

## Catalizadores de alúmina y estudio cinético de la deshidratación de etanol a etileno

Los catalizadores de alúmina conocidos por su poder catalítico en la deshidratación del etanol, se prepararon por el método de precipitación determinando experimentalmente la optimización de los parámetros de preparación. Se describe el proceso de selección utilizando un reactor diferencial, siguiendo la técnica del diseño factorial de experimentos para escoger el que dé mayor conversión y selectividad, y luego emplearlo en la determinación del comportamiento cinético de la reacción, para así establecer una expresión de la velocidad de reacción en función de la presión parcial de los reactantes y productos. Los productos se analizaron por la técnica de la Cromatografía de Gases, ésta parte corresponde a la evaluación. El estudio cinético se hizo a una temperatura de 325, 350 y 370°C; los resultados indican que la expresión de la velocidad de reacción puede emplearse para diseñar un reactor catalítico a nivel de planta piloto.

**ORLANDO FRANCO HERNANDEZ**  
Ingeniero Químico  
**HELBERTH ESPITIA RIVERA**  
Ingeniero Químico  
**GUILLERMO FORERO TORRES**  
Ingeniero Químico  
**LUIS CARBALLO S.**  
Ingeniero Químico Ph. D., M.Sc.  
**FRANCISCO SANCHEZ**  
Ingeniero Químico

Este trabajo forma parte del programa de investigación Alcohol-Química que en una de sus líneas trata del desarrollo de catalizadores, aprobado por un convenio entre Colciencias y la Universidad. Desde años atrás se ha venido dejando una recopilación sobre la teoría de la Catálisis Heterogénea debido al poco conocimiento que hay sobre este tema y a que la información está muy dispersa en nuestro medio. Particularmente en el presente estudio realizado como un Proyecto de Grado titulado "Evaluación, Selección de un Catalizador de Alúmina y Estudio Cinético de la Deshidratación Catalítica de Etanol a Etileno", por parte de los señores Orlando Franco H., Helberth Espitia R., y Guillermo Forero T. para obtener el título de Ingenieros Químicos, donde actuaron como directores los Ingenieros Luis Carballo S. y Francisco Sánchez; se dejan las bases de la teoría cinética con catalizadores sólidos en reacciones gaseosas.

El proyecto fue teórico-experimental y sus objetivos fueron:

- Preparar y comprobar el grado de reproducibilidad de los catalizadores de alúmina por el método de precipitación, determinando experimentalmente la optimización de los parámetros de preparación del catalizador, como son área superficial activa, tamaño de partícula, distribución del tamaño del poro y su actividad catalítica.
- Seleccionar, con base en los análisis de los productos de la reacción el catalizador que dé una mayor respuesta de conversión y selectividad. Debido a la complejidad de esta reacción heterogénea es preciso hacer varias corridas experimentales para tener así una mayor confiabilidad en la toma de los datos.
- Caracterizar los mejores catalizadores para tener un conocimiento profundo de la manera como se lleva a cabo el proceso catalítico y comprender los fenómenos de superficie que puedan ocurrir.
- Una vez seleccionado y caracterizado el catalizador se toman los datos cinéticos para obtener una expresión de la velocidad de reacción que explique satisfactoriamente el comportamiento cinético de dicha reacción.

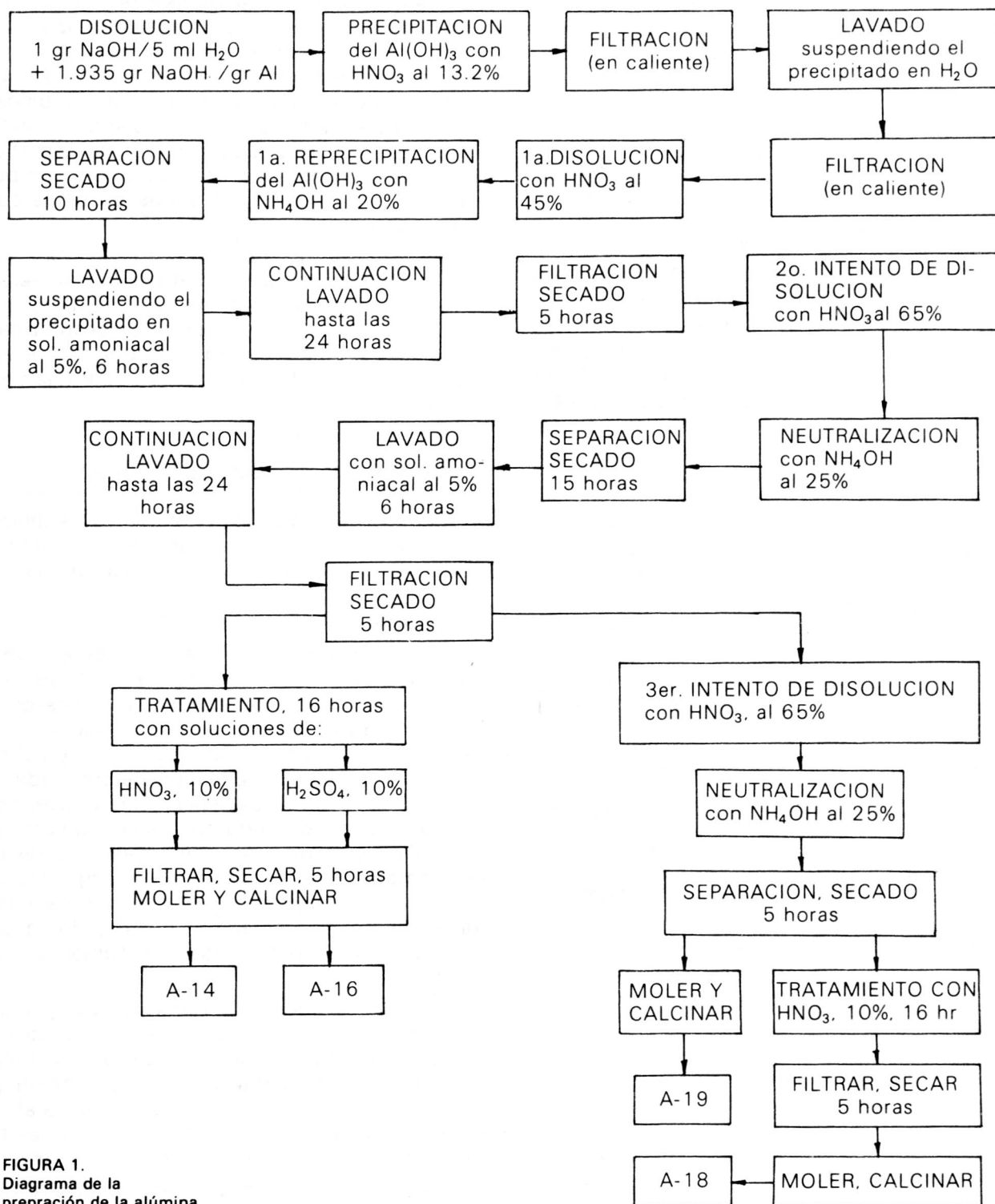


FIGURA 1.  
Diagrama de la  
preparación de la alúmina.

Como objetivos secundarios enmarcados dentro del programa general se tienen los siguientes:

- Determinar una correlación entre la temperatura de reacción, la velocidad de ésta y los valores hallados para las constantes de adsorción.
- Comparar los catalizadores preparados con uno comercial.
- Dejar las bases de la teoría cinética en reacciones catalíticas heterogéneas.
- Con la presente investigación también se pretende sentar las bases para que en un futuro se desarrolle la industria del etileno a partir de

materias primas renovables independientes del petróleo, muy rentable por los derivados que de él se pueden sacar (PVC, polietileno, acetato de vinilo, etc.) y porque el equipo requerido no es muy complicado.

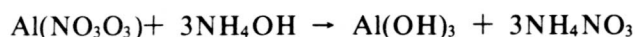
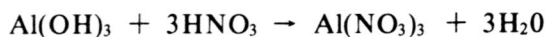
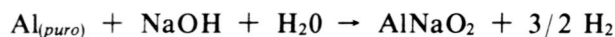
### PREPARACION DE LOS CATALIZADORES

Se prepararon los catalizadores por la vía aluminato teniendo en cuenta la concentración de los reactantes, tiempo y temperatura de precipitación, de secado y de calcinación; parámetros estos que inciden en el poder catalítico de la alúmina. Se usaron reactivos analíticos y las precipitaciones se

efectuaron con reactivos a bajas concentraciones y en caliente (80°C), siendo la temperatura óptima de secado de 110°C. En el diagrama de la figura 1 se muestra la secuencia de la preparación del catalizador<sup>1</sup>. Con el aluminio puro en polvo y el NaOH se prepara el aluminato de sodio que se precipita con HNO<sub>3</sub> al 13.2% en peso. Una vez realizada la precipitación se calienta la solución y se procede a la separación del precipitado por centrifugación. Separado el Al(OH)<sub>3</sub> se moldea en pastillas y se seca durante 5 horas a 110°C. El primer intento de disolución con HNO<sub>3</sub> al 45% se hace en proporciones estequiométricas, agregando en seguida 3/4 litro de H<sub>2</sub>O por litro de HNO<sub>3</sub>. Se hizo la primera reprecipitación con amoníaco en caliente. En total se hicieron tres disoluciones y tres reprecipitaciones. Después de cada precipitación se calentaba para eliminar el exceso de amoníaco, además de agregar un litro de agua desmineralizada para eliminar el espesamiento del precipitado. Todas las precipitaciones tuvieron largos períodos de precipitación, de 24 a 48 horas de reposo. La temperatura de calcinación fue de 400°C durante un tiempo de 5 a 6 horas.

De esta forma se prepararon cuatro catalizadores de alúmina denominados A-14, A-16, A-18 y A-19 tamizados en la malla 32-48 Tyler.

Las reacciones que se suceden en la preparación del catalizador son:



## CARACTERIZACION Y EVALUACION

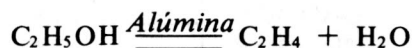
En las reacciones catalíticas heterogéneas se debe tener un amplio conocimiento de la naturaleza del catalizador. De tal manera se deben conocer ciertos aspectos fisicoquímicos del catalizador que afectan su comportamiento. El catalizador favorece la formación de un determinado producto, lo que implica que en la reacción química se arreglen las estructuras electrónicas de las moléculas reaccionantes con el catalizador.

Las características químicas del catalizador corresponden a los fenómenos de la quimisorción, que es un arreglo de electrones entre la molécula reactante y la superficie del sólido o un intercambio de electrones entre el catalizador y la molécula adsorbida. Para cuantificar este fenómeno existen las medidas de adsorción, las isotermas de adsorción, los calores de adsorción y el área superficial activa, además de la acidez superficial muy relacionada con la actividad catalítica que determina el poder adsorbente de los centros ácidos y su distribución o densidad superficial. Las características físicas del catalizador son: la adsorción física asociada con las fuerzas de Van

der Waals, que son fuerzas físicas electrostáticas más débiles que los enlaces de la quimisorción; la densidad de empaque que es el peso por unidad del volumen del lecho catalítico y la densidad del sólido, necesarios para determinar la caída de presión a través del lecho; el área superficial total, el tamaño del poro y la distribución del tamaño del poro, importantes en la predicción del comportamiento del catalizador. Algunas de estas características se reportan en (1) y (7).

La evaluación de los catalizadores dan como variables de respuesta la conversión y la selectividad, indispensables para la selección del mejor catalizador. Se realiza la reacción de deshidratación de etanol a etileno en un reactor tubular diferencial (10). En la figura 2 se muestra el diagrama de este equipo.

La reacción efectuada es:



En todos los ensayos experimentales se utilizó un gramo de catalizador de alúmina, analizando los productos de la reacción por cromatografía.

## SELECCION

El equipo usado (10) para la selección del catalizador se muestra en la figura 2. Consiste de un reactor diferencial, de donde se descargan los productos a una unidad de condensación; inicialmente la mezcla de alcohol-agua se carga al balón hervidor con una composición determinada, conduciendo los vapores de esta mezcla a través de una tubería de cobre cubierta con una banda calefactora empleando nitrógeno como gas de arrastre. El lecho catalítico tiene un control de temperatura que se ajusta a la temperatura de reacción deseada; la corriente de alimentación en estado gaseoso reacciona tan pronto entra en contacto con el catalizador.

Inicialmente se efectuaron unos ensayos de calibración con el fin de buscar un amplio rango de variación de las presiones parciales de los reactantes y de los productos, como una función de la variación en la composición de la mezcla alcohol-agua, temperatura de dicha mezcla en el balón hervidor y la medida del flujo de gas de arrastre.

Se seleccionó el catalizador denominado A-19 (ver figura 1), con base en el análisis de varianza hecho al diseño factorial de experimentos, donde se consideraron como variables independientes: la técnica de preparación (cuatro catalizadores y uno comercial), temperatura de reacción (325, 350 y 370°C y la concentración de los reactantes (73 y 96° G-L). Como variable de respuesta se usó la conversión y la selectividad definidas:

$$\% \text{ Conversión a etileno} = \frac{\text{moles de etileno producido} \times 100}{\text{moles de alcohol alimentadas}} = \% X$$

$$\% \text{ Selectividad} = \frac{\text{Peso de etileno producido} \times 100}{\text{Peso de todos los productos}}$$

El resultado de la selección fijó el catalizador por emplearse en la toma de los datos cinéticos y las condiciones de operación.

### ESTUDIO CINETICO

Se han hecho numerosas investigaciones sobre la cinética de la deshidratación catalítica de etanol a etileno, pero sus autores, (2), (3), (4), (9) y (11), han reportado resultados diferentes en cuanto al mecanismo debido a la aparente complejidad de esta reacción heterogénea, por lo que se han seguido procedimientos empíricos en el diseño de los reactores.

En la determinación de la velocidad de reacción en fase gaseosa cuando ésta se efectúa en presencia de un catalizador sólido, se deben hallar además de las constantes de equilibrio, las de adsorción y desorción, de transferencia de masa y de calor como también el mecanismo por medio del cual se lleva a cabo la reacción; situación que se hace más compleja ya que en la catálisis heterogénea se presentan varios pasos y cualquiera de ellos puede controlar y gobernar la reacción global así:

1. Difusión de los reactantes desde la fase gaseosa a la superficie exterior del catalizador.
2. Difusión en los poros del catalizador.
3. Adsorción de los reactantes en la superficie catalítica (quimisorción).
4. Reacción superficial.

5. Desorción de los productos.
6. Difusión de los productos hacia el exterior de la partícula sólida.
7. Difusión de los productos desde la salida de la superficie catalítica hacia el seno de la corriente gaseosa.

Estos pasos van acompañados de absorción o desprendimiento de calor. Los pasos 1, 2, 6 y 7 se denominan físicos, el 3 y el 5 pueden ser físicos o químicos si la adsorción fue física o química; el paso 4 es netamente químico. Si la velocidad de alguno de estos pasos es apreciablemente más lenta que las otras, ésta será la velocidad global y el paso más lento se conoce como etapa controlante de la reacción.

Para obtener los datos cinéticos es deseable que los pasos físicos no sean los controlantes de la reacción, para lo cual se debe trabajar con el tamaño óptimo de partícula, evitar una gran caída de presión por medio del lecho catalítico, para lo cual se emplea un reactor diferencial.

Para que los pasos sean solo químicos se debe verificar que el calor de adsorción sea del orden de 20 Kcal/mol. De tal manera los pasos químicos son: adsorción o quimisorción, reacción superficial en el estado adsorbido y desorción de los productos.

Para establecer la relación entre concentraciones superficiales y las concentraciones en el seno del fluido y para medir el área catalítica total se utilizan

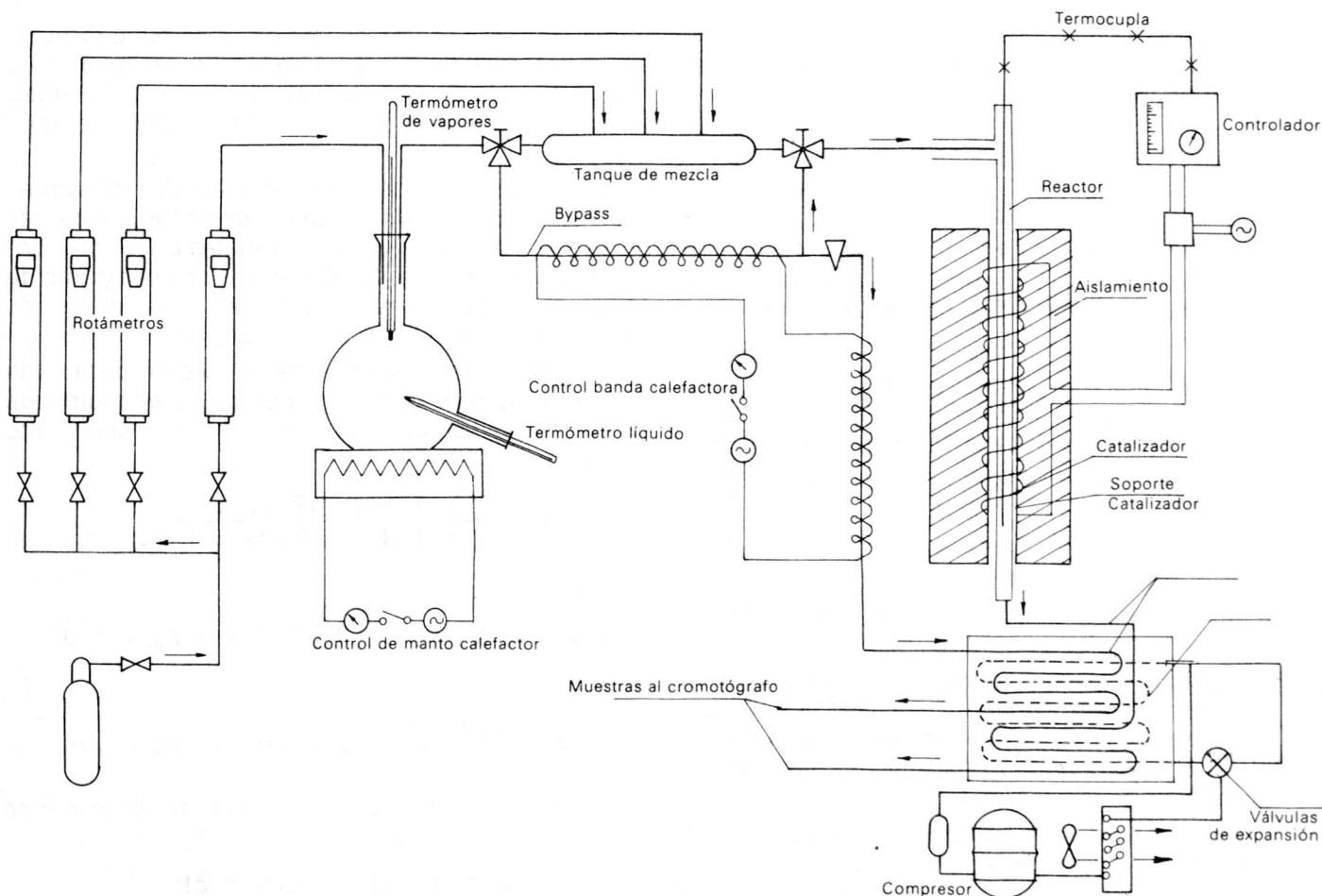


FIGURA 2. Diagrama de flujo equipo utilizado en toma de datos y evaluación catalizadores y cinética.

## NOMENCLATURA

A: Reactante, Etanol.

a, b, c, d y e : Constantes empíricas.

$C_A$ ,  $C_E$ ,  $C_R$  y  $C_W$ : Concentraciones de alcohol, éter, etileno quimisorbidos.

$C_i$ : Concentración de sitios activos.

H: Cambio de entalpía, energía de activación del complejo activado.

k: Constante de velocidad de reacción (mol convertidas/gramo catalizador-hr).

$K_A$ ,  $K_E$ ,  $K_R$ ,  $K_W$ : Constantes de adsorción en el equilibrio de etanol, éter, etileno y agua, respectivamente (atm<sup>-1</sup>).

L: Concentración total de sitios activos.

I: Un centro activo.

R: Función de velocidad.

r: Velocidad de reacción (gr-mol convertidas/gr catalizador-hr).

$P_A$ ,  $P_E$ ,  $P_R$  y  $P_W$ : Presiones parciales en el equilibrio de etanol, éter, etileno y agua, respectivamente (atm).

T: Temperatura absoluta (°K).

S: Cambio de entropía en la formación del complejo activado.

W/F: Factor de tiempo (gr catalizador/gr-mol de alimento-hr).

las teorías de Langmuir y Hinshelwood (5), (7), que además explican el mecanismo de la reacción como un posible rompimiento de las moléculas en dos radicales,  $C_2H_5+$  y  $OH-$ , para ser adsorbidos en dos sitios activos del catalizador.

Las constantes empíricas son las de adsorción y la ecuación de velocidad está en función de ellas. Estas constantes son específicas para cada componente y se hallan por métodos experimentales obteniendo datos cinéticos, además se correlacionan con la temperatura por medio de la ecuación de Arrhenius:

$$\ln K = - (\Delta H^0/R*T) + (\Delta S^0/R)$$

La ecuación cinética es el punto de partida para el diseño del reactor, por lo tanto se debe tener un conocimiento amplio del mecanismo de la reacción que satisfaga todas las condiciones de operación y que sea confiable para determinar el tamaño del reactor.

Para derivar la ecuación de velocidad se escriben todas las ecuaciones químicas para cada uno de los tres pasos, determinando cuál es el paso controlante, con lo cual se supone que todos los demás están en equilibrio.

En general los pasos por seguir en la determinación de la cinética son:

- 1- Proposición de un mecanismo, teniendo en cuenta los pasos químicos.
- 2- Deducción a partir de cada mecanismo de su correspondiente ecuación de velocidad. Para cada mecanismo propuesto se tendrán tantas ecuaciones de velocidad como etapas controlantes se puedan suponer.
- 3- Deducción de un modelo matemático lineal a partir de las diferentes ecuaciones de velocidad.
- 4- Resolución de este modelo matemático por medio de modelos de regresión.

5- Aceptación o rechazo de este modelo.

Para obtener los datos cinéticos se tienen como variables independientes el factor tiempo (W/F), la concentración de los reactantes y la temperatura de reacción y como variable dependiente la conversión, de donde la velocidad de reacción se expresa como:

$$r = dx / d(W/F)$$

En el reactor diferencial empleado se mide directamente esta velocidad, y como la conversión es muy pequeña puede ser tratada como una cantidad diferencial, además de que su medida debe ser muy exacta.

Las corridas se efectúan empleando diferentes valores de la concentración inicial de los reactantes para cambiar las presiones parciales de los componentes del alimento y a diferentes temperaturas de reacción para correlacionar las constantes de adsorción y de velocidad de reacción.

Para hallar las constantes de adsorción para cada mecanismo propuesto, se coloca la ecuación de velocidad en forma lineal, por ejemplo si esta resultó de la forma:

$$r = \frac{k (P_A - (P_R P_S / K))}{(1 + K_A P_A + K_R P_R + K_S P_S)}$$

haciendo:

$$1/k = a; K_A/k = b; K_R/k = c; y K_S/k = d$$

se tiene:

$$\frac{P_A - (P_R P_S / K)}{r} = a + b P_A + c P_R + d P_S$$

y haciendo el término de la izquierda igual a R se tiene:

$$R = a + b P_A + c P_R + d P_S$$

donde aparecen las constantes empíricas desconocidas en forma lineal y este modelo matemático se resuelve por un modelo de regresión.

La constante de equilibrio se determina por propiedades termodinámicas. Una constante de adsorción negativa no tiene ningún sentido físico, por tanto se rechazará el mecanismo que en su correspondiente modelo matemático tenga como solución constantes empíricas negativas; de la misma forma se rechaza el mecanismo que explique satisfactoriamente el comportamiento cinético a una temperatura dada pero no lo haga para otra dentro del rango para el cual es posible que se lleve a cabo dicha reacción.

### MECANISMOS DE REACCION

Los posibles mecanismos planteados para la deshidratación del etanol tienen que ver con el tipo de esquema de reacción, ya sea paralelo, en serie o simultáneo, con la naturaleza de los sitios activos responsables de la quimisorción y la reacción superficial y con la etapa controlante. (6) A continuación se muestra un posible mecanismo indicando paso a paso su desarrollo hasta encontrar una expresión de velocidad. Obviamente deben minimizarse los pasos físicos para evitar que tengan incidencia en la velocidad de la reacción. Se supone además que la reacción superficial para la formación del etileno es la etapa controlante y que los demás pasos se encuentran en equilibrio.



Siendo el paso (2) la etapa controlante, la expresión de velocidad es:

$$r = k_2 C_A - k_2' C_R P_W \quad (6)$$

Despejando  $C_A$  de (1),  $C_R$  de (3),  $C_E$  de (5)

y reemplazando en (6) da:

$$r = k_2 P_A C_I K_1 - k_2' P_R C_I P_W / K_3 \quad (7)$$

de donde  $k_2' = k_2 / K_2$ , reemplazándolo en (7)

y factorizando se tiene:

$$r = k_2 C_I K_1 (P_A - P_R P_W / K_1 K_2 K_3) \quad (8)$$

Expresando  $C_I$  en términos del número de centros activos que son la suma de los ocupados por los complejos quimisorbidos más los desocupados, se tiene:

$$L = C_I + C_A + C_R + C_E \quad (9)$$

reemplazando en (9) los valores obtenidos para  $C_A$ ,  $C_R$  y  $C_E$  se obtiene:

$$L = C_I + K_1 P_A C_I + P_R C_I / K_3 + P_E C_I / K_5 \quad (10)$$

despejando  $C_I$ , factorizando en (10) y haciendo  $K_1 = K_A$ ;  $1/K_3 = K_R$   $1/K_5 = K_E$  y reemplazando en (8) se tiene:

$$r = \frac{k_2 k_1 L (P_A - P_R P_W / K_1 K_2 K_3)}{(1 + K_A P_A + K_R P_R + K_E P_E)} \quad (11)$$

haciendo  $k_2 K_1 L = k$ ;  $K_1 k_2 K_3 = K$ , se tiene la expresión final:

$$r = \frac{k (P_A - P_R P_W / K)}{(1 + K_A P_A + K_R P_R + K_E P_E)}$$

Esta expresión puede variar de acuerdo con la etapa que se suponga como controlante, es decir, que para este mismo mecanismo se tienen cinco expresiones diferentes de velocidad. Un resumen de algunos de los posibles mecanismos para cada esquema obtenidos de manera semejante, (34 mecanismos), se muestran en (7), lo mismo que las respectivas ecuaciones de velocidad.

Una vez obtenidas las expresiones de velocidad se le determinó a cada una su modelo matemático, cuyos parámetros se evalúan independientemente, basados en los datos cinéticos experimentales, por un método de regresión matemática, teniendo en cuenta que el principal criterio para aceptar o rechazar un determinado mecanismo es que los parámetros deben ser en su totalidad positivos. De igual forma se muestran en (7) los parámetros hallados para cada mecanismo propuesto y evaluados a las tres temperaturas de reacción.

Las corridas experimentales se hicieron de tal forma que con un número determinado de ellas se cubriera un amplio rango de valores tanto en las presiones parciales de los reactantes como de los productos, logrando así una marcada variación en el valor de la velocidad de reacción para permitir una correcta evaluación de los parámetros.

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los experimentos se realizaron en el equipo mostrado en la figura 2, (10), de igual forma que se hicieron los ensayos de selección. Cabe anotar que al equipo se le modificó la unidad de condensación cambiándosele totalmente por otra que garantizaba una completa condensación de los productos; el diseño de esta unidad se explica en (7). Se implementó una línea toma-muestras en la corriente de alimentación, haciéndola pasar también por la unidad de condensación, para conocer mejor la composición del alimento.

Se usó alcohol del 96 °G-L, 84, 73, 65, 54 y 42 °G-L y en todos los casos se empleó un gramo de catalizador de alúmina. Inicialmente se hacía una activación "in situ" pasando una corriente de  $N_2$  por el lecho catalítico durante 15 minutos. Como la actividad catalítica decrece con el tiempo, cada 10 corridas cuando se cambiaba el grado alcohólico, se trocaba el catalizador por uno fresco. La corriente de alimentación contenía alcohol, agua y nitrógeno,

todos en estado gaseoso, manteniéndose esa condición con ayuda de una banda calefactora.

Se hizo un total de 30 ensayos por duplicado, en la etapa de selección y 34 en la obtención de los datos cinéticos. Por medio de un balance de materia se determinaba la cantidad de cada reactante y del etileno producido. Se observó que el número de moles de etileno producido es equivalente al valor de la velocidad de reacción porque se usó como base de cálculo una hora y se empleó un gramo de alúmina en todos los ensayos.

De acuerdo con la parte teórica y con los mecanismos postulados se concluyó que la reacción superficial es la etapa controlante, que la reacción sigue un esquema en paralelo y que sólo hay adsorción sobre un sitio activo de tal manera que la ecuación de velocidad así obtenida es:

$$r = \frac{k(P_A - P_R P_W / K)}{(1 + K_A P_A + K_W P_W + K_E P_E)} \frac{\text{grmol de etileno}}{\text{gr catalizador} \cdot \text{Hr}}$$

y el modelo matemático para esta ecuación es:

$$R = a + bP_A + dP_W + eP_E$$

El valor de la constante de equilibrio (K) para la reacción de deshidratación del etanol se evaluó por medio de propiedades termodinámicas y para relacionarla con las tres temperaturas investigadas se hizo un ajuste por mínimos cuadrados obteniéndose la ecuación:

$$\ln K = -5659.43/T + 15.69$$

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se siguió el desarrollo mostrado en el estudio cinético para evaluar los parámetros del modelo matemático y por medio de ellos hallar la constante de adsorción a las tres temperaturas de reacción investigadas dando los resultados de la Tabla 1.

Estas constantes de adsorción se expresan en función de la temperatura por medio de la ecuación de Arrhenius y ajustando para cada componente por mínimos cuadrados se obtiene la ecuación de una recta así:

$$\ln K_A = 6611.37/T - 10.35$$

$$\ln K_W = 16433.85/T - 27.03$$

$$\ln K_E = 16086.33/T - 26.33$$

$$\ln k = -3628.90/T + 5.46$$

**TABLA 1. Evaluación de las constantes de adsorción y de reacción.**

	Temperatura (°C)		
	325	350	370
a	1.7839	1.5175	1.1565
k	0.5607	0.6590	0.8647
b	3.3944	2.2465	0.9942
K <sub>A</sub>	1.9033	1.4804	0.8596
d	2.1537	1.4885	0.1861
K <sub>W</sub>	1.2076	0.9809	0.1609
e	2.3367	2.6065	0.2039
K <sub>E</sub>	1.3065	1.7176	0.1763

Reemplazando la temperatura en °Kelvin y  $R^* = 1.986$  cal/grmol °K se obtiene la entalpía y entropía de activación como se muestra en la Tabla 2, para la formación del complejo activado R1.

De la tabla 2 se concluye que los valores de adsorción están dentro del intervalo aceptable para considerar el proceso como una quimisorción.

Para preparar un catalizador y poder reproducirlo fielmente se debe hacer un estudio investigativo de catálisis y hacer una adaptación de tecnología en nuestro medio para aprovechar experiencias realizadas en otros países además de centralizar toda la información para su fácil acceso; de esta forma se puede asegurar que siguiendo la formulación de preparación del catalizador se obtiene un alto grado de reproductibilidad.

El catalizador de alúmina fue el denominado A-19, como el seleccionado para la obtención de los datos cinéticos.

En cuanto a la cinética de la deshidratación catalítica del etanol, se determinó que el esquema por medio del cual se realiza la reacción es en paralelo y su mecanismo permite concluir que el etanol se adsorbe sobre un solo sitio activo, que la fuerza de adsorción del etileno una vez formado mediante la reacción superficial es la etapa controlante y se lleva a cabo por medio del mecanismo de Langmuir-Hinshelwood.

Se recomienda para la continuación de este estudio implementar el equipo con un sistema de recirculación de productos, que permita lograr presiones parciales de etileno y éter, realmente significativas para el proceso y estudiar el efecto de variar la presión total.

**TABLA 2. Entalpías y entropías de adsorción y activación.**

Componente	$\Delta H$ Adsorción	$\Delta S$ Adsorción	$\Delta H$ Activación	$\Delta S$ Activación
A	13130.18	-20.5649		
W	32637.60	-53.6718		
E	31947.45	-52.0890		
R1			-7206.99	10.8541

Con la ecuación de velocidad, el ingeniero químico puede calcular la cantidad de catalizador y distribución del producto para muchas condiciones de operación, estudiar el efecto del reciclaje, analizar el

efecto del calentamiento, estudiar el efecto de cada variable separadamente y ver la posibilidad de regenerar el catalizador por su elevado costo y que se desactiva rápidamente.

## BIBLIOGRAFIA

Agudelo V. Betty, Cortés Humberto y Garzón, Luis Alberto **Preparación, Caracterización y Evaluación de un Catalizador de Alúmina Activa para la Deshidratación del Etanol a Etileno**. Tesis I.Q. U.N. 1982.

Boer, Fahim, Linsen. **Kinetic of the dehydration of alcohol on Alumina**, J. of Catalysis, 7, 163-172, (1967).

Butler J. D. **Kinetics of the catalytic dehydration of ethanol over Alumina**. J. Am. Chem. Soc. 905-908 (1968).

Butt and Bliss. **Rates of reaction in a recycling system dehydration of ethanol and diethyl ether over alumina**. Aiche J. 8(1), 42, (1962).

Carberry, James. **Ingeniería de las reacciones químicas y catalíticas**, Ed. Géminis, Buenos Aires, 1980.

Corrigan, Thomas. **Chem. Eng. Chem. Eng. Fundamentals**, 61(3,4), (1954).

Franco H. Orlando; Espitia R. Helberth y Forero T. Guillermo. **Evaluación, Selección de un catalizador de Alúmina y Estudio Cinético de la deshidratación Catalítica de Etanol a Etileno**. Tesis I.Q. U.N. 1982.

Hougen, O. A. and Watson, K. M. **Chemical process Principles, Part III**. Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1947.

Knozinger Helmut and Horst, Boll. **The dehydration of alcohols on Alumina reactivity and mechanism**, J. of Catalysis, 24, 57-68 (1972).

Mantilla, Jairo y Reyes, Jairo. **Diseño, Construcción y Montaje de un reactor tubular experimental**. Tesis I.Q. U.N. 1982.

Miller, Donald and Kirk, Roberts. **Kinetics of the catalytic dehydration of primary alcohols**, Aiche J. 8(2), (1962).