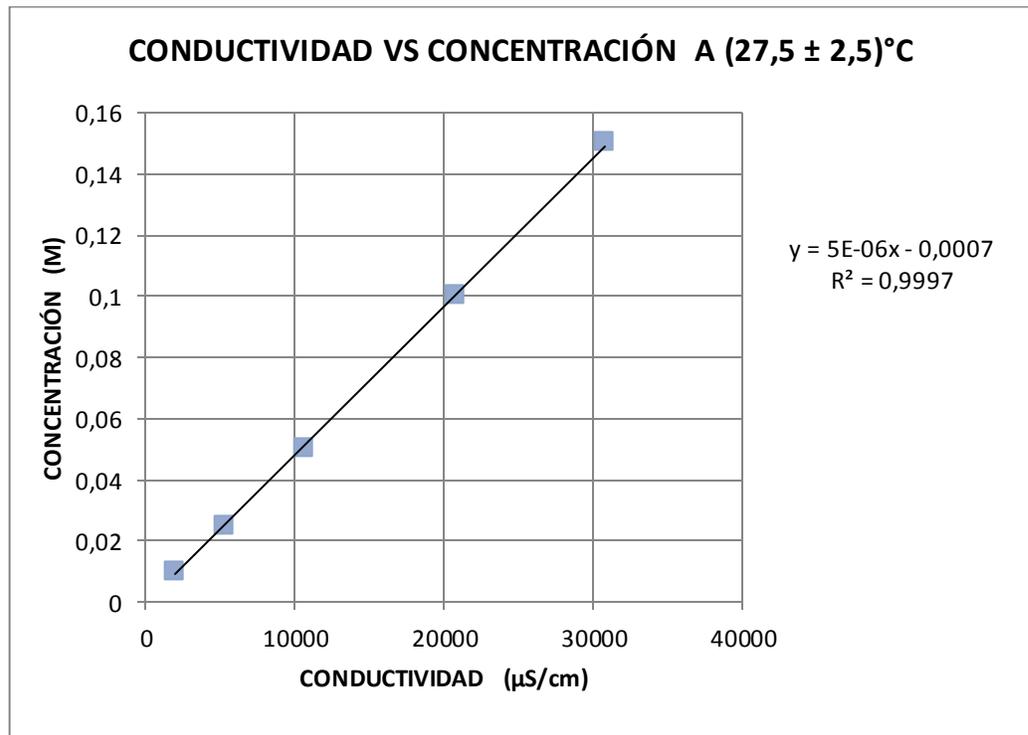
De acuerdo a las curvas de calibración trazadas a temperaturas de 20°C, 25°C, 30°C, 35°C y 40°C (Véase Anexo II); se percibe que las ecuaciones de las diferentes rectas son muy similares, y entre 25°C y 30°C existe una variación mínima entre las concentraciones calculadas en diferentes tiempos durante la saponificación.

Para un mejor desarrollo experimental, se traza una curva de calibración a 27,5°C la cual es útil para temperaturas entre 25°C y 30°C (temperaturas a las que se desarrolla favorablemente la reacción en estudio); en caso de efectuarse la reacción a  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,  $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,  $(45 \pm 2)^\circ\text{C}$  se utilizarán las ecuaciones de las rectas correspondientes a dichas temperaturas. (Véase Anexo II).

**Tabla 3.1.** Datos para la curva de calibración de NaOH a  $27,5^{\circ}\text{C} \pm 2,5$  en diferentes concentraciones.

<b>27,5°C ± 2,5</b>	
<b>CONDUCTIVIDAD uS/cm</b>	<b>CONCENTRACION MOLAR NaOH</b>
2002.5	0,010
5260	0,025
10610	0,050
20850	0,100
30750	0,150

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T.



**Gráfica 3.1.** Curva de calibración del NaOH a (27,5 ± 2)°C en diferentes concentraciones.

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T.

### 3.3.1. Ecuación de la recta para valores de conductividad entre (27,5 ± 2,5) °C.

Ecuación de la recta tomada de la curva de calibración:

$$y = 0,000005x - 0,0007 \quad \text{Ecuación 4.}$$

Dónde:

y= Concentración molar de NaOH

x= Conductividad del NaOH

**Reemplazando:**

$$\text{Concentración} = (0,000005 * \text{Conductividad}) - 0,0007$$

### 3.4. Descripción de los ensayos a nivel laboratorio

Se realizan pruebas a nivel laboratorio con el fin de determinar los datos que se usaran para la operación del reactor batch, estos ensayos se realizaron utilizando 3 vasos de precipitación de 1000 ml, se cargan 500ml de Hidróxido de Sodio 0,1M; 0,05M; 0,2M y 500ml de Acetato de Etilo 0,1M; 0,1M; 0,15M respectivamente.

Se varían las revoluciones del agitador magnético empleado para la mezcla de soluciones evitando siempre la formación de espuma; con las concentraciones mencionadas se realizan 4 pruebas a 100rpm, 200rpm, 250rpm y 500rpm; con el objetivo de determinar las concentraciones y velocidad de agitación adecuadas a través del tiempo para lograr una reacción de segundo orden como está establecido teóricamente, para ello se mide la conductividad y pH cada 5 minutos durante 45 minutos (tiempo aproximado en que la reacción se estabiliza). (Véase Anexo II).

### **3.5. Determinación de la constante cinética para una reacción de saponificación en un reactor batch.**

#### **3.5.1. Materiales y reactivos**

##### **Materiales**

- 1 Reactor batch.
- 1 pipeta graduada de 10 ml.
- 1 vaso de precipitación de 1000 ml.
- 2 matraces volumétricos de 1000 ml.

- 3 vasos de precipitación de 250 ml.
- Cronómetro.
- Espátula.
- 1 Balanza analítica de 4 decimales
- Agua destilada

### **Reactivos**

- Hidróxido de sodio.
- Acetato de etilo.

### **3.5.2. Procedimiento**

- Preparar 15 litros de Hidróxido de Sodio 0.1M y 15 litros de Acetato de Etilo 0.1 M.
- Verificar condiciones de operación, temperatura aproximada ( $27,5 \pm 2,5$ )°C.
- Cargar cuidadosamente el Hidróxido en el interior del reactor.

- Encender el motor que accionará el agitador y verter brevemente el Acetato de Etilo en el interior del reactor.
- Mientras se carga el Acetato de Etilo poner el cronómetro en marcha.
- Seguir el proceso mediante el registro manual de la conductividad a intervalos de 5 minutos, tomando pequeñas muestras para la lectura. La toma de datos se realizará hasta que la variación de las lecturas de conductividad sea mínima (aproximadamente 45 minutos), para obtener el mayor número de datos empleados posteriormente en la elaboración de la gráfica  $1/c$  vs  $T$ .

### 3.5.3. Preparación de Soluciones

**Tabla 3.2.** Preparación de las soluciones de Hidróxido de Sodio a diversas concentraciones para realizar la curva de calibración.

Materiales	Procedimiento	Cálculo
-1 Balanza analítica -5 Balones aforados de 100 ml -1 Vaso de precipitación de 500 ml -Agua destilada -Hidróxido de sodio	-Pesar los gramos de NaOH según el cálculo realizado para 0.01M; 0.025M; 0.05M; 0.1M y 0.15 M -Colocar la cantidad pesada en el balón aforado de 100 ml. -Aforar el balón hasta la marca indicada con agua destilada. -Realizar el mismo procedimiento para cada una de las cinco concentraciones mencionadas	$grNaOH = C * PM * V$ <p>Donde:            C = Concentración a la cual queremos la solución (mol/l)            PM = Peso molecular del hidróxido de sodio            V = Volumen del balón aforado</p>

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T.

### Preparación de la solución de NaOH 0,1M

Partiendo de la ecuación:

$$Cm = \frac{M}{V} \text{Ecuación 5.}$$

Despejando "M" tenemos

$$M = Cm(V)$$

El volumen de alimentación de NaOH en el reactor batch es de 3.96 galones, que equivalen a 15 litros. Calculamos las moles:

$$M = 0.1M(15L)$$

$$M = 1.5\text{moles}$$

Convirtiendo los moles en gramos:

$$m = (1.5\text{moles}) \left(40 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)$$

$$m = 60\text{g}$$

Se pesan 60gr de NaOH para preparar 15L de concentración 0.1M.

**Preparación de la solución de Acetato de Etilo 0,1M**

El volumen de alimentación de Acetato de Etilo que emplearemos en el reactor batch es de 3.96 galones, que equivalen a 15 litros.

Calculamos las moles:

$$M = Cm(V)$$

$$M = 0,1M(15L)$$

$$M = 1.5\text{moles}$$

Convirtiendo los moles en gramos:

$$m = (1.5\text{moles}) \left( 88.1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)$$

$$m = 132.15\text{g}$$

A partir de la densidad = 0.898gr/ml (a 25 °C respecto al agua a 25 °C).

$$\rho = \frac{m}{V} \text{Ecuación 6.}$$

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{132.15\text{g}}{0.898 \frac{\text{g}}{\text{ml}}}$$

$$V = 147.16\text{ml}$$

La pureza del acetato de Etilo especificada en su ficha es del 99,90%, entonces el volumen real requerido es:

$$V = \frac{147,16\text{ml}}{0,999}$$

$$V = 147,30\text{ml}$$

Se miden 147,30ml de  $\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$  para preparar 15L de concentración 0,1M.

### 3.6. Datos adicionales

**Tabla 3.3.** Datos adicionales del Acetato de Etilo

<b>Datos</b>	<b>Valor</b>
Peso Molecular	88.1 g/mol
Densidad	0.898 g/mol
Viscosidad	0.45 Cp

**Fuente:** PERRY Robert H, Manual del Ingeniero Químico.

**Tabla 3.4.** Datos adicionales del Hidróxido de Sodio

<b>Datos</b>	<b>Valor</b>
Peso Molecular	40.0 g/mol
Densidad	2.1 g/mol

**Fuente:** PERRY Robert H, Manual del Ingeniero Químico.

**Tabla 3.5.** Datos adicionales de la capacidad calorífica de los reactivos y productos

<b>Capacidad calorífica</b>	<b>Valor</b>
Acetato de Etilo	169.6 J/mol K
NaOH	57.213 J/mol K
Acetato de Sodio	65.07 J/mol K
Etanol	97.49 J/mol K

**Fuente:** PERRY Robert H, Manual del Ingeniero Químico.

**Tabla 3.6.** Análisis físicos de la solución preparada de Hidróxido de Sodio 0,1M a 25°C

<b>Parámetros físicos</b>	<b>Valor</b>
Densidad	0.984 g/cm
Viscosidad	0.5 Cp (mPa s)

**Fuente:** Nuñez J; Udeos T.

**Tabla 3.7.** Análisis físicos de la solución preparada de Acetato de Etilo 0,1M a 25°C

<b>Parámetros físicos</b>	<b>Valor</b>
Densidad	0.894 g/cm
Viscosidad	0.44Cp (mPa s)

**Fuente:** Nuñez J; Udeos T.

### **3.7. Datos experimentales**

De los ensayos mencionados en el apartado 3.4 de la descripción de ensayos a nivel laboratorio, se concluye que las concentraciones ideales para operar el reactor batch son 0.1M para el Acetato de Etilo y 0.1M para el Hidróxido de Sodio, el volumen de alimentación será de 50% de cada uno de los reactantes. La velocidad de agitación que proporciona una mejor cinética de segundo orden es de 500 rpm, donde en los primeros 10 minutos la concentración disminuye a mayor velocidad y luego de forma pausada hasta estabilizarse (tiempo total de 45 minutos).

#### **3.7.1. Pruebas preliminares**

*Alimentación:* 0,1M Acetato de Etilo (500ml)

0,1M Hidróxido de Sodio (500ml)

**Tabla 3.8.** Datos obtenidos simulando el proceso en el laboratorio a  
25°C

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Conductividad (<math>\mu\text{s}</math>)</b>
0	11100
5	7520
10	5830
15	4950
20	4340
25	3900
30	3600
35	3360
40	3130
45	3020

**Fuente:** Nuñez J; Udeos T.

# CAPÍTULO 4

## 4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR BATCH

### 4.1. Cálculo para el Diseño del Reactor

#### 4.1.1. Cálculo del volumen del cilindro del reactor

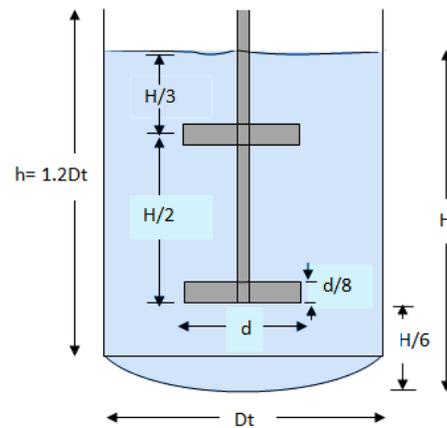
Se realizaron cálculos para las dimensiones del cilindro del reactor tomando un volumen para el mismo de 10 galones.

$$V = \pi * r^2 * h \text{ Ecuación 7.}$$

$$V = \frac{\pi * Dt^2 * h}{4}$$

$$\text{Donde } h = 1.2Dt$$

$$4 * V = \pi * Dt^2 * 1.2Dt$$



**Figura 4.1.** Esquema del cilindro

**Fuente:** Nuñez J; Udeos T.

$$V = \frac{\pi * Dt^2 * 1.2Dt}{4}$$

$$10\text{gal} * \frac{3.785\text{L}}{1\text{gal}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} = 0.0378\text{m}^3$$

$$4*(0.0378\text{m}^3) = 3.76Dt^3$$

$$Dt = \sqrt[3]{0.040270}$$

$$Dt = 0.3427\text{m} = 34.27\text{cm}$$

Se trabaja con un diámetro de 35cm para una mayor precisión de los cálculos posteriores.

$$h = 1.2Dt$$

$$h = 1.2 * 35 = 42cm$$

Se trabajará con una altura de 45 cm para mayor facilidad.

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

$$V = \frac{\pi * 35^2 * 45}{4}$$

$$V = 43295.07 \text{ cc}$$

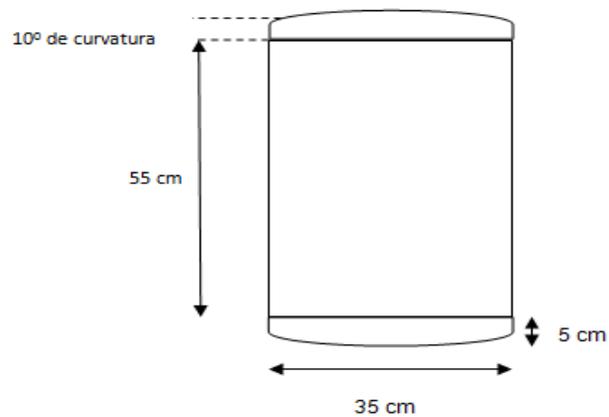
1galón tiene 3.785Litros

$$V_1 = 43.29 \text{ L} = 11.44 \text{ gal}$$

Se dejará un excedente de  $11.44\text{gal} - 10\text{gal} = 1.44\text{gal}$ , debido a que el serpentín, el eje y las paletas para agitación interferirán en la capacidad (volumen) del tanque.

Sobre la entrada del serpentín (altura del tanque), se dejarán 10 cm de altura adicionales como factor de seguridad del 1.25, para evitar que la acumulación de gases y en el caso que se forme espuma y ambos cambios físicos causen problemas durante el funcionamiento del

equipo, y mejorar la eficiencia del proceso, siendo la altura final del tanque 55cm.[23].



**Figura 4.2.** Dimensiones del tanque

**Elaborado por:** Nuñez J, Udeos T

#### 4.1.2. Cálculo del volumen del reactor

Se toma el volumen del cilindro  $V_1$  mas el volumen del asiento redondeado de la parte baja del cilindro.

$$V_r = V_1 + V_2$$

Donde  $V_2$  es el volumen del asiento redondeado, el cual se calculó con el volumen de casquete esférico. [24].

$$V_2 = \frac{1}{3} * \pi * hc^2 * (3 * r - hc) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$V_2 = \frac{1}{3} * \pi * 5^2 * [(3 * 17.5) - 5]$$

$$V_2 = 2487.09 \text{ cc} ; V_2 = 2.48 \text{ l} \quad V_2 = 0.65 \text{ gal}$$

$$V_r = V_1 + V_2$$

$$V_r = 11.44 + 0.65 = 12.09 \text{ gal}$$

#### 4.1.3. Cálculo del área de transferencia de calor del serpentín de calentamiento

$$Q_{ganado} = Q_{perdido} \quad \text{Ecuación 9}$$

Q ganado = Calor sensible ganado por la solución a calentarse

Q perdido = Calor latente cedido por el vapor

$$Q = U * A * (MLDT) \quad \text{Ecuación 10}$$

Para este caso, el mecanismo de transferencia es el de convección, ya que el de conducción por el espesor de la tubería de cobre es insignificante y el mecanismo de radiación térmica no existe (normalmente existe cuando hay gases de combustión).

Siendo así, el cálculo del área de transferencia del medio calefactor se determinará por la ecuación de enfriamiento de Newton (para convección de procesos de ebullición y condensación).

$$Q_{\text{conv}} = h \cdot A (T_s - T_f)$$

$h$  = Coeficiente de transferencia calor

$A$  = Área transferencia

$T_s$  = Temperatura superficie de contacto

$T_f$  = Temperatura del fluido lejos de la superficie

De acuerdo al texto de Kern (Transferencia de Calor) el Coeficiente de Transferencia de Calor por convección para procesos de ebullición y condensación, está en el siguiente rango:

$$h = 2500 \text{ a } 100000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$T_s$ , de acuerdo a los cálculos de la calidad de vapor, tomaría el valor de 310 °F (154,4°C) (Véase Anexo VII).

Tf, de acuerdo al concepto de Tf tomaría el valor de 287 °F (141,7°C).

Asumiendo un valor de h de 50000 W/m<sup>2</sup>.K, se tiene:

$$A = \frac{142463}{(50000 * (154,4 + 273) - (141,7 + 273))}$$

$$A = 0.23m^2$$

Si se emplea una tubería de cobre de 1/2 pulg de diámetro; la longitud de la tubería de cobre es:

$$1 \text{ pulg} = 0.0254 \text{ m}$$

$$\text{Longitud de circunferencia} = \pi * dt = \pi * 0.0127 = 0,040 \text{ m}$$

$$\text{Longitud tubería} = D$$

$$\text{Longitud circunferencia} = C$$

$$A = C * D$$

$$\text{Longitud tubería} = A/C$$

$$\text{Longitud tubería} = 5,75 \text{ m}$$

En el diseño se utilizaron 6 metros para los acoples al tanque y la trampa de vapor.

$$L \text{ diseño} = 6.0 \text{ m}$$

#### 4.1.4. Cálculo del flujo calórico

POR ENTALPIA

En el caso del vapor de agua pasa del estado **a** (líquido saturado) al estado **b** (vapor sobrecalentado), la diferencia de estas entalpías será el flujo calórico.

Estado **a**: Presión de 54,7psia la entalpía como líquido saturado es:

$$H_f = 256,42 \text{ BTU/lb}$$

Estado **b**: Presión de 54,7psi y Temperatura de sobrecalentamiento de 310 °F; la entalpía como vapor sobrecalentado es  $H = 1185 \text{ BTU/lb}$

Entonces, el flujo calórico es:

$$Q = m \cdot (H_b - H_a) \quad \text{Ecuación 11.}$$

$$Q = (517.5 \cdot (1185 - 256.42))$$

$$Q = 486129.15 \text{ BTU/h} = 512866 \text{ kJ/h} = 142463 \text{ W} \quad [25]$$

## **4.2. Cálculos para el sistema de agitación**

### **4.2.1. Cálculo de la longitud del eje de agitación**

Longitud eje= H= 55 cm.

### **4.2.2. Cálculo de la altura del eje de agitación**

La altura del eje debe de ser igual a la altura del tanque sin tomar en cuenta la altura que contendrá el volumen muerto, la altura será 55 cm y el eje tendrá un diámetro de 2.0 cm.

### **4.2.3. Cálculo de las dimensiones de las paletas**

Para agitadores radiales se debe cumplir lo siguiente:

$$0.3 < d/D_t < 0.6$$

$$0.3 < d/35 < 0.6$$

$$10.5 < d < 21$$

El diámetro de las paletas debe estar en un rango entre 10.5 a 21, por cuestión de que el tanque tiene un serpentín, definiremos un diámetro de 16 cm.

Las paletas deben cumplir  $d/8$ , por lo cual la altura es de 2cm. [26].

El equipo operará con dos paletas axiales, la primera ubicada a 8.3 cm y 37.5 cm desde el extremo inferior del eje respectivamente. (Véase Anexo V).

#### 4.2.4. Cálculo de las fracciones molares

$n_{NaOH} = 1,5$  moles

$n_{AcEt} = 1,5$  moles

$n_{totales} = 3,0$  moles

$$X_{NaOH} = \frac{n_{NaOH}}{n_{totales}} = \frac{1,5}{3,0} = 0,5$$

$$X_{AcEt} = \frac{n_{AcEt}}{n_{totales}} = \frac{1,5}{3,0} = 0,5$$

#### 4.2.5. Cálculo de la densidad y viscosidad de la mezcla

$$\rho_{mezcla} = \rho_{NaOH} * X_{NaOH} + \rho_{AcEt} * X_{AcEt} \text{ Ecuación 12.}$$

$$\rho_{mezcla} = 0,984 * 0,5 + 0,894 * 0,5$$

$$\rho_{mezcla} = 0,939 \frac{g}{cm^3}$$

$$\rho_{mezcla} = 0,939 \frac{g}{cm^3} * \frac{62,427961 lb/ft^3}{1 g/cm^3}$$

$$\rho_{mezcla} = 58,62 lb/ft^3$$

$$\mu_{mezcla} = \mu_{NaOH} * X_{NaOH} + \mu_{AcEt} * X_{AcEt} \text{ Ecuación 13.}$$

$$\mu_{mezcla} = 0,5 * 0,5 + 0,44 * 0,5$$

$$\mu_{mezcla} = 0,47 cP$$

$$\mu_{mezcla} = 0,47 cP * \frac{0,00067196897514 lb/pie - s}{1 cP}$$

$$\mu_{mezcla} = 3,158 \times 10^{-4} lb/pie - s$$

#### 4.2.6. Cálculo del número de Reynolds

Densidad de la mezcla en  $lb/pie^3$ , viscosidad en  $lb/pie-s$  y diámetro del reactor en pies.

$$Dt = 35cm * \frac{0,032808399 ft}{1cm} = 1.15ft$$

$$Nre = \frac{Da^2 * N * \rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 14.}$$

Dónde:

Da=Diámetro del rodete

N=Número de revoluciones por segundo

$\rho$ =Densidad de la mezcla

$\mu$ =viscosidad de la mezcla fluido

$$Nre = \frac{0.52^2 * 8,3 * 58,62}{3,158 * 10^{-4}}$$

$$Nre = 416599.235 = 4.2 * 10^5$$

#### 4.3. Cálculo de la potencia para accionar el eje

$$P = \frac{Np * N^3 * Da^5 * \rho_{mezcla}}{g_c} \quad \text{Ecuación 15.}$$

Donde

P=Potencia

Np= es número de potencia

N= Número de revoluciones por segundo

Da= Diámetro del rodete (pies)

$\rho$ = Densidad de la mezcla (lb/pie<sup>3</sup>)

$g_c$ = gravedad específica (pies/s<sup>2</sup>)

Por medio de la gráfica de correlaciones de potencia para rodetes específicos tomando en cuenta la curva 5 que corresponde a palas axiales Anexo VI Geankoplis C J Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, se obtiene el número de potencia  $N_p$  un valor de:  $N_p=0,4$

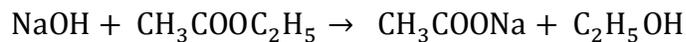
**Reemplazando:**

$$P = \frac{0,4 * 8,3^3 * 1,15^5 * 58,62}{32,17}$$

$$P = 308,9 \frac{ft-lb}{s} * \frac{1HP}{550 \frac{ft-lb}{s}} = 0.5 HP$$

Como no se encontró un motor que se acople a los HP teóricos, se implementó un motor de 1/3 HP. [27].

#### 4.4. Cálculo de la masa de reactivos cargados al reactor y la masa de los productos



P.M            40g/mol        88,11g/mol        82,03g/mol    46,06g/mol

a) Cálculo de la masa de los reactivos cargados al reactor

$$m\text{NaOH} = 60g$$

$$m\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 = 60g \text{ NaOH} * \frac{88,11g/mol \text{ CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5}{40g/mol \text{ NaOH}}$$

$$\text{masa total de reactivos} = m\text{NaOH} + m\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$$

$$\text{masa total de reactivos} = 60g + 132,16g$$

$$\text{masa total de reactivos} = 192,16g$$

b) Cálculo de la masa de los productos

$$m\text{CH}_3\text{COONa} = 60g \text{ NaOH} * \frac{82,03g/mol \text{ CH}_3\text{COONa}}{40g/mol \text{ NaOH}}$$

$$m\text{CH}_3\text{COONa} = 123,04g$$

$$m\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 60g \text{ NaOH} * \frac{46,06g/mol \text{ C}_2\text{H}_5\text{OH}}{40g/mol \text{ NaOH}}$$

$$m\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 69,09g$$

$$\text{masa total de productos} = m\text{CH}_3\text{COONa} + m\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$$

$$\text{masa total de productos} = 123,04g + 69,09g$$

$$\text{masa total de productos} = 192,13g$$

#### 4.5. Balance de energía

- a) Cuando se trabaja sin emplear calentamiento: Como la reacción se da a temperatura ambiente ( $27,5 \pm 2,5$ )°C se desprecia las pérdidas de calor hacia el exterior y obviamos un balance de energía simultáneo.
- b) Cuando se emplea el serpentín de calentamiento que utiliza vapor de agua como medio calefactor, se emplea un balance de energía. Véase la calidad del vapor que sale de la caldera en (Anexo VII)

$$\Sigma Q + \Sigma W + \Sigma \theta = \Delta E \quad \text{Ecuación 16.}$$

$\Sigma Q$ = Sumatoria de calor

$\Sigma w$ = Sumatoria de trabajo

$\Sigma E$ = Sumatoria de energías de flujo

$\Delta E$ = Cambio de energía total

Como el sistema es estacionario el cambio de energía total es cero ( $\Delta E=0$ ).

La sumatoria de calor estaría definida por el calor que entra (serpentín) y el calor que sale estaría dado por la energía de la reacción. [28].

$$\Delta H^{\circ}_{rxn} = \Sigma \Delta H^{\circ}_f \text{ productos} - \Delta H^{\circ}_f \text{ reactivos}$$

$$\Delta H^{\circ}_{rxn} = \Delta H^{\circ}_{etanol} + \Delta H^{\circ}_{AcNa} - \Delta H^{\circ}_{AcEt} - \Delta H^{\circ}_{NaOH}$$

$$\Delta H^{\circ}_{rxn} = [-56.12 - 169.8 + 105.86 + 101.99] \frac{KCal}{mol}$$

$$\Delta H^{\circ}_{rxn} = -18.07 \frac{KCal}{mol} = -75655.47 \frac{J}{mol} * 3mol = -226.96 KJ$$

$$-Q_s + W_e = 0$$

$$226.96 KJ = W_e$$

$$W_e = 226.96 KJ$$

**$\Delta H^{\circ}_{rxn}$** = Entalpía de reacción

**Q<sub>e</sub>**= Calor que entra (serpentín)

**Q<sub>s</sub>**=Calor que sale

**W<sub>e</sub>**= Trabajo del agitador

# CAPÍTULO 5

## 5. PUESTA EN MARCHA DEL REACTOR BATCH

### 5.1. Obtención de datos de la reacción de Saponificación de Acetato de Etilo con Hidróxido de Sodio en el Reactor Batch.

Concentración de NaOH= 0,1M

Concentración de Acetato de Etilo= 0,1M

Volumen de alimentación de NaOH= 15L

Volumen de alimentación de Acetato de Etilo= 15L

Duración de la prueba = 45 minutos.

Temperatura de Operación (para la prueba en estudio)= 25°C

Para la preparación de las soluciones y el correcto manejo del equipo ver el Manual de Operación del Reactor (Véase Anexo XIII).

**Tabla 5.1.** Datos obtenidos a 25°C

Tiempo (minutos)	Conductividad ( $\mu\text{s}$ )	Volumen inicial de NaOH 0,1M (Litros)	Volumen inicial de Acetato de Etilo 0,1M (Litros)	Volumen del producto (Litros)
0	19830	15	15	30
5	9990			
10	7679			
15	6286			
20	5490			
25	4966			
30	4570			
35	4201			
40	3950			
45	3722			

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T.

Para volumen y temperatura constante durante la reacción:

$$\frac{dC_A}{dT} = -k \cdot C_A^n$$

**C<sub>a</sub>**: Concentración puntual del reactivo

**T**: Tiempo

**k**: Constante cinética de la reacción

**n**: Orden de la reacción

**Orden uno (n=1)** Si al graficar  $\ln(C)$  vs Tiempo obtenemos una recta con pendiente negativa.

$$\frac{dC_A}{C_A} = -k \cdot dT$$

Integrando la expresión:

$$\ln(C_A) = -k \cdot T + \ln(C_{A_0})$$

**C<sub>A0</sub>**: Concentración inicial del reactivo **a**

**Orden dos (n=2)** Si al graficar  $1/C$  vs tiempo obtenemos una recta con pendiente positiva.

$$\frac{dC_A}{C_A^2} = -k \cdot dT$$

Integrando la expresión:

$$\frac{1}{C_A} = k \cdot t + \frac{1}{C_{A0}}$$

## 5.2. Constante teórica de velocidad de saponificación del Acetato de Etilo con Hidróxido de Sodio en el reactor batch

Para los cálculos se utilizarán los datos cinéticos teóricos, según la ecuación de Arrhenius.[29]

$$k(T) = A * e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

Donde:

- **kT**: Constante cinética (dependiente de la temperatura)
- **A**: Factor de frecuencia. Indica la frecuencia de las colisiones (mismas unidades de k)
- **Ea**: Energía de activación, expresada en J/mol.
- **R**: Constante universal de los gases. Su valor es 8,3143 J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup>

- **T:** Temperatura absoluta [K]

### Manipulación de la ecuación de Arrhenius:

Conocida la energía de activación se puede predecir el valor de la constante de velocidad  $k_2$  a la temperatura  $T_2$  a partir de otro valor de  $k$  a otra temperatura  $T$ .

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

**$k_2$ :**  $k_{\text{teórica}}$

$$k_{\text{teórica}} = 0,39175 \exp \left[ 5472,7 \left( \frac{1}{273} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad \text{Ecuación 17.}$$

Temperatura promedio de operación del reactor 25°C.

$T_2 = 298\text{K}$  (grados Kelvin)

Reemplazando el valor de la temperatura en la ecuación 17

$$k_{\text{teo}} = 0,39175 \exp \left[ 5472,7 \left( \frac{1}{273} - \frac{1}{298} \right) \right]$$

$$k_{\text{teo}} = 2,10 \frac{m^3}{kmol * min}$$

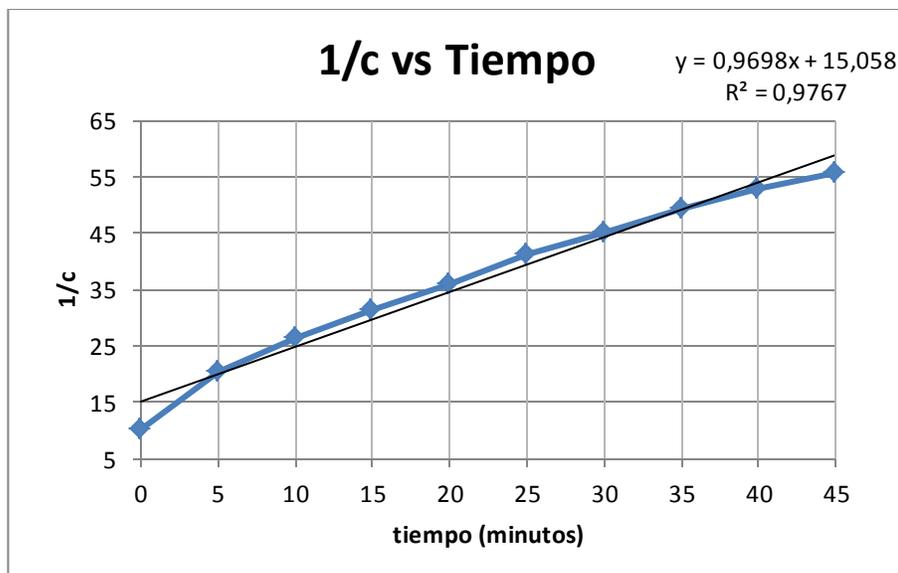
$$k_{\text{teo}} = 2,10 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol} * \text{min}} * \frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3} * \frac{1\text{kmol}}{1000\text{mol}} = 2,10\text{L/mol} * \text{min}$$

### 5.3. Cálculo de la constante de velocidad de reacción experimental en el reactor batch.

**Tabla 5.2.** Datos para la determinación de la constante de velocidad obtenidos a 25°C

TIEMPO MINUTOS	CONDUCTIVIDAD uS/cm	CONCENTRACION MOLAR NaOH	1/C
0	19830	0,0985	10,15744033
5	9990	0,0493	20,30456853
10	7689	0,0377	26,49357531
15	6499	0,0318	31,45148608
20	5695	0,0278	36,00360036
25	4996	0,0243	41,18616145
30	4580	0,0222	45,04504505
35	4201	0,0203	49,24895346
40	3910	0,0189	53,05039788
45	3722	0,0179	55,8347292

Elaborado por: Nuñez J; Udeos T.



**Gráfico 5.1.**Datos para una cinética de segundo orden tomados a 25°C

Como la reacción de saponificación de Acetato de Etilo con NaOH es una reacción irreversible de segundo orden global y de orden uno con respecto a cada uno de los reactivos, la velocidad con la que se consumen está dada por la ley de la velocidad:

$$-r_A = kC_A C_B$$

$$-r_A = kC_A^2$$

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^2$$

$$-\frac{dC_A}{kC_A^2} = dt$$

Integrando:

$$-\frac{1}{k} \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A^2} = \int_0^t dt$$

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

$$k = \frac{\left( \frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} \right)}{t - t_0}$$

$$k = \frac{(20,304 - 10,157)}{5 - 0}$$

$$k = \frac{2,02L}{mol * min}$$

#### 5.4. Cálculo de la conversión de Hidróxido de Sodio y Acetato de Etilo en el reactor

$$C_A = C_{A0}(1 - X_A) \text{ Ecuación 18. [30].}$$

$$X_A = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}}$$

$$X_{NaOH} = \frac{0,1M - 0,017M}{0,1M}$$

$$X_{NaOH} = 0,83$$

$$X_{Ac.Etilo} = 0,17$$

**C<sub>A0</sub>**= Concentración inicial

**C<sub>A</sub>**= Concentración final

**X<sub>A</sub>**= Conversión (Valores entre 0-1)

### 5.5. Cálculo del tiempo de vida media

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{2^{n-1} - 1}{kC_{A_0}^{n-1}(n-1)}$$

Ecuación 19.

Donde:

**T<sub>1/2</sub>**: Tiempo de vida media experimental (min) (tiempo necesario para que la concentración inicial se reduzca en un 50%)

**k**: Constante cinética experimental (lt/mol\*min)

**C<sub>A0</sub>**: Concentración inicial (mol/lt)

**n**: Orden de reacción (adimensional)

Como la reacción de acetato de etilo es de segundo orden,  $n=2$ :

$$T_{1/2} = \frac{1}{k * C_{A0}}$$

$$T_{1/2} = \frac{1}{2,02 * 0,1} = 5 \text{ minutos}$$

En la tabla 4.2 se puede observar que al minuto 5 disminuyó la concentración del NaOH en aproximadamente 50%, lo cual se puede determinar también mediante la ecuación 19.[31].

### 5.6. Cálculo del porcentaje de desviación

$$\% \text{desviación} = \frac{k_{\text{teo}} - k_{\text{exp}}}{k_{\text{teo}}} * 100 \text{ Ecuación 20.}$$

$k_{\text{teo}}$ : Constante Cinética Teórica

$k_{\text{exp}}$ : Constante cinética experimental

$$\% \text{desviación} = \frac{2,10 - 2,02}{2,10} * 100$$

$$\% \text{desviación} = 3,80\%$$

### 5.7. Cálculo de la energía de activación

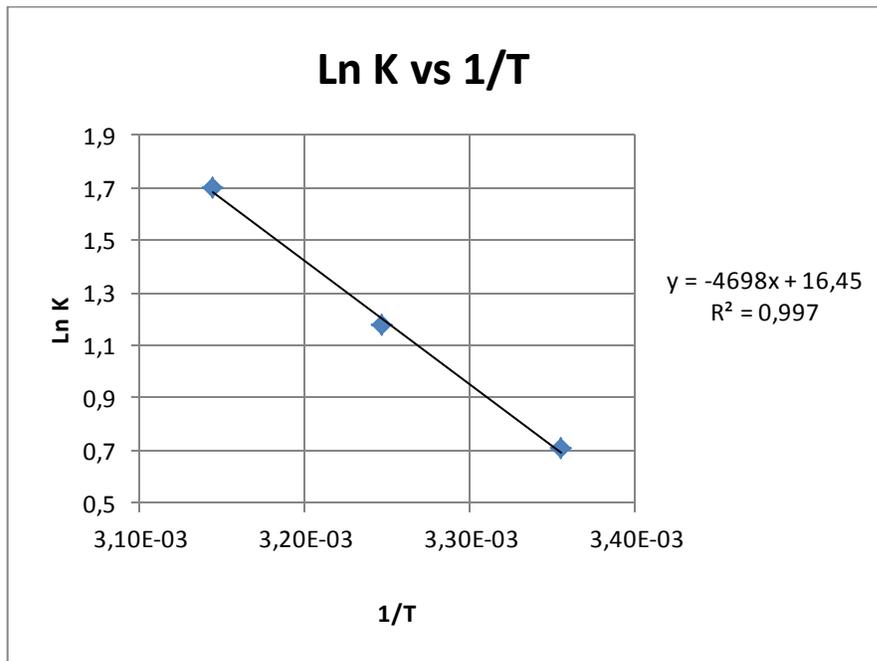
Temperaturas de trabajo 25°C, 35°C y 45°C

Se realizaron dos pruebas adicionales a 35°C y 45°C respectivamente, de la misma forma en la que se realizó la prueba a 25°C, pero añadiendo el uso del serpentín de calentamiento instalado en el equipo para proporcionar el calor necesario a los reactantes.

**Tabla 5.3.** Datos obtenidos en las diferentes pruebas realizadas

Experimento	T (K)	k (l/mol*min)	1/T (K-1)	ln k
1	298	2,02	3,36E-03	0,70309751
2	308	3,24	3,25E-03	1,17557333
3	318	5,45	3,14E-03	1,69561561

**Fuente:** Nuñez J; Udeos T.



**Gráfico 5.2.**Ln vs 1/T

**Fuente:** Nuñez J; Udeos T.

Representando Ln k frente a 1/T (gráfico 5.2) se ajusta una recta cuya ecuación es la correspondiente a la ecuación de Arrhenius.

Ecuación de Arrhenius: [32].

$$\text{Ln } k = \text{Ln } A - \frac{E_A}{R \cdot T} \text{ Ecuación 21.}$$

Siendo:

**A**= Factor de frecuencia Litros/mol\*min (mismas unidades de k)

**E<sub>a</sub>**= Energía de activación KJ/mol

**T**= Temperatura en Kelvin

**R**= Constante de los gases ideales 8,31 J/mol\*K

**k**= Constante de velocidad Litros/mol\*min

Ecuación de la recta:  $\ln k = 16,45 - 4698 * \frac{1}{T}$

$$\text{Pendiente} = -\frac{E_a}{R}$$

$$-4698 = -\frac{E_a}{8,31 \text{ J/mol} * k}$$

$$4698 \text{ K} * 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} * \text{K}} = E_a$$

$$E_a = 39,04 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

## 5.8. Análisis y discusión de resultados

En la tabla 5.2 y en el gráfico 5.1 se puede observar como la conversión en la saponificación del Acetato de Etilo aumenta paulatinamente a lo largo del tiempo que se ejecuta la reacción. En los primeros minutos de iniciada la reacción estos cambios ocurren de forma más pronunciada pero, a medida que transcurre el tiempo de la reacción se va estabilizando porque está cerca de completarse el período de reacción (alcanzar la conversión máxima). Este comportamiento es típico en la conversión de un reactivo durante una reacción isotérmica.

Los valores mostrados en la tabla 5.2, referentes a la conversión en diferentes intervalos de tiempo no son calculados a partir de los moles consumidos ni los moles alimentados, si no, a través de la medición del parámetro de conductividad por medio de un conductímetro, el mismo que mide la disminución de la conductividad del Hidróxido de Sodio a través del tiempo ya que la del Acetato de Etilo es insignificante en comparación a la del Hidróxido; esto quiere decir que es posible calcular la conversión de un reactivo en una reacción isotérmica a partir del seguimiento del cambio de una propiedad física

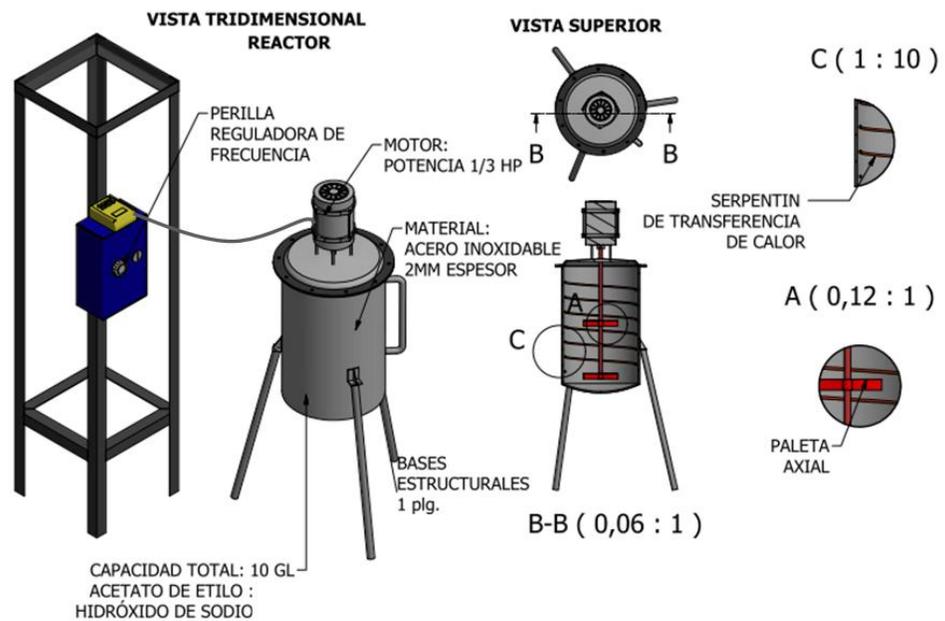
o química en función del tiempo, y que sea aditiva y proporcional a la concentración. Calculando la conversión puntual del NaOH, la cual es igual a la del Acetato de Etilo porque la reacción es equimolar, se puede obtener el valor de la concentración puntual conociendo previamente la concentración inicial. Con los valores de concentración puntual de NaOH (reactivo en seguimiento), se realiza el ajuste al modelo cinético de orden 2 mediante el uso de la curva de calibración del NaOH a diferentes concentraciones para temperaturas de  $(27,5 \pm 2,5)^\circ\text{C}$  (Tabla 3.1 y Gráfica 3.1).

Analizando los resultados obtenidos, estos fueron bastante satisfactorios ya que, al calcular la constante cinética de la reacción se obtuvo un porcentaje de desviación del 3.80% en base a la comparación con la constante teórica, lo que indica que las condiciones en las que se llevó a cabo la reacción fueron adecuadas. En cuanto a la energía de activación para la reacción de saponificación a  $25^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$  y  $45^\circ\text{C}$  respectivamente, se obtuvo un valor de  $E_a=39,04\text{KJ/mol}$  (positivo) porque se añadió calor para alcanzar las dos últimas temperaturas ( $35^\circ\text{C}$  y  $45^\circ\text{C}$ ).

# CAPÍTULO 6

## 6. DIAGRAMA DE INSTALACIÓN DEL REACTOR BATCH

### 6.1. Esquema del reactor batch



**Figura 6.1.** Diagrama del Reactor Batch

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T.

## 6.2. Materiales usados en la construcción

Para seleccionar el material que se usará en la construcción de un equipo, se consideran los siguientes aspectos:

- a) Las tendencias corrosivas y erosivas de los reactivos en la reacción.
- b) La aplicación industrial, como es el caso de industrias farmacéuticas y alimenticias, donde en los requerimientos de higiene para la prevención de contaminantes es esencial el uso de aleaciones especiales.
- c) Los recursos económicos disponibles.
- d) La preferencia del usuario.

En base a estos puntos mencionados y tomando en consideración el disponer de un reactor piloto de gran duración; a continuación, se describen los materiales empleados para la construcción del Reactor tipo Batch.

El reactor consta de 2 partes tanto el cuerpo del mismo (tanque) y una tapa, el tanque posee una brida al igual que la tapa, y mediante 12 tornillos se acoplan; el reactor está construido de una plancha de acero inoxidable AISI 304 de 2mm de espesor.

Para la soldadura del equipo se emplea la TIG, la cual sella y une perfectamente las partes del tanque de acero inoxidable, asegurando que no existan fugas en el mismo, logrando un acabado completamente liso para darle una buena estética. Con esta soldadura, se acoplan cada una de las bridas y los neoplos al reactor. Se une el cuerpo a la tapa del reactor por medio de pernos de acero inoxidable de 8 mm; además de un empaque de lámina de caucho neopreno, utilizado en la industria alimenticia y muy resistente a altas temperaturas.

### **Tuberías y Accesorios**

Las tuberías para la alimentación de los reactivos almacenados en los dos tanques son de polipropileno de ½" (con accesorios del mismo material (uniones, codos, T, reductores tipo bush y nudos).

Las válvulas para la alimentación son esféricas o de bola cuyo cuerpo es de PVC y una válvula de aguja de cuerpo de bronce.

Las tuberías de vapor son de hierro negro con accesorios del mismo material de ½" para la entrada de vapor; y de acero inoxidable con accesorios de hierro negro de 1" para la salida de vapor.

La válvula para la entrada de vapor es de bola, elaborada de hierro negro con asientos de acero inoxidable, junto a la misma se encuentra un medidor de presión.

Las tuberías para el condensado de vapor son de polipropileno de  $\frac{1}{2}$ " y un accesorio de hierro negro (trampa de vapor) instalada en el extremo inferior del serpentín de cobre por donde sale el condensado. El medidor de nivel está formado por un par de codos  $\frac{1}{2}$ " a  $45^\circ$  y una manguera plástica de  $\frac{1}{2}$ ". Este medidor está conectado al cuerpo del reactor.

En la parte baja del cuerpo del reactor se ubica un termómetro que marca un rango de lectura de  $0^\circ\text{C}$  a  $150^\circ\text{C}$ .

Para la purga el tanque posee un neplo de  $\frac{1}{2}$ " con una válvula tipo bola.

### **6.3. Descripción del Diagrama de Instalación**

El Reactor Batch con una capacidad de operación de 10 galones posee un motor de  $\frac{1}{3}$  hp para accionar el eje de agitación, las revoluciones por minuto son reguladas mediante un variador de

frecuencia de 60 Hz marca Siemens, el mismo que está conectado a una perilla con diferentes niveles para aumentar o disminuir la frecuencia. (Véase Anexo X).

Los breakers para proporcionar la energía para accionar el variador se encuentran en el cajetín.

El eje de agitación está conformado por dos paletas axiales fabricadas de acero inoxidable de 3 mm de espesor, 16 cm de largo y 2,5 cm de altura. Además el tanque cuenta con un serpentín de cobre para calentamiento interno, el mismo que tiene 70 cm de largo y  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro, enrollado en 6 vueltas dentro del interior del tanque y con las respectivas conexiones de líneas de vapor (Se emplea calentamiento en la presente tesis únicamente para calcular la energía de activación, la tesis se centra exclusivamente en la saponificación a  $(27.5 \pm 2.5) ^\circ\text{C}$ ).

El reactor cuenta con dos tanques para el almacenamiento previa a la alimentación de los reactivos, una bomba de  $\frac{1}{2}$  hp, los mismos que se usarán en el caso de operar el reactor en flujo continuo dándole versatilidad al equipo. Los detalles y diagramas completos se encuentran en la sección Anexos. (Véase Anexo IV).

# CAPÍTULO 7

## 7. COSTOS Y MATERIALES

### 7.1. Requerimiento presupuestario

#### 7.1.1. Recursos materiales

**Tabla 7.1.** Costo de recursos materiales

<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>COSTOS (Dólares)</b>
Materiales y suministros de oficina.	100,00
Reactivos para la prueba de Laboratorio (Hidróxido de Sodio y Acetato de Etilo)	0,00
Materiales para la construcción del equipo (Anexo III)	1000,00
Estructura del equipo	50,00
Transporte	80,00
Varios	100,00
<b>Total</b>	<b>1320,00</b>

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T.

### 7.1.2. Recursos de operación

La operación del equipo no generó ningún costo tanto material como energético, los reactivos Hidróxido de sodio y el Acetato de Etilo fueron donados por la Universidad y el reactor operará dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias que pertenece al Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas.

### 7.1.3. Recursos humanos

**Tabla 7.2.** Costo de recursos humanos

<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>COSTOS (Dólares)</b>
Mano de obra para la construcción del equipo	400,00
Mano de obra para las conexiones del sistema eléctrico	50,00
<b>Total</b>	<b>450,00</b>

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T.

#### 7.1.4. Recursos totales

**Tabla 7.3.** Costo de recursos totales

<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>COSTOS (Dólares)</b>
Recursos Humanos	450,00
Recursos Materiales	1320,00
Subtotal	1770,00
Imprevistos	80,00
<b>Total</b>	<b>1850,00</b>

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T.

# CAPÍTULO 8

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1. Conclusiones

- Se efectuó el diseño y construcción de un reactor batch en acero inoxidable 304 AISI por su resistencia a la corrosión, la capacidad de operación del equipo es de 10 galones. La instalación de un variador de frecuencia junto con un motor de 1/3 hp fue indispensable, para poder regular la velocidad de giro del eje de agitación en diferentes rangos (300-1200) rpm.
- A lo largo del tiempo se evidenció que la velocidad de reacción en la saponificación del Acetato de Etilo con Hidróxido de Sodio disminuye a medida que los reactivos se agotan. Esto se notó por disminución de

la conductividad (por el agotamiento del NaOH que estaba reaccionando).

- El incremento de la temperatura a la cual se lleva a cabo una reacción isotérmica aumenta la velocidad de reacción de la misma. Esto se comprueba con valores más altos en la constante cinética para temperatura más elevada.
- A una mayor temperatura  $T$ , una fracción mayor de moléculas poseen la energía necesaria y la reacción se produce a mayor velocidad, esto se comprobó por el incremento del valor de la constante cinética.
- Se determinó que dentro del reactor el régimen de flujo es turbulento debido a que se obtuvo un número de Reynolds de  $4.2 * 10^5$ .
- Se obtuvo una conversión de hidróxido de sodio de 89%, una concentración final de 0.0179 mol/l y una constante de velocidad de  $2,10L/mol * min$  lo que demuestra el funcionamiento del reactor es óptimo.
- Al graficar los valores inversos de la concentración ( $1/CA$ ) obtenidos durante la experimentación observamos que se ajusta al modelo de una reacción de 2do orden, por lo que se determina que esta reacción es de tipo 2 (segundo orden).

- Principal razón porque un aumento de temperatura aumenta la velocidad de reacción es que hay un mayor número de partículas en colisión que tienen la energía de activación necesaria para que suceda la reacción

## **8.2. Recomendaciones**

- Preparar los reactivos en una área ventilada (de ser posible usar una sorbona), con el fin de disminuir el fuerte olor que desprende el Acetato de Etilo durante su manipulación.
- Se recomienda utilizar de inmediato el hidróxido de sodio para preparar las soluciones además de un almacenamiento adecuado del reactivo debido a que es una sustancia hidrófila.
- Para las prácticas de laboratorio en el reactor se recomienda utilizar reactivos de alta pureza para que tenga lugar la reacción deseada.
- Usar mascarilla, mandil y guantes durante la preparación de los reactivos y durante su posterior carga y descarga, para evitar derrames y contacto con la piel, usar pipetas de clase A para disminuir

el error proporcionado por el material de vidrio; así como también balones aforados.

- En el anexo IX se encuentran las hojas de seguridad de los compuestos utilizados. Los riesgos son el contacto con los ojos, la piel, posibilidad de inhalación, ingestión y fuego.
- Leer el manual antes de su puesta en marcha para tener en cuenta los parámetros de control involucrados y evitar posteriores fallas.
- Luego de culminada la práctica descargar el producto final en la alcantarilla del laboratorio y posteriormente lavar con agua internamente el tanque y secar bien porque el Hidróxido de Sodio es muy corrosivo.
- En caso de realizar una práctica que emplee vapor, encender el caldero 30 minutos antes y revisar las conexiones de líneas de vapor hacia el reactor.

# **ANEXOS**

## Anexo I

### Pruebas de Laboratorio



Soluciones de NaOH y Acetato de Etilo a diferentes concentraciones



Preparación de soluciones y medición de conductividad



Prueba a escala laboratorio para encontrar las revoluciones óptimas de mezclado

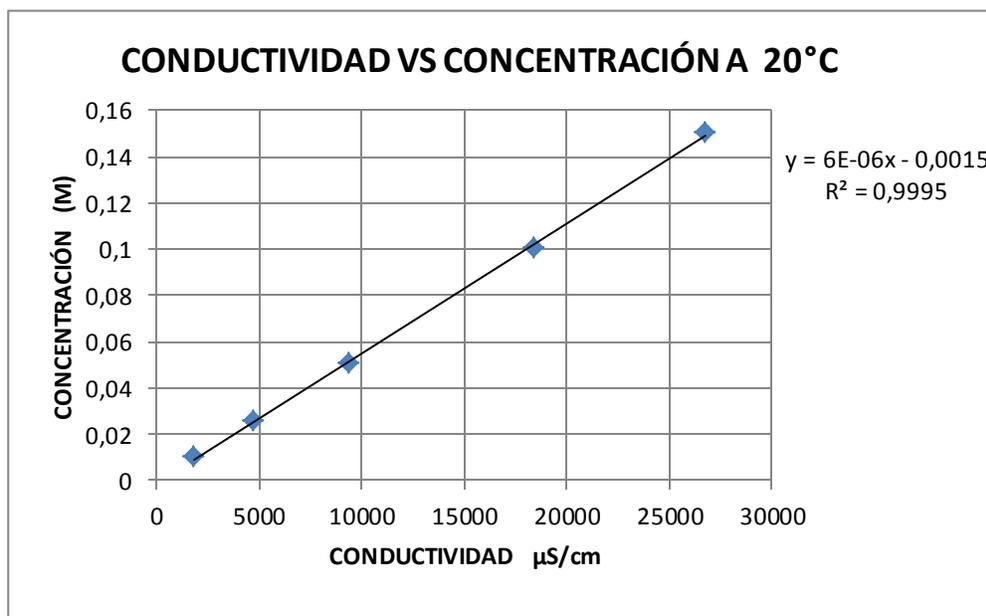
## Anexo II

Curvas de calibración a diferentes temperaturas

Datos obtenidos a 20°C

20°C	
CONDUCTIVIDAD NaOH $\mu\text{S/cm}$	CONCENTRACIÓN MOLAR NaOH
1835	0,01
4710	0,025
9390	0,05
18390	0,1
26800	0,15

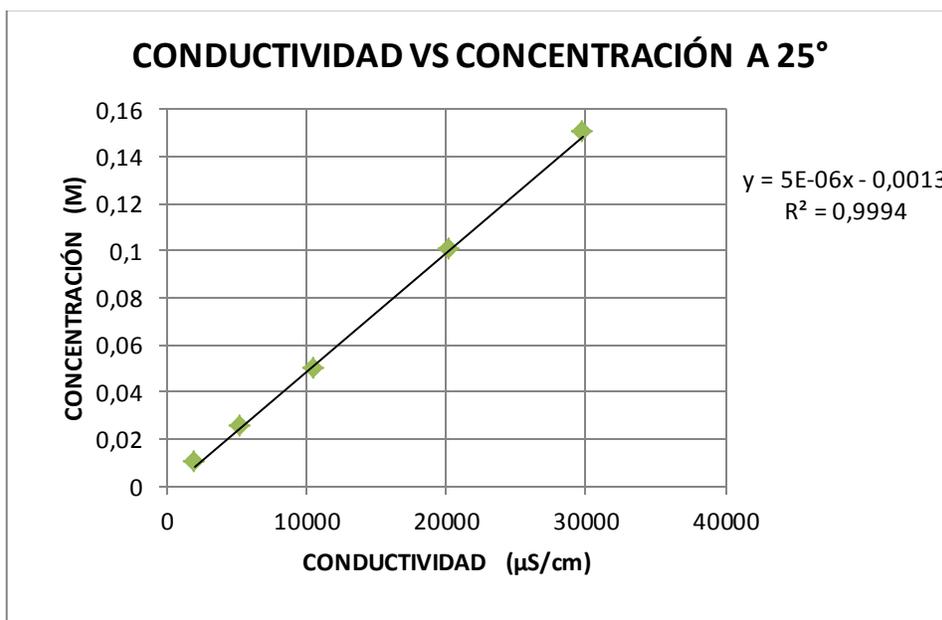
Curva de calibración del NaOH a 20°C en diferentes concentraciones



Datos obtenidos a 25°C

25°C	
CONDUCTIVIDAD NaOH $\mu\text{S}/\text{cm}$	CONCENTRACIÓN MOLAR NaOH
1925	0,01
5230	0,025
10520	0,05
20300	0,1
29800	0,15

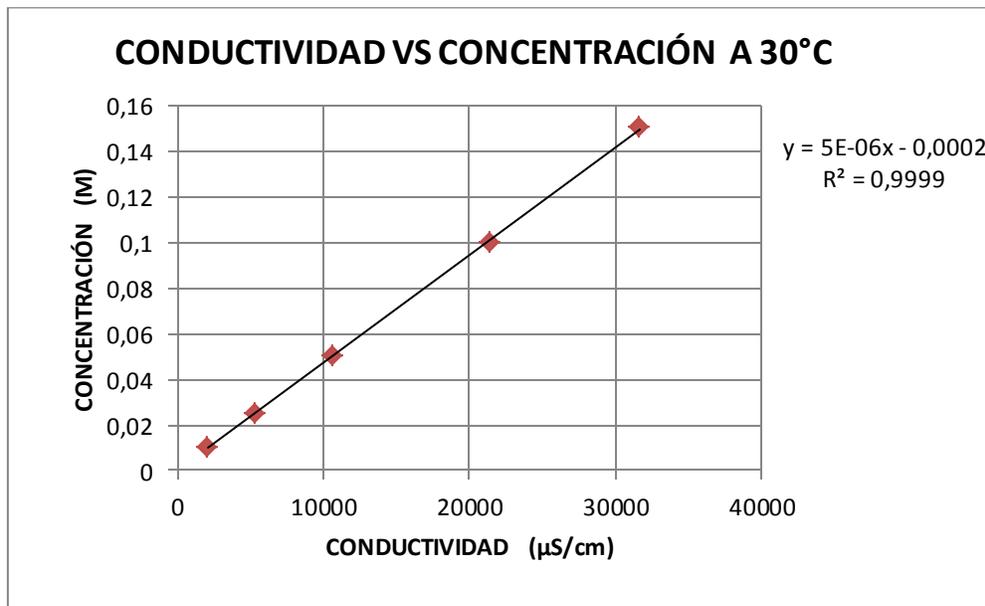
Curva de calibración del NaOH a 25°C en diferentes concentraciones



Datos obtenidos a 30°C

30°C	
CONDUCTIVIDAD NaOHuS/cm	CONCENTRACIÓN MOLAR NaOH
2080	0,01
5290	0,025
10700	0,05
21400	0,1
31700	0,15

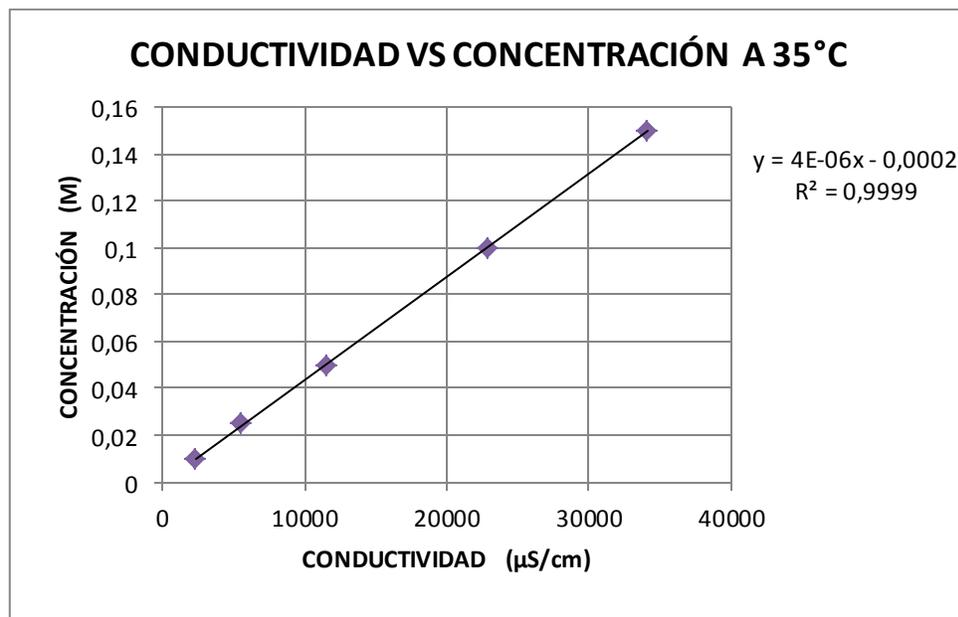
Curva de calibración del NaOH a 30°C en diferentes concentraciones



Datos obtenidos a 35°C

35°C	
CONDUCTIVIDAD NaOH $\mu\text{S/cm}$	CONCENTRACION MOLAR NaOH
2300	0,01
5650	0,025
11550	0,05
22900	0,1
34100	0,15

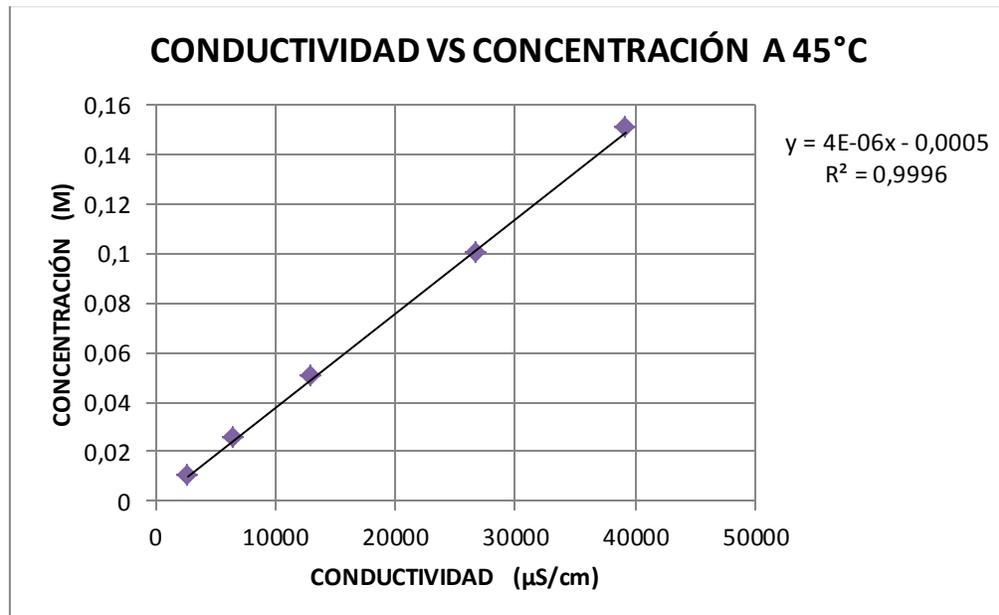
Curva de calibración del NaOH a 35°C en diferentes concentraciones



Datos obtenidos a 45°C

45°C	
CONDUCTIVIDAD NaOHuS/cm	CONCENTRACION MOLAR NaOH
2800	0,01
6600	0,025
13050	0,05
26800	0,1
39180	0,15

Curva de calibración del NaOH a 45°C en diferentes concentraciones



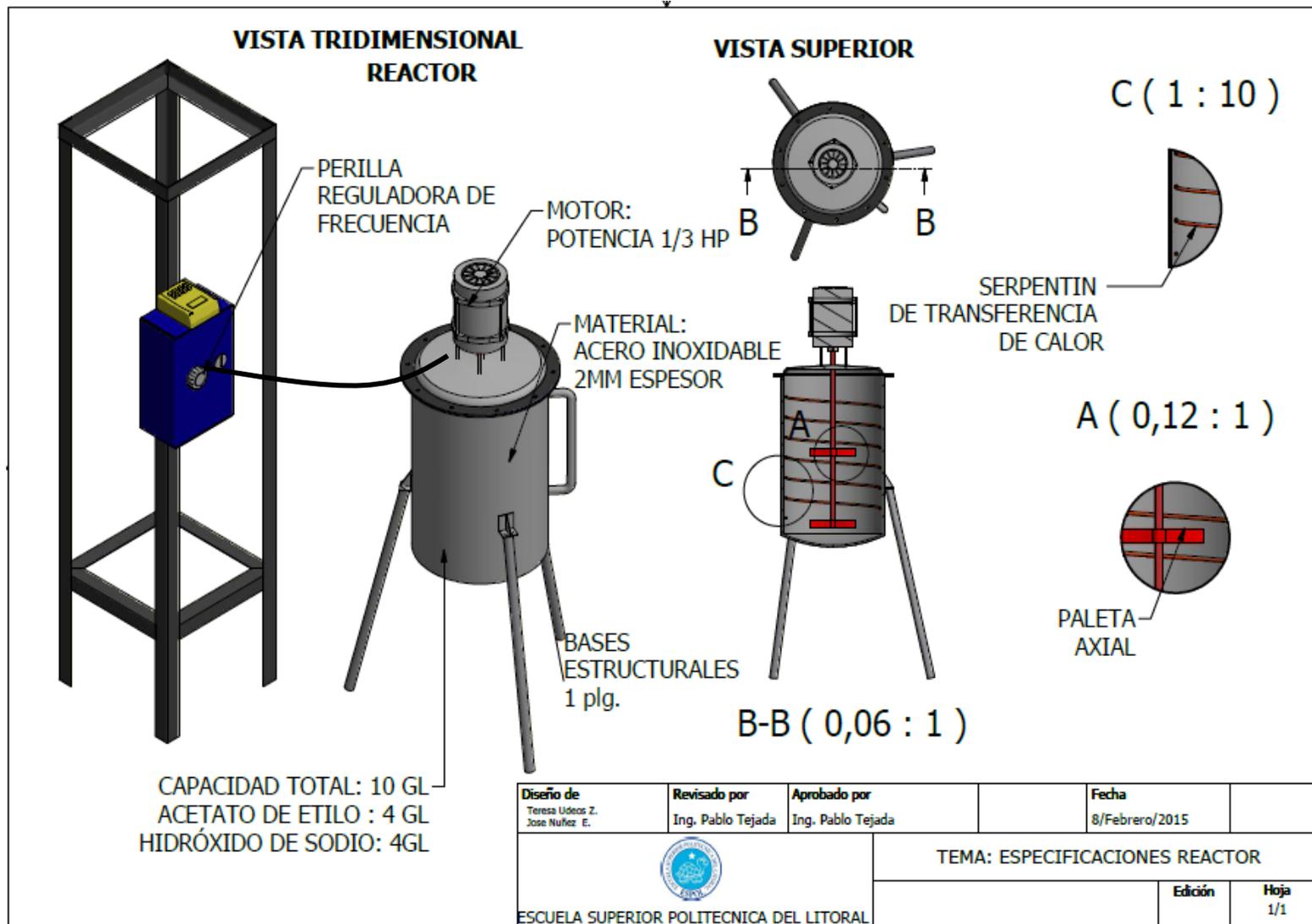
**Anexo III**

Valores Materiales y equipos para la construcción el reactor

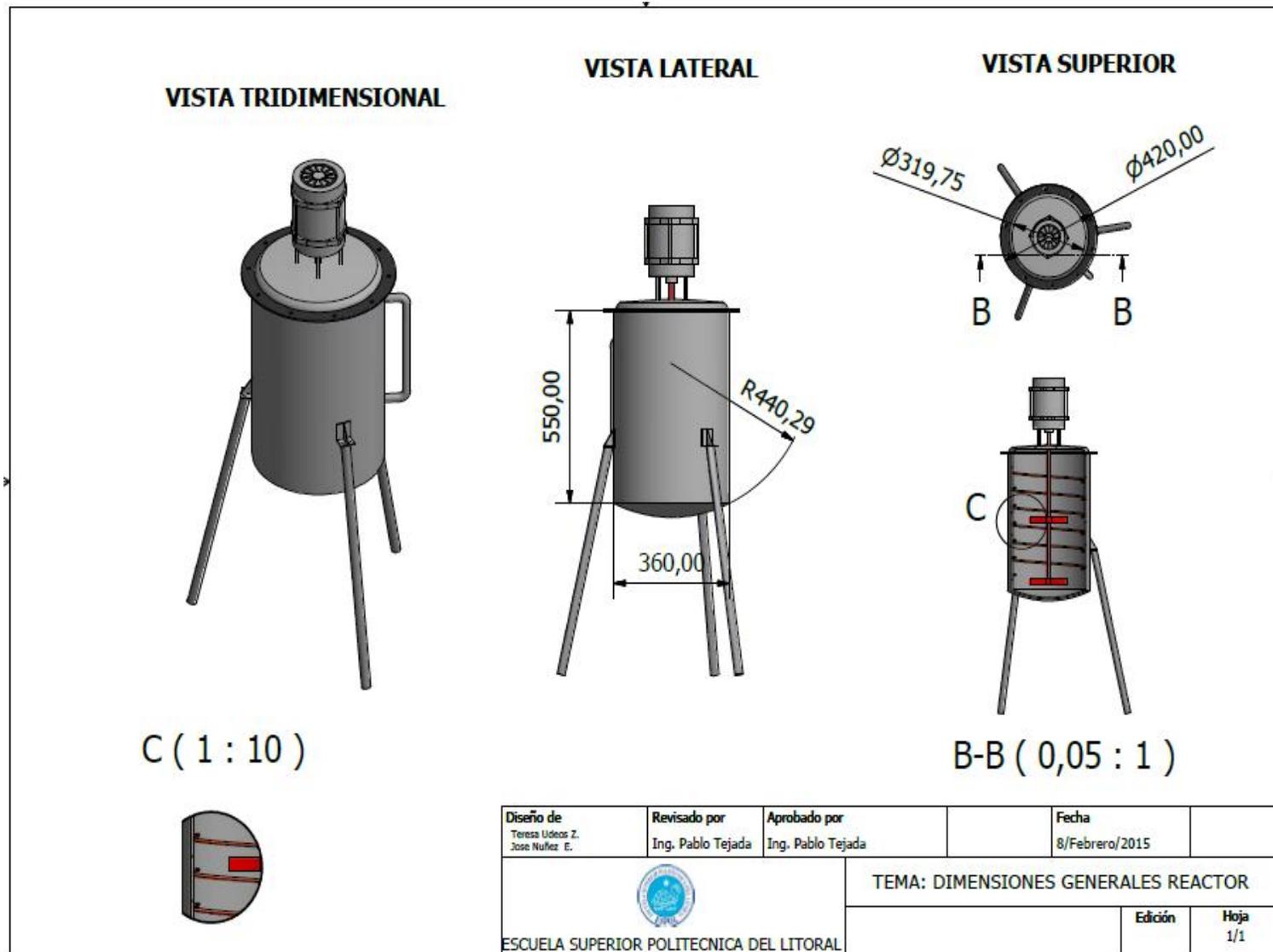
<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Equipos</b>	
Variador de frecuencia	250,00
Motor	100,00
<b>Materiales</b>	
Tanque de acero inoxidable	400,00
Estructura metálica	50,00
Accesorios del tanque	200,00
<b>Total</b>	<b>\$ 1.000,00</b>

## Anexo IV

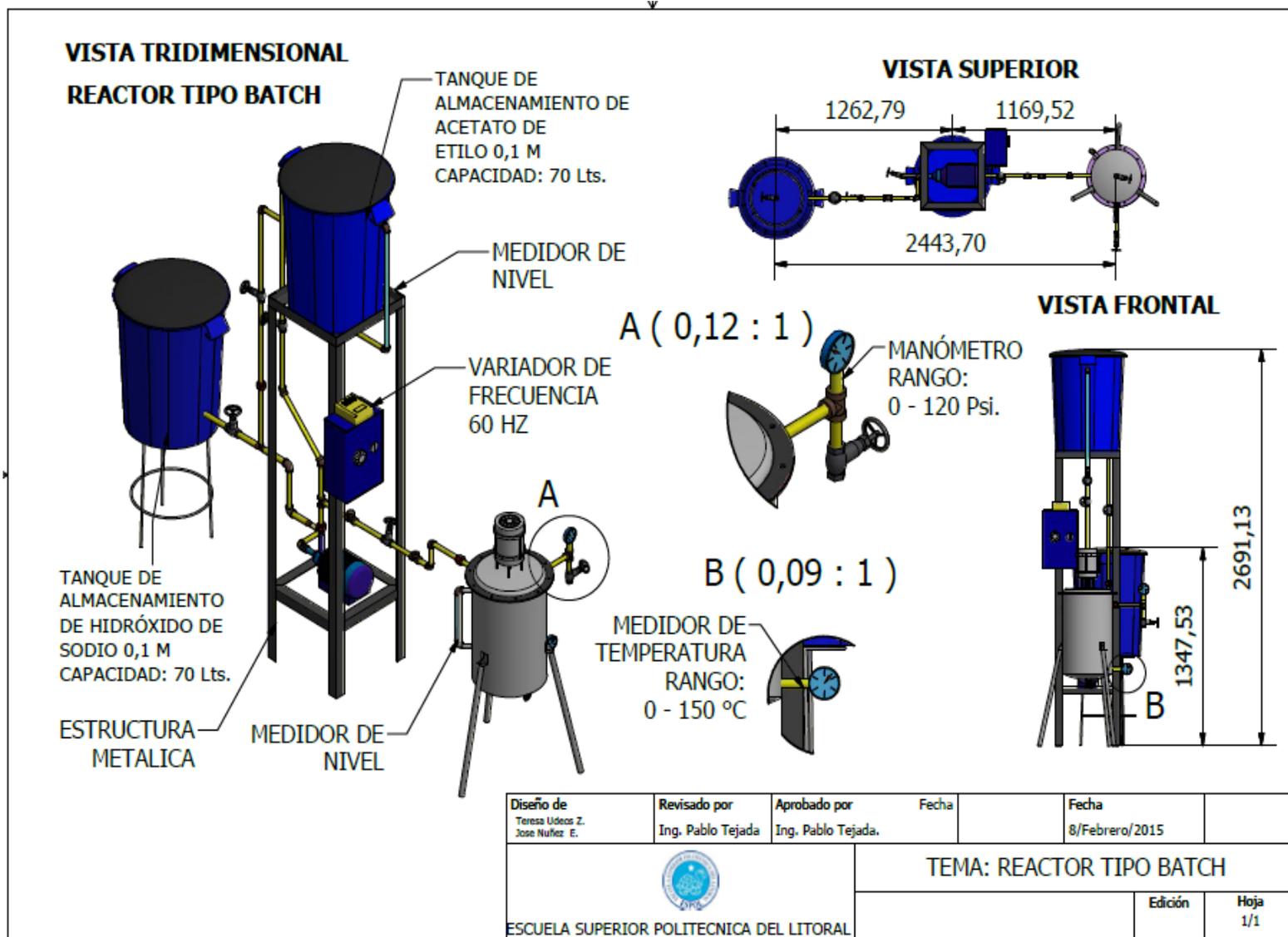
## Vista Tridimensional del Reactor y equipos



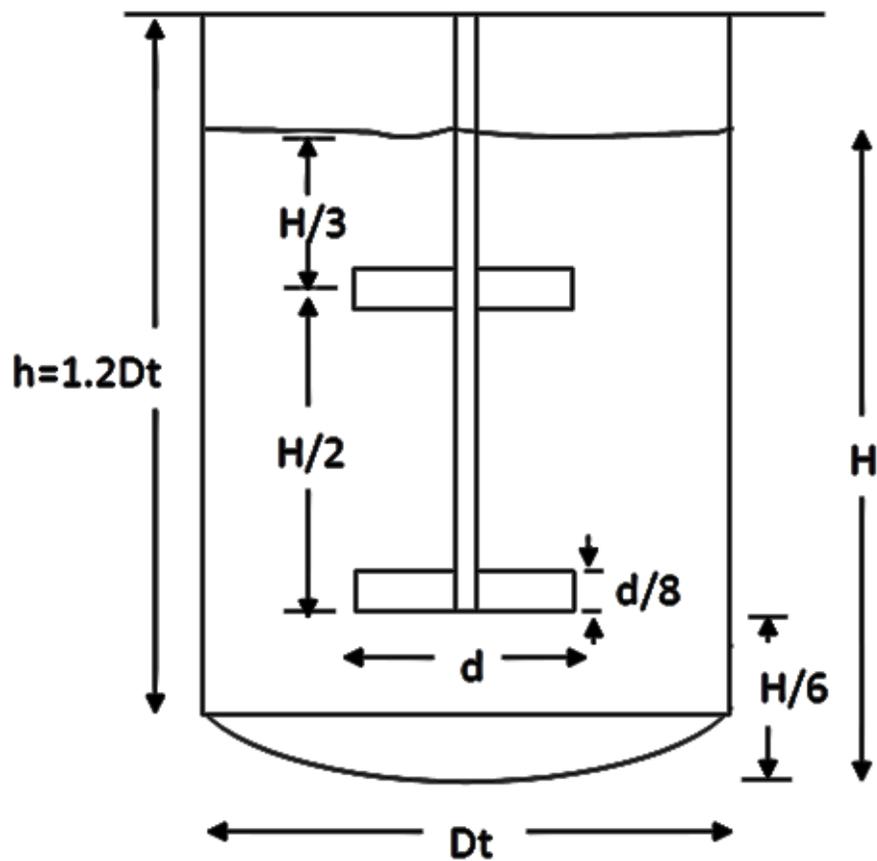
## Vista Tridimensional del Reactor



## Vista Tridimensional del Equipo Completo



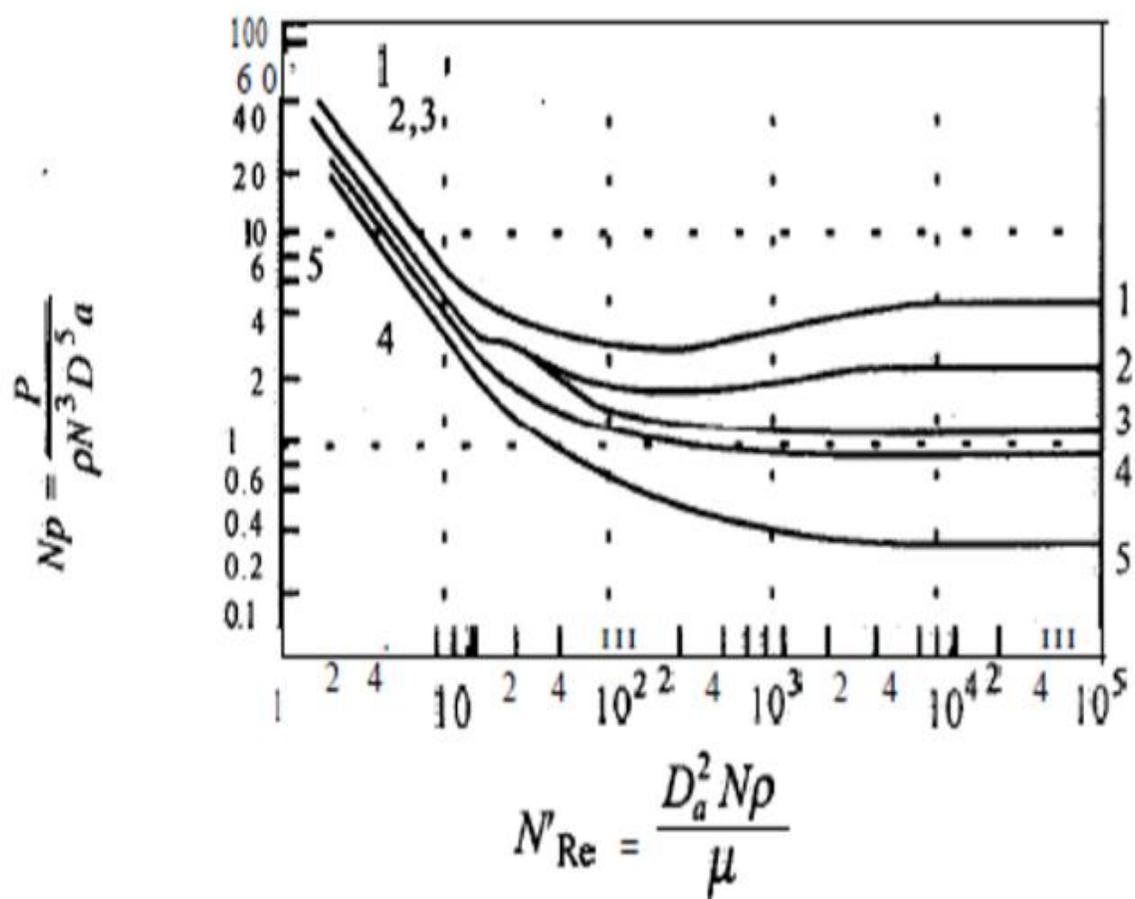
## Anexo V



Proporciones para el diseño del Reactor (Tomada del libro: Manual del Ingeniero Químico de Perry)

## Anexo VI

Gráfica de las correlaciones de Potencia para diversos impulsores y deflectores para el cálculo de  $N_p$



## Anexo VII

Calculo de la calidad de vapor y flujo de vapor de la caldera del laboratorio de operaciones unitarias de la FCNM de la ESPOL

Datos:

\* Caldera Piro tubular

\* Presión baja: 35 a 40 PSI

\* BHP = 15

### a) Determinación del flujo másico de vapor

1 BHP = 34,5 lb vapor /h; entonces la caldera genera:

### b) Determinación de la calidad de vapor

\* Cálculo de presión de vapor absoluta (psia)

$$\text{psia} = 40 + 14,7 = 54,7$$

\* Determinación de la temperatura de saturación

Por medio de las tablas de vapor, a la presión de 54,7 psia, como temperatura de saturación se tiene  $T_{\text{satur}} = 287 \text{ }^\circ\text{F}; 141,7^\circ\text{C}$

\* Determinación de la entropía del vapor sobrecalentado,  $s_1$

La caldera dispone de una sección de calentamiento muy pequeña, es decir se puede estimar que llegará a calentarse máximo unos 20°F-25°F, es decir a la salida del caldero la temperatura estará en alrededor de 310°F, 154°C.

Con esta temperatura y la presión de 54,7 psia se busca en las tablas de vapor sobrecalentado el valor de entropía  $S_1$ .

$$P = 54,7 \text{ psia}$$

$$T = 310^\circ\text{F}$$

$$S_1 = 1,65 \text{ BTU/lb.R}$$

\* Determinación de la entropía luego del proceso de expansión,  $s_2$ .

Basándose en criterios termodinámicos, de acuerdo a los cuales el proceso de expansión del vapor es isoentrópico, tenemos:  $S_1 = S_2$ .

$$S_2 = 1,65 \text{ BTU/lb.R}$$

\* Determinación de la calidad del vapor

Una vez que termina el proceso de expansión, disminuye la presión así como la temperatura del vapor, en base al concepto de proceso procesoisoentrópico se puede calcular la calidad del vapor

$$s_2 = s_f + x(s_{fg})$$

El dato de  $s_2$  ya se dispone; los datos de  $s_f$  y  $s_{fg}$  se determinarán de las tablas de vapor a la presión o temperatura de expansión; es de entenderse que durante esta expansión isoentrópica existirá un decrecimiento de presión y temperatura. De acuerdo a mediciones experimentales la presión 2 está en alrededor de  $25,3+14,7 = 40,0$ psia (aprox.  $267,22$  °F).

Con este dato las entropías son:

$$S_f = 0,39213 \text{ BTU/lb.R}$$

$$S_{fg} = 1,28448 \text{ BTU/lb.R}$$

Reemplazando en la fórmula se tiene:

$$X = (S_2 - S_f) / S_{fg}$$

$$X = (1,65 - 0,39213) / 1,28448$$

$$X = 0,9793 \quad 98\%$$

\* Como el proceso de expansión realmente no es isoentrópico por cuanto hay fricción y el aislamiento no es perfecto; el título real del vapor será un porcentaje menor, para efectos de cálculo, se sugiere manejar un 95% del valor calculado, es decir  $X = 0,98 * 0,95$

$$X = 93\%$$

## Anexo VIII

## Tablas de vapor saturado y sobrecalentado (Unidades Inglesas)

TABLA A-5E

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., P psia	Temp. sat., T <sub>sat</sub> °F	Volumen específica, ft <sup>3</sup> /lbm		Energía interna, Btu/lbm			Entalpía, Btu/lbm			Entropía, Btu/lbm · R		
		Liq. sat., v <sub>f</sub>	Vapor sat., v <sub>g</sub>	Liq. sat., u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Vapor sat., u <sub>g</sub>	Liq. sat., h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Vapor sat., h <sub>g</sub>	Liq. sat., s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>	Vapor sat., s <sub>g</sub>
1	101.69	0.01614	333.49	69.72	973.99	1043.7	69.72	1035.7	1105.4	0.13262	1.84495	1.9776
2	126.02	0.01623	173.71	94.02	967.45	1051.5	94.02	1021.7	1115.8	0.17499	1.74444	1.9194
3	141.41	0.01630	118.70	109.39	946.90	1056.3	109.40	1012.8	1122.2	0.20090	1.68489	1.8858
4	152.91	0.01636	90.629	120.89	938.97	1059.9	120.90	1006.0	1126.9	0.21985	1.64225	1.8621
5	162.18	0.01641	73.525	130.17	932.53	1062.7	130.18	1000.5	1130.7	0.23488	1.60894	1.8438
6	170.00	0.01645	61.982	138.00	927.08	1065.1	138.02	995.88	1133.9	0.24739	1.58155	1.8289
8	182.81	0.01652	47.347	150.83	918.08	1068.9	150.86	988.15	1139.0	0.26757	1.53800	1.8056
10	193.16	0.01659	38.425	161.22	910.75	1072.0	161.25	981.82	1143.1	0.28362	1.50391	1.7875
14.696	211.95	0.01671	26.805	180.12	897.27	1077.4	180.16	970.12	1150.3	0.31215	1.44441	1.7566
15	212.99	0.01672	26.297	181.16	896.52	1077.7	181.21	969.47	1150.7	0.31370	1.44441	1.7549
20	227.92	0.01683	20.093	196.21	885.63	1081.8	196.27	959.93	1156.2	0.33582	1.39606	1.7319
25	240.03	0.01692	16.307	208.45	876.67	1085.1	208.52	952.03	1160.6	0.35347	1.36060	1.7141
30	250.30	0.01700	13.749	218.84	868.98	1087.8	218.93	945.21	1164.1	0.36821	1.33132	1.6995
35	259.25	0.01708	11.901	227.92	862.19	1090.1	228.03	939.16	1167.2	0.38093	1.30632	1.6872
40	267.22	0.01715	10.501	236.02	856.09	1092.1	236.14	933.69	1169.8	0.39213	1.28448	1.6766
45	274.41	0.01721	9.4028	243.34	850.52	1093.9	243.49	928.68	1172.2	0.40216	1.26506	1.6672
50	280.99	0.01727	8.5175	250.05	845.39	1095.4	250.21	924.03	1174.2	0.41125	1.24756	1.6588
55	287.05	0.01732	7.7882	256.25	840.61	1096.9	256.42	919.70	1176.1	0.41958	1.23162	1.6512
60	292.69	0.01738	7.1766	262.01	836.13	1098.1	262.20	915.61	1177.8	0.42728	1.21697	1.6442
65	297.95	0.01743	6.6560	267.41	831.90	1099.3	267.62	911.75	1179.4	0.43443	1.20341	1.6378
70	302.91	0.01748	6.2075	272.50	827.90	1100.4	272.72	908.08	1180.8	0.44112	1.19078	1.6319
75	307.59	0.01752	5.8167	277.31	824.09	1101.4	277.55	904.58	1182.1	0.44741	1.17895	1.6264
80	312.02	0.01757	5.4733	281.87	820.45	1102.3	282.13	901.22	1183.4	0.45335	1.16783	1.6212
85	316.24	0.01761	5.1689	286.22	816.97	1103.2	286.50	898.00	1184.5	0.45897	1.15732	1.6163
90	320.26	0.01765	4.8972	290.38	813.62	1104.0	290.67	894.89	1185.6	0.46431	1.14737	1.6117
95	324.11	0.01770	4.6532	294.36	810.40	1104.8	294.67	891.89	1186.6	0.46941	1.13791	1.6073
100	327.81	0.01774	4.4327	298.19	807.29	1105.5	298.51	888.99	1187.5	0.47427	1.12888	1.6032
110	334.77	0.01781	4.0410	305.41	801.37	1106.8	305.78	883.44	1189.2	0.48341	1.11201	1.5954
120	341.25	0.01789	3.7289	312.16	795.79	1107.9	312.55	878.20	1190.8	0.49187	1.09646	1.5883
130	347.32	0.01796	3.4557	318.48	790.51	1109.0	318.92	873.21	1192.1	0.49974	1.08204	1.5818
140	353.03	0.01802	3.2202	324.45	785.49	1109.9	324.92	868.45	1193.4	0.50711	1.06858	1.5757
150	358.42	0.01809	3.0150	330.11	780.69	1110.8	330.61	863.88	1194.5	0.51405	1.05595	1.5700
160	363.54	0.01815	2.8347	335.49	776.10	1111.6	336.02	859.49	1195.5	0.52061	1.04405	1.5647
170	368.41	0.01821	2.6749	340.62	771.68	1112.3	341.19	855.25	1196.4	0.52682	1.03279	1.5596
180	373.07	0.01827	2.5322	345.53	767.42	1113.0	346.14	851.16	1197.3	0.53274	1.02210	1.5548
190	377.52	0.01833	2.4040	350.24	763.31	1113.6	350.89	847.19	1198.1	0.53839	1.01191	1.5503
200	381.80	0.01839	2.2882	354.78	759.32	1114.1	355.46	843.33	1198.8	0.54379	1.00219	1.5460
250	400.97	0.01865	1.8440	375.23	741.02	1116.3	376.09	825.47	1201.6	0.56784	0.95912	1.5270
300	417.35	0.01890	1.5435	392.89	724.77	1117.7	393.94	809.41	1203.3	0.58818	0.92289	1.5111
350	431.74	0.01912	1.3263	408.55	709.98	1118.5	409.79	794.65	1204.4	0.60590	0.89143	1.4973
400	444.62	0.01934	1.1617	422.70	696.31	1119.0	424.13	780.87	1205.0	0.62168	0.86350	1.4852
450	456.31	0.01955	1.0324	435.67	683.52	1119.2	437.30	767.86	1205.2	0.63595	0.83828	1.4742

TABLA A-6E

Vapor de agua sobrecalentado

T °F	v ft <sup>3</sup> /lbm	u Btu/lbm	h Btu/lbm	s Btu/lbm · R	v ft <sup>3</sup> /lbm	u Btu/lbm	h Btu/lbm	s Btu/lbm · R	v ft <sup>3</sup> /lbm	u Btu/lbm	h Btu/lbm	s Btu/lbm · R
<b>P = 1.0 psia (101.69°F)*</b>				<b>P = 5.0 psia (162.18°F)</b>				<b>P = 10 psia (193.16°F)</b>				
Sat.	333.49	1043.7	1105.4	1.9776	73.525	1062.7	1130.7	1.8438	38.425	1072.0	1143.1	1.7875
200	392.53	1077.5	1150.1	2.0509	78.153	1076.2	1148.5	1.8716	38.849	1074.5	1146.4	1.7926
240	416.44	1091.2	1168.3	2.0777	83.009	1090.3	1167.1	1.8989	41.326	1089.1	1165.5	1.8207
280	440.33	1105.0	1186.5	2.1030	87.838	1104.3	1185.6	1.9246	43.774	1103.4	1184.4	1.8469
320	464.20	1118.9	1204.8	2.1271	92.650	1118.4	1204.1	1.9490	46.205	1117.6	1203.1	1.8716
360	488.07	1132.9	1223.3	2.1502	97.452	1132.5	1222.6	1.9722	48.624	1131.9	1221.8	1.8950
400	511.92	1147.1	1241.8	2.1722	102.25	1146.7	1241.3	1.9944	51.035	1146.2	1240.6	1.9174
440	535.77	1161.3	1260.4	2.1934	107.03	1160.9	1260.0	2.0156	53.441	1160.5	1259.4	1.9388
500	571.54	1182.8	1288.6	2.2237	114.21	1182.6	1288.2	2.0461	57.041	1182.2	1287.8	1.9693
600	631.14	1219.4	1336.2	2.2709	126.15	1219.2	1335.9	2.0933	63.029	1219.0	1335.6	2.0167
700	690.73	1256.8	1384.6	2.3146	138.09	1256.7	1384.4	2.1371	69.007	1256.5	1384.2	2.0605
800	750.31	1295.1	1433.9	2.3553	150.02	1294.9	1433.7	2.1778	74.980	1294.8	1433.5	2.1013
1000	869.47	1374.2	1535.1	2.4299	173.86	1374.2	1535.0	2.2524	86.913	1374.1	1534.9	2.1760
1200	988.62	1457.1	1640.0	2.4972	197.70	1457.0	1640.0	2.3198	98.840	1457.0	1639.9	2.2433
1400	1107.8	1543.7	1748.7	2.5590	221.54	1543.7	1748.7	2.3816	110.762	1543.6	1748.6	2.3052
<b>P = 15 psia (212.99°F)</b>				<b>P = 20 psia (227.92°F)</b>				<b>P = 40 psia (267.22°F)</b>				
Sat.	26.297	1077.7	1150.7	1.7549	20.093	1081.8	1156.2	1.7319	10.501	1092.1	1169.8	1.6766
240	27.429	1087.8	1163.9	1.7742	20.478	1086.5	1162.3	1.7406				
280	29.085	1102.4	1183.2	1.8010	21.739	1101.4	1181.9	1.7679	10.713	1097.3	1176.6	1.6858
320	30.722	1116.9	1202.2	1.8260	22.980	1116.1	1201.2	1.7933	11.363	1112.9	1197.1	1.7128
360	32.348	1131.3	1221.1	1.8496	24.209	1130.7	1220.2	1.8171	11.999	1128.1	1216.9	1.7376
400	33.965	1145.7	1239.9	1.8721	25.429	1145.1	1239.3	1.8398	12.625	1143.1	1236.5	1.7610
440	35.576	1160.1	1258.8	1.8936	26.644	1159.7	1258.3	1.8614	13.244	1157.9	1256.0	1.7831
500	37.986	1181.9	1287.3	1.9243	28.458	1181.6	1286.9	1.8922	14.165	1180.2	1285.0	1.8143
600	41.988	1218.7	1335.3	1.9718	31.467	1218.5	1334.9	1.9398	15.686	1217.5	1333.6	1.8625
700	45.981	1256.3	1383.9	2.0156	34.467	1256.1	1383.7	1.9837	17.197	1255.3	1382.6	1.9067
800	49.967	1294.6	1433.3	2.0565	37.461	1294.5	1433.1	2.0247	18.702	1293.9	1432.3	1.9478
1000	57.930	1374.0	1534.8	2.1312	43.438	1373.8	1534.6	2.0994	21.700	1373.4	1534.1	2.0227
1200	65.885	1456.9	1639.8	2.1986	49.407	1456.8	1639.7	2.1668	24.691	1456.5	1639.3	2.0902
1400	73.836	1543.6	1748.5	2.2604	55.373	1543.5	1748.4	2.2287	27.678	1543.3	1748.1	2.1522
1600	81.784	1634.0	1861.0	2.3178	61.335	1633.9	1860.9	2.2861	30.662	1633.7	1860.7	2.2096
<b>P = 60 psia (292.69°F)</b>				<b>P = 80 psia (312.02°F)</b>				<b>P = 100 psia (327.81°F)</b>				
Sat.	7.1766	1098.1	1177.8	1.6442	5.4733	1102.3	1183.4	1.6212	4.4327	1105.5	1187.5	1.6032
320	7.4863	1109.6	1192.7	1.6636	5.5440	1105.9	1187.9	1.6271				
360	7.9259	1125.5	1213.5	1.6897	5.8876	1122.7	1209.9	1.6545	4.6628	1119.8	1206.1	1.6263
400	8.3548	1140.9	1233.7	1.7138	6.2187	1138.7	1230.8	1.6794	4.9359	1136.4	1227.8	1.6521
440	8.7766	1156.1	1253.6	1.7364	6.5420	1154.3	1251.2	1.7026	5.2006	1152.4	1248.7	1.6759
500	9.4005	1178.8	1283.1	1.7682	7.0177	1177.3	1281.2	1.7350	5.5876	1175.9	1279.3	1.7088
600	10.4256	1216.5	1332.2	1.8168	7.7951	1215.4	1330.8	1.7841	6.2167	1214.4	1329.4	1.7586
700	11.4401	1254.5	1381.6	1.8613	8.5616	1253.8	1380.5	1.8289	6.8344	1263.0	1379.5	1.8037
800	12.4484	1293.3	1431.5	1.9026	9.3218	1292.6	1430.6	1.8704	7.4457	1292.0	1429.8	1.8453
1000	14.4543	1373.0	1533.5	1.9777	10.8313	1372.6	1532.9	1.9457	8.6575	1372.2	1532.4	1.9208
1200	16.4525	1456.2	1638.9	2.0454	12.3331	1455.9	1638.5	2.0135	9.8615	1455.6	1638.1	1.9887
1400	18.4464	1543.0	1747.8	2.1073	13.8306	1542.8	1747.5	2.0755	11.0612	1542.6	1747.2	2.0508

## Anexo IX

Tabla de calores de formación y de combustión

TABLA F.1 (cont.)

Compuesto	Fórmula	Peso mol.	Estado	$\Delta\hat{H}_f^\circ$ (kJ/g mol)	$\Delta\hat{H}_c^\circ$ (kJ/g mol)
Etano	$C_2H_6$	30.07	g	-84.667	-1559.9
Acetato de etilo	$CH_3CO_2C_2H_5$	88.10	l	-442.92	-2274.48
Alcohol etílico	$C_2H_5OH$	46.068	l	-277.63	-1366.91
			g	-235.31	-1409.25
Etil benceno	$C_6H_5 \cdot C_2H_5$	106.16	l	-12.46	-4564.87
			g	29.79	-4607.13
Cloruro de etilo	$C_2H_5Cl$	64.52	g	-105	
Etileno	$C_2H_4$	28.052	g	52.283	-1410.99
Cloruro de etileno	$C_2H_3Cl$	62.50	g	31.38	-1271.5
3-Etil hexano	$C_8H_{18}$	114.22	l	-250.5	-5470.12
			g	-210.9	-5509.78
Cloruro férrico	$FeCl_3$		c	-403.34	
Óxido férrico	$Fe_2O_3$	159.70	c	-822.156	
Sulfuro férrico	$FeS_2$				
	vea Sulfuro de hierro		vea Sulfuro de hierro		
Óxido ferrososférrico	$Fe_3O_4$	231.55	c	-1116.7	
Cloruro férrico	$FeCl_2$		c	-342.67	-303.76
Óxido ferroso	$FeO$	71.85	c	-267	
Sulfuro ferroso	$FeS$	87.92	c	-95.06	
Formaldehído	$H_2CO$	30.026	g	-115.89	-563.46
n-Heptano	$C_7H_{16}$	100.20	l	-224.4	-4816.91
			g	-187.8	-4853.48
n-Hexano	$C_6H_{14}$	86.17	l	-198.8	-4163.1
			g	-167.2	-4194.753
Hidrógeno	$H_2$	2.016	g	0	-285.84
Bromuro de hidrógeno	$HBr$	80.924	g	-36.23	
Cloruro de hidrógeno	$HCl$	36.465	g	-92.311	
Cianuro de hidrógeno	$HCN$	27.026	g	130.54	
Sulfuro de hidrógeno	$H_2S$	34.082	g	-20.15	-562.589
Sulfuro de hierro	$FeS_2$	119.98	c	-177.9	
Óxido de plomo	$PbO$	223.21	c	-219.2	
Cloruro de magnesio	$MgCl_2$	95.23	c	-641.83	
Hidróxido de magnesio	$Mg(OH)_2$	58.34	c	-924.66	
Óxido de magnesio	$MgO$	40.32	c	-601.83	
Metano	$CH_4$	16.041	g	-74.84	-890.4
Alcohol metílico	$CH_3OH$	32.042	l	-238.64	-726.55
			g	-201.25	-763.96
Cloruro de metilo	$CH_3Cl$	50.49	g	-81.923	-766.63†
Metil ciclohexano	$C_7H_{14}$	98.182	l	-190.2	-4565.29
			g	-154.8	-4600.68
Metil ciclopentano	$C_6H_{12}$	84.156	l	-138.4	-3937.7
			g	-106.7	-3969.4

**Tabla 1-2** (Cont.)

Sustancia	Fórmula	Estado	$\Delta F^{\circ}_{298}$
Calcio:			
Carbonato	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<i>s</i>	-269 780
Carburo	<b>CaC<sub>2</sub></b>	<i>s</i>	-16 200
Cloruro	<b>CaCl<sub>2</sub></b>	<i>s</i>	-179 300
Cloruro	<b>CaCl<sub>2</sub></b>	<i>aq</i>	-194 880
<b>Hidróxido</b>	<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	<i>s</i>	-214 330
Hidróxido	<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	<i>aq</i>	-207 370
Oxido	CaO	<i>s</i>	-144 400
Carbono:			
Dióxido	<b>CO<sub>2</sub></b>	<i>g</i>	-94 058
Monóxido	<b>CO</b>	<i>g</i>	-32 781
Hidrógeno:			
Cloruro	<b>HCl</b>	<i>g</i>	-22 892
Sulfuro	<b>H<sub>2</sub>S</b>	<i>g</i>	-7 892
Hierro:			
Oxido	<b>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	<i>s</i>	-242 400
Oxido	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<i>s</i>	-177 100
Sulfuro	<b>FeS<sub>2</sub></b>	<i>s</i>	-39 840
Nitrógeno:			
Acido nítrico	HNO <sub>3</sub>	<i>aq</i>	-26 410
Acido nítrico	HNO <sub>3</sub>	<i>l</i>	-19 100
<b>Oxidos</b>	<b>NO</b>	<i>g</i>	20 690
	<b>NO<sub>2</sub></b>	<i>g</i>	12 265
	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<i>g</i>	24 933
	<b>N<sub>2</sub>O<sub>4</sub></b>	<i>g</i>	23 395
Sodio:			
Carbonato	<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	<i>s</i>	-250 400
Cloruro	<b>NaCl</b>	<i>s</i>	-91 785
Cloruro	<b>NaCl</b>	<i>aq</i>	-93 939
<b>Hidróxido</b>	<b>NaOH</b>	<i>s</i>	-90 600
Hidróxido	<b>NaOH</b>	<i>aq</i>	-100 184

**Anexo X**

Tabla para regular la frecuencia del motor en función de las revoluciones requeridas.

$RPM = \frac{120 * f}{p}$	
Frecuencia	Rpm
10	300
16.6	500
20	600
30	900
40	1200

Donde:

f= Factor de frecuencia (Hz)

p= Número de polos (4 polos para este motor)

rpm= Revoluciones por minuto

## Anexo XI

### Fichas internacionales de Seguridad Química del Acetato de Etilo e Hidróxido de Sodio.

#### Fichas Internacionales de Seguridad Química

#### ACETATO DE ETILO

ICSC: 0367

			
ACETATO DE ETILO Acido acético, éster etílico $C_4H_8O_2/CH_3COOC_2H_5$ Masa molecular: 88.1			
Nº CAS 141-78-6 Nº RTECS AH5425000 Nº ICSC 0367 Nº NU 1173 Nº CE 607-022-00-5 			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Altamente inflamable.	Evitar llama abierta, NO producir chispas y NO fumar.	AFFF, espuma resistente al alcohol, polvos, dióxido de carbono.
<b>EXPLOSION</b>	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra). Utilícense herramientas manuales no	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones por pulverización con agua. Los bomberos deberían emplear indumentaria de protección completa, incluyendo equipo
<b>EXPOSICION</b>			
• <b>INHALACION</b>	Tos, vértigo, somnolencia, dolor de cabeza, náusea, jadeo, dolor de garganta, pérdida de conocimiento, debilidad.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semiincorporado y someter a atención médica. Respiración artificial si estuviera indicado.
• <b>PIEL</b>	Enrojecimiento, dolor.	Guantes protectores, traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y solicitar atención médica.
• <b>OJOS</b>	Enrojecimiento, dolor.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.
• <b>INGESTION</b>	Dolor abdominal, vértigo, náusea, dolor de garganta, debilidad.		Enjuagar la boca, dar a beber abundante agua y someter a atención médica.
DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO	
Evacuar la zona de peligro. Recoger en la medida de lo posible el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a lugar seguro. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).	A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes, ácidos y bases. Mantener en lugar frío, seco. Almacenar herméticamente cerrado.	símbolo F símbolo Xi R: 11-36-66-67 S: (2-)16-26-33 Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II CE:  	

## Fichas Internacionales de Seguridad Química

## ACETATO DE ETILO

ICSC: 0367

D A T O S  I M P O R T A N T E S	<p><b>ESTADO FISICO; ASPECTO</b> Líquido incoloro, de olor característico.</p> <p><b>PELIGROS FISICOS</b> El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante.</p> <p><b>PELIGROS QUIMICOS</b> El calentamiento intenso puede originar combustión violenta o explosión. La sustancia se descompone bajo la influencia de luz UV, bases y ácidos. La solución en agua es un ácido débil. Reacciona con oxidantes fuertes, bases o ácidos. Ataca muchos metales en presencia de agua. Ataca los plásticos.</p> <p><b>LIMITES DE EXPOSICION</b> TLV: 400 ppm; 1400 mg/m<sup>3</sup> (ACGIH 1990-1991).</p>	<p><b>VIAS DE EXPOSICION</b> La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor.</p> <p><b>RIESGO DE INHALACION</b> Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p><b>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION</b> La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La sustancia puede tener efectos sobre el sistema nervioso. La exposición muy por encima del OEL puede producir la muerte. Se recomienda vigilancia médica.</p> <p><b>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA</b> El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis.</p>
	<p><b>PROPIEDADES FISICAS</b></p> <p>Punto de ebullición: 77°C Punto de fusión: -84°C Densidad relativa (agua = 1): 0.9 Solubilidad en agua: Muy buena Presión de vapor, kPa a 20°C: 10</p>	<p>Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3.0 Punto de inflamación: 7°C (o.c.)°C Temperatura de autoignición: 427°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 2.2-11.5 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 0.73</p>
<p><b>DATOS AMBIENTALES</b></p>	<p>Esta sustancia puede ser peligrosa para el ambiente; debería prestarse atención especial al agua.</p> 	
<b>NOTAS</b>		
<p>El consumo de bebidas alcohólicas aumenta el efecto nocivo. Está indicado examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto a menudo hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son por ello imprescindibles. Nombres comerciales: Acetidín, Vinagar naphtha. Tarjeta de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-76</p> <p style="text-align: right;">Código NFPA: H 1; F 3; R 0;</p>		
<b>INFORMACION ADICIONAL</b>		
<p>FISQ: 1-003 ACETATO DE ETILO</p>		
<p>ICSC: 0367</p>		<p>ACETATO DE ETILO</p>
© CCE, IPCS, 1994		

## Fichas Internacionales de Seguridad Química

HIDRÓXIDO DE SODIO		ICSC: 0360 Mayo 2010	
CAS: 1310-73-2 Sosa cáustica NU: 1823 Hidrato de sodio CE Índice Anexo I: 011-002-00-6 Sosa CE / EINECS: 215-185-5 NaOH Masa molecular: 40.0			
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible. El contacto con la humedad o con el agua, puede generar calor suficiente para provocar la ignición de materiales combustibles.	NO poner en contacto con el agua.	En caso de incendio en el entorno: usar un medio de extinción adecuado.
EXPLOSIÓN	Riesgo de incendio y explosión en contacto con: (ver Peligros Químicos).	NO poner en contacto con materiales incompatibles. (Ver Peligros Químicos).	
EXPOSICIÓN		<b>¡EVITAR LA DISPERSIÓN DEL POLVO! ¡EVITAR TODO CONTACTO!</b>	<b>¡CONSULTAR AL MÉDICO EN TODOS LOS CASOS!</b>
Inhalación	Tos. Dolor de garganta. Sensación de quemazón. Jadeo.	Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Enrojecimiento. Dolor. Graves quemaduras cutáneas. Ampollas.	Guantes de protección. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse durante 15 minutos como mínimo. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor. Visión borrosa. Quemaduras graves.	Pantalla facial o protección ocular combinada con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Dolor abdominal. Quemaduras en la boca y la garganta. Sensación de quemazón en la garganta y el pecho. Náuseas. Vómitos. Shock o colapso.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Dar a beber un vaso pequeño de agua, pocos minutos después de la ingestión. Proporcionar asistencia médica inmediatamente.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Protección personal: traje de protección química, incluyendo equipo autónomo de respiración. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente de plástico. Recoger cuidadosamente el residuo y trasladarlo a continuación a un lugar seguro.		No transportar con alimentos y piensos. Clasificación UE Símbolo: C R: 35 S: (1/2-)26-37/39-45 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 8 Grupo de Envasado NU: II Clasificación GHS Peligro Nocivo en caso de ingestión. Provoca graves quemaduras en la piel y lesiones oculares. Puede provocar irritación respiratoria.	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Código NFPA: H3; F0; R1		Separado de alimentos y piensos, ácidos fuertes y metales. Almacenar en el recipiente original. Mantener en lugar seco. Bien cerrado. Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2010			
			

## Fichas Internacionales de Seguridad Química

HIDRÓXIDO DE SODIO		ICSC: 0360
<b>DATOS IMPORTANTES</b>		
<p><b>ESTADO FÍSICO; ASPECTO</b> Sólido blanco e higroscópico, en diversas formas</p> <p><b>PELIGROS QUÍMICOS</b> La disolución en agua es una base fuerte que reacciona violentamente con ácidos y es corrosiva con metales tales como: aluminio, estaño, plomo y cinc, formando gas combustible (hidrógeno - ver FISQ:0001). Reacciona con sales de amonio produciendo amoníaco, originando peligro de incendio. El contacto con la humedad o con el agua genera calor. (Ver Notas).</p> <p><b>LÍMITES DE EXPOSICIÓN</b> TLV: 2 mg/m<sup>3</sup> (Valor techo) (ACGIH 2010). MAK: 1lb (no establecido pero hay datos disponibles) (DFG 2009).</p>	<p><b>VÍAS DE EXPOSICIÓN</b> Efectos locales graves</p> <p><b>RIESGO DE INHALACIÓN</b> Puede alcanzarse rápidamente una concentración nociva de partículas suspendidas en el aire cuando se dispersa.</p> <p><b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN</b> La sustancia es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Corrosivo por ingestión.</p> <p><b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA</b> El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis.</p>	
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>		
<p>Punto de ebullición: 1388°C Punto de fusión: 318°C Densidad: 2.1 g/cm<sup>3</sup></p> <p>Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 109 (muy elevada).</p>		
<b>DATOS AMBIENTALES</b>		
Esta sustancia puede ser peligrosa para el medio ambiente. Debe prestarse atención especial a los organismos acuáticos.		
<b>NOTAS</b>		
El valor límite de exposición laboral aplicable no debe ser superado en ningún momento por la exposición en el trabajo. NO verter NUNCA agua sobre esta sustancia; cuando se deba disolver o diluir, añadirla al agua siempre lentamente. Otro nº NU: NU1824 Disolución de hidróxido de sodio, clasificación de peligro 8, grupo de envasado II-III.		
<b>INFORMACIÓN ADICIONAL</b>		
Límites de exposición profesional (INSHT 2011): VLA-EC: 2 mg/m <sup>3</sup>		
<b>NOTA LEGAL</b>	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.	
© IPCS, CE 2010		

## Anexo XII

### Construcción y puesta en marcha del Reactor Batch



Tanque luego del proceso de Soldadura TIG



Instalación de serpentín para calentamiento



Variador de frecuencia



Variador de frecuencia en condición de trabajo 16,6 Hz



Motor



Termómetro

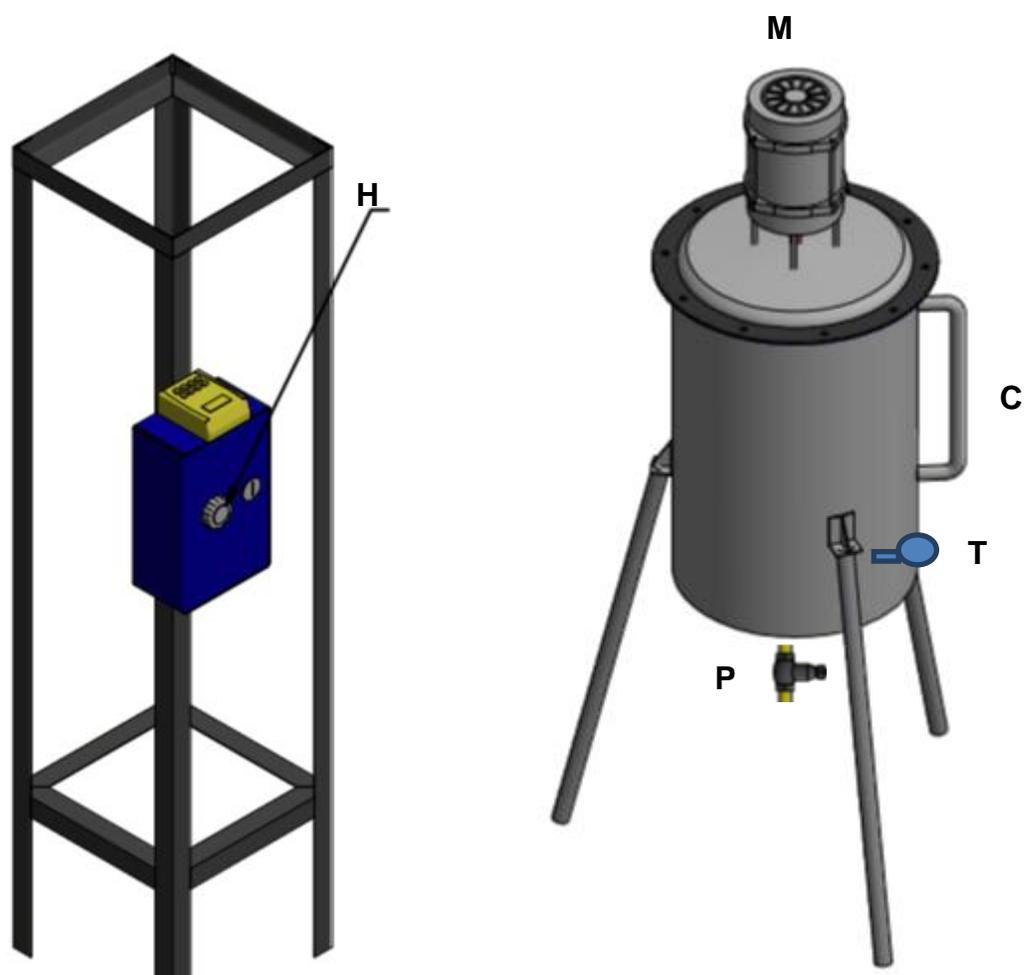


Manómetro



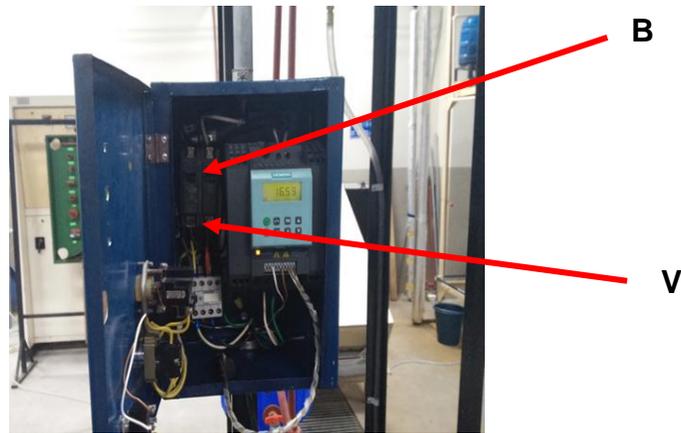
Medición de conductividad durante pruebas en el equipo

**Anexo XIII**  
Manual de Operación



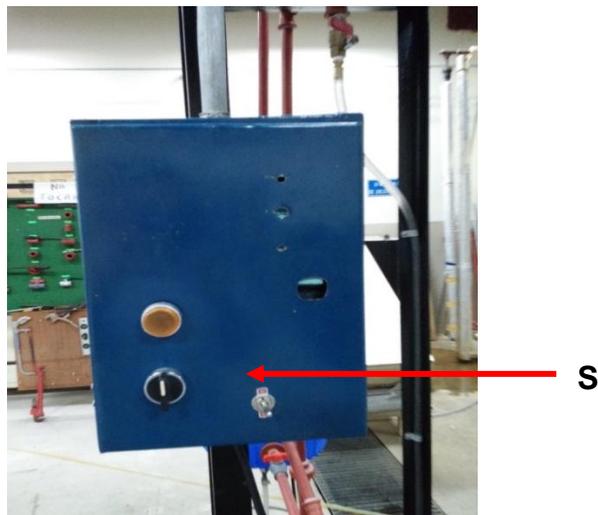
Vista frontal del reactor y equipos

**Elaborado por:** Nuñez J; Udeos T.



Variador de frecuencia

**Fuente:** José Nuñez; Udeos T.



Tablero de Control

**Fuente:** José Nuñez; Udeos T.

Tabla de Simbología del equipo

Simbología	Significado
<b>P</b>	Válvula de Purga
<b>T</b>	Termómetro
<b>B</b>	Breuer de control
<b>V</b>	Variador
<b>S</b>	Switch on-off del variador
<b>M</b>	Motor
<b>H</b>	Perilla reguladora de Hz
<b>C</b>	Medidor de Nivel

**Fuente:** Nuñez J; Udeos T.

### **Preparación de las soluciones de trabajo**

Preparar 15 litros de Hidróxido de Sodio 0.1M y 15 litros de Acetato de Etilo 0.1 M.

#### **Para lo cual:**

Se pesan 60gr de NaOH, los cuales se disolverán en agua destilada para preparar 15L de concentración 0,1M.

Se miden 147,30ml de  $\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$  para preparar 15L de concentración 0,1M.

El volumen de alimentación tanto de Acetato de Etilo e Hidróxido de Sodio que se emplea en el Reactor Batch es de 3,96 galones por cada uno, que equivalen a 15 litros de cada solución.

### **Puesta en marcha del equipo**

- 1) Verificar que todos los servicios generales (agua, vapor y corriente eléctrica) estén disponibles, para el vapor solo en caso de requerirse.
- 2) Revisar que todas las válvulas estén cerradas purga (**P**) y entrada de vapor.

- 3) Verificar condiciones de operación, temperatura aproximada ( $27,5 \pm 2,5$ ) °C, mediante el termómetro (**T**) que tiene el reactor.
- 4) Retirar los tornillos de la tapa del reactor para proceder a verter las soluciones.
- 5) Cargar cuidadosamente el Hidróxido en el interior del reactor.
- 6) Colocar el switch del breque (**B**) de protección en **on** y encender el variador de frecuencia (**V**) para lo cual hay q oprimir el switch (**S**) de modo **on** a **off** y luego a modo **on** para encender el motor (**M**) el cual es controlado con el variador de frecuencia, el cual tiene una perilla para regular a 16.6 los hertz de frecuencia (**H**).
- 7) Se accionara el agitador y verter brevemente el Acetato de Etilo en el interior del reactor.
- 8) Mientras se carga el Acetato de Etilo poner el cronómetro en marcha, se puede observar por medio del medidor de nivel (**C**) la formación o no de espuma.
- 9) Seguir el proceso mediante el registro manual de la conductividad a intervalos de 5 minutos, tomando pequeñas muestras en una fiola para la lectura por medio de la válvula de purga del reactor, realizándose la medición con un conductivímetro.

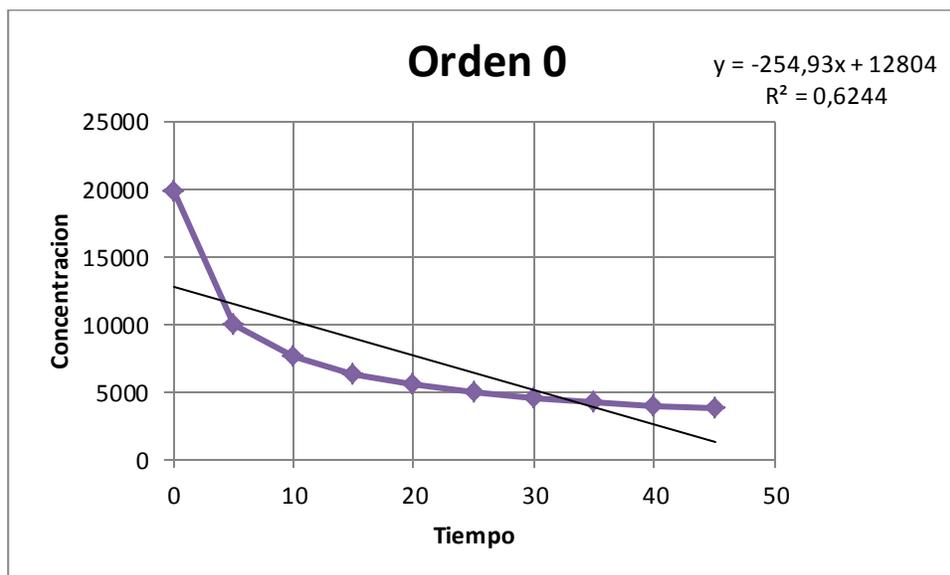
- 10) La toma de datos se realizará hasta observar una variación muy pequeña en los cambios de conductividad (45 minutos aproximadamente).

### **Parada del equipo**

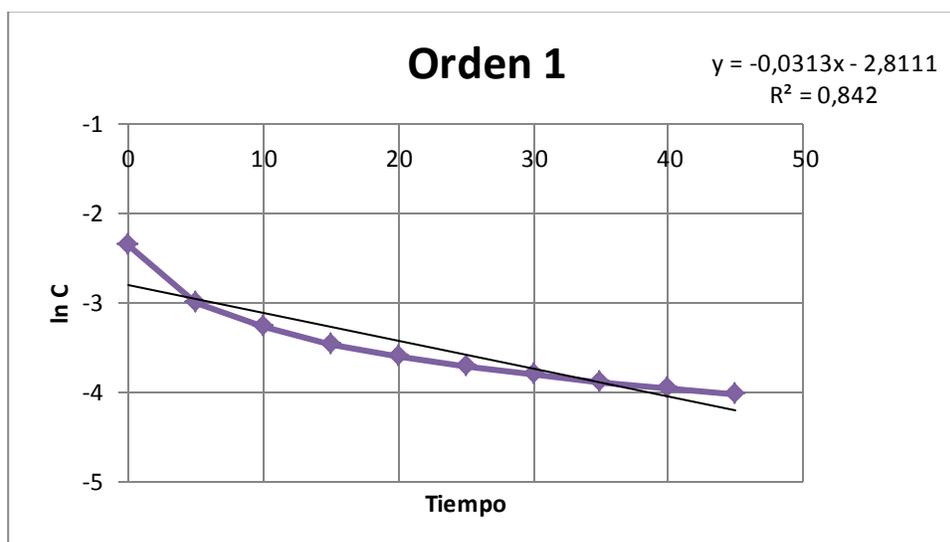
- 1) Apagar el variador de frecuencia y colocar el switch del breque de protección en off.
- 2) Una vez que cesa la operación, abrir la válvula de purga del reactor para recoger en canecas de plástico el producto.

**Anexo XIV**

## Análisis experimental del orden de reacción



La gráfica no es de orden cero



La gráfica no es de orden uno

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Correa, C. (2002). Fenómenos Químicos. *Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT*. Primera edición, capítulo 7.

[2] Peña, E., Pérez, A., Miranda, A. J., & Sánchez, J. H. (2008). Modelado de un reactor químico tipo CSTR y evaluación del control predictivo aplicando Matlab-Simulink. *Revista Ingeniería Universidad de Carabobo*, 15(3), 97-112.

[3]Georgette, V. (Enero 2015). *Liceo Domingo Matte Perez-Operación mecánica y Transferencia de Calor*. Obtenido de [http://www.liceodmp.cl/v.2/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&download=577:liceo-domingo-matte-perez-oper-mec7&id=118:operacion-mecánica-y-transferencia-de-calor-om&Itemid=73](http://www.liceodmp.cl/v.2/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=577:liceo-domingo-matte-perez-oper-mec7&id=118:operacion-mecánica-y-transferencia-de-calor-om&Itemid=73).

[4] Levenspiel, O. (1987). *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. México: Reverté, páginas 107-108.

[5] Herguido, J., Menéndez, M. A., & Monzón, A. (1999). Ingeniería de reactores. Síntesis. España.

[6] Levenspiel, O. (1987). Ingeniería de las Reacciones Químicas. México: Reverté, página 12.

[7] Escuela de Ingeniería de Antioquía. (Diciembre 2014). Hidráulica Conceptos Básicos de Fluidos. Obtenido de <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/conceptosbasicosmfluidos/cohesi%C3%B3n/Tension%20superficial.htm>.

[8] Universidad Autónoma de México. (Enero 2015). Datos Tecnicos de Acetato de Etilo. Obtenido de <http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/8acetatodeetilo.pdf>

[9] Encured. (Enero 2015). Hidroxido de Sodio. Cuba. Obtenido de [http://www.ecured.cu/index.php/Hidr%C3%B3xido\\_de\\_Sodio](http://www.ecured.cu/index.php/Hidr%C3%B3xido_de_Sodio).

[10] Tominaga, H. y Tamaki, M. (1997). Chemical Reaction and Reactor Design, Chichester, Wiley.

[11] Levenspiel, O. (2004). Ingeniería de las Reacciones Químicas. México: Limusa S.A.

[12] Gilbert F. Froment y Kenneth B. Bischoff, (1979). Chemical Reactor Analysis and Design. Toronto, página 361.

[13] Universidad Tecnológica Nacional de Argentina. (Noviembre 2014). Ingeniería de las Reacciones. Argentina. Obtenido de [http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/4\\_anio/ingenieria\\_reacciones/UNIDAD\\_3.pdf](http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/4_anio/ingenieria_reacciones/UNIDAD_3.pdf).

[14] Henry J Glynn, Heinke Gary W. (1999). Ingeniería Ambiental. México, Página 195.

[15] Levenspiel, O. (2004). Ingeniería de las Reacciones Químicas. México: Limusa S.A. página 91.

[16] Universidad de Valencia España. (Noviembre 2014). Determinación Conductimétrica de la Constante de Velocidad para una Cinética de Saponificación, España. Obtenido de

[http://www.uv.es/qflab/2009\\_10/descargas/cuadernillos/qf1\\_innovacion/cas tellano/2-Sap\\_AcET.pdf](http://www.uv.es/qflab/2009_10/descargas/cuadernillos/qf1_innovacion/cas tellano/2-Sap_AcET.pdf).

[17] Sarco J. (2009). Reconstrucción Mecánica del Sistema de Agitación del Tanque de Mezcla (Blonger) 2 etapas para Desmenuación de Sílice, Pendespato y Caolines, página 20.

[18] McCabe, W. L., & Smith, J. C. (1981). Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Reverté, página 254.

[19] McCabe, W. L., & Smith, J. C. (1981). Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Reverté, página 253.

[20] McCabe, W. L., & Smith, J. C. (1981). Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Reverté, página 255.

[21] Aldás, J. & Vivar, G. (2014). Diseño y Construcción de un Reactor Semicontinuo para la Obtención de Acetato de Sodio. Riobamba. Páginas 17-19.

[22] Gaido, A. Ruiz, A. & Bonami, F. (2002). Saponificación del Acetato de Etilo. Página 23.

[23] Acosta, F. Castro, P. & Cortijo, E. (2008). Manual de Construcción y Uso de Reactor para Producción de Biodiesel a Pequeña Escala. Lima. Página 13.

[24] Ditutor. (Diciembre 2014). Volumen del Casquete del Reactor. Málaga. Obtenido de [http://www.ditutor.com/geometria\\_espacio/volumen\\_casquete.html](http://www.ditutor.com/geometria_espacio/volumen_casquete.html).

[25] Kern, D. (1995). Procesos de Transferencia de Calor. México.

[26] Perry, H. & Green, D. (2001). Manual del Ingeniero Químico. México. Mc Graw Hill. Tomo IV.

[27] Mott, R. (2006). Mecánica de Fluidos. México. Pearson Educación. Página 231.

[28] Himmelblau, D. M. (1997). Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química. México: Pearson Educación. Página 444.

[29] Fogler, H. S. (2008). Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas. México, Pearson Prentice Hall.

[30] Levenspiel, O. (2004). Ingeniería de las Reacciones Químicas. México. LimusaWiley. Página 41.

[31] Avery H.E. (2002). Cinética Química Básica y Mecanismos de Reacción. Sevilla. Reverté S.A. Página 22.

[32] Perry, R.H. (1992). Manual del Ingeniero Químico. México. Mc Graw Hill.