

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTUDIO DEL GRADO DE REDUCCIÓN PARA UNA REACCIÓN  
HOMOGÉNEA REDOX, DE SEGUNDO ORDEN (SISTEMA ÁCIDO  
OXÁLICO-BROMO), A DIFERENTES CONCENTRACIONES,  
REALIZADA EN UN REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO, ESCALA  
LABORATORIO.**

**TESIS**

**PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**POR**

**ISRAEL DARÍO DE LEÓN LIMA  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

**GUATEMALA, JUNIO DE 1997**

07  
17044

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**ESTUDIO DEL GRADO DE REDUCCIÓN PARA UNA REACCIÓN  
HOMOGÉNEA REDOX, DE SEGUNDO ORDEN (SISTEMA ÁCIDO  
OXÁLICO-BROMO), A DIFERENTES CONCENTRACIONES,  
REALIZADA EN UN REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO, ESCALA  
LABORATORIO.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 7 de marzo de 1997, Ref. EIQ.098.97.

  
ISRAEL DARÍO DE LEÓN LIMA

# UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



## FACULTAD DE INGENIERÍA

### MIEMBROS DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1 <sup>o</sup> .	Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra
VOCAL 2 <sup>o</sup> .	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL 3 <sup>o</sup> .	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL 4 <sup>o</sup> .	Br. Víctor Manuel Lobos Aldano
VOCAL 5 <sup>o</sup> .	Br. Wagner Gustavo López Cáceres
SECRETARIA	Inga. y Licda. Gilda Marina Castellanos de Illescas

### TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN

#### GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio I. González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Julio E. Chávez Montúfar
EXAMINADOR	Ing. Manuel Galván
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Espinoza Smith
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López

## AGRADECIMIENTOS

A: Ing. César Alfonso García, por los conocimientos y tiempo dedicado a la asesoría de esta tesis.

Dr. Adolfo Gramajo, por la colaboración y tiempo dedicado a la revisión de esta tesis.

Ing. Byron Baldizón, por la colaboración y conocimientos brindados.

Ing. Carlos Cardona, por los conocimientos brindados.

Ing. Marino Barrientos, por la colaboración y tiempo dedicado.

## DEDICATORIA

- A Dios: creador y padre celestial.
- A mis padres: Darío De León Paredes y Amanda Lima de De León. Con amor y agradecimiento a sus sabios consejos, esfuerzos y sacrificios por sacarme adelante en la vida.
- A mis hermanos, con cariño y agradecimiento por el apoyo de siempre.
- A Jacqueline, con amor y agradecimiento por el apoyo constante.
- A mis abuelos, con cariño.
- A mis familiares, cariñosamente.
- A mis amigos, por la amistad de siempre.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

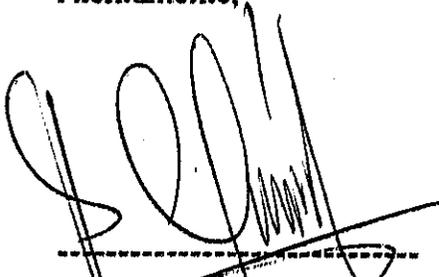
Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

**Ing. Julio Chavez**  
Director de la Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

**Ing. Julio Chavez:**

Por la presente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que, habiendo revisado y asesorado al estudiante Israel Darío De León Lima, carnet No. 9012601 en el trabajo de tesis titulado: **ESTUDIO DEL GRADO DE REDUCCIÓN PARA UNA REACCIÓN HOMOGÉNEA REDOX, DE SEGUNDO ORDEN (SISTEMA ÁCIDO OXÁLICO-BROMO), A DIFERENTES CONCENTRACIONES, REALIZADA EN UN REÁCTOR TUBULAR ISOTÉRMICO, ESCALA LABORATORIO**, me permito darle aprobación al presente Informe.

Atentamente,

  
Ing. Cesar Alfonso Garcia.  
No. Colegiado 145.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE ING. QUIMICA  
CARRERAS DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 22 de mayo de 1,997

Ingeniero  
Julio Chávez Montúfar  
Director Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

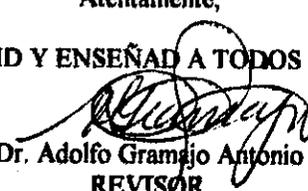
Estimado Ingeniero.

Por medio de la presente hago de su conocimiento que he revisado el Informe Final de Tesis titulado **ESTUDIO DEL GRADO DE REDUCCIÓN HOMOGÉNEA RODES, DE SEGUNDO ORDEN SISTEMA ÁCIDO OXALICO BROMO, A DIFERENTES CONCENTRACIONES, REALIZADA EN UN REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO, ESCALA LABORATORIO**, del estudiante **ISRAEL DARIO DE LEON LIMA**, dejo constancia de aprobación para proceder a la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular, me suscribo de usted,

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Dr. Adolfo Gramajo Antonio  
REVISOR

c.c. archivo

AGA]ga

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y Regional de Post-grado de Ingeniería Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ing. Julio Chávez Montúfar, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de tesis del estudiante Israel Darío de León Lima, titulado: ESTUDIO DEL GRADO DE REDUCCION PARA UNA REACCION HOMOGENEA REDOX, DE SEGUNDO ORDEN (SISTEMA ACIDO OXALICO-BROMO), A DIFERENTES CONCENTRACIONES, REALIZADA EN UN REACTOR TUBULAR ISOTERMICO, ESCAL LABORATORIO, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Julio Chávez Montúfar  
DIRECTOR  
ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 4 de junio de 1,997.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **ESTUDIO DEL GRADO DE REDUCCION PARA UNA REACCION HOMOGENEA REDOX, DE SEGUNDO ORDEN (SISTEMA ACIDO OXALICO-BROMO), A DIFERENTES CONCENTRACIONES, REALIZADA EN UN REACTOR TUBULAR ISOTERMICO, ESCALA LABORATORIO** del estudiante Israel Darío de León Lima procede a la autorización para la impresión de la misma.

**IMPRIMASE:**

Ing. Herbert Miranda Barrios  
DECANO



Guatemala, 4 de junio de 1,997.

# ÍNDICE

CONTENIDO	PÁGINA
INTRODUCCIÓN .....	i.
RESUMEN.....	ii.
JUSTIFICACIONES.....	iii.
OBJETIVOS.....	iv.
HIPÓTESIS.....	v.
<b>I. ANTECEDENTES.....</b>	<b>1.</b>
<b>A. ESTUDIOS REALIZADOS.....</b>	<b>1.</b>
<b>B. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4.</b>
1. CINÉTICA DE LAS REACCIONES QUÍMICAS.....	4.
2. REACTORES IDEALES.....	7.
3. REACCIONES DE OXIDORREDUCCIÓN.....	10.
4. TÉCNICAS DE OXIDORREDUCCIÓN.....	12.
5. ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN.....	15.
<b>II. METODOLOGÍA.....</b>	<b>19.</b>
<b>A. LOCALIZACIÓN.....</b>	<b>19.</b>
<b>B. MATERIALES.....</b>	<b>19.</b>
<b>C. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>20.</b>
1. DISEÑO DE TRATAMIENTOS.....	20.
2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	20.
3. UNIDAD EXPERIMENTAL.....	20.
4. MANEJO DEL EXPERIMENTO.....	21.
5. VARIABLE RESPUESTA.....	22.
6. MODELO ESTADÍSTICO.....	22.
<b>III. RESULTADOS.....</b>	<b>25.</b>
<b>IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>26.</b>
CONCLUSIONES.....	vii.
RECOMENDACIONES.....	ix.
REFERENCIAS .....	x.
BIBLIOGRAFÍA.....	xi.
APÉNDICE.....	xii.
<b>A. MUESTRA DE CALCULO.....</b>	<b>xiii.</b>
1. CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE BROMO RESIDUAL.....	xiii.
2. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE BROMO A BROMURO.....	xiii.
3. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA.....	xv.
<b>B. TABLAS.....</b>	<b>xvi.</b>
<b>C. GRÁFICAS.....</b>	<b>xxix.</b>
<b>D. FIGURAS.....</b>	<b>xl.</b>

## LISTADO DE TABLAS

- | No. | DESCRIPCIÓN   |
|-----|---|
| 1.  | TRATAMIENTOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL.  |
| 2.  | CONCENTRACIONES RESIDUALES DE BROMO, PARA UNA CONCENTRACIÓN DE BROMO INICIAL DE 0.015 M.  |
| 3.  | CONCENTRACIONES RESIDUALES DE BROMO, PARA UNA CONCENTRACIÓN DE BROMO INICIAL DE 0.03 M.   |
| 4.  | CONCENTRACIONES RESIDUALES DE BROMO, PARA UNA CONCENTRACIÓN DE BROMO INICIAL DE 0.06 M.   |
| 5.  | PORCENTAJE DE CONVERSIÓN, EN LA REDUCCIÓN DE BROMO A BROMURO EN EL SISTEMA QUÍMICO REDOX, PARA UNA CONCENTRACIÓN DE BROMO INICIAL DE 0.015 M. |
| 6.  | PORCENTAJE DE CONVERSIÓN, EN LA REDUCCIÓN DE BROMO A BROMURO EN EL SISTEMA QUÍMICO REDOX, PARA UNA CONCENTRACIÓN DE BROMO INICIAL DE 0.03 M.  |
| 7.  | PORCENTAJE DE CONVERSIÓN, EN LA REDUCCIÓN DE BROMO A BROMURO EN EL SISTEMA QUÍMICO REDOX, PARA UNA CONCENTRACIÓN DE BROMO INICIAL DE 0.06 M.  |
| 8.  | TIEMPOS DE RESIDENCIA MEDIDOS A LO LARGO DEL REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO.  |
| 9.  | ANÁLISIS DE VARIANZA, PARA LA VARIABLE DEPENDIENTE PORCENTAJE DE CONVERSIÓN.  |
| 10. | ANÁLISIS DE VARIANZA DE FISCHER.  |
| 11. | PRUEBA DE INTERVALOS MÚLTIPLES DE DUNCAN, PARA EL FACTOR DE VARIACIÓN CONCENTRACIÓN DE BROMO INICIAL.   |
| 12. | PRUEBA DE INTERVALOS MÚLTIPLES DE DUNCAN, PARA EL FACTOR DE VARIACIÓN CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO OXÁLICO INICIAL.                                 |
| 13. | PRUEBA DE INTERVALOS MÚLTIPLES DE DUNCAN, PARA EL FACTOR DE VARIACIÓN LONGITUD.   |
| 14. | ANÁLISIS DE VARIANZA, CORRESPONDIENTE A LA VARIABLE DEPENDIENTE PORCENTAJE DE CONVERSIÓN.   |

## LISTADO DE GRÁFICAS

- | No. | DESCRIPCIÓN   |
|-----|---|
| 1.  | CURVA DE CALIBRACIÓN, CAUDAL VRS. ALTURA.   |
| 2.  | CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL $\text{Br}_2$ , TRANSMITANCIA VRS. CONCENTRACIÓN. ESPECTROFOTÓMETRO SPECTRONIC 20, BAUSCH AND LOMB.  |
| 3.  | CONVERSIÓN VRS. LONGITUD. CONCENTRACIÓN DE $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 = 0.015, 0.03, \text{ Y } 0.06 \text{ M. PARA UNA CONCENTRACIÓN DE } \text{Br}_2 = 0.06 \text{ M.}$  |
| 4.  | CONVERSIÓN VRS. LONGITUD. CONCENTRACIÓN DE $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 = 0.015, 0.03, \text{ Y } 0.06 \text{ M. PARA UNA CONCENTRACIÓN DE } \text{Br}_2 = 0.03 \text{ M.}$  |
| 5.  | CONVERSIÓN VRS. LONGITUD. CONCENTRACIÓN DE $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 = 0.015, 0.03, \text{ Y } 0.06 \text{ M. PARA UNA CONCENTRACIÓN DE } \text{Br}_2 = 0.015 \text{ M.}$ |
| 6.  | CONVERSIÓN VRS. $[\text{Br}_2]$ O $[\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4]$ . PARA UNA LONGITUD DEL REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO = 51.3 cm.  |
| 7.  | CONVERSIÓN VRS. $[\text{Br}_2]$ O $[\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4]$ . PARA UNA LONGITUD DEL REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO = 102.6 cm.   |
| 8.  | CONVERSIÓN VRS. $[\text{Br}_2]$ O $[\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4]$ . PARA UNA LONGITUD DEL REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO = 153.9 cm.   |
| 9.  | CONVERSIÓN VRS. $[\text{Br}_2]$ O $[\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4]$ . PARA UNA LONGITUD DEL REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO = 205.2 cm.   |
| 10. | CONVERSIÓN VRS. $[\text{Br}_2]$ O $[\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4]$ . PARA UNA LONGITUD DEL REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO = 256.5 cm.   |
| 11. | CONVERSIÓN VRS. $[\text{Br}_2]$ O $[\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4]$ . PARA UNA LONGITUD DEL REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO = 51.3, 153.9, Y 256.5 cm.                              |

## LISTADO DE FIGURAS

- | No. | DESCRIPCIÓN  |
|-----|--|
| 1.  | PORCENTAJE DE ERROR RELATIVO EN LA ABSORBANCIA O EN LA CONCENTRACIÓN CALCULADA DE LA ESPECIE ABSORBENTE, EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE TRANSMITANCIA. |
| 2.  | REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO ESCALA LABORATORIO.   |

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio, es la continuación de los trabajos hechos acerca del estudio de la búsqueda de sistemas adecuados, para utilizarse en la implementación de prácticas de laboratorio, para el curso de Cinética de los procesos químicos. Con un reactor tubular, en un proceso estable, y reacciones de primero, segundo y tercer orden.

Este trabajo de investigación, realizó el estudio de las condiciones adecuadas de concentración inicial, de bromo molecular y ácido oxálico, y su conversión. En función de la longitud recorrida en un reactor tubular escala laboratorio, a temperatura constante, en un proceso estable. Con una reacción homogénea redox de segundo orden, correspondiente al sistema químico redox (ácido oxálico-bromo).

La metodología de estudio, recurre a mediciones espectrofotométricas de reactivo, a través del cambio químico que se sucede en un reactor tubular, en condiciones isotérmicas, para una reacción homogénea redox, de segundo orden, en un proceso estable.

## 2. RESUMEN

En el presente estudio se ha evaluado el efecto de la variación de concentración inicial de bromo, ácido oxálico, y distancia recorrida en un reactor tubular isotérmico, en el porcentaje de reducción de bromo a bromuro en la reacción homogénea redox sistema ácido oxálico-bromo, en un reactor tubular isotérmico (22°C) escala laboratorio. Se utilizaron tres concentraciones iniciales de ácido oxálico (0.015, 0.03, y 0.06 M), con tres concentraciones iniciales nominales de bromo (0.015, 0.03, y 0.06 M), y cinco distancias recorridas a lo largo del reactor tubular isotérmico (51.3, 102.6, 153.9, 205.2, y 256.5 cm.).

Para cada tratamiento experimental con los tres factores de variación antes mencionados se hicieron tres repeticiones y, para cada uno, se ha calculado el porcentaje de reducción de bromo a bromuro en la reacción, a partir de la medición de la concentración de bromo residual por medio de técnicas espectrofotométricas. A estos resultados se les ha hecho un análisis de varianza en el que se han utilizado la prueba F de Fischer y la de intervalos múltiples de Duncan.

Los datos obtenidos indican que existe variación significativa en el porcentaje de reducción de bromo a bromuro, como consecuencia de la variación en la concentración inicial de ácido oxálico, bromo, y distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico escala laboratorio. La concentración inicial de bromo presenta el efecto mayor en la reducción de bromo a bromuro en la reacción homogénea redox sistema ácido oxálico-bromo.

### 3. JUSTIFICACIONES

El presente trabajo de investigación, muestra cambios en la metodología experimental, para el cálculo de la conversión, de reactivos a productos, en un reactor tubular. De una serie de trabajos sugeridos, para implementar una práctica de laboratorio, del curso de cinética de los procesos químicos.

Introduce el uso de un espectrofotómetro, para el cálculo de la concentración de bromo residual, de forma rápida y precisa, a diferentes longitudes recorridas, en el reactor tubular, para el cálculo del porcentaje de reducción de bromo a bromuro, en función de la concentración de bromo residual de la reacción redox estudiada.

Permite evaluar la posibilidad en el manejo seguro de bromo molecular, de acuerdo con las normas de seguridad preestablecidas, sin correr riesgos de envenenamiento, o quemaduras, puesto que se debe verificar el riesgo minimizado.

La presente investigación abarca conceptualmente, análisis instrumental, cinética química, fenómenos de transporte, y tratamiento estadístico de datos.

El experimento se efectuó, a temperatura constante (temperatura de 22°C), debido a la presión de vapor del bromo y la solubilidad del mismo en agua. A 22°C, la presión de vapor del bromo es de 189.35 mm Hg, y la solubilidad del mismo en agua es de 10% .

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 Generales:

- 4.1.1 Estudiar el grado de conversión en la reacción homogénea redox de segundo orden, con el sistema (ácido oxálico-bromo), con un reactor tubular isotérmico escala laboratorio.
- 4.1.2 Establecer la factibilidad de proponer la experimentación del sistema para una practica de laboratorio, del curso de cinética de los procesos químicos.

### 4.2 Específicos:

- 4.2.1 Estudiar la oxidación del ácido oxálico, monitoriado espectrofotométricamente por la disminución de la densidad óptica a la longitud de onda optima, causada por la reducción del bromo en solución acuosa.
- 4.2.2 Determinar las concentraciones necesarias de reactivos, para la obtención de un porcentaje de conversión efectivo, en la reducción de bromo a bromuro, en el rango de concentraciones estudiado.
- 4.2.3 Realizar una evaluación estadística mediante el diseño experimental seleccionado, y verificar la existencia de diferencias significativas, entre los factores de variación que determinan el grado de reducción de bromo a bromuro, en la reacción homogénea redox.

v.

## 5. HIPÓTESIS

Es posible estudiar la conversión, mediante mediciones espectrofotométricas de la reducción de bromo a bromuro a diferentes concentraciones iniciales de agente oxidante (bromo), agente reductor (ácido oxálico), y a lo largo de un reactor tubular isotérmico escala laboratorio.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUSTAVIA  
Biblioteca Central

## **6. HIPÓTESIS ESTADÍSTICA**

**6.1** Sí existen variaciones significativas en la reducción de bromo a bromuro, en la reacción homogénea redox, a diferentes distancias recorridas, en un reactor tubular isotérmico, escala laboratorio, con una longitud total de 2.60 m., y a diferentes concentraciones iniciales de ácido oxálico y bromo.

**6.2** No existe variación significativa.

## 7. ANTECEDENTES

### 7.1 Estudios realizados:

Los trabajos de investigación, acerca de un reactor tubular a nivel de laboratorio, tuvieron su origen, a partir del entusiasmo del Ing. César García Guerra, con su participación en el seminario sobre, "La Enseñanza de la ingeniería química", realizado por la Universidad de Puebla, México en 1982.

El primer trabajo de tesis, acerca de un reactor tubular, fue el de Teresa Lisely De León Arana con el título, EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE UN REACTOR QUÍMICO TUBULAR TIPO LABORATORIO COMO RECURSO DOCENTE PARA LA PRÁCTICA DEL CURSO DE CINÉTICA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS. Estudió la variación de la temperatura, concentración, longitud del reactor tubular, y su influencia en la mayor conversión de reactivos a productos. En la reacción de oxidación del ion yoduro por el ion persulfato, respecto del yodo libre obtenido. Se emplearon rangos de temperatura, de 20 a 60°C, concentraciones de KI, de 0.05 a 0.2 M. Los resultados obtenidos fueron: una conversión máxima de 0.065 mol-l con un tiempo de residencia de 1.53 seg., para un reactor de 1.20m de longitud.

En 1986, Francisco Aben Rosales Cerezo publica, el proyecto titulado, HIDRÓLISIS DE LA SACAROSA CON ÁCIDO CLORHÍDRICO DILUIDO EN CONDICIONES ISOTERMAS,

ADAPTADA AL REACTOR TUBULAR TIPO LABORATORIO. Este trabajo de investigación, consistió en la hidrólisis (inversión) de la sacarosa en sus dos componentes, fructuosa y glucosa, por medio del ácido clorhídrico.

Se trabajaron a diferentes temperaturas, con concentración constante de azúcar y ácido clorhídrico. Obteniendo una temperatura óptima de  $65^{\circ}\text{C}$ , con una concentración de sacarosa de 1.9476 M. Una inversión máxima de sacarosa de 1.98%, con una velocidad espacial de 0.063 min., para un reactor de 1.20m. de longitud.

Francisco Rosales Cerezo, también desarrollo el proyecto de examen privado, OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN REACTOR DE LABORATORIO A TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN CONSTANTE PARA UNA REACCIÓN HOMOGÉNEA DE PRIMER ORDEN. Trabajo la hidrólisis de la sacarosa, con ácido clorhídrico diluido, con una reacción de pseudo primer orden. Se obtuvo, una temperatura óptima de  $70^{\circ}\text{C}$ , concentración de sacarosa de 0.29844 M. Se alcanzo una conversión máxima de 91.78%, con un tiempo de residencia de 1.59 seg. Para un reactor de 3.60 m. de longitud.

En 1988, Walter Oswaldo Zelada Sánchez publica la tesis titulada, EVALUACIÓN DE UN REACTOR TIPO TUBULAR DE LABORATORIO PARA UNA REACCIÓN HOMOGÉNEA E IRREVERSIBLE DE SEGUNDO ORDEN (SISTEMA ACETATO DE ETILO-HIDRÓXIDO DE SODIO). Trabajó un rango de concentraciones de 0.05 a 0.15 mol-l, obteniendo como resultados, una

constante de velocidad de reacción  $K=0.1547\text{mol seg.}$ , un orden de reacción  $n=2.055$ , un tiempo de residencia de 13.0 seg., y un porcentaje de conversión máxima de 38.06%.

En 1989, Telma Maricela Cano Morales publica la tesis titulada, EVALUACIÓN DEL GRADO DE CONVERSIÓN PARA UNA REACCIÓN DE SEGUNDO ORDEN (SISTEMA YODURO-PERSULFATO) CATALIZADA, A DIFERENTES CONCENTRACIONES, REALIZADA EN UN REACTOR TUBULAR, ESCALA LABORATORIO, A DIFERENTES TEMPERATURAS DE OPERACIÓN.

En este trabajo de investigación, se utilizó un reactor tipo tubular, un sistema químico redox yoduro de potasio-persulfato de potasio, con una reacción de segundo orden, operando en un rango de temperaturas, de 22 a 60°C, concentraciones iniciales de reactivos, de 0.01 a 0.03 M. Obtuvo una conversión máxima de 51.6%, con una concentración de 0.03 M, para un reactor de 318.5 cm. de longitud.

En 1991, Willy Vidal Pirir Rojas publicó el trabajo de tesis titulado, EVALUACIÓN DEL GRADO DE CONVERSIÓN EN EL SISTEMA QUÍMICO CLORURO FÉRRICO-CLORURO ESTANNOSO CATALIZADO CON ÁCIDO CLORHÍDRICO. Empleo un reactor tubular escala laboratorio, con una cinética de tercer orden, a diferentes concentraciones y temperaturas. Obtuvo como resultado, un porcentaje de conversión máxima, para un reactor tubular de una longitud determinada.

En 1994, Claudia Cristina Urizar Pérez publicó el trabajo de tesis titulado, EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL CATALIZADOR EN EL GRADO DE CONVERSIÓN PARA UNA REACCIÓN HOMOGÉNEA DE SEGUNDO ORDEN (SISTEMA YODURO-PERSULFATO) A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE REACTANTES, EN UN REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO, ESCALA LABORATORIO. Utilizó valores de concentración de reactivos, en un rango de 0.01 a 0.03 M, y concentración de catalizador, de 0.2 M / 0.267 M a 0.6 M/0.8 M. Obtuvo como resultado una conversión máxima de 89.93%, para un reactor tubular de 359.60 cm. de longitud.

## **7.2 Marco teórico:**

### **7.2.1 Cinética de las reacciones químicas:**

El Ingeniero Químico ha de conocer la cinética de la reacción, para hacer un diseño, y una operación de forma satisfactoria, del reactor en el que ésta ha de efectuarse.

La cinética química trata principalmente del estudio de la velocidad de conversión, con todos los factores que influyen sobre ella y explica la causa de la magnitud de esa velocidad de reacción.

Hay muchas maneras de clasificar las reacciones químicas. En la Ingeniería de las reacciones químicas probablemente el esquema más útil es el que resulta de dividir las, de acuerdo con el número y tipo de fases implicadas, en dos grandes grupos: sistemas homogéneos y

heterogéneos. Una reacción es homogénea si se efectúa solamente en una fase, y es heterogénea si, al menos, se requiere la presencia de dos fases para que transcurra a la velocidad que lo hace. La velocidad de una reacción homogénea, con respecto a un componente cualquiera A se define como:

$$r_A = \frac{1}{V} \left( \frac{dN_A}{dt} \right) = \frac{\text{(moles de A que aparecen por reacción)}}{\text{(unidad de volumen)(unidad de tiempo)}} \quad (1)$$

De acuerdo con esta definición, la velocidad será positiva si A aparece como producto, mientras que será negativa si A es un reactante que se está consumiendo; es decir,  $-r_A$  es la velocidad de desaparición del reactante. Es de esperar que el transcurso de este tipo de reacciones dependa de la composición, temperatura y presión del sistema. No deben influir sobre la velocidad de las reacciones homogéneas: la forma del recipiente, las propiedades de las superficies de los sólidos en contacto con la fase, y las características difusionales del fluido. Frecuentemente encontramos que la velocidad con que transcurre una reacción en la que intervienen las sustancias A, B, ..., D puede darse aproximadamente por una expresión del tipo siguiente:

$$r_A = K C_A^a C_B^b \dots C_D^d, \quad a + b + \dots + d = n \quad (2)$$

donde a, b, ..., d no han de estar necesariamente relacionados con los coeficientes estequiométricos. El orden de reacción es el exponente a que están elevadas las concentraciones. Así, la reacción anterior es de orden a con respecto a A, orden b con respecto a B, y orden global n.

6.

La conversión fraccional es una variable adecuada para los cálculos de ingeniería, que sustituye muchas veces a la concentración. De un reactante dado A, se define como la fracción de ese reactante convertido en producto, o sea:

$$X_A = (N_{A0} - N_A)/(N_{A0}) \quad (3)$$

Para una reacción bimolecular irreversible de segundo orden, de la forma:



con una ecuación cinética:

$$-r_A = -dC_A/dt = -dC_B/dt = KC_A C_B \quad (5)$$

Tomando en cuenta que las cantidades de A y B que han reaccionado en cualquier tiempo t son iguales y vienen dadas por  $C_{A0}X_A = C_{B0}X_B$ , se puede escribir la ec. (5) en función de  $X_A$  del modo siguiente:

$$-r_A = C_{A0} (dX_A/dt) = K(C_{A0} - C_{A0}X_A)(C_{B0} - C_{A0}X_A) \quad (6)$$

integrando resulta:

$$\ln(1 - X_B)/(1 - X_A) = \ln(C_B C_{A0}/(C_{B0} C_A)) = (C_{B0} - C_{A0})Kt \quad (7)$$

Para una reacción de segundo orden, cuando las concentraciones iniciales de los reactantes A y B son iguales, o para la reacción:



la ecuación diferencial de segundo orden será:

$$-r_A = -(dC_A/dt) = KC_A^2 = KC_{A0}^2(1 - X_A)^2 \quad (9)$$

que una vez integrada resulta:

$$(1/C_A) - (1/C_{A0}) = (1/C_{A0})(X_A/(1 - X_A)) = Kt \quad (10)$$

### 7.2.2 Reactores ideales:

Existen tres tipos de reactores ideales: reactor discontinuo, reactor de flujo en pistón, y reactor de mezcla completa.

En el reactor discontinuo, los reactantes se introducen en el reactor, se mezclan, se deja que reaccionen un tiempo determinado, y finalmente se descarga la mezcla resultante. Es ésta una operación no estacionaria en la que la composición va variando con el tiempo, aunque en cada instante es uniforme en todos los puntos del reactor.

Uno de los dos reactores ideales de flujo estacionario, se conoce con diferentes nombres: reactor de flujo en tapón, de flujo en pistón, de flujo tubular ideal, y de flujo uniforme. Se caracteriza por que el flujo del fluido a su través 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.

El otro reactor ideal de flujo estacionario se denomina reactor de mezcla completa, reactor de retomezcla, reactor ideal de tanque con agitación, o reactor CFSTR (constant flow stirred tank reactor), y como su nombre indica, es el reactor en el que su contenido está perfectamente agitado, y su composición en cada 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. Del mismo modo que el tiempo  $t$  de reacción es la medida natural de la velocidad del proceso, el tiempo espacial y la velocidad espacial son las medidas adecuadas para el diseño de los reactores de flujo. El tiempo espacial es el tiempo necesario para tratar un volumen de alimentación igual al volumen del reactor, medido en condiciones determinadas, se define como:

$$\tau = 1/s \quad (11)$$

La velocidad espacial es el número de volúmenes de la alimentación en condiciones determinadas que puede tratarse en la unidad de tiempo, medidos en volúmenes de reactor, se define como:

$$1/\tau \quad (12)$$

### 7.2.2.1 Reactor de flujo en pistón en estado estacionario:

En un reactor de flujo en pistón la composición del fluido varía con la coordenada de posición en la dirección del flujo; en consecuencia, el balance de materia para un componente de la reacción ha de referirse a un elemento diferencial de volumen  $dV$ . Así, para el reactante A, se dará:

$$\text{entrada} = \text{salida} + \text{desaparición por reacción} + \text{acumulación} \quad (13)$$

para un volumen de  $dV$ , obtenemos la ecuación:

$$F_A = (F_A + dF_A) + (-r_A)dV \quad (14)$$

donde,  $F_A$  = entrada de A, moles/tiempo.

$F_A + dF_A$  = salida de A, moles/tiempo.

$(-r_A)dV$  = desaparición de A por reacción, moles/tiempo.

Teniendo en cuenta que:

$$dF_A = d[F_{A0}(1 - X_A)] = -F_{A0} dX_A.$$

Por sustitución, resulta:

$$F_{A0} dX_A = (-r_A) dV \quad (15)$$

Por consiguiente, ésta es la ecuación referida a A para el volumen  $dV$  en una sección diferencial del reactor; para todo el reactor es necesario integrar esta expresión, de forma siguiente:

$$\int^V dV/F_{A0} = \int^{X_{Af}} dX_A/(-r_A)$$

y de aquí:

$$V/F_{A0} = \tau/C_{A0} = \int^{X_{Af}} dX_A/(-r_A) \quad (16)$$

La ecuación (16) permite calcular el tamaño del reactor conociendo el caudal de la alimentación y la conversión requerida. Para el caso especial de sistemas de densidad constante,

$$X_A = 1 - (C_A/C_{A0}) \quad \text{y} \quad dX_A = -(dC_A/C_{A0})$$

la ecuación de diseño puede expresarse en función de las concentraciones, o sea:

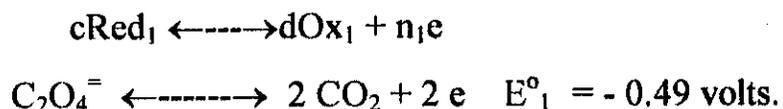
$$V/F_{A0} = \tau/C_{A0} = \int^{X_{Af}} dX_A/(-r_A) = -(1/C_{A0}) \int^{C_{Af}} dC_A/(-r_A) \quad (17)$$

### 7.2.3 Reacciones de oxidorreducción:

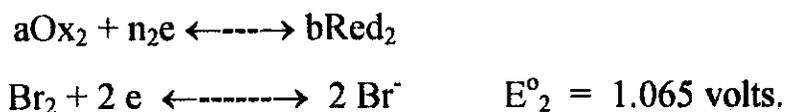
Las reacciones de oxidorreducción, están formadas por dos hemirreacciones. La hemirreacción de oxidación, la cual presenta la pérdida de electrones de una especie denominada, agente reductor. Y la hemirreacción de reducción, la cual presenta la ganancia de electrones de una especie denominada, agente oxidante. Las dos hemirreacciones siempre están enlazadas, debido a que los electrones libres no pueden existir en solución.

Para el sistema químico redox, ácido oxálico-bromo:

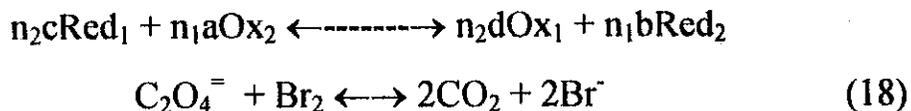
La hemirreacción de oxidación es:



La hemirreacción de reducción es:



La reacción redox global para el sistema químico redox estudiado, es la siguiente:



En el sistema químico redox anterior, el ácido oxálico es el agente reductor, y el bromo es el agente oxidante.

El cálculo del potencial en sistemas de oxidorreducción (redox), puede determinarse por medio de la ecuación de Nernst:

$$E = E^{\circ} - (0.059/n) \log [Aox] / [Ared] \quad (19)$$

en donde:

E = potencial en voltios.

$E^{\circ}$  = potencial estándar de reducción u oxidación.

n = número de electrones transferidos.

[Aox] = concentración del agente oxidante.

[Ared] = concentración del agente reductor.

0.059 = constante a 25° C.

El equilibrio en una reacción redox, se alcanza cuando el potencial es cero ( $E_{Ox2/Red2} = E_{Ox1/Red1}$ ). Por lo tanto, la relación [Aox] / [Ared] es constante y se llama,  $K_{eq}$ , o a menudo  $K_{redox}$ , en general se tiene que:

$$\begin{aligned} E^{\circ}_{Ox2/Red2} + (0.059/n_2) \log [Ox_2]^a / [Red_2]^b &= \\ = E^{\circ}_{Ox1/Red1} + (0.059/n_1) \log [Ox_1]^d / [Red_1]^c & \end{aligned} \quad (20)$$

Y la constante de equilibrio dada por,

$$\begin{aligned} K_{redox} &= ([Ox_1]^{n_2d} [Red_2]^{n_1b}) / ([Red_1]^{n_2c} [Ox_2]^{n_1a}) = \\ &= 10^{(E^{\circ}_{Ox2/Red2} - E^{\circ}_{Ox1/Red1}) / (0.059/n_1n_2)} & (21) \end{aligned}$$

De acuerdo con Dick (Ref. 9, p.189), en el caso especial en que  $n_1 = n_2$  se tiene:

$$K_{redox} = 10^{(n_1(E^{\circ}_{Ox2/Red2} - E^{\circ}_{Ox1/Red1}) / 0.059)} \quad (22)$$

Después de sustituir los potenciales estándar del sistema químico redox, ácido oxálico-bromo.

La ecuación (22) se convierte en:

$$K_{\text{redox}} = 10^{(2)(1.065 - (-0.49)) / 0.059} \quad (23)$$

Como resultado, se obtiene:

$$K_{\text{redox}} = 5.15 \cdot 10^{52}$$

#### **7.2.4 Técnicas de oxidorreducción aplicadas al análisis orgánico cuantitativo:**

Una característica de las reacciones de oxidorreducción de aplicación en análisis inorgánico cuantitativo es su velocidad, lo cual permite utilizarlas en técnicas de titulación de oxidorreducción. La baja velocidad de las reacciones de oxidorreducción asociadas con compuestos orgánicos evita, en casi todos los casos, su aplicación en procedimientos de titulación directa. Cuando las reacciones de oxidorreducción pueden aplicarse en la determinación cuantitativa de compuestos orgánicos, el procedimiento normal es el de agregar un exceso medido del oxidante o reductor, permitiendo que la reacción proceda hasta completarse durante un período relativamente prolongado. La porción sin reaccionar del oxidante o reductor se determina entonces a través de algún método bien establecido. Posteriormente, la cantidad de oxidante o reductor que reaccionó con el

compuesto orgánico viene a ser la base para la estimación cuantitativa del compuesto.

#### **7.2.4.1 Procesos que emplean el ion permanganato:**

En medio alcalino, generalmente de hidróxido de sodio, el ion permanganato,  $\text{MnO}_4^-$ , puede reducirse a ion manganato,  $\text{MnO}_4^{2-}$ , o a dióxido de manganeso,  $\text{MnO}_2$ . Deben elegirse de preferencia las condiciones de reacción que favorezcan la producción de  $\text{MnO}_4^{2-}$  antes que la de  $\text{MnO}_2$ , ya que la primera de estas reacciones se efectúa fácilmente, con limpieza y rapidez. El empleo de una solución relativamente concentrada de hidróxido de sodio (alrededor de 2 M) y un exceso razonable de ion permanganato (aproximadamente el doble de la cantidad teórica) provee una base adecuada para la reacción de permanganato o manganato. El  $\text{MnO}_4^-$  que resta sin reaccionar se determina por reducción con un exceso de una solución valorada de oxalato de sodio, luego el exceso de oxalato de sodio se retitula con solución valorada de permanganato de potasio, hasta la aparición de un color rosado.

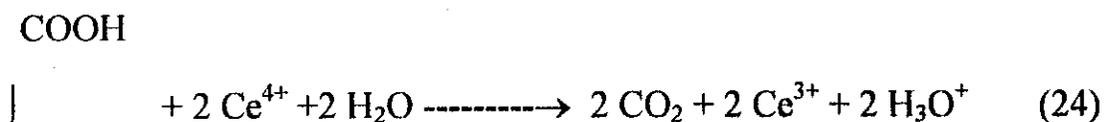
#### **7.2.4.2 Procesos que emplean el ion cerio (IV):**

Ciertos compuestos orgánicos pueden determinarse por oxidación con ion dicromato en procesos similares a aquellos que emplean el ion permanganato. Cuando se emplea el ion cerio (IV) en ácido sulfúrico, la oxidación de compuestos orgánicos adecuados generalmente se efectúa lentamente, y a menudo con estequiometría inconsistente, aun a

temperaturas elevadas. Cuando se emplea ácido sulfúrico 10 a 12 M, en lugar del acostumbrado 3 a 5 M, se logra un ligero aumento en la velocidad de reacción y una definida mejoría en la estequiometría. Aun en este caso, las bajas velocidades de reacción (ebullición y reflujo durante una hora o más) tienden a restarle valor a este procedimiento.

Sin embargo, en ácido perclórico, con concentración aproximadamente 4 M, ciertos compuestos orgánicos pueden oxidarse rápidamente, a menudo a temperatura ambiente, y con una estequiometría consistente. El ataque causa la ruptura del enlace entre los átomos de carbono para cualesquiera de los siguientes grupos funcionales adyacentes entre sí: -COOH, -COH, >CO, >CHOH, -CH<sub>2</sub>OH, y el activo grupo metileno >CH<sub>2</sub>. Cada uno de los fragmentos resultantes se oxida al ácido carboxílico saturado correspondiente, salvo en el caso de fragmentos que ya contengan un grupo carboxílico, en cuyo caso el grupo carboxilo se oxida a CO<sub>2</sub>.

Ejemplo:



COOH

Ácido Oxálico

La técnica habitual consiste en añadir un exceso medido de ion cerio (IV) en ácido perclórico 4 M al compuesto orgánico, permitiendo que la reacción se complete a temperatura ambiente o, cuando se requiera, a alguna temperatura elevada cuidadosamente elegida. El  $Ce^{4+}$  que resta sin reaccionar se determina por reducción con solución valorada de oxalato de sodio o de hierro (II), empleando un indicador adecuado, como la 5-nitro-1,10-fenantrolina ferrosa (nitroferroína).

### 7.2.5 Espectroscopia de absorción:

Los términos y símbolos empleados con mayor frecuencia en espectroscopia de absorción son:

#### 7.2.5.1 Transmitancia:

Representa un haz de radiación paralela antes y después de pasar a través de una capa de solución de  $b$  cm de espesor, y que contiene una especie molecular que absorbe radiación cuya concentración es  $c$ . Como consecuencia de las interacciones entre los fotones y las partículas absorbentes, la potencia del haz disminuye de  $P_0$  a  $P$ . La transmitancia  $T$  de la solución, es la fracción de radiación incidente transmitida por la solución. O sea que:

$$T = P/P_0 \quad (25)$$

Por lo general, la transmitancia se expresa como porcentaje.

#### 7.2.5.2 Absorbancia:

La absorbancia de una solución está definida por la ecuación:

$$A = -\log_{10} T = \log P_0/P \quad (26)$$

Obsérvese que a diferencia de la transmitancia, la absorbancia de una solución aumenta a medida que aumenta la atenuación de haz.

### 7.2.5.3 Absortividad y absortividad molar:

La absorbancia es directamente proporcional a la trayectoria de la radiación a través de la solución y a la concentración de la especie que produce la absorción. Es decir,  $A = abc$ . (27)

Donde  $a$  es una constante de proporcionalidad llamada absortividad. Resulta evidente que la magnitud de  $a$  depende de las unidades utilizadas para  $b$  y  $c$ .

Cuando se expresa la concentración en moles por litro y la trayectoria a través de la celda en centímetros, la absortividad se denomina absortividad molar y se representa con el símbolo  $\epsilon$ . En consecuencia, cuando  $b$  se expresa en centímetros y  $c$  en moles por litro,

$$A = \epsilon bc. \quad (28)$$

Las ecuaciones (27) y (28), constituyen expresiones de la ley de Beer.

### 7.2.5.4 Espectrofotómetros:

Existe una gran variedad de espectrofotómetros comerciales. Los instrumentos para el espectro visible, son espectrómetros diseñados para el intervalo de 380 a 800 nm, aunque dentro de estos límites de región utilizable varia de un instrumento a otro. Los espectrofotómetros construidos para operar en la región visible del espectro, son por lo general sencillos aparatos de un solo haz, con monocromador de rejilla, de costo no muy elevado (menos de 1000 dólares), resistentes y fácilmente trasladables de un lugar a otro. Existen modelos suficientemente livianos que funcionan con baterías y son portátiles.

Los instrumentos de un solo haz están particularmente bien adaptados al análisis cuantitativo basado en las medidas de absorbancia a una sola longitud de onda. En este caso, la sencillez del instrumento y la consiguiente facilidad de mantenimiento ofrecen ventajas reales. Por otra parte, la mayor velocidad y comodidad de medición hace el instrumento de doble haz particularmente útil para análisis cualitativos, en los que deben hacerse muchas mediciones de absorbancia en varias longitudes de onda. El espectrofotómetro Spectronic 20 de la marca Bausch and Lomb, emplea un fototubo de referencia que sirve para compensar las fluctuaciones de la salida de la fuente de luz, que es un lámpara de filamento de tungsteno. Este diseño elimina la necesidad de emplear una fuente de poder estabilizada para la lámpara. La diferencia de señales amplificadas que provienen de ambos fototubos acciona un instrumento de medida que posee una escala de 14 cm., calibrada en transmitancia y absorbancia.

El Spectronic 20 está equipado con un obturador consistente en una plaquita que cae automáticamente entre el haz y el detector toda vez que se retira la cubeta del portacubeta, en esta forma se puede realizar el ajuste de T a 0%. El intervalo de operación del Spectronic 20 es de 340 a 625 nm; con el uso de un fototubo auxiliar se puede extender este intervalo hasta los 950 nm.

Entre otras características de este aparato, puede mencionarse su ancho de banda de 20 nm y la exactitud en la longitud de onda es de  $\pm 2.5$  nm.

En un análisis espectrofotométrico la medición de absorbancia se hace ordinariamente en una longitud de onda que corresponda a un pico de absorción, porque el cambio de la absorbancia por unidad de concentración es mayor en este punto; se obtiene así la sensibilidad máxima. Además, la curva de absorción es a menudo plana en esta región; en estas circunstancias, puede esperarse una buena adhesión a la ley de Beer.

Después de decidir sobre un conjunto de condiciones para el análisis, es necesario preparar una **curva de calibración** partiendo de una serie de soluciones patrón. Estos patrones tienen que aproximarse a la composición general de las muestras reales y abarcar una razonable escala de concentración.

## 8. METODOLOGÍA

### 8.1 Localización:

El experimento se realizó en el Laboratorio del área de química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, y en el Laboratorio de Química Industrial del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

### 8.2 Materiales:

- Bromo molecular, Merck, Cas.-Núm. 7726-95-6. Soluciones acuosas, con concentraciones de: 0.015, 0.03, y 0.06 M.
- Ácido oxálico, Merck, Cas.-Núm. 6153-56-6. Soluciones acuosas con concentraciones de: 0.015, 0.03, y 0.06 M.
- Espectrofotómetro (spectronic 20, marca Bausch and Lomb).
- Cinco condensadores tipo Liebig, Cas.-Núm. 271-286.  
 $\varnothing_{\text{interno}} = 1.2 \text{ cm.}$ , y largo = 51.3 cm.
- Cinco válvulas muestreadoras de teflon.
- Dos depósitos contenedores de reactivos, con sus válvulas reguladoras de flujo.
- Tubería en Y de vidrio pyrex,  $\varnothing_{\text{entrada}} = 0.5 \text{ cm.}$ , y  $\varnothing_{\text{salida}} = 1 \text{ cm.}$
- Tubería de polipropileno (No. 5), con  $\varnothing_{\text{interno}} = 1 \text{ y } 0.5 \text{ cm.}$
- Equipo de seguridad (guantes, bata, mascarilla, lentes, y ventiladores).
- Hielo.
- Tubos de ensayo con tapadera de rosca.

### 8.3 Metodología experimental

#### 8.3.1 Diseño de tratamientos:

Para el estudio del porcentaje de reducción de bromo a bromuro, de la reacción homogénea redox, se utilizó un reactor tubular isotérmico. Se fijó una concentración inicial de bromo y una de ácido oxálico, tomando muestras en 5 diferentes longitudes recorridas, en el reactor tubular. Los tratamientos utilizados, se presentan en la Tabla N<sup>o</sup>.1. del apéndice.

#### 8.3.2 Diseño experimental:

Se realizó un experimento factorial con un arreglo combinatorio y una distribución completamente al azar, con 45 tratamientos ( $3^2 \cdot 5$ ) y 3 repeticiones. Las 135 unidades experimentales, estuvieron constituidas por los 45 tratamientos presentados en la Tabla N<sup>o</sup>.1 del apéndice, y 3 repeticiones para cada uno de ellos.

#### 8.3.3 Unidad experimental:

La unidad experimental de laboratorio, estuvo constituida por un reactor tubular de vidrio pyrex, compuesto por cinco condensadores en serie, unidos con tubería de polipropileno (N<sup>o</sup>.5), con  $\varnothing_{\text{interno}} = 1.0$  cm., y cinco válvulas muestreadoras de teflon en dichas uniones.

En la entrada del reactor se instaló una tubería en forma de Y de vidrio pyrex. Los reactivos fluyeron por gravedad desde dos depósitos contenedores con válvulas reguladoras, partiendo de ellos tuberías de polipropileno de  $\varnothing_{\text{interno}} = 0.5$  cm., las cuales se unieron a dos de los extremos de la tubería en Y, el otro extremo de ésta es de  $\varnothing_{\text{interno}} = 1.0$  cm y se unió directamente al reactor tubular.

Además, la unidad experimental dispuso de un espectrofotómetro (spectronic 20), para medir el porcentaje de transmitancia de bromo residual, de las muestras tomadas a diferentes distancias del reactor tubular.

#### **8.3.4 Manejo del experimento:**

El experimento se llevó a cabo en un reactor tubular isotérmico, escala laboratorio, compuesto de cinco condensadores tipo Liebig, Cas.-Núm. 271-286, con  $\varnothing_{\text{interno}} = 1.2\text{cm.}$ , y largo = 51.3cm.

Se prepararon los reactivos (ácido oxálico y bromo) en solución acuosa, con concentraciones de: 0.015, 0.03, y 0.06 M.

Para la determinación del ácido oxálico se empleó la técnica de oxidorreducción aplicada al análisis orgánico cuantitativo, denominada: Permanganatometría.

Los reactivos fluyeron por gravedad, con flujo laminar, y se mezclarán en una tubería en forma de Y de vidrio pyrex de 30° de abertura, para evitar turbulencia. Se prepararon justo antes de la realización del experimento debido a la descomposición de los mismos, sobre todo la rápida decoloración del bromo.

Los flujos de los reactivos fueron controlados por válvulas colocadas a la salida de los depósitos contenedores. Se alcanzó flujo de pistón dentro del reactor tubular, a temperatura constante (temperatura ambiente). La curva de calibración (caudal vrs. altura), correspondiente a los flujos alcanzados en el reactor, se observa en la gráfica No. 1 del apéndice.

Se utilizó un espectrofotómetro (spectronic 20 marca Bausch and Lomb) para determinar la concentración de bromo residual, de las muestras tomadas a diferentes longitudes recorridas del reactor tubular, a partir de la curva de calibración de dicho espectrofotómetro, y consecuentemente el porcentaje de reducción de bromo a bromuro, en función de la concentración de bromo residual, de la reacción redox.

El manejo del bromo se hizo en base a las normas de seguridad J.T. Baker (codigo B 3905-07).

### 8.3.5 Variable respuesta:

Correspondió al porcentaje de reducción de bromo a bromuro, en función de la concentración de bromo residual de la reacción redox. Esta definido por:

$$\% X_c = ([Br_2]_o - [Br_2]) / [Br_2]_o * 100 \quad (29)$$

donde,

$\% X_c$  = porcentaje de conversión, en función de la concentración de bromo residual, de la reacción redox.

$[Br_2]_o$  = concentración de bromo al inicio de la reacción redox.

$[Br_2]$  = concentración de bromo residual, de la muestra tomada a diferentes longitudes del reactor tubular.

### 8.3.6 Modelo estadístico:

El porcentaje de reducción de bromo a bromuro, de la reacción homogénea redox, se evaluó mediante un análisis de varianza para un

diseño factorial con un arreglo combinatorio y una distribución completamente al azar, con 45 tratamientos y 3 repeticiones.

El modelo estadístico que se utilizó es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + t_i + \beta_j + \tau_k + (t\beta)_{ij} + (t\tau)_{ik} + (\beta\tau)_{jk} + (t\beta\tau)_{ijk} + E_{ijk} \quad (30)$$

$Y_{ijk}$  = Variable respuesta (% de reducción de bromo a bromuro de la reacción redox).

$\mu$  = Efecto de la media general sobre la variable respuesta.

$t_i$  = Efecto de la  $i$ -ésima concentración de reactivo, ácido oxálico (factor fijo con  $A$  niveles)  $A = 3$ .

$\beta_j$  = Efecto de la  $j$ -ésima concentración de reactivo, bromo molecular (factor fijo con  $B$  niveles)  $B = 3$ .

$\tau_k$  = Efecto de la  $k$ -ésima longitud del reactor tubular (factor fijo con  $L$  niveles)  $L = 5$ .

$(t\beta)_{ij}$  = Efecto de interacción concentración de reactivo ácido oxálico-concentración de reactivo bromo molecular.

$(t\tau)_{ik}$  = Efecto de interacción concentración de reactivo ácido oxálico-longitud del reactor tubular.

$(\beta\tau)_{jk}$  = Efecto de interacción concentración de reactivo bromo  
molecular-longitud del reactor tubular.

$(\tau\beta)_{ijk}$  = Efecto de interacción concentración de reactivo ácido oxálico-  
concentración de reactivo bromo molecular-longitud del  
reactor.

$E_{ijk}$  = Error experimental asociado a la  $ijk$ -ésima unidad  
experimental (repetición).

Debido a que existieron diferencias significativas considerables  
entre los factores de variación, se realizó una comparación de medias de  
Duncan para determinar la significancia de los tratamientos.

## 9. RESULTADOS

### 1. Resultados de la prueba F de Fischer:

Las F observadas, de los factores de variación y de la interacción, son mayores que las F críticas respectivas.

(Vea la tabla No. 9 y No. 10, de la sección 15.2.1 en el apéndice).

### 2. Resultados de la prueba de intervalos múltiples de Duncan:

Los tratamientos experimentales empleados presentaron diferencia significativa en el porcentaje de reducción de bromo a bromuro, a excepción de dos parejas de tratamientos correspondientes al factor de variación concentración de bromo inicial, con la pareja de tratamientos  $[\text{Br}_2] = 0.015 \text{ M}$ ,  $[\text{Br}_2] = 0.03 \text{ M}$ , y al factor de variación concentración de ácido oxálico inicial, con la pareja de tratamientos  $[\text{OX}] = 0.015 \text{ M}$ ,  $[\text{OX}] = 0.03 \text{ M}$ .

(Vea la tabla No. 9 y No. 10, de la sección 15.2.1 en el apéndice).

## 10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al evaluar el sistema investigado en función de las diferentes combinaciones de concentración de bromo y ácido oxálico, a lo largo del reactor tubular isotérmico, se obtuvieron diferencias significativas en la variable respuesta (reducción de bromo a bromuro), según el análisis de varianza referido en la sección 15.2.1, tabla No. 9 y No. 10.

Las gráficas de resultados (Gráfica No. 3 a la No. 5 del apéndice) que representan conversión vrs. longitud, con concentraciones de ácido oxálico 0.015, 0.03, y 0.06 M, para una concentración de bromo inicial de 0.06, 0.03, y 0.015 M respectivamente, su comportamiento puede ser descrito con un modelo polinomial de segundo orden o cuadrático.

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza referido en la sección 15.2.1, tabla No. 9, el coeficiente de variabilidad es de 37.1548, el cual indica que existen errores experimentales significativos, dado que un coeficiente de variabilidad mayor que 20, representa errores experimentales significativos (ref. 7). La razón por la cual los errores en las mediciones experimentales son significativos, es el error fotométrico en las mediciones de porcentaje de transmitancia obtenidas en el espectrofotómetro utilizado (spectronic 20, Bausch and Lomb), a causa de fluctuaciones en el funcionamiento normal de este instrumento, según refiere la literatura (ref. 8).

En la curva de calibración del espectrofotómetro spectronic 20 Bausch

and Lomb (transmitancia vrs. concentración de bromo residual), el error se vuelve extremadamente grande a cada extremo de la escala de porcentaje de transmitancia, como se observa en la figura No. 1 del apéndice. **Las determinaciones cuantitativas de máxima exactitud, se encuentran entre 20 y 65 por 100 de transmitancia** (ref. 8), y los valores de porcentaje de transmitancia en las mediciones experimentales se encontraron en un rango de 3 a 44% de transmitancia.

En las gráficas No. 3 a la No. 5 del apéndice, se observa mayor conversión cuando la concentración de bromo inicial se encuentra en exceso superando la concentración de ácido oxálico inicial, debido a que en la reacción homogénea redox sistema ácido oxálico-bromo, se favorece la oxidación del agente reductor (ácido oxálico) con un exceso de agente oxidante (bromo) (ref. 9), y por ende la reducción de bromo a bromuro.

El porcentaje de reducción aumenta a la mayor distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico, como se observa en la gráfica No. 11 que representa conversión vrs.  $[\text{Br}_2]$  o  $[\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4]$ , para una distancia recorrida en el reactor tubular de 51.3, 153.9, y 256.5 cm. **Dicho comportamiento fué el esperado, y se debe a que el flujo dentro del reactor tubular isotérmico varia con la posición en dirección del flujo, y no varia en dirección axial a la del flujo** (ref. 10).

De acuerdo con las gráficas No. 6 a la No. 10 que representan conversión vrs  $[\text{Br}_2]$  o  $[\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4]$ , para una distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico de 51.3, 102.6, 153.9, 205.2, y 256.5 cm. respectivamente,



**del reactor tubular isotérmico**, a través de un incremento en la longitud del mismo, con la finalidad de obtener un tiempo de residencia mayor y por ende una conversión mayor de 23.44%, correspondiente a concentraciones, 0.06 M de bromo inicial y 0.06 M de ácido oxálico inicial.

El estudio estadístico de los resultados, referido por el análisis de varianza, tabla No. 10, sección 15.2.1, presenta los factores de variación siguientes: concentración inicial de bromo (BR), concentración inicial de ácido oxálico (OX), distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico (LO), y las interacciones (BR-OX), (BR-LO), (OX-LO), (BR-OX-LO), los cuales presentan diferencias significativas en las medias de los valores del porcentaje de reducción de bromo a bromuro en el reactor tubular isotérmico ( $Pr > F = 0.0001$ ). La significancia de la interacción, indica que **el efecto ejercido por la variable concentración de bromo inicial sobre el porcentaje de reducción de bromo a bromuro, presenta dependencia de la variable concentración de ácido oxálico inicial, y de la distancia recorrida a lo largo del reactor tubular isotérmico.**

Se realizó la prueba de intervalos múltiples de Duncan a cada uno de los factores de variación antes mencionados. Los resultados de la prueba de Duncan se muestran en el apéndice, sección 15.2.1, Tablas No. 11 a la No. 13, que presentan el agrupamiento Duncan de medias del porcentaje de reducción de bromo a bromuro, para cada uno de los factores de variación. **De acuerdo con los resultados de dicha prueba, existen dos pares de tratamientos experimentales que no presentan diferencia significativa en el porcentaje**

**de conversión de bromo a bromuro.** Un par de tratamientos corresponde al factor de variación concentración de bromo inicial, con los tratamientos (BR) = 0.015 M, y (BR) = 0.03 M. El otro par de tratamientos corresponde al factor de variación concentración de ácido oxálico inicial, con los tratamientos (OX) = 0.015 M, y (OX) = 0.03 M.

En el agrupamiento Duncan de medias del porcentaje de reducción de bromo, se observa que **el efecto de los factores de variación sobre la variable respuesta, en orden decreciente es el siguiente:** concentración de bromo inicial (BR), distancia recorrida a lo largo del reactor tubular isotérmico (LO), y concentración de ácido oxálico inicial (OX).

El mayor porcentaje de conversión, y por ende de reducción de bromo a bromuro en el reactor tubular isotérmico (22°C), fué de 23.44%. El tratamiento experimental en el que se obtuvo el mayor porcentaje de conversión de bromo a bromuro, es el correspondiente a la concentración de bromo inicial (BR) = 0.06 M, concentración de ácido oxálico inicial (OX) = 0.06 M, y distancia recorrida en el reactor tubular (LO) = 256.5 cm.

La concentración de bromo inicial con la cual se alcanzó un porcentaje de reducción de bromo a bromuro alto, con cada una de las diferentes concentraciones de ácido oxálico inicial, y las diferentes distancias recorridas en el reactor tubular, fué de 0.06 M. Dichos resultados se observan en la gráfica No. 11.

La concentración de ácido oxálico inicial con la cual se alcanzó un porcentaje de reducción de bromo a bromuro alto, con cada una de las diferentes concentraciones de bromo inicial, y las diferentes distancias recorridas en el reactor tubular, fue de 0.06 M. Dichos resultados se observan en la gráfica No. 11.

Para las mediciones experimentales de concentración de bromo residual se utilizó la curva de calibración transmitancia vrs. concentración de bromo (gráfica No. 2), la cual corresponde a una longitud de onda de 480 nm. Para una concentración de bromo alta (0.06 M), el valor de porcentaje de transmitancia resulta ser bajo (5.5 %), debido a que la transmitancia de la solución, es la fracción de radiación incidente transmitida por la misma (ref. 14), y para una concentración de bromo alta la fracción de radiación incidente transmitida por la solución es pequeña.

Debido a que existieron errores significativos en las mediciones de transmitancia por el error fotométrico del espectrofotómetro spectronic 20, Bausch and Lomb, **se recomienda diluir las muestras que contienen bromo residual tomadas a lo largo del reactor tubular, para trabajar dentro del rango de porcentaje de transmitancia óptimo en el espectrofotómetro (20 a 65 %)**, y a partir del valor de dilución conocer la concentración de bromo residual original de las muestras tomadas a lo largo del reactor tubular isotérmico.

## 11. CONCLUSIONES

1. Sí es posible estudiar la conversión, mediante mediciones espectrofotométricas de la reducción de bromo a bromuro a diferentes concentraciones iniciales de agente oxidante (bromo), agente reductor (ácido oxálico), y a lo largo de un reactor tubular isotérmico escala laboratorio.
2. Existe variación significativa en el grado de conversión en la reacción homogénea redox, sistema ácido oxálico-bromo, en el reactor tubular isotérmico, como consecuencia de la variación en la concentración de bromo inicial y ácido oxálico inicial, a diferentes distancias recorridas en el reactor tubular.
3. El efecto en orden decreciente, de los factores de variación es el siguiente: concentración de bromo inicial > distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico > concentración de ácido oxálico inicial.
4. Para trabajar en el rango de transmitancia óptimo (20 a 65 %), para un mínimo error fotométrico, se deben recuperar en un volumen de agua las muestras obtenidas a lo largo del reactor tubular, y considerar el valor de dilución, para conocer la concentración de bromo residual original de dichas muestras.

5. El arreglo combinatorio de concentraciones de bromo inicial y ácido oxálico inicial, que permite obtener variaciones apreciables en el grado de conversión en la reacción homogénea redox, sistema ácido oxálico-bromo, a la misma distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico, es el siguiente:

CUADRO No. 1

CONCENTRACIÓN DE BROMO INICIAL (mol/l)	CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO OXÁLICO INICIAL = 0.015 M	CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO OXÁLICO INICIAL = 0.03 M	CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO OXÁLICO INICIAL = 0.06 M
0.015			X
0.03	X		X
0.06		X	X

\* Arreglo combinatorio de concentraciones de bromo inicial y ácido oxálico inicial, en la reacción homogénea redox sistema ácido oxálico-bromo, a temperatura constante (22°C), con el reactor tubular escala laboratorio.

6. El presente estudio aporta información adecuada para el diseño de un instructivo, para práctica de laboratorio, del curso de cinética de los procesos químicos.

## 12. RECOMENDACIONES

1. Para realizar este experimento como práctica de laboratorio del curso de cinética de los procesos químicos, se recomienda utilizar un método para solubilizar bromo molecular en agua, debido a la limitada facilidad para solubilizar el mismo a temperatura ambiente.
2. Se recomienda que en la realización de este sistema redox, se maneje el bromo molecular con base en las normas de seguridad J.T. Baker (código B 3905-07).
3. Para la preparación de las soluciones de bromo (0.015, 0.03, y 0.06 M), se recomienda utilizar pipetas graduadas no mayores de 5 ml., debido a la alta densidad y volatilidad del bromo a temperatura ambiente, lo cual hace difícil el trasvase, a través de pipetas de volumen mayor a 5 ml.
4. Si se desea alcanzar un valor de porcentaje de conversión mayor al obtenido en el sistema estudiado (23.44 %), se recomienda aumentar la longitud del reactor, colocando mas condensadores tubulares de la misma especificación.

### 13. REFERENCIAS

1. Teresa Lisely De León Arana, **Evaluación del diseño de un reactor químico tubular tipo laboratorio como recurso docente para la practica del curso de cinética de los procesos químicos** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1984), p. 52.
2. Francisco A. Rosales C., **Optimización de la operación de un reactor tipo tubular de laboratorio a temperatura y concentración constante y para una reacción homogénea de primer orden** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1986), p. 23.
3. Walter O. Zelada Sánchez, **Evaluación de un reactor tipo tubular para una reacción homogénea e irreversible de segundo orden (sistema acetato de etilo-hidróxido de sodio)** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1988), p. 51.
4. Telma Maricela Cano Morales, **Evaluación del grado de reacción de segundo orden (sistema yoduro persulfato) catalizada, a diferentes concentraciones, realizada en un reactor tubular, escala laboratorio, a diferentes temperaturas de operación** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1989), p. 62.
5. Willy Vidal Pirir Rojas, **Evaluación del grado de conversión en el sistema químico cloruro férrico-cloruro estannoso catalizado con ácido clorhídrico, correspondiente a una cinética de tercer orden, realizado a diferentes concentraciones y temperaturas de operación, en un reactor tubular escala laboratorio** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1991), p. 42.
6. Claudia Cristina Urizar Pérez, **Efecto de la concentración del catalizador en el grado de conversión para una reacción homogénea de segundo orden (sistema yoduro-persulfato) a diferentes concentraciones de reactantes, en un reactor tubular isotérmico, escala laboratorio** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1994), p. 74.
7. Douglas C. Montgomery, **Diseño y Análisis de experimentos** (México: Editorial Iberoamérica, 1991), p. 67.
8. Fischer y Peters, **Compendio de Análisis químico cuantitativo** (México: Editorial Interamericana, 1989), p. 423.
9. John Dick, **Química Analítica** (México: Editorial El Manual Moderno S.A.), p. 189.
10. Octave Levenspiel, **Ingeniería de las Reacciones químicas** (México: Editorial Reverté, S.A., 1993), p. 121.
11. Alan S. Wingrove, **Química Orgánica** (México: Editorial Harla, 1986), p. 1046.
12. Wade, **Química Orgánica** (México: Editorial Prentice Hall, 1994), p. 976.
13. Raymond Chang, **Química** (4ta. edición; México: Editorial Mc Graw-Hill, 1992), p. 545.
14. D. A. Skoog y D. M. West, **Análisis Instrumental** (2a. edición; México: Editorial Interamericana, 1984), p.

**14. BIBLIOGRAFÍA**

1. Blanco, Jesús y Ricardo Linarte  
**Diseño de reactores químicos.** México: Editorial Trillas, 1978.
2. Chang, Raymond  
**Química.** México: Editorial Mc Graw-Hill, 1992.
3. Dick, John  
**Química Analítica.** México: Editorial El Manual Moderno S.A., 1979.
4. Fischer y Peters  
**Compendio de Análisis químico cuantitativo.** México: Editorial Interamericana., 1989.
5. Hann, Richard, Arleigh Hartkopf y George Schenn  
**Química Analítica cuantitativa.** México: Editorial C.E.C.S.A., 1984.
6. Levenspiel, Octave  
**Ingeniería de las Reacciones químicas.** México: Editorial Reverté, S.A., 1993.
7. Montgomery, Douglas  
**Diseño y Análisis de experimentos.** México: Editorial Iberoamérica, 1991.
8. Perry, R.  
**Manual del Ingeniero Químico.** 3a. de.; México: Editorial Mc Graw-Hill, 1979.
9. Pierce, K. B.  
**Química de la Materia.** México: Editorial PCSA, 1974.
10. Reyes Castañeda, P.  
**Diseño de Experimentos aplicados.** México: Editorial Trillas, 1981.
11. Skoog, D. A. y D. M. West  
**Análisis Instrumental.** México: Editorial Interamericana, 1984.

**15. APÉNDICE**



## 15.1 MUESTRA DE CÁLCULO

### 15.1.1 Cálculo de la concentración de bromo residual:

La concentración de bromo residual se calcula a partir de la curva de calibración del espectrofotómetro spectronic 20, de marca Bausch and Lomb, para una longitud de onda de 480 nm (gráfica No. 2 del apéndice).

A partir de la correlación de la curva de calibración, transmitancia vs. concentración de bromo, para un rango de transmitancia de 0 % a 100 %, y un rango de concentración de bromo de 0.01M a 0.15 M, se obtiene el valor de concentración molar de bromo residual.

Para valor de transmitancia de 5.5 %, el valor de concentración de bromo residual se calcula a partir de la ecuación de correlación de la curva de calibración:  $y = (0.203)x^{-1.174}$ , con  $r = -0.985$  (1.), para un rango de transmitancia de 19.95 % a 54.95 %.

Después de sustituir el valor de transmitancia 5.5 % en la ecuación (1.), se obtiene:  $5.5 = (0.203)x^{-1.174}$  (2.).

Como resultado se obtiene un valor de concentración molar de bromo residual = 0.0602 M.

### 15.1.2 Cálculo del porcentaje de reducción de bromo a bromuro:

El porcentaje de reducción de bromo a bromuro, en la reacción homogénea redox:  $\text{Br}_2 + \text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 \rightleftharpoons 2 \text{Br}^- + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}^+$  (3.), puede medirse a partir de la cantidad de bromo sin reaccionar (concentración de bromo residual).

Para sistemas a volumen constante, el porcentaje de conversión, en éste caso de reducción de bromo a bromuro, está definido de la forma siguiente:  $\% X = ((C_{A0} - C_A) / C_{A0}) (100)$  (4.),

donde:  $C_{A0}$  = concentración de bromo inicial (mol/l),

$C_A$  = concentración de bromo residual (mol/l).

Debido a la dificultad en el manejo de volúmenes de bromo molecular, la concentración molar de bromo inicial se obtuvo de la regresión, concentración molar de bromo residual vs. distancia recorrida en el reactor.

Para el tratamiento concentración de bromo inicial = 0.06 M, con concentración de ácido oxálico inicial = 0.03 M, a lo largo del reactor tubular (51.3, 102.6, 153.9, 205.2, y 256.5 cm.), se obtiene la regresión de concentración molar de bromo residual vs. distancia recorrida en el reactor tubular:  $y = 5 \cdot 10^{-8} x^2 - 7 \cdot 10^{-5} x + 0.0742$ , con  $r = 0.979$ . Para una distancia recorrida en el reactor tubular igual a cero, el valor de concentración molar de bromo nominal obtenido por regresión es 0.074M. El valor de concentración molar de bromo residual correspondiente al tratamiento  $[\text{Br}_2] = 0.06 \text{ M}$ ,  $[\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4] = 0.03 \text{ M}$ , y

una distancia recorrida en el reactor tubular = 256.5 cm., obtenido a partir de la curva de calibración (sección 15.1.1), es igual a 0.0602 M.

Después de sustituir la concentración de bromo inicial = 0.074 M, y la concentración residual de bromo = 0.0602 M, en la ecuación (4.), se obtuvo un porcentaje de reducción de bromo a bromuro de 18.65 %.

### 15.1.3 Cálculo del tiempo de residencia:

El tiempo de residencia se define como:  $\tau = V / Q$  (5.),

en donde V es el volumen del reactor, y Q el flujo volumétrico (34.6 cm<sup>3</sup>/s). El volumen se define como:  $V = A * L$  (6.),

donde A es el área del reactor igual a 0.785 cm<sup>2</sup>, y L es la longitud del reactor tubular.

Después de sustituir la ecuación (6.) en la ecuación (5.) se obtiene:  $\tau = A * L / Q$  (7.).

Para L = 102.6 cm., se obtiene:

$$\tau = (0.785 \text{ cm}^2 * 102.6 \text{ cm}) / (34.6 \text{ cm}^3/\text{s})$$

$$\tau = 1.16 \text{ s.}$$

Los tiempos de residencia correspondientes a cada una de las distancias recorridas a lo largo del reactor tubular, se encuentran en la Tabla No. 8, sección 15.2.

## 15.2 Tablas.

TABLA No.1

## TRATAMIENTOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL

código de tratamiento	concentración de ácido oxálico [mol/l.]	concentración de bromo molecular [mol/l.]	distancia recorrida en el reactor tubular (cm.)
A1B1L1	0.015	0.015	51.3
A1B1L2	0.015	0.015	102.6
A1B1L3	0.015	0.015	153.9
A1B1L4	0.015	0.015	205.2
A1B1L5	0.015	0.015	256.5
A1B2L1	0.015	0.03	51.3
A1B2L2	0.015	0.03	102.6
A1B2L3	0.015	0.03	153.9
A1B2L4	0.015	0.03	205.2
A1B2L5	0.015	0.03	256.5
A1B3L1	0.015	0.06	51.3
A1B3L2	0.015	0.06	102.6
A1B3L3	0.015	0.06	153.9
A1B3L4	0.015	0.06	205.2
A1B3L5	0.015	0.06	256.5
A2B1L1	0.03	0.015	51.3
A2B1L2	0.03	0.015	102.6
A2B1L3	0.03	0.015	153.9
A2B1L4	0.03	0.015	205.2
A2B1L5	0.03	0.015	256.5
A2B2L1	0.03	0.03	51.3
A2B2L2	0.03	0.03	102.6
A2B2L3	0.03	0.03	153.9
A2B2L4	0.03	0.03	205.2
A2B2L5	0.03	0.03	256.5
A2B3L1	0.03	0.06	51.3
A2B3L2	0.03	0.06	102.6
A2B3L3	0.03	0.06	153.9
A2B3L4	0.03	0.06	205.2
A2B3L5	0.03	0.06	256.5
A3B1L1	0.06	0.015	51.3
A3B1L2	0.06	0.015	102.6
A3B1L3	0.06	0.015	153.9
A3B1L4	0.06	0.015	205.2
A3B1L5	0.06	0.015	256.5

\* Tratamientos utilizados en el diseño experimental, con una concentración inicial de bromo y ácido oxálico, para cinco distancias recorridas a lo largo del reactor tubular isotérmico.

**TABLA N<sup>o</sup>.1 (continuación)**  
**TRATAMIENTOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL**

<b>código de tratamiento</b>	<b>concentración de ácido oxálico [mol/l.]</b>	<b>concentración de bromo molecular [mol/l.]</b>	<b>distancia recorrida en el reactor tubular (cm.)</b>
A3B2L1	0.06	0.03	51.3
A3B2L2	0.06	0.03	102.6
A3B2L3	0.06	0.03	153.9
A3B2L4	0.06	0.03	205.2
A3B2L5	0.06	0.03	256.5
A3B3L1	0.06	0.06	51.3
A3B3L2	0.06	0.06	102.6
A3B3L3	0.06	0.06	153.9
A3B3L4	0.06	0.06	205.2
A3B3L5	0.06	0.06	256.5

\* Tratamientos utilizados en el diseño experimental, con una concentración inicial de bromo y ácido oxálico, para cinco distancias recorridas a lo largo del reactor tubular isotérmico.

**NOTA:**

El significado del código de tratamiento, es el siguiente:

$A_i$  = Concentración inicial de ácido oxálico,  $i(i = 1..3)$

$B_j$  = Concentración inicial de bromo,  $j(j = 1..3)$

$L_k$  = Longitud del reactor tubular,  $k(k = 1..5)$

## 15.2.1 Tablas de resultados.

**Tabla No. 2**  
**CONCENTRACIONES RESIDUALES DE BROMO**

Concentración de ácido oxálico inicial [mol/l]	Distancia recorrida en el reactor tubular (cm.)	R1 [mol/l]	R2 [mol/l]	R3 [mol/l]	R <sub>promedio</sub> [mol/l]
0.015	51.3	0.0294	0.0294	0.0294	0.0294
0.015	102.6	0.0293	0.0294	0.0293	0.0293
0.015	153.9	0.0293	0.0294	0.0293	0.0293
0.015	205.2	0.0293	0.0293	0.0293	0.0293
0.015	256.5	0.0293	0.0293	0.0293	0.0293
0.03	51.3	0.0294	0.0294	0.0294	0.0294
0.03	102.6	0.0294	0.0294	0.0294	0.0294
0.03	153.9	0.0294	0.0294	0.0294	0.0294
0.03	205.2	0.0293	0.0294	0.0294	0.0294
0.03	256.5	0.0293	0.0294	0.0294	0.0294
0.06	51.3	0.0295	0.0295	0.0295	0.0295
0.06	102.6	0.0294	0.0294	0.0294	0.0294
0.06	153.9	0.0293	0.0293	0.0294	0.0293
0.06	205.2	0.0293	0.0293	0.0293	0.0293
0.06	256.5	0.0293	0.0293	0.0293	0.0293

\* Concentraciones residuales de bromo, a diferente concentración inicial de ácido oxálico, y diferente distancia recorrida en el reactor tubular. Correspondientes a una concentración inicial de bromo = 0.015 M. Para las tres repeticiones realizadas en el experimento.

Tabla No. 3

## CONCENTRACIONES RESIDUALES DE BROMO

Concentración de ácido oxálico inicial [mol/l]	Distancia recorrida en el reactor tubular (cm.)	R1 [mol/l]	R2 [mol/l]	R3 [mol/l]	Rpromedio [mol/l]
0.015	51.3	0.0325	0.0325	0.0322	0.0324
0.015	102.6	0.0325	0.0325	0.0319	0.0323
0.015	153.9	0.0319	0.0319	0.0317	0.0318
0.015	205.2	0.0317	0.0314	0.0314	0.0315
0.015	256.5	0.0317	0.0314	0.0314	0.0315
0.03	51.3	0.0300	0.0302	0.0304	0.0302
0.03	102.6	0.0300	0.0302	0.0304	0.0302
0.03	153.9	0.0300	0.0301	0.0302	0.0301
0.03	205.2	0.0299	0.0300	0.0300	0.0300
0.03	256.5	0.0299	0.0299	0.0300	0.0299
0.06	51.3	0.0319	0.0314	0.0319	0.0317
0.06	102.6	0.0319	0.0311	0.0317	0.0316
0.06	153.9	0.0317	0.0311	0.0317	0.0315
0.06	205.2	0.0314	0.0309	0.0314	0.0312
0.06	256.5	0.0311	0.0307	0.0311	0.0310

\* Concentraciones residuales de bromo, a diferente concentración inicial de ácido oxálico, y diferente distancia recorrida en el reactor tubular. Correspondientes a una concentración inicial de bromo = 0.03 M. Para las tres repeticiones realizadas en el experimento.

Tabla No. 4

## CONCENTRACIONES RESIDUALES DE BROMO

Concentración de ácido oxálico inicial [mol/l]	Distancia recorrida en el reactor tubular (cm.)	R1 [mol/l]	R2 [mol/l]	R3 [mol/l]	Rpromedio [mol/l]
0.015	51.3	0.0885	0.0953	0.0953	0.0930
0.015	102.6	0.0885	0.0953	0.0953	0.0930
0.015	153.9	0.0885	0.0953	0.0953	0.0930
0.015	205.2	0.0885	0.0885	0.0953	0.0908
0.015	256.5	0.0789	0.0885	0.0885	0.0853
0.03	51.3	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714
0.03	102.6	0.0653	0.0714	0.0653	0.0673
0.03	153.9	0.0653	0.0653	0.0653	0.0653
0.03	205.2	0.0653	0.0653	0.0602	0.0636
0.03	256.5	0.0602	0.0602	0.0602	0.0602
0.06	51.3	0.0602	0.0602	0.0602	0.0602
0.06	102.6	0.0602	0.0559	0.0522	0.0561
0.06	153.9	0.0559	0.0522	0.0522	0.0534
0.06	205.2	0.0490	0.0522	0.0522	0.0511
0.06	256.5	0.0490	0.0490	0.0490	0.0490

\* Concentraciones residuales de bromo, a diferente concentración inicial de ácido oxálico, y diferente distancia recorrida en el reactor tubular. Correspondientes a una concentración inicial de bromo = 0.06 M. Para las tres repeticiones realizadas en el experimento.

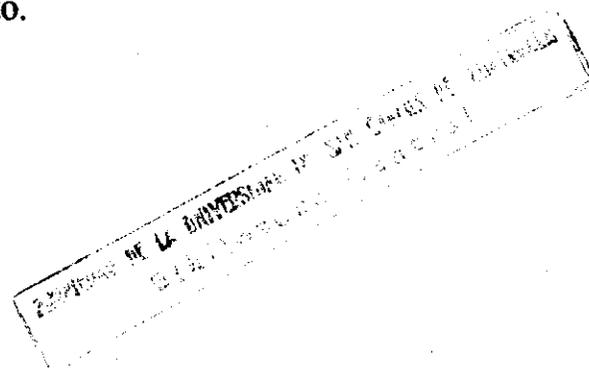


Tabla No. 5

**PORCENTAJE DE CONVERSIÓN, EN LA REDUCCIÓN DE BROMO A BROMURO EN EL SISTEMA QUÍMICO REDOX (ÁCIDO OXÁLICO-BROMO).**

Concentración de ácido oxálico inicial [mol/l]	Distancia recorrida en el reactor tubular (cm.)	R1 %	R2 %	R3 %	Rpromedio %
0.015	51.3	2	2	2	2
0.015	102.6	2.33	2	2.33	2.22
0.015	153.9	2.33	2	2.33	2.22
0.015	205.2	2.33	2.33	2.33	2.33
0.015	256.5	2.33	2.33	2.33	2.33
0.03	51.3	0	0	0	0
0.03	102.6	0	0	0	0
0.03	153.9	0	0	0	0
0.03	205.2	0.34	0	0	0.11
0.03	256.5	0.34	0	0	0.11
0.06	51.3	1.67	1.67	1.67	1.67
0.06	102.6	2	2	2	2
0.06	153.9	2.33	2.33	2	2.22
0.06	205.2	2.33	2.33	2.33	2.33
0.06	256.5	2.33	2.33	2.33	2.33

\* Porcentaje de conversión, en la reducción de bromo a bromuro en el sistema químico redox (ácido oxálico-bromo), a diferente concentración de ácido oxálico inicial y, longitud recorrida en el reactor tubular isotérmico. Para una concentración de bromo inicial = 0.015 M.

Tabla No. 6

**PORCENTAJE DE CONVERSIÓN, EN LA REDUCCIÓN DE BROMO A BROMURO EN EL SISTEMA QUÍMICO REDOX (ÁCIDO OXÁLICO-BROMO).**

Concentración de ácido oxálico inicial [mol/l]	Distancia recorrida en el reactor tubular (cm.)	R1 %	R2 %	R3 %	Rpromedio %
0.015	51.3	1.52	1.52	2.42	1.82
0.015	102.6	1.52	1.52	3.33	2.12
0.015	153.9	3.33	3.33	3.94	3.53
0.015	205.2	3.94	4.85	4.85	4.55
0.015	256.5	3.94	4.85	4.85	4.55
0.03	51.3	0	0	0	0
0.03	102.6	0	0	0	0
0.03	153.9	0	0	0	0
0.03	205.2	0.33	0	0	0.11
0.03	256.5	0.33	0.33	0	0.22
0.06	51.3	0.31	1.88	0.31	0.83
0.06	102.6	0.31	2.81	0.94	1.35
0.06	153.9	0.94	2.81	0.94	1.56
0.06	205.2	1.88	3.44	1.88	2.4
0.06	256.5	2.81	4.06	2.81	3.23

\* Porcentaje de conversión, en la reducción de bromo a bromuro en el sistema químico redox (ácido oxálico-bromo), a diferente concentración de ácido oxálico inicial y, longitud recorrida en el reactor tubular isotérmico. Para una concentración de bromo inicial = 0.03 M.

**Tabla No. 7**  
**PORCENTAJE DE CONVERSIÓN, EN LA REDUCCIÓN DE BROMO A BROMURO EN EL SISTEMA QUÍMICO REDOX (ÁCIDO OXÁLICO-BROMO).**

Concentración de ácido oxálico inicial [mol/l]	Distancia recorrida en el reactor tubular (cm.)	R1 %	R2 %	R3 %	Rpromedio %
0.015	51.3	6.21	0	0	2.07
0.015	102.6	6.21	0	0	2.07
0.015	153.9	6.21	0	0	2.07
0.015	205.2	6.21	6.21	0	4.14
0.015	256.5	19.14	6.21	6.21	10.52
0.03	51.3	3.51	3.51	3.51	3.51
0.03	102.6	11.76	3.51	11.76	9.01
0.03	153.9	11.76	11.76	11.76	11.76
0.03	205.2	11.76	11.76	18.65	14.06
0.03	256.5	18.65	18.65	18.65	18.65
0.06	51.3	5.94	5.94	5.94	5.94
0.06	102.6	5.94	12.66	18.44	12.35
0.06	153.9	12.66	18.44	18.44	16.51
0.06	205.2	23.44	18.44	18.44	20.11
0.06	256.5	23.44	23.44	23.44	23.44

\* Porcentaje de conversión, en la reducción de bromo a bromuro en el sistema químico redox (ácido oxálico-bromo), a diferente concentración de ácido oxálico inicial y, longitud recorrida en el reactor tubular isotérmico. Para una concentración de bromo inicial = 0.06 M.

Tabla No. 8

**TIEMPOS DE RESIDENCIA MEDIDOS A LO LARGO DEL REACTOR  
TUBULAR ISOTÉRMICO**

<b>Longitud</b> (cm.)	<b>Tiempo de Residencia</b> (seg.)
51.3	1.16
102.6	2.33
153.9	3.49
205.2	4.66
256.5	5.82

\* Tiempos de residencia medidos en el reactor tubular isotérmico, a diferentes distancias recorridas, con el sistema químico redox (ácido oxálico-bromo).

Área media =  $0.785 \text{ cm}^2$ , Flujo volumétrico =  $0.0346 \text{ L/s}$ .

**TABLA No. 9**  
ANÁLISIS DE VARIANZA

VARIABLE DEPENDIENTE: PORCENTAJE DE CONVERSIÓN.

F.V.	G.L.	S.C.	M.C.	Valor F	Pr > F
Modelo	44	4451.7658	101.1765	35.40	0.0001
Error	90	257.2229	2.8580		
Total	134	4708.9887			

Coefficiente de variabilidad = 37.1548

\* Resultados del análisis de varianza sobre el modelo escogido, correspondientes a la variable dependiente: porcentaje de conversión.

**TABLA No. 10**  
ANÁLISIS DE VARIANZA DE FISCHER.

F.V.	G.L.	Anova SS	M.C.	Valor F	Pr > F
BR	2	2339.6441	1169.8221	409.31	0.0001
OX	2	249.8074	124.9037	43.70	0.0001
BR-OX	4	634.9577	158.7394	55.54	0.0001
LO	4	476.4897	119.1224	41.68	0.0001
BR-LO	8	587.5080	73.4385	25.70	0.0001
OX-LO	8	45.5017	5.6877	1.99	0.0565
BR-OX-LO	16	117.8571	7.3661	2.58	0.0025

\* Evaluación de los factores de variación sobre el porcentaje de conversión (porcentaje de reducción de bromo a bromuro en la reacción).

**TABLA No. 11**  
PRUEBA DE INTERVALOS MÚLTIPLES DE DUNCAN.  
VARIABLE DEPENDIENTE: PORCENTAJE DE CONVERSIÓN.

Agrupamiento Duncan	Media	No.	BR
A	10.435	45	0.06
B	1.752	45	0.03
B	1.463	45	0.015

\* Medias con la letra igual no tienen diferencia significativa.

TABLA No. 12

PRUEBA DE INTERVALOS MÚLTIPLES DE DUNCAN.

VARIABLE DEPENDIENTE: PORCENTAJE DE CONVERSIÓN.

Agrupamiento Duncan	Media	No.	OX
A	6.471	45	0.06
B	3.685	45	0.03
B	3.494	45	0.015

\* Medias con letra igual no tienen diferencia significativa.

TABLA No. 13

PRUEBA DE INTERVALOS MÚLTIPLES DE DUNCAN.

VARIABLE DEPENDIENTE: PORCENTAJE DE CONVERSIÓN.

Agrupamiento Duncan	Media	No.	LO
A	7.440	27	256.5
B	5.632	27	205.2
C	4.448	27	153.9
D	3.174	27	102.6
E	2.056	27	51.3

\* Medias con letra igual no tienen diferencia significativa.

TABLA No. 14  
ANÁLISIS DE VARIANZA.

VARIABLE DEPENDIENTE: PORCENTAJE DE CONVERSIÓN.

BR	OX	LO	No.	Media	DS
0.03	0.03	51.3	3	0.0000	0.0000
0.03	0.03	102.6	3	0.0000	0.0000
0.03	0.03	153.9	3	0.0000	0.0000
0.03	0.03	205.2	3	0.1467	0.1680
0.03	0.03	256.5	3	0.2933	0.0634
0.03	0.06	51.3	3	1.0067	0.7998
0.03	0.06	102.6	3	1.4900	1.2559
0.03	0.06	153.9	3	1.7700	0.9525
0.03	0.06	205.2	3	2.5733	0.7943
0.03	0.06	256.5	3	3.3667	0.6361
0.03	0.015	51.3	3	1.6200	0.1732
0.03	0.015	102.6	3	1.7200	0.3464
0.03	0.015	153.9	3	3.3967	0.1155
0.03	0.015	205.2	3	4.4467	0.4637
0.03	0.015	256.5	3	4.4467	0.4637
0.06	0.03	51.3	3	3.5100	0.0000
0.06	0.03	102.6	3	8.0933	4.2007
0.06	0.03	153.9	3	11.7600	0.0000
0.06	0.03	205.2	3	12.5267	1.3279
0.06	0.03	256.5	3	18.6500	0.0000
0.06	0.06	51.3	3	5.9400	0.0000
0.06	0.06	102.6	3	10.3167	3.7935
0.06	0.06	153.9	3	15.8700	2.9427
0.06	0.06	205.2	3	20.6633	2.5455
0.06	0.06	256.5	3	23.4400	0.0000
0.06	0.015	51.3	3	2.7600	3.1620

\* Resultados del análisis de varianza, correspondientes a la variable dependiente: porcentaje de conversión.

TABLA No. 14 (continuación)

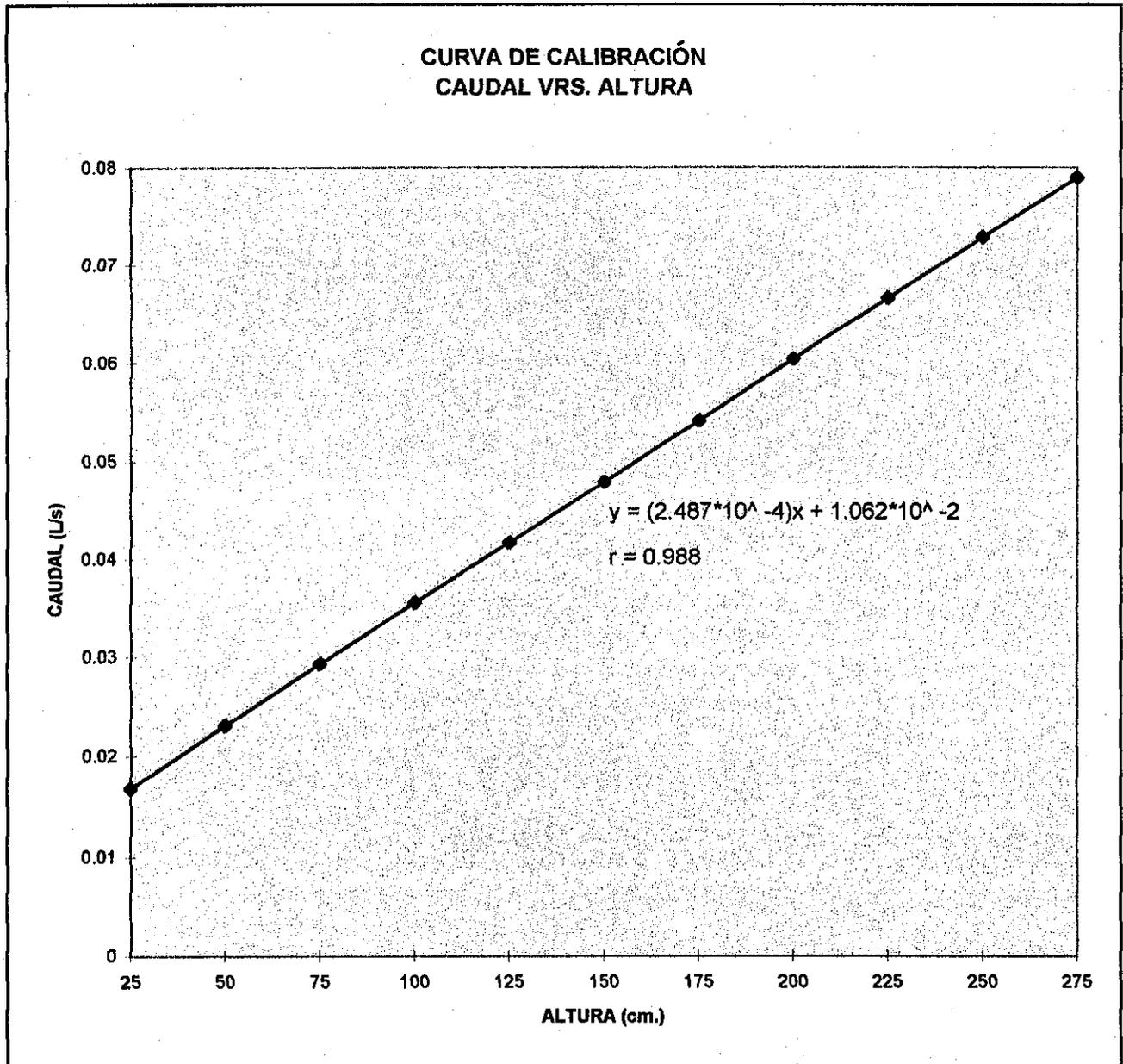
## ANÁLISIS DE VARIANZA.

## VARIABLE DEPENDIENTE: PORCENTAJE DE CONVERSIÓN.

BR	OX	LO	No.	Media	DS
0.06	0.015	102.6	3	2.7600	3.1620
0.06	0.015	153.9	3	2.7600	3.1620
0.06	0.015	205.2	3	5.5200	1.1951
0.06	0.015	256.5	3	11.9567	6.5836
0.015	0.03	51.3	3	0.0000	0.0000
0.015	0.03	102.6	3	0.0000	0.0000
0.015	0.03	153.9	3	0.0000	0.0000
0.015	0.03	205.2	3	0.1500	0.1735
0.015	0.03	256.5	3	0.1500	0.1735
0.015	0.06	51.3	3	1.6700	0.0000
0.015	0.06	102.6	3	2.0000	0.0000
0.015	0.06	153.9	3	2.2933	0.0635
0.015	0.06	205.2	3	2.3300	0.0000
0.015	0.06	256.5	3	2.3300	0.0000
0.015	0.015	51.3	3	2.0000	0.0000
0.015	0.015	102.6	3	2.1833	0.1680
0.015	0.015	153.9	3	2.1833	0.1680
0.015	0.015	205.2	3	2.3300	0.0000
0.015	0.015	256.5	3	2.3300	0.0000

\* Resultados del análisis de varianza, correspondientes a la variable dependiente: porcentaje de conversión.

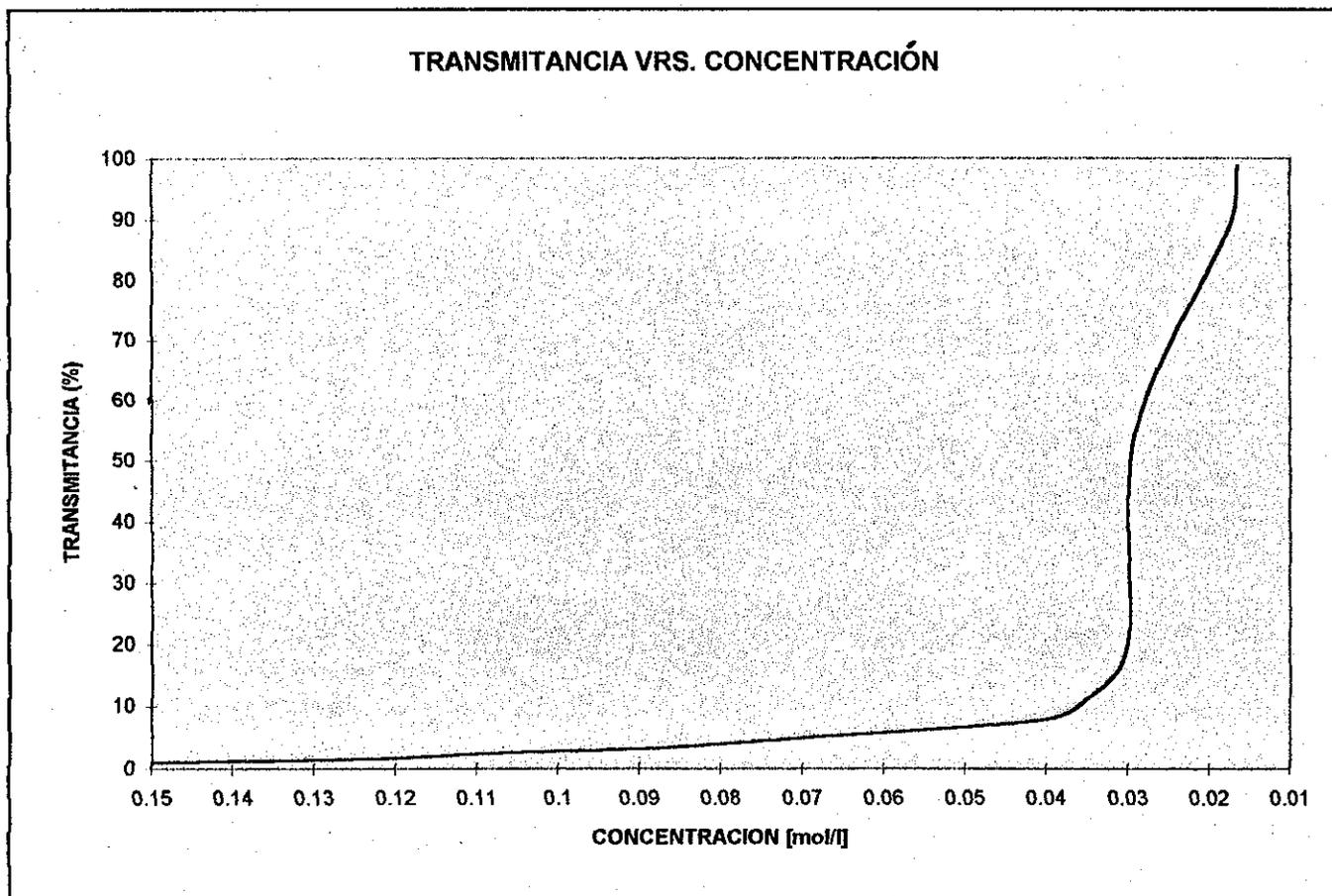
## GRÁFICA No. 1



\* Caudales formados por el flujo de reactivos y productos, a lo largo del reactor tubular isotérmico. Corresponden a diferentes alturas de los tanques contenedores de reactivos (ácido oxálico y bromo).

Los reactivos se mezclan en el punto de referencia (altura = 0).

XXX.  
**GRÁFICA No. 2**  
**CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL Br<sub>2</sub>**  
**ESPECTROFOTÓMETRO SPECTRONIC 20 , BAUSCH AND LOMB**



LONGITUD DE ONDA = 480 nm.

**CORRELACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN:**

Rango de transmitancia (1-3.47%)

$$y = (20.48)(1.77 \cdot 10^{-9})^x \quad r = -0.996$$

Rango de transmitancia (3.47-11.22%),

$$y = (0.203)x^{-1.174} \quad r = -0.985$$

Rango de transmitancia (11.22-19.95%)

$$y = (630.44)(1.023 \cdot 10^{-50})^x \quad r = -0.999$$

Rango de transmitancia (19.95-54.95%)

$$y = -35000x + 1069.95 \quad r = -0.999$$

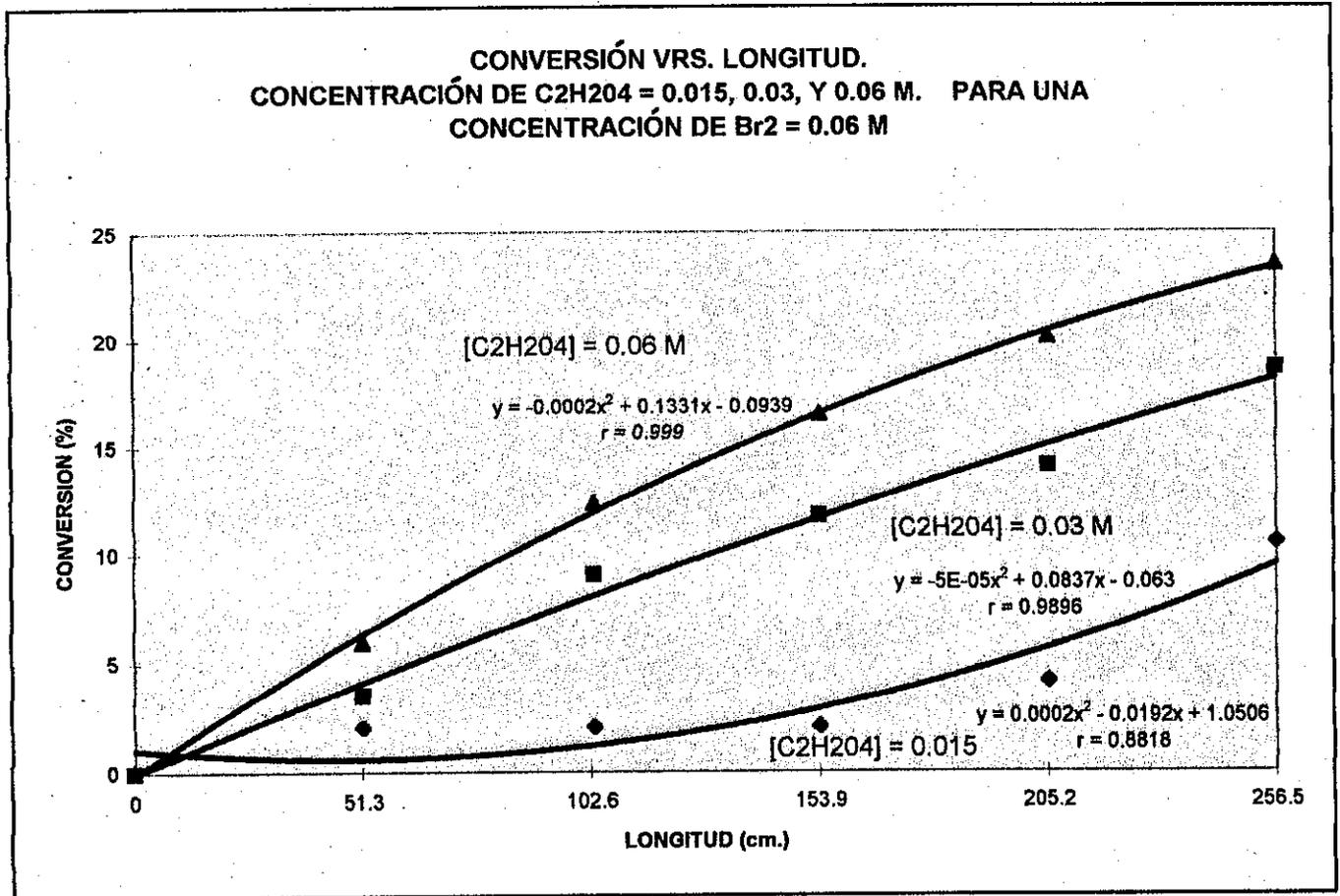
Rango de transmitancia (54.95-89.13%)

$$y = -2946.55x + 140.4 \quad r = -0.999$$

Rango de transmitancia (89.13-98.86%)

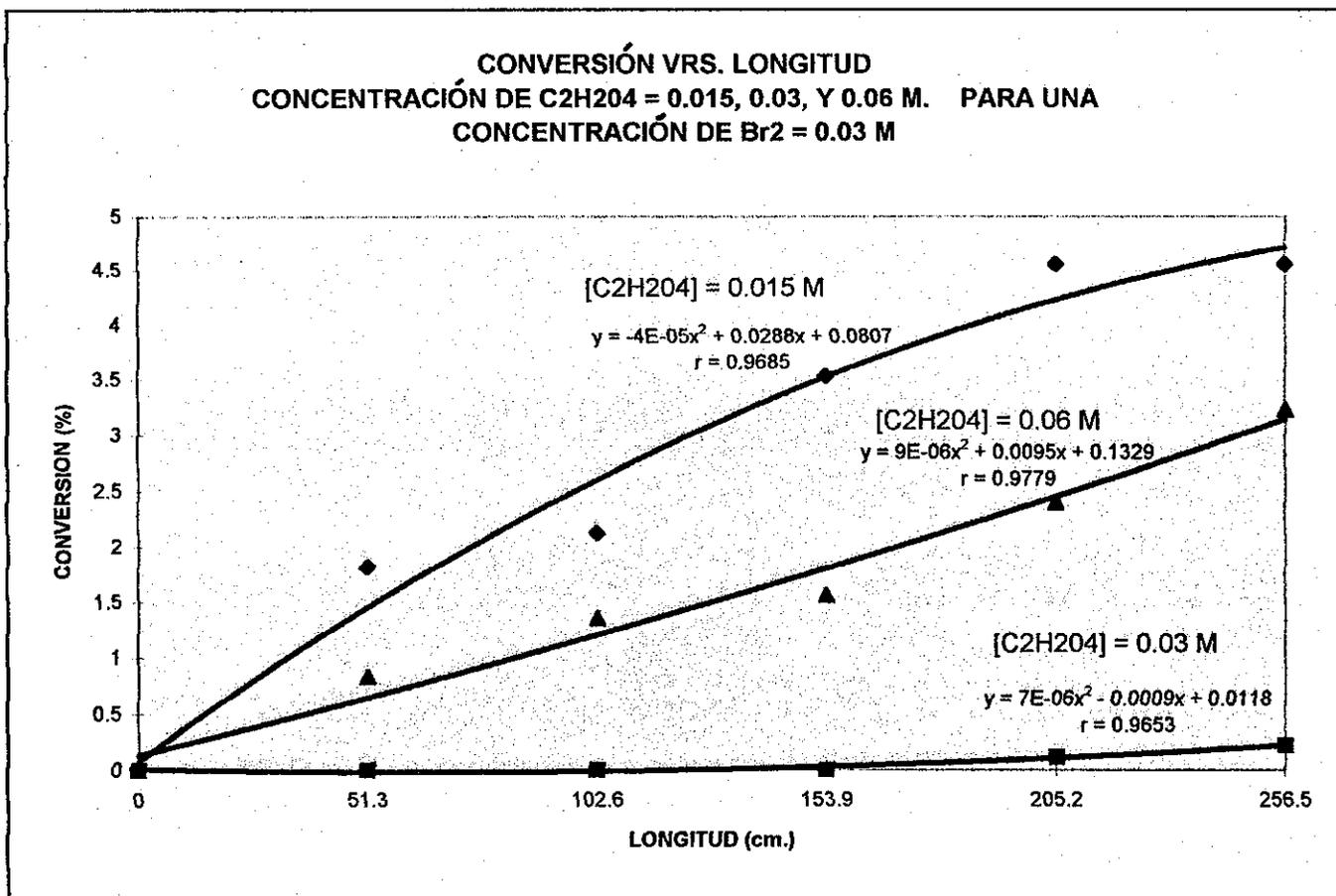
$$y = 325212.28x^2 - 1.04x - 0.009 \quad r = 0.999$$

## GRÁFICA No. 3



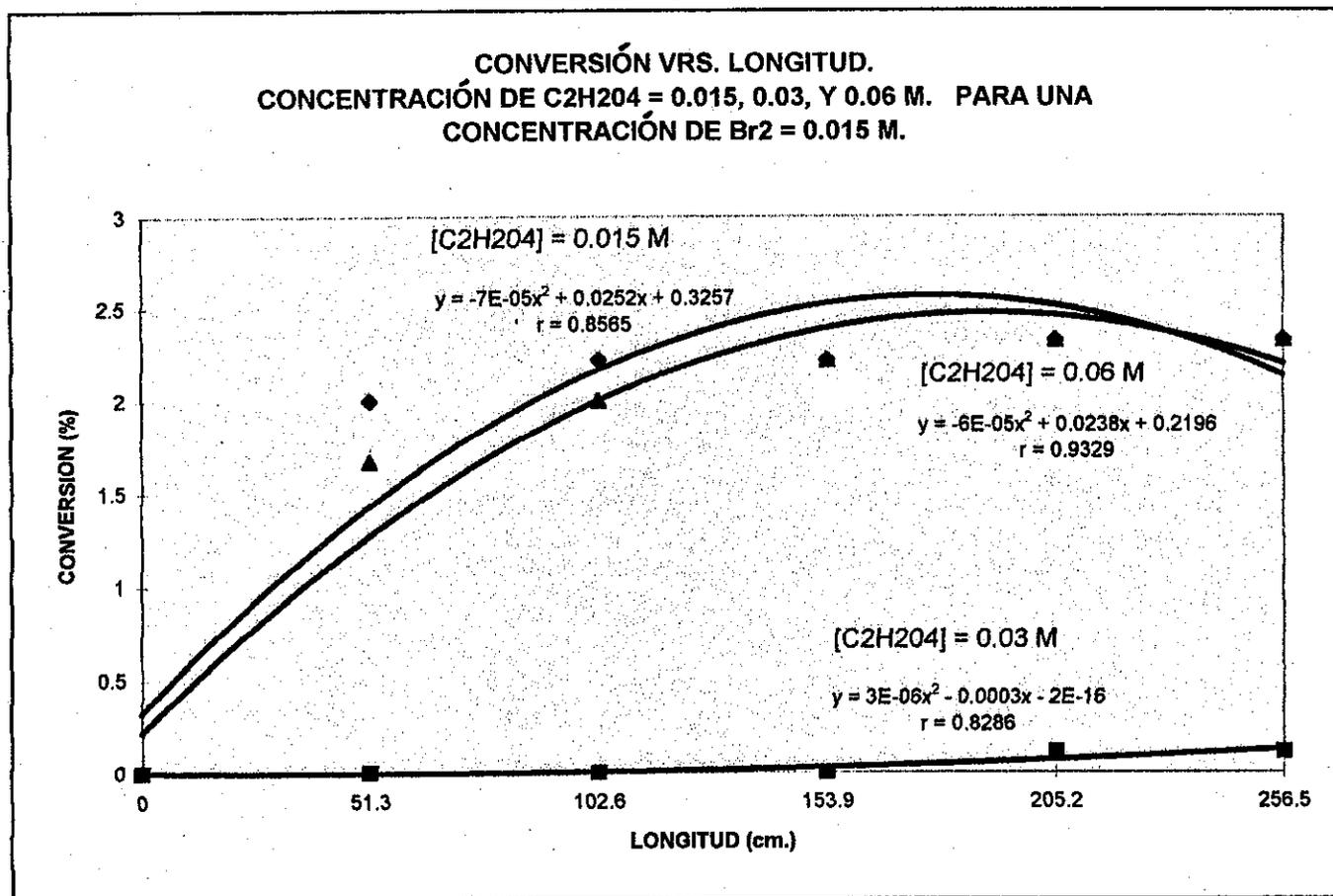
\* Conversión en función de la distancia recorrida a lo largo del reactor tubular isotérmico, para una concentración de bromo inicial nominal 0.06 M, y concentración de ácido oxálico inicial 0.015, 0.03, y 0.06 M.

## GRÁFICA No. 4



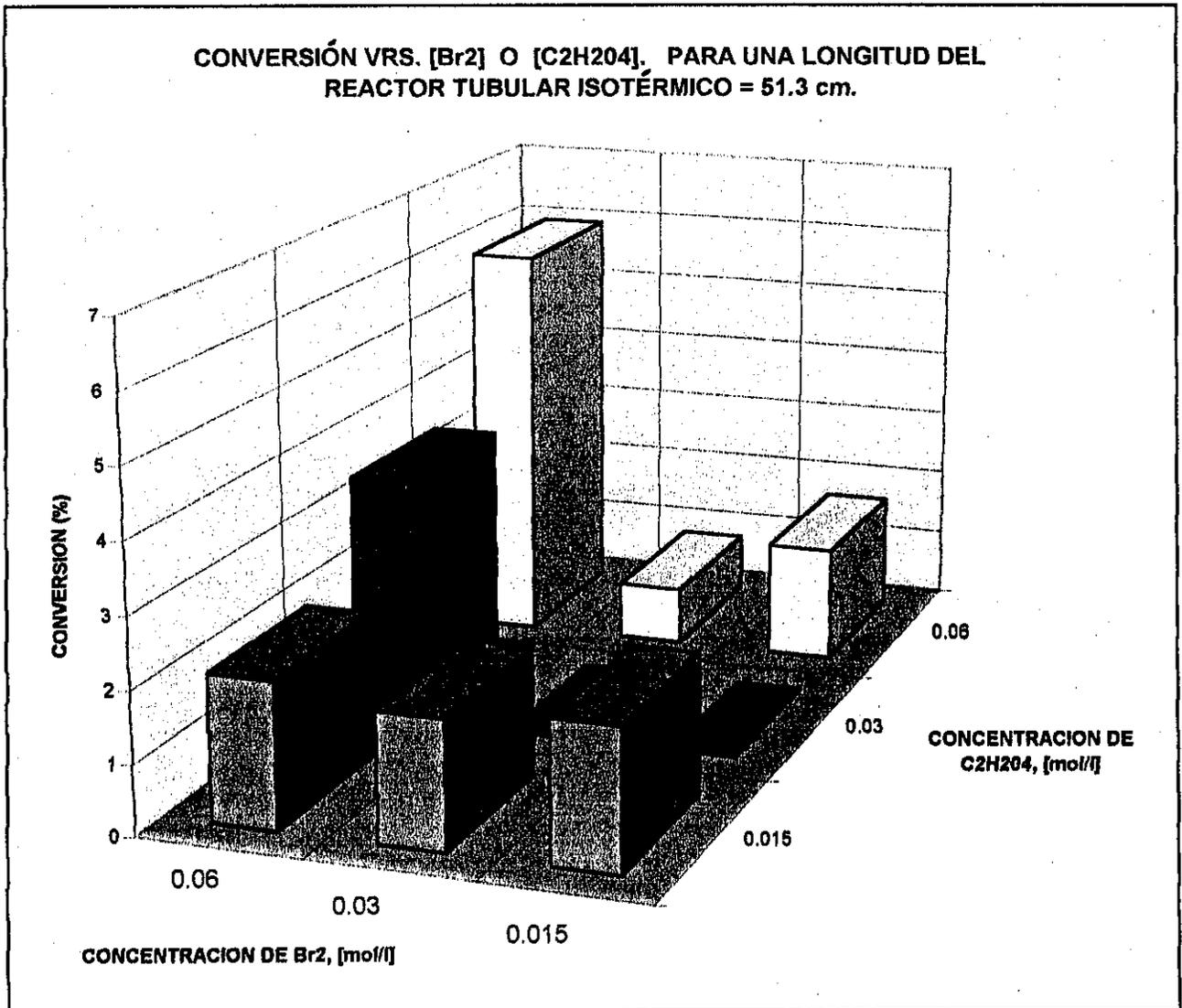
\* Conversión en función de la distancia recorrida a lo largo del reactor tubular isotérmico, para una concentración de bromo inicial nominal 0.03 M, y concentración de ácido oxálico inicial 0.015, 0.03, y 0.06 M.

## GRÁFICA No. 5



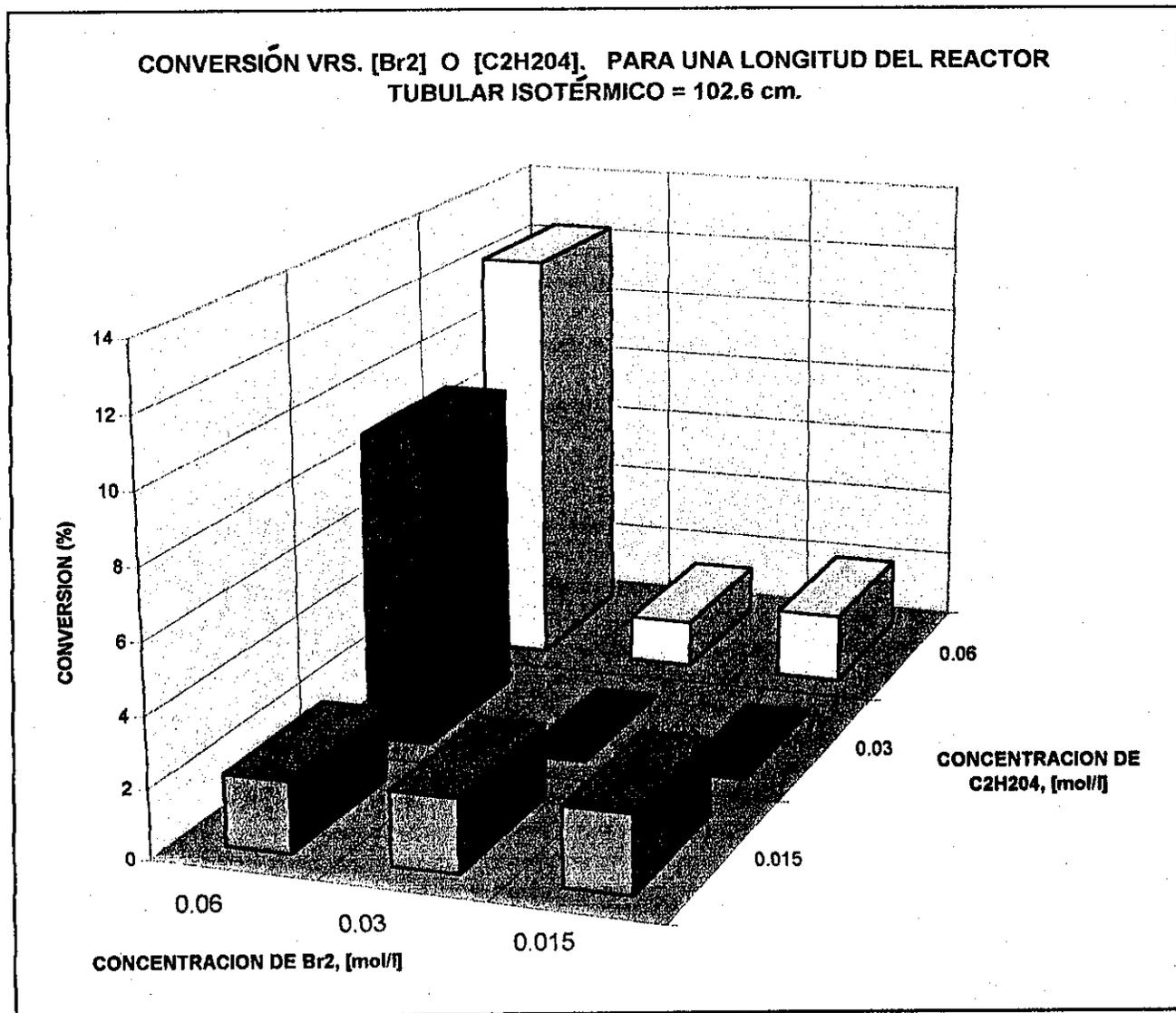
\* Conversión en función de la distancia recorrida a lo largo del reactor tubular isotérmico, para una concentración de bromo inicial nominal 0.015 M, y concentración de ácido oxálico inicial 0.015, 0.03, y 0.06 M.

## GRÁFICA No. 6



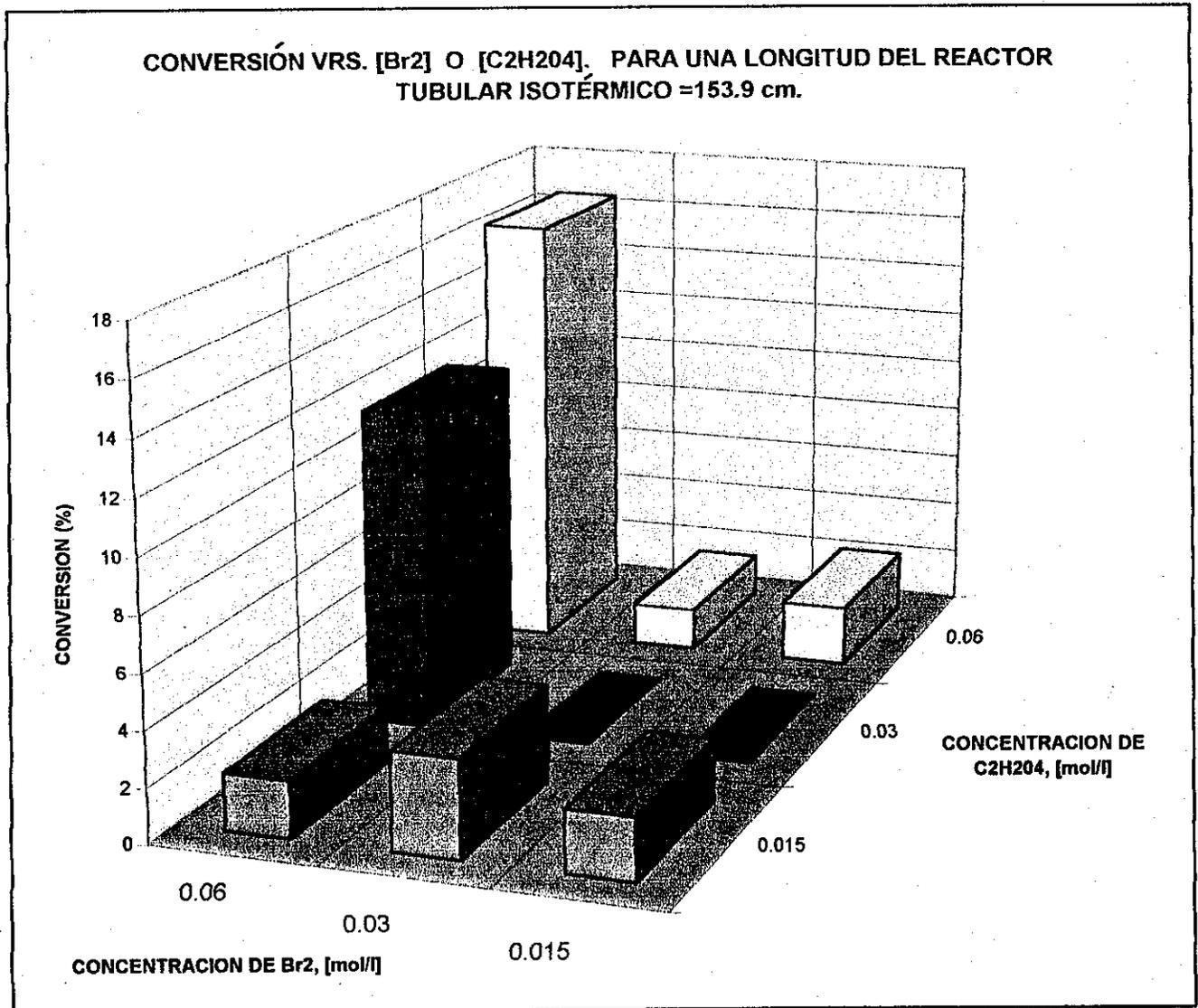
\* Conversión en función de la concentración de bromo inicial nominal, o de la concentración inicial de ácido oxálico inicial, correspondiente a una distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico de 51.3 cm.

## GRÁFICA No. 7



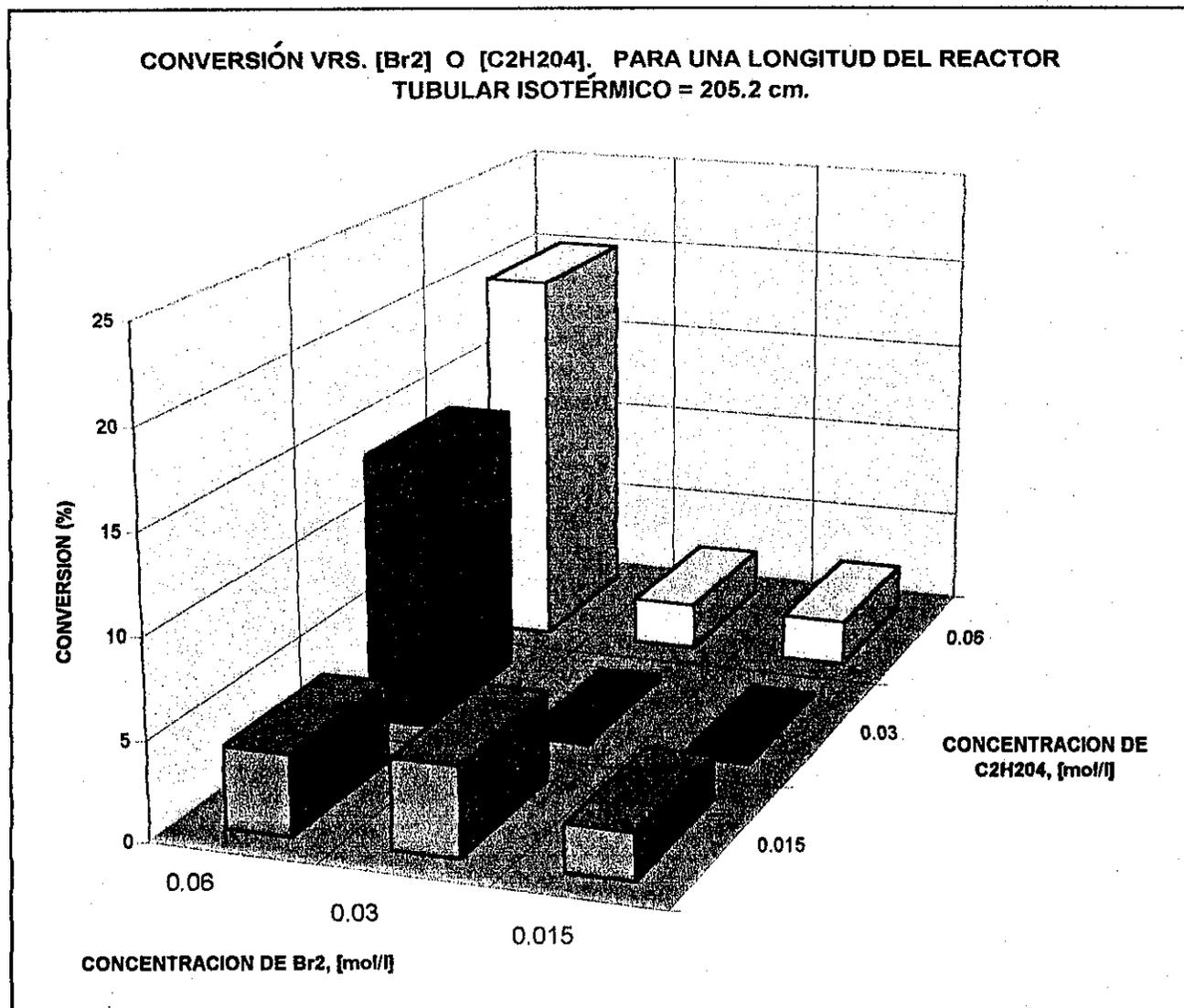
\* Conversión en función de la concentración de bromo inicial nominal, o de la concentración inicial de ácido oxálico inicial, correspondiente a una distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico de 102.6 cm.

## GRÁFICA No. 8



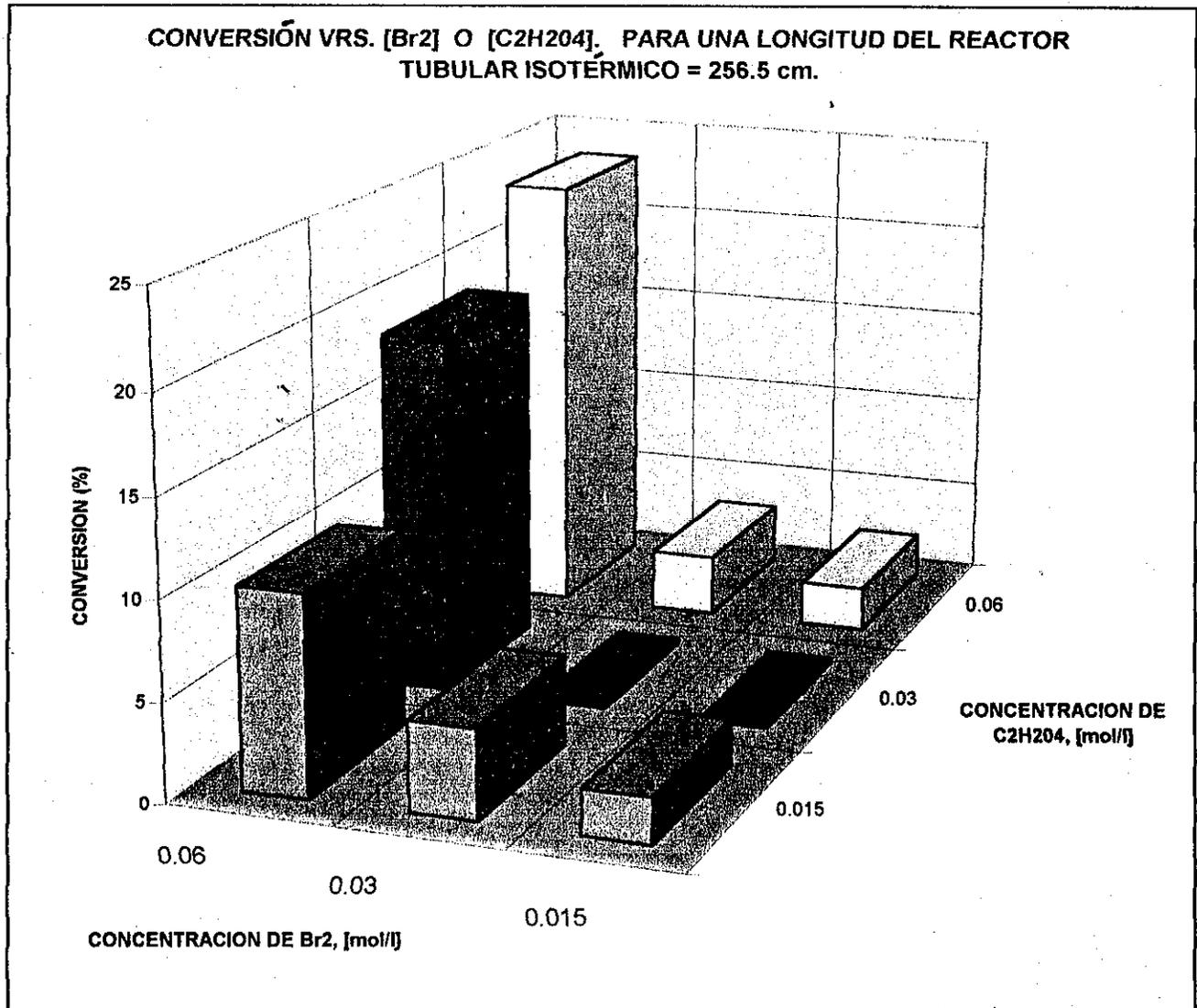
\* Conversión en función de la concentración de bromo inicial nominal, o de la concentración inicial de ácido oxálico inicial, correspondiente a una distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico de 153.9 cm.

## GRÁFICA No. 9



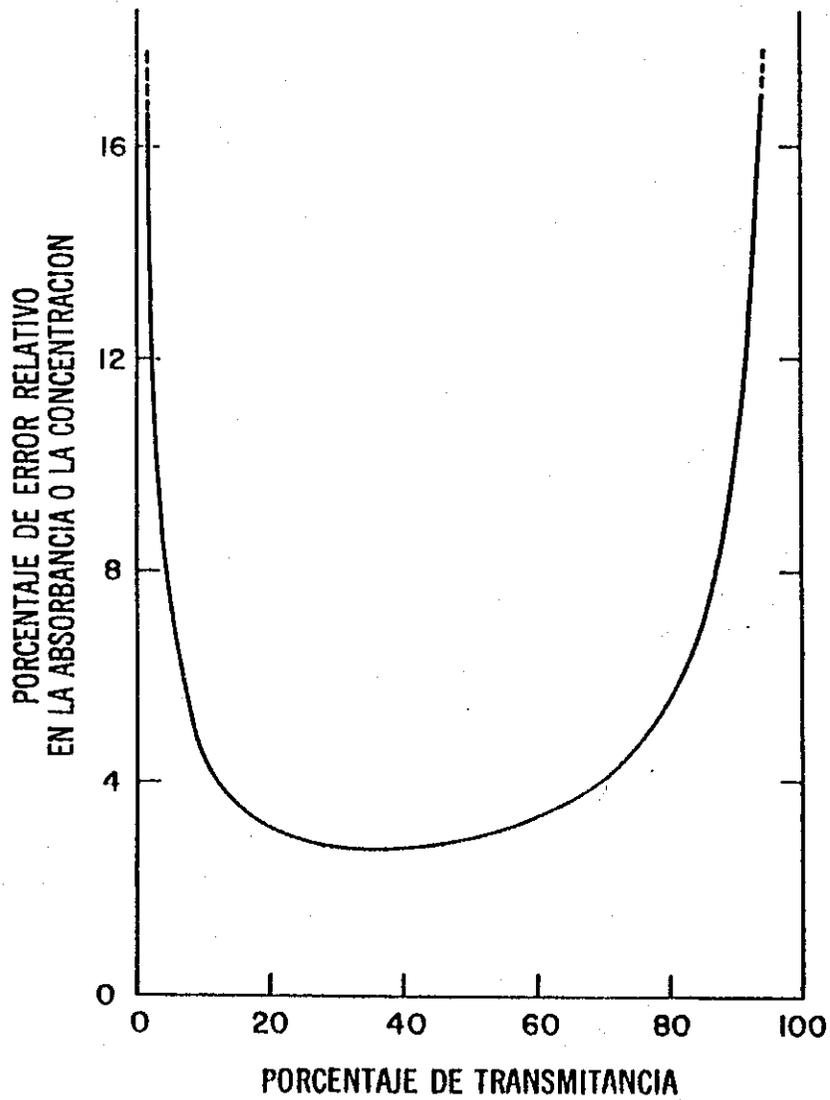
\* Conversión en función de la concentración de bromo inicial nominal, o de la concentración inicial de ácido oxálico inicial, correspondiente a una distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico de 205.2 cm.

## GRÁFICA No. 10



\* Conversión en función de la concentración de bromo inicial nominal, o de la concentración inicial de ácido oxálico inicial, correspondiente a una distancia recorrida en el reactor tubular isotérmico de 256.5 cm.

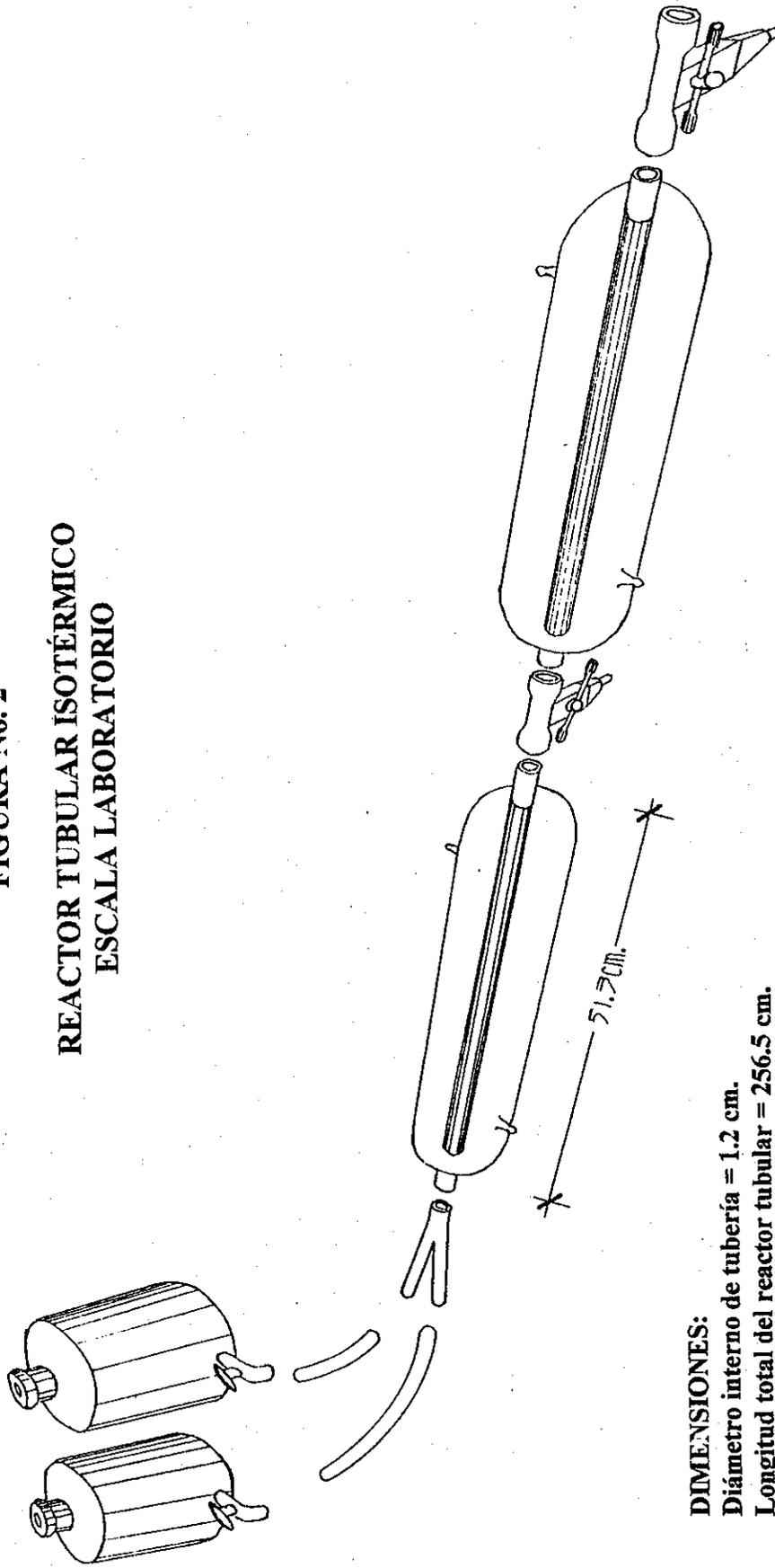
xl.  
FIGURA No. 1



Porcentaje de error relativo en la absorbancia o en la concentración calculada de la especie absorbente, en función del porcentaje de transmitancia (ref.8, página 423).

FIGURA No. 2

REACTOR TUBULAR ISOTÉRMICO  
ESCALA LABORATORIO



**DIMENSIONES:**

Diámetro interno de tubería = 1.2 cm.

Longitud total del reactor tubular = 256.5 cm.

**NOTA:**

El reactor tubular, esta compuesto de cinco condensadores tipo Liebig, Cas.-Núm. 271-286. y cinco válvulas muestreadoras de teflon.