

# Simulación de una torre de absorción para la producción de ácido nítrico

JUAN FERNANDO MARTINEZ C., Ing. Químico  
EDGAR M. SARMIENTO C., Ing. Químico  
ARISTOBULO CENTENO H., Ing. Químico, M.Sc.

## RESUMEN

Se presenta un análisis teórico del equilibrio y la cinética de las reacciones durante el proceso de absorción de óxidos nitrosos para la producción de ácido nítrico, incluyendo un algoritmo y diagrama de flujo de un programa de computador que simula la operación de una torre. Se comparan los resultados del modelo computacional con los datos de operación de una planta industrial.

## INTRODUCCION

La producción de ácido nítrico se lleva a cabo por absorción de los óxidos nitrosos en agua, mecanismo que está asociado con un proceso de reacción química. Este mecanismo de reacción es complejo y del cual no hay mucha información, además el proceso de producción en sí es bastante contaminante por la presencia de óxidos nitrosos en los gases residuales. Esta situación ha conducido a que se presente cierto interés en el estudio del proceso de fabricación por parte de varios investigadores.

\* Trabajo presentado como Tesis de Grado.

\*\* Profesor Asistente Departamento de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Se han desarrollado métodos de diseño de columnas de absorción, que han sido en primera instancia aproximaciones válidas dentro del proceso de desarrollo tanto industrial como desde el punto de vista científico, pero que han dejado lagunas e inexactitudes que deben ser llenadas o corregidas. E.D. Ermenc (5) plantea un modelo, que para evitar el planteamiento de las relaciones de equilibrio tediosas y complicadas, coloca éstas en gráficas y nomogramas para que la persona encargada de hacer el diseño ahorre tiempo y esfuerzo en sus cálculos. Este método fue práctico en la época de su concepción, pero realmente presenta algunos inconvenientes, unos de forma como el caso de basarse en gráficas, lo que conduce a errores de lectura y apreciación, poca exactitud de éstas, y además están limitadas a muy pocas condiciones de operación; otras de fondo como es la consideración de que el  $N_2O_4$  no reacciona con el agua para la formación del ácido nítrico sino el  $NO_2$ , afirmación que aunque el autor sostiene ha sido verificada en operaciones reales, hay mucha controversia al respecto y conceptos de varios autores en contra de tal planteamiento.

Otro método muy ingenioso, también gráfico, es el propuesto por R. King y J.C. Fielding (7), y consiste en un extensión del clásico diagrama de Mc Cabe-Thiele. Como el proceso de absorción de  $NO_x$  en contracorriente presenta dificultades adicionales porque se contempla la presencia de una reacción química muy lenta, en los cálculos debe considerarse el factor tiempo como una variable muy importante.

Lógicamente el tamaño de la columna se ve afectado por el tiempo requerido para la oxidación de  $NO$  a  $NO_2$ . Este método indudablemente es bastante interesante e ingenioso pues aplica un procedimiento sencillo para la solución de problemas de transferencia de masa como es el método de Mc Cabe-Thiele, a casos complejos de absorción gas-líquido con reacción química. Su limitación más importante es la tediosa e inexacta construcción de las curvas de operación y equilibrio que hacen poco práctico su uso.

Otros autores Sherwood (17) y Chilton (3), han tratado de plantear el mecanismo de ocurrencia de los fenómenos en la torre y sugieren métodos de cálculo, los cuales se han escogido como base para el presente trabajo.

El propósito es desarrollar un procedimiento sistematizado de cálculo por computador

que se base en los mecanismos propuestos con algunas simplificaciones apropiadas y sirva para diseñar una columna para la producción de ácido nítrico, con su correspondiente verificación en un proceso industrial en uso.

## ASPECTOS TEORICOS

La torre de absorción simulada por el modelo se muestra en la Figura 1, en una forma esquemática. Esta torre prácticamente trabaja isotérmicamente ya que todo el calor generado durante el proceso de absorción es retirado por serpentines con agua de enfriamiento en cada plato.

El mecanismo seleccionado plantea una serie de cuatro pasos consecutivos, que son:

1. Reacción de dimerización
2. Reacción de producción de ácido nítrico a partir de la absorción del  $\text{NO}_2$  en agua.
3. Balances de masa en el plato en consideración
4. Reacción de oxidación del óxido nítrico (NO)

En la Figura 2, se presenta la descripción de la secuencia de los pasos considerados por el modelo para el primer plato de la torre.

A continuación se hace una descripción detallada de los planteamientos teóricos que sustentan el procedimiento propuesto.

### Primer paso. Dimerización del $\text{NO}_2$

El dióxido de nitrógeno existe en un estado de equilibrio con su dimero el tetraóxido de dinitrógeno, sin importar que existan en proporciones prácticamente despreciables óxidos mayores como el  $\text{N}_2\text{O}_3$  y el  $\text{NO}_3$ . Chilton (3) muestra gráficamente que el equilibrio de la dimerización favorece la forma dimérica a bajas temperaturas. A altas temperaturas la mezcla está compuesta casi totalmente por la forma disociada.

Esta reacción de asociación se lleva a cabo en fase gaseosa (17) y su equilibrio es alcanzado en forma casi instantánea (16).



La constante de equilibrio para la reacción se representa por:

$$K_P = \frac{P(\text{N}_2\text{O}_4)}{P(\text{NO}_2)^2}$$

y

$$\log K_P = (2993/T) - 9.226$$

Definiendo  $\alpha$  como la fracción de  $\text{N}_2\text{O}_4$  disociada, y considerando comportamiento ideal en la fase gaseosa, la  $K_P$  se puede representar como:

$$K_P = (1 - \alpha^2)/(P_T \times 4 \times \alpha^2)$$

Si definimos  $\text{NO}_2^* = \text{Peróxido de Nitrógeno} = \text{NO}_2 + 2 \text{N}_2\text{O}_4$  y,  $P(\text{NO}_2)^* = P(\text{NO}_2 + 2 P(\text{N}_2\text{O}_4))$ , reemplazando y reordenando la expresión para la constante de equilibrio, se llega a la ecuación:

$$K_P = (1 - \alpha)/(P(\text{NO}_2^*) \times 2 \times \alpha^2)$$

reordenando,

$$2 \times P(\text{NO}_2^*) \times K_P \times \alpha^2 + \alpha - 1 = 0$$

La solución de esta expresión cuadrática para  $\alpha$  está dada por:

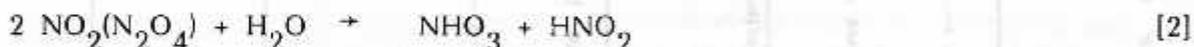
$$\alpha = ((1 + 8 \times K_P \times P(\text{NO}_2^*))^{1/2} - 1)/(4 \times P(\text{NO}_2^*) \times K_P)$$

conocidos por lo tanto los valores de  $\alpha$  y  $P_T$  se pueden hallar las presiones parciales de  $\text{N}_2\text{O}_4$  y de  $\text{NO}_2$  en el plato de fondo. Es importante señalar que la dimerización del  $\text{NO}_2$  y todas las consideraciones que esto conlleva, sólo se tienen en cuenta para la corriente que entra inicialmente al plato de fondo. En los platos siguientes no se analiza la cantidad de  $\text{NO}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}_4$  por separado, porque siempre se toma en cuenta el peróxido de nitrógeno como el complejo que se absorbe y produce el

ácido nítrico. La razón de usar las expresiones de dimerización en la corriente del gas que entra a la torre es obtener un indicativo de la relación  $N_2O_4$  y  $NO_2$  presente en la mezcla producida en los pasos anteriores, y constituye un punto de arranque en los cálculos posteriores.

### Segundo paso. Reacción de producción del ácido nítrico

Se puede presentar la formación de ácido nítrico en los absorbedores industriales por los siguientes pasos:



las cuales son equivalentes a la reacción global:



esta reacción es esencialmente reversible, rápida y su equilibrio es alcanzado casi en forma instantánea. Bajo condiciones normales en operaciones industriales, se lleva a cabo en fase líquida y se considera que la constante de equilibrio para esta reacción es:

$$K_a = \frac{P(NO) \cdot a(HNO_3)^2}{P(N_2O_4)^{3/2} \cdot a(H_2O)}$$

donde  $a(HNO_3)$  y  $a(H_2O)$  representan las actividades en el líquido. La expresión para la constante de equilibrio se puede representar como:

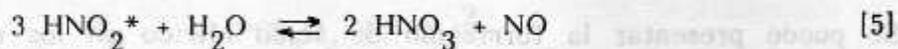
$$K_a = K_{a1} \times K_c = K_{a1} \times [P(NO)/P(N_2O_4)]^{3/2}$$

donde  $K_c$  es sólo función de la concentración del ácido e independiente de la temperatura. Se reporta (16), (17) esta relación de  $K_c$  y  $W$  (concentración del  $HNO_3$  en fracción en peso) como:

$$\text{Log } K_c = 7.412 - 20.28921 \times W + 32.47322 \times W^2 - 30.87 \times W^3$$

para  $K_c$  en  $\text{atm}^{1/2}$ .

Si se representa la ecuación [4] como:



se puede concluir que:

$$3(P(\text{NO}))_{\text{sal}} - P(\text{NO})_{\text{ent}} = (P(\text{NO}_2^*))_{\text{ent}} - P(\text{NO}_2^*)_{\text{sal}}$$

se puede mediante reemplazos de las definiciones de las constantes de equilibrio y arreglos matemáticos organizar la ecuación para las condiciones de entrada y salida:

$$3(K_c \times K_p^{1.5}) \times (P(\text{NO}_2)_s)^3 + 2 K_p (P(\text{NO}_2)_s)^2 + (P(\text{NO}_2)_s)$$

la cual es una ecuación cúbica donde la variable a evaluar es  $(P(\text{NO}_2))_s$ . El modelo computacional planteado en este trabajo la resuelve por el método de CARDANO.

Conocido el valor de  $(P(\text{NO}_2))_s$  se evalúa:

$$(P(\text{N}_2\text{O}_4))_s = K_p \times (P(\text{NO}_2)_s)^2$$

$$(P(\text{N}_2\text{O}_4))_s = K_p \times (P(\text{NO}_2)_s)^2$$

$$(P(\text{NO}))_s = K_c \times (P(\text{N}_2\text{O}_4)_s)^{1.5}$$

$$(P(\text{NO}_2^*))_s = P(\text{NO}_2)_s + 2 (P(\text{N}_2\text{O}_4))_s$$

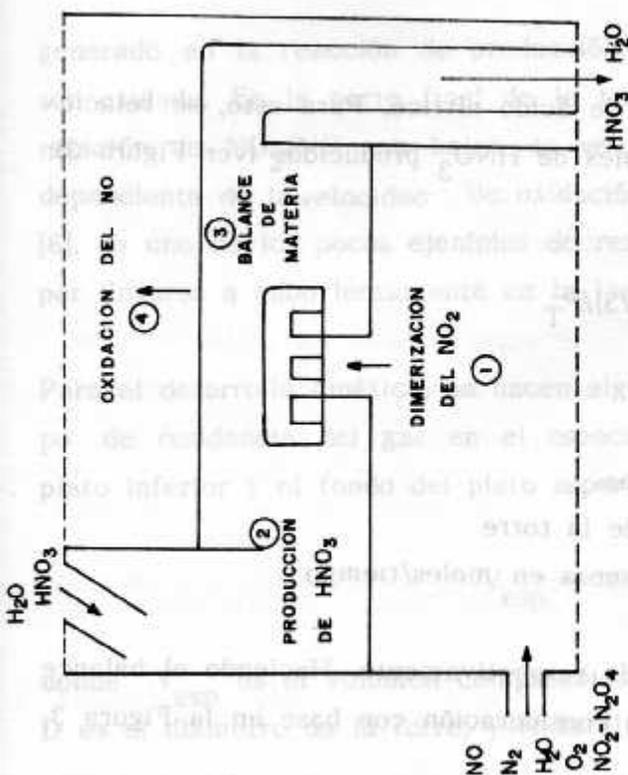


FIGURA 2 PLATO DEL FONDO DE LA TORRE

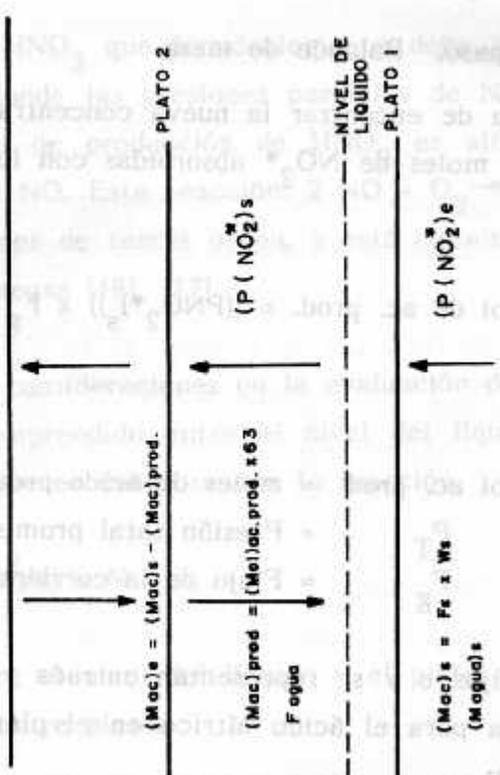


FIGURA 3 CORRIENTES COMPROMETIDAS EN EL BALANCE DE MASA

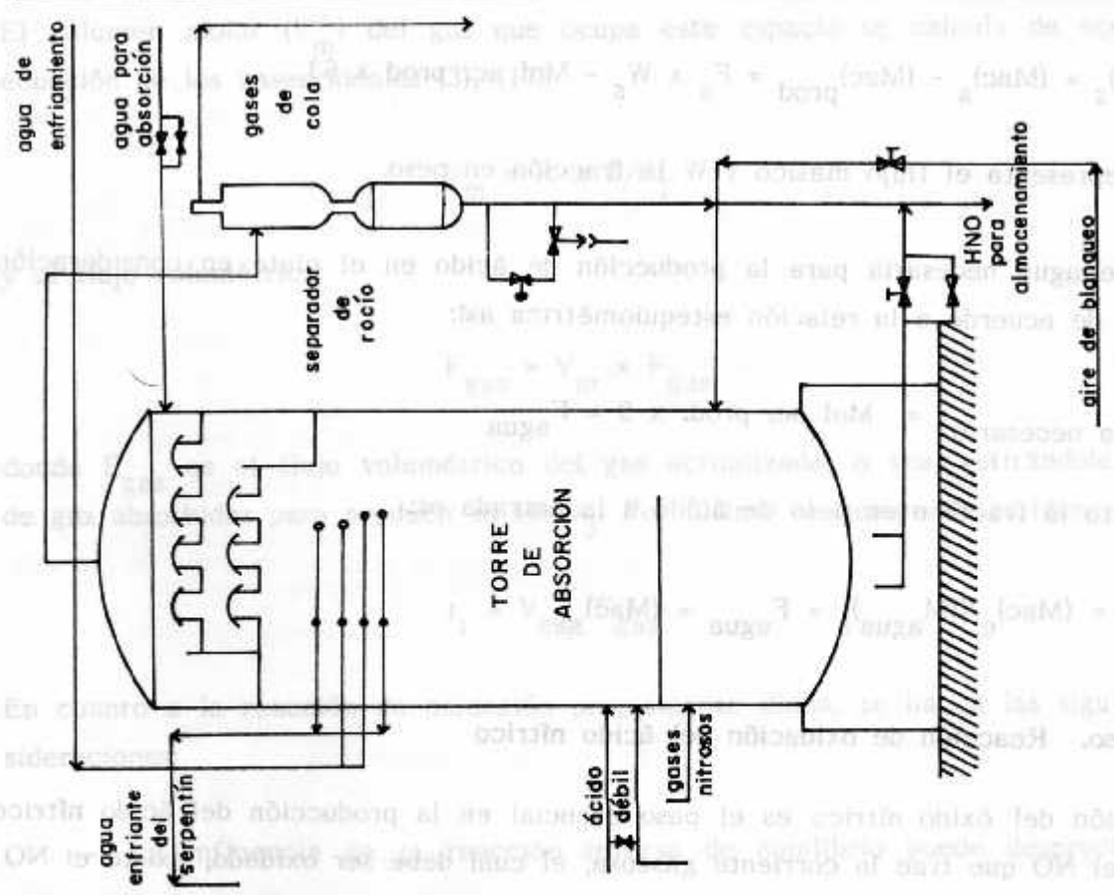


FIGURA 1 TORRE DE ABSORCION

### Tercer paso. Balance de masa

Se trata de encontrar la nueva concentración de ácido nítrico. Para esto, se relacionan las moles de  $\text{NO}_2^*$  absorbidas con los moles de  $\text{HNO}_3$  producidas (ver Figura 3):

$$\text{Mol de ac. prod.} = ((P\text{NO}_2^*)_s) \times F_g \times (2/3)/P_T$$

donde:

Mol ac. prod = moles de ácido producidas

$P_T$  = Presión total promedio de la torre

$F_g$  = Flujo de la corriente gaseosa en moles/tiempo

Los sufijos e y s representan entrada y salida respectivamente. Haciendo el balance de masa para el ácido nítrico en el plato en consideración con base en la Figura 3, tenemos:

$$(\text{Mac})_s = (\text{Mac})_e - (\text{Mac})_{\text{prod}} = F_s \times W_s - \text{Mol ac. prod} \times 63$$

donde F representa el flujo másico y W la fracción en peso.

El peso de agua necesaria para la producción de ácido en el plato en consideración se calcula de acuerdo a la relación estequiométrica así:

$$F_{\text{agua necesario}} = \text{Mol ac. prod.} \times 9 = F_{\text{agua}}$$

por lo tanto la fracción en peso de ácido a la entrada es:

$$W_e = (\text{Mac})_e / ((M_{\text{agua}})_s + F_{\text{agua}} + (\text{Mac})_s)$$

### Tercer paso. Reacción de oxidación del ácido nítrico

La oxidación del óxido nítrico es el paso esencial en la producción del ácido nítrico. Además del NO que trae la corriente gaseosa, el cual debe ser oxidado, existe el NO

generado en la reacción de producción del  $\text{HNO}_3$  que indudablemente debe también ser oxidado. En la parte final de la torre donde las presiones parciales de NO y la relación de  $\text{NO}_2/\text{NO}$  son bajas, la velocidad de producción de  $\text{HNO}_3$  es altamente dependiente de la velocidad de oxidación del NO. Esta reacción:  $2 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_2$  [6], es uno de los pocos ejemplos de reacciones de tercer orden, y está caracterizada por llevarse a cabo lentamente en la fase gaseosa [16], [17].

Para el desarrollo cinético, se hacen algunas consideraciones en la evaluación del tiempo de residencia del gas en el espacio comprendido entre el nivel del líquido del plato inferior y el fondo del plato superior, que es donde ocurre la reacción.

$$V_{\text{esp}} = \pi \times (D^2/4) \times N$$

donde  $V_{\text{esp}}$  es el volumen comprendido entre el nivel del líquido y el plato superior; D es el diámetro de la torre; y N la altura entre platos.

El volumen molar ( $V_m$ ) del gas que ocupa este espacio se calcula de acuerdo a la ecuación de los gases ideales (3), (17):

$$V_m = R \times T/P_T$$

y el flujo volumétrico:

$$F_{\text{gas}} = V_m \times F_{\text{gas}}$$

donde  $F_{\text{gas}}$  es el flujo volumétrico del gas actualizado, o sea, retirándole las moles de gas absorbidas para producir el  $\text{HNO}_3$ . Por último el tiempo de residencia es:

$$t_r = V_{\text{esp}}/F_{\text{gas}}$$

En cuanto a la reacción de oxidación propiamente dicha, se hacen las siguientes consideraciones:

- La influencia de la reacción inversa de equilibrio puede despreciarse a las

condiciones de operación de un absorbedor industrial (1).

- El número total de moles puede considerarse constante, ya que la corriente gaseosa posee principalmente nitrógeno de tal forma que la proporción de óxidos de nitrógeno no produce un error significativo en los cálculos (1).
- El flujo por el interior de la torre y en el espacio entre los platos se considera de mezclado completo con la suposición de una velocidad de reacción constante donde el grado de oxidación puede ser obtenido por un balance de materiales (1), (6).
- En general a temperatura y volumen constante, la ecuación cinética de esta reacción puede expresarse por:

$$d P(\text{NO}_2)/dt = K_1 (P(\text{NO}))^2 (P(\text{O}_2))$$

para la cual la constante de velocidad se calcula como:

$$\log K_1 = 641/T - 0.725$$

llamando  $x$  la fracción oxidada de NO, puede representarse la presión parcial del gas al final en función de la del inicio así:

$$(P(\text{NO}))_{\text{final}} = (P(\text{NO}))_{\text{ini}} \cdot (1 - x)$$

$$(P(\text{O}_2))_{\text{final}} = (P(\text{O}_2))_{\text{ini}} - (P(\text{NO}))_{\text{ini}} \cdot (x/2)$$

Haciendo un balance molar de NO para el sistema gaseoso antes y después de llevada a cabo la reacción de oxidación, se tiene:

$$\text{Moles de No iniciales} - \text{Moles de NO resultantes} = \text{Moles de NO que no reaccionaron}$$

Mediante reemplazo y arreglos se llega a la expresión:

$$t_r = x/K_1(P(NO))_{ini} (1-x)^2 ((P(O_2))_{ini} - (P(NO))_{ini} x/2))$$

La expresión anterior se lleva a una forma cúbica con el objeto de poder hallar x.

$$(P(N))_{ini}/3 x^3 - [(P(NO))_{ini} + (P(O_2))_{ini}] x^2 + [(P(NO))_{ini}/2 +$$

$$2(P(O_2))_{ini} + 1/(t_r K_1 (P(NO))_{ini} x - (P(O_2))_{ini}] = 0$$

Esta ecuación se resuelve también por el método de CARDANO para x. Seguidamente se hallan los valores de las presiones parciales de los compuestos presentes plato a plato de la torre de absorción.

## IMPLEMENTOS AL COMPUTADOR

### Diagrama de flujo

En la Figura 4 se representa un diagrama de flujo para la simulación de la operación de la torre.

### Algoritmo general

1.- **Entrada.** Se suministran dos tipos de datos, unos llamados standar y otros llamados variables.

Los datos standar son:

- Diámetro de la torre (metros)
- Número de platos reales de la torre
- Espacio entre platos, medido desde el nivel de líquido del plato inferior al fondo del plato superior (centímetros).
- Número del plato en que se inyecta el ácido débil

Los datos variables son:

- Temperatura (K)
- Presión (kPa)

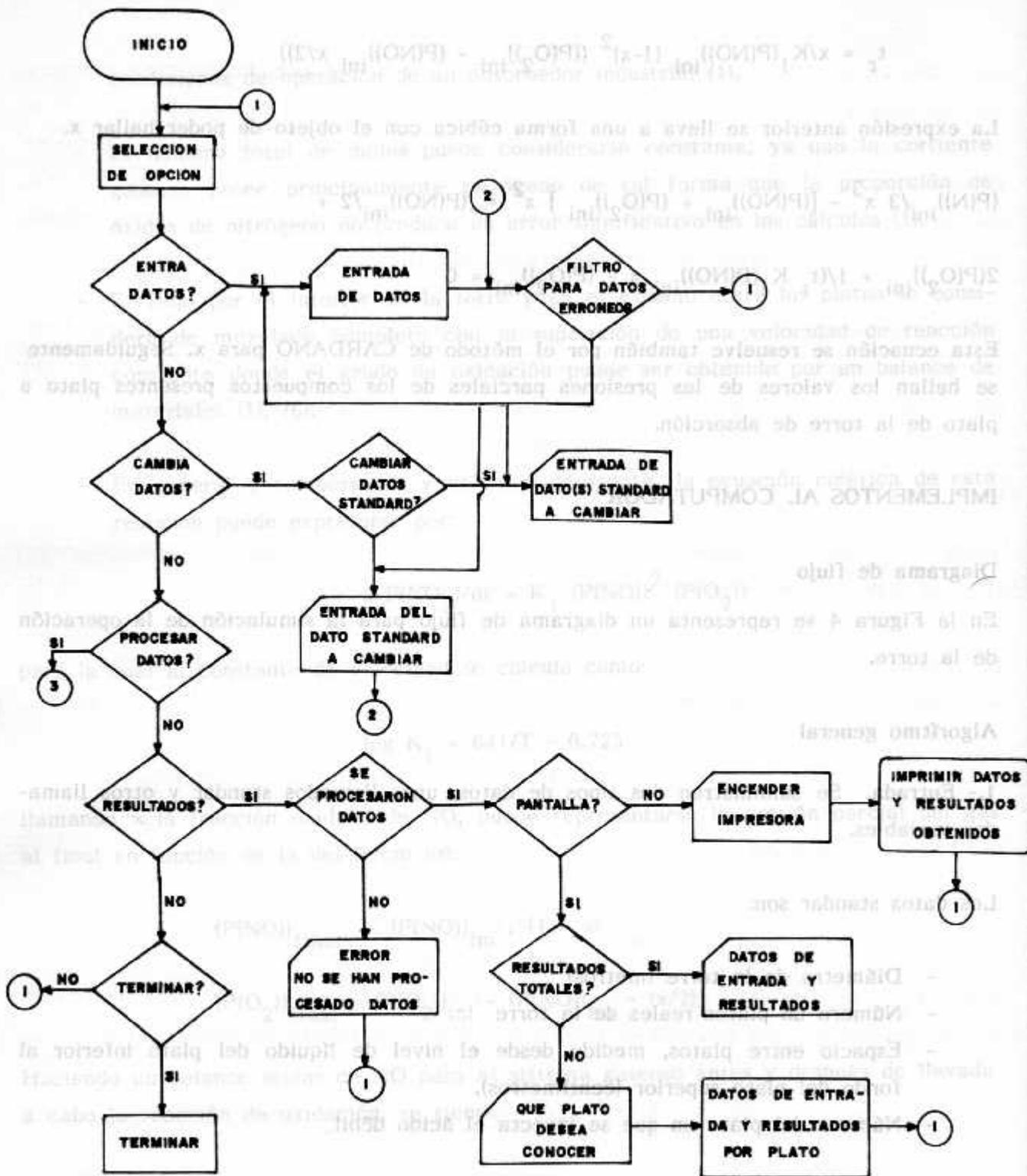


FIGURA 4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SIMULACION DE LA TORRE ABSORBEDORA.

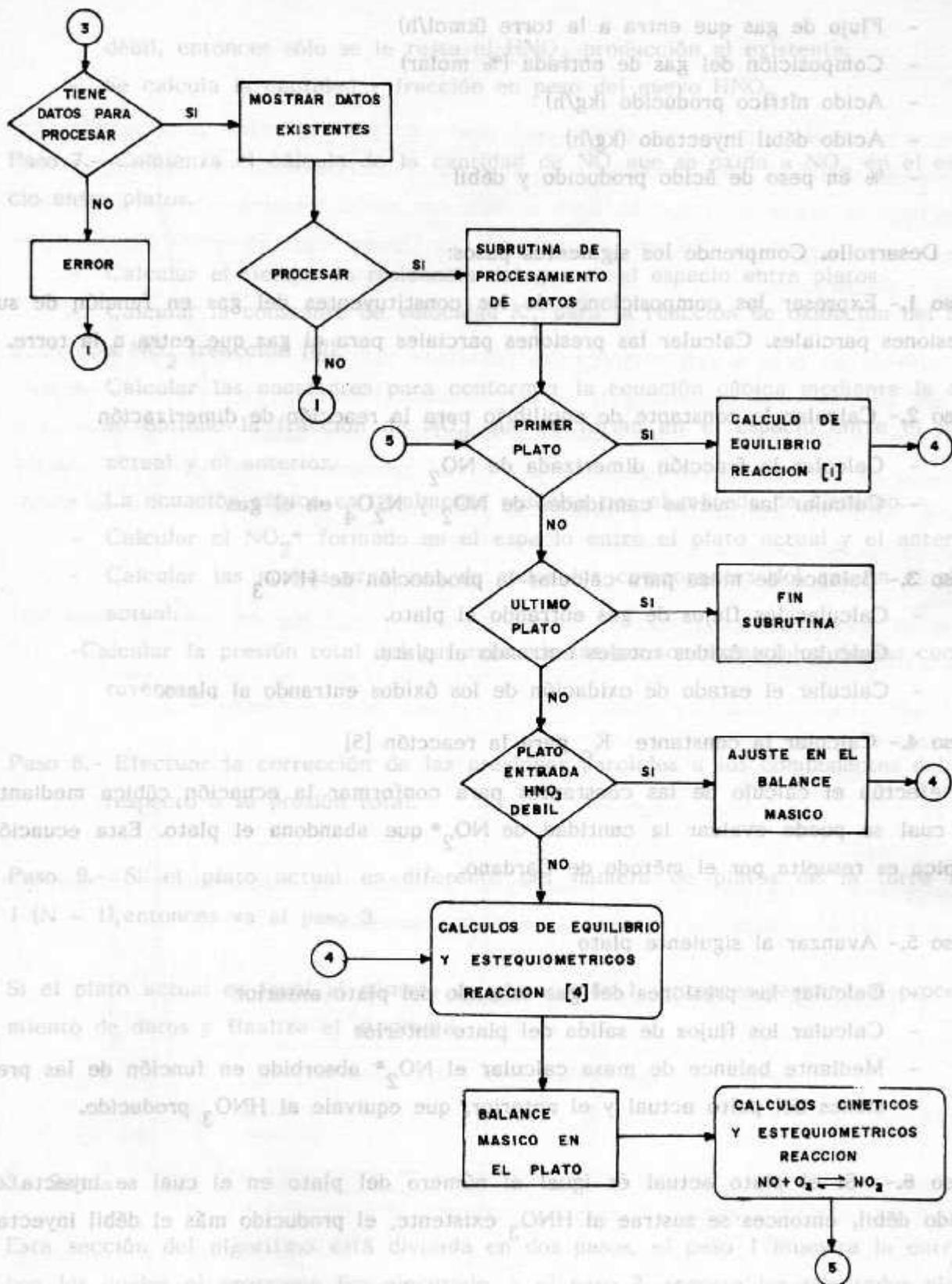


FIGURA 4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA ... (CONTINUACION)

- Flujo de gas que entra a la torre (kmol/h)
- Composición del gas de entrada (% molar)
- Acido nítrico producido (kg/h)
- Acido débil inyectado (kg/h)
- % en peso de ácido producido y débil

2.- Desarrollo. Comprende los siguientes pasos:

**Paso 1.-** Expresar las composiciones de los constituyentes del gas en función de sus presiones parciales. Calcular las presiones parciales para el gas que entra a la torre.

**Paso 2.-** Calcular la constante de equilibrio para la reacción de dimerización

- Calcular la fracción dimerizada de  $\text{NO}_2$
- Calcular las nuevas cantidades de  $\text{NO}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}_4$  en el gas

**Paso 3.-** Balance de masa para calcular la producción de  $\text{HNO}_3$

- Calcular los flujos de gas entrando al plato.
- Calcular los óxidos totales entrando al plato.
- Calcular el estado de oxidación de los óxidos entrando al plato.

**Paso 4.-** Calcular la constante  $K_c$  para la reacción [5]

Se efectúa el cálculo de las constantes para conformar la ecuación cúbica mediante la cual se puede evaluar la cantidad de  $\text{NO}_2^*$  que abandona el plato. Esta ecuación cúbica es resuelta por el método de Cardano.

**Paso 5.-** Avanzar al siguiente plato

- Calcular las presiones del gas saliendo del plato anterior
- Calcular los flujos de salida del plato anterior
- Mediante balance de masa calcular el  $\text{NO}_2^*$  absorbido en función de las presiones del plato actual y el anterior, que equivale al  $\text{HNO}_3$  producido.

**Paso 6.-** Si el plato actual es igual al número del plato en el cual se inyecta el ácido débil, entonces se sustrae al  $\text{HNO}_3$  existente, el producido más el débil inyectado.

- Si el plato actual es diferente al número del plato de inyección del ácido

débil, entonces sólo se le resta el  $\text{HNO}_3$  producción al existente.

- Se calcula la cantidad y fracción en peso del nuevo  $\text{HNO}_3$ .

**Paso 7.-** Comienza el cálculo de la cantidad de  $\text{NO}$  que se oxida a  $\text{NO}_2$  en el espacio entre platos.

- Calcular el tiempo de residencia del gas en el espacio entre platos
- Calcular la constante de velocidad  $K_1$  para la reacción de oxidación del  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$  (reacción [6]).
- Calcular las constantes para conformar la ecuación cúbica mediante la cual se obtiene la fracción de  $\text{NO}_2$  que se forma en el espacio entre el plato actual y el anterior.
- La ecuación cúbica es igualmente resuelta por el método de Cardano.
- Calcular el  $\text{NO}_2^*$  formado en el espacio entre el plato actual y el anterior.
- Calcular las nuevas presiones de todos los componentes del gas en el plato actual.
- Calcular la presión total del gas sumando las presiones parciales de sus constituyentes.

**Paso 8.-** Efectuar la corrección de las presiones parciales a los componentes del gas respecto a su presión total.

**Paso 9.-** Si el plato actual es diferente del número de platos de la torre más 1 ( $N + 1$ ), entonces va al paso 3.

Si el plato actual es igual al número de platos más 1, entonces termina el procesamiento de datos y finaliza el programa.

### 3.- Salida

Esta sección del algoritmo está dividida en dos pasos, el paso 1 muestra la entrada con los cuales el programa fue ejecutado, y el paso 2, reporta los resultados platos por plato, o para un plato específico.

## RESULTADOS

Se hicieron varias corridas de prueba del programa para apreciar la influencia que ejercen las variables de operación y evaluar el comportamiento del modelo, dentro de las que se destaca, la que se llevó a cabo con datos promedio de una planta de producción existente en Colombia (Amoníaco del Caribe), que sirvieron para comparación y verificación.

Esta corrida se hizo a una temperatura constante variando la presión de operación; y a una presión constante variando la temperatura. Parte de los resultados se presentan en las figuras 5 a 8 las cuales corresponden a una temperatura de operación constante de 305 K y determinaciones a distintas presiones de operación, de porcentajes de ácido nítrico, estado de oxidación, porcentaje de recuperación en cada plato y porcentaje de recuperación total.

Donde el porcentaje de  $\text{HNO}_3$  es la concentración de ácido en peso que sale del plato en consideración.

El estado de oxidación es la relación molar de:

$$\text{NO}_2 / (\text{NO} + \text{NO}_2^*)$$

El porcentaje de recuperación por plato es el porcentaje de óxidos totales recuperados por plato; esta relación se obtiene mediante la expresión:

$$100 \times \frac{[\text{Moles de NO entrando al plato } n \quad \text{Moles de NO}_x \text{ entrando al plato } n+1]}{\text{Moles de NO}_x \text{ que entran a la torre absorbedora}}$$

El porcentaje de recuperación total representa el porcentaje acumulado de óxidos totales recuperados por plato y se halla mediante la expresión

$$\% \text{ Recuperación total para el plato } n \quad + \quad \% \text{ Recuperación total para para el plato } n+1$$

## CONCLUSIONES

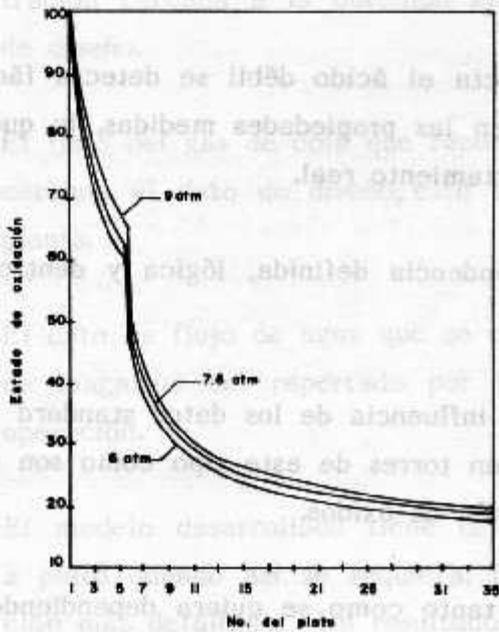


FIGURA 5 VARIACION DEL ESTADO DE OXIDACION EN CADA PLATO RESPECTO A LA PRESION. TEMP.: 305 K

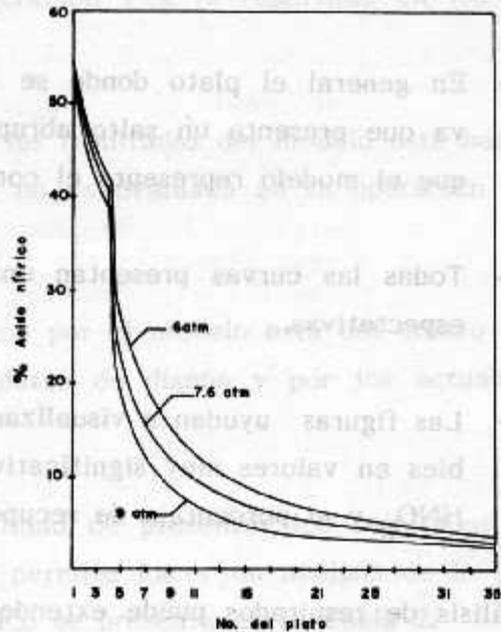


FIGURA 6 VARIACION DEL % ACIDO NITRICO EN CADA PLATO RESPECTO A LA PRESION. TEMPERAT.: 305 K

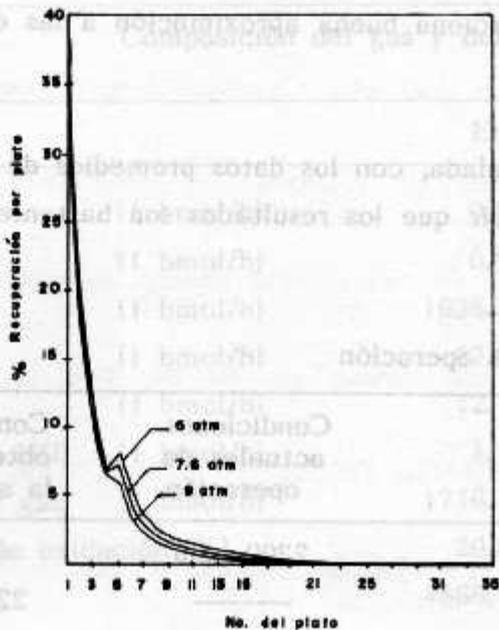


FIGURA 7 VARIACION DEL % RECUPERACION EN CADA PLATO RESPECTO A LA PRESION. TEMP.: 305 K

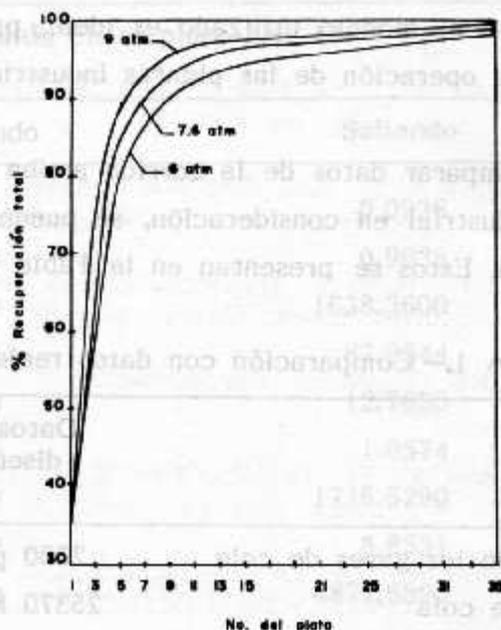


FIGURA 8 VARIACION DEL % RECUPERACION TOTAL EN CADA PLATO RESPECTO A LA PRESION. TEMP.: 305 K

## CONCLUSIONES

Algunos comentarios se pueden hacer de las Figuras 5 a 8:

- En general el plato donde se inyecta el ácido débil se detecta fácilmente ya que presenta un salto abrupto en las propiedades medidas, lo que indica que el modelo representa el comportamiento real.
- Todas las curvas presentan una tendencia definida, lógica y dentro de las expectativas.
- Las figuras ayudan a visualizar la influencia de los datos standard y variables en valores muy significativos en torres de este tipo como son el % de  $\text{HNO}_3$  y el porcentaje de recuperación de óxidos.

El análisis de resultados puede extenderse tanto como se quiera dependiendo de las necesidades que se tengan al evaluar las condiciones de operación utilizando el modelo de simulación. No es este el propósito de esta presentación.

Aunque el modelo utilizado es ideal, proporciona buena aproximación a las condiciones de operación de las plantas industriales.

Al comparar datos de la corrida arriba señalada, con los datos promedios de la planta industrial en consideración, se puede decir que los resultados son bastante aproximados. Estos se presentan en la Tabla 1.

**TABLA 1.-** Comparación con datos reales de operación

	Datos de diseño	Condiciones actuales de operación	Condiciones obtenidas en la simulación
$\text{NO}_x$ en los gases de cola	2000 ppa	2300 ppm	900 ppm
Gas de cola	25370 kg/h	-----	22500 kg/h
Acido nítrico	55 % peso	54 % peso	54 % peso
$\text{H}_2\text{O}$ inyectada	2640 kg/h	2300 kg/h	2150 kg/h

Se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Los  $\text{NO}_x$  en los gases de cola predichos por el modelo están en una concentración cercana a la obtenida en operación y a la reportada en los datos de diseño.
- El flujo del gas de cola que reportan los resultados del modelo está bastante cercano al dato de diseño; este flujo no es evaluado en la operación de la planta.
- El dato de flujo de agua que se obtiene por el modelo está del mismo orden de magnitud del reportado por los datos de diseño y por los actuales de operación.
- El modelo desarrollado tiene la facilidad de presentar los resultados plato a plato cuando así se requiera. Esto permite hacer un análisis de la operación más detallado. Un resultado típico se presenta en la Tabla 2.

TABLA 2.- Representación de flujos y composiciones en un plato

Composición del gas y del líquido en el plato No. 18

	Entrando	Saliendo
$\text{NO}_2^*$ (1 bmol/h)	0.2407	0.0936
NO (1 bmol/h)	0.9146	0.9638
$\text{N}_2$ (1 bmol/h)	1638.3600	1638.3600
$\text{O}_2$ (1 bmol/h)	87.0544	87.0544
$\text{H}_2\text{O}$ (1 bmol/h)	12.7650	12.7650
$(\text{NO}_2^* + \text{NO})$ (1 bmol/h)	1.1553	1.0574
Flujo de gas (1 bmol/h)	1716.5290	1716.5290
Estado de oxidación (%)	20.8319	8.8531
$\text{HNO}_3$	4866.4040	4871.6890
% en peso del $\text{HNO}_3$	3.1728	3.2962

Lo sencillo y versátil del modelo lo hace fácil de entender y aplicar a las plantas industriales. Mediante el programa de computador se pueden generar análisis de variables y condiciones de proceso con el fin de conseguir mayores eficiencias operacionales, y control de proceso.

#### ABSTRACT

A theoretical analysis is made about the reactions that occur in the absorption process of nitrous oxides for the production of nitric acid. An algorithm and flow diagram of a computer program that simulates the tower operations is presented. The simulation results are compared with data obtained in a commercial plant.

#### BIBLIOGRAFIA

1. AZPITARTE, J.L. Nomograph gives NO oxidation. Hydrocarbon Processing, Feb, 1971. pp. 107-111.
2. BILLET, R. The absorption of nitrogen oxides. Brit. Chem. Eng. & Proc. Tech. Vol. 17, No. 9, Sep. 1972.
3. CHILTON, T.H. The manufacture of nitric acid by the oxidation of ammonia. Chem. Eng. Progress Monograph series, Vol. 56, No. 3, 1960.
4. COLINCE, R.M. Scrubbing of gaseous nitrogen oxides in packed towers. AIChE Journal, Vol. 29, No. 1, Enc. 1983. pp. 26-32.
5. ERMENC, E.D. Design data for oxides of nitrogen. Chemical Engineering, Feb. 23 de 1959. pp. 139-142.
6. GILLILAND, E.R. Gas-flow patterns in beds of fluidized solids. Industrial Engineering Chemistry, Vol. 45, No. 6, Jun 1953. pp. 1177-1185.
7. KING, R.W. A graphical design method for nitric acid absorption towers. Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 38, 1960. pp. 71-83.
8. KIRK-OTHMER. Encyclopedia of chemical technology. 4a. ed. Vol. 15, pp. 853-870.
9. MANUAL DE OPERACIONES DE LA PLANTA DE ACIDO NITRICO DE AMONIA-COS DEL CARIBE (AMOCAR).
10. MANUAL DE OPERACIONES DE LA PLANTA DE ACIDO NITRICO DE FERTI-LIZANTES DE COLOMBIA S.A. (FERTICOL).
11. MARZO, L. Acido nítrico concentrado situación actual de la tecnología. Ingeniería Química, Abr. 1980. pp. 31-36.

12. McKEDWN, B. Nitric acid-Nitrogen dioxide-water systems. *Industrial and Eng. Cheistry*, Vol. 47, No. 12, Dic. 1955.
13. MINISTERIO DE SALUD. Decreto No. 2 de enero 11 de 1982 sobre "Emisiones Atmosféricas".
14. NONHEBEL, G. Gas purification processes for air pollution control. New York, Butterworth Co., 1972. pp. 164-187.
15. PETERS, M.S. Vapor and liquid phase reactions between nitrogen dioxide and water. *Industrial and Engineering chemistry*, Vol. 42, No 12, Dic. 1955. pp. 2536-2539.
16. SHERWOOD, T.K. Absorption and extraction. 2a. ed. New York, Mc Graw-Hill Book Company Inc., 1972. pp. 164-187.
17. SHERWOOD, T.K. Mass Transfer. New York, Mc Graw-Hill, 1975. pp. 346-361.
18. TEGEDER, F. Métodos de la industria química inorgánica. Barcelona, Recerté, 1975. pp. 111-119.

Biotecnología