

INTERACCIONES ENTRE VARIABLES DE OPERACIÓN EN LOS REACTORES DE REFORMACIÓN CATALÍTICA DE LPG

Margarita Rivera Soto, René Viera Bertrán, Carlos Hernández Pedrera, Rafael Matos Durán
Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio de simulación, realizado con el software REFORM, a fin de comprobar la existencia de interacciones entre diferentes variables operacionales que pueden afectar la operación de los reactores utilizados en la producción de Hidrógeno, mediante la reformación catalítica de LPG con vapor de agua, en la empresa "Moa Nickel S. A". Se procesaron 180 turnos de operación y se obtuvieron resultados importantes

Palabras clave: *lpg, hidrógeno, reformación catalítica, interacciones.*

In this work the results of a simulation study are presented, realized with the software REFORM, in order to check the existence of interactions between different operational variables that can affect the operation of the reactors used in the production of Hydrogen, by the catalytic steam reforming of LPG, in the company "Moa Nickel S. A." 180 operation shifts were processed and important results were obtained.

Key words: *lpg, hydrogen, catalytic reforming, interactions.*

Introducción

En un proceso, el efecto que los cambios en una variable de operación ejercen sobre determinada respuesta de interés, está en ocasiones condicionado por el valor que tenga otra u otras variables de trabajo; en este caso existe interacción entre ellas y puede afirmarse que la influencia que tiene la primera variable sobre el proceso, dependerá de los cambios que experimente la otra u otras que interactúan con ella.

El presente trabajo presenta los resultados obtenidos en un estudio de simulación llevado a cabo con un software denominado REFORM/1/, con el propósito de comprobar la existencia de interacciones entre las variables de operación durante el funcionamiento de los reactores catalíticos utilizados en el proceso de producción de hidrógeno, mediante la reformación catalítica del LPG con vapor de agua.

El software desarrollado se basa en un modelo matemático fenomenológico y de estructura bidimensional, que describe satisfactoriamente el comportamiento de los reactores, así como un algoritmo que permite la estimación de los parámetros básicos del modelo y la simulación del proceso.

Se seleccionaron aleatoriamente 180 turnos de operación para estimar los parámetros del modelo e igual cantidad para la simulación del proceso.

Las pruebas de validación arrojaron excelentes resultados, hecho que confirma la confiabilidad del modelo matemático y las posibilidades del software para realizar diferentes estudios de simulación, entre los que se encuentran:

- **Análisis de sensibilidad paramétrica /2/,** con el objetivo de determinar cuáles son las variables de operación que ejercen mayor influencia sobre las diferentes respuestas en el proceso de reformación catalítica de LPG: los % de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano (% molares), a la salida de los reactores, siendo de especial interés: el hidrógeno y metano.
- **Determinación de la existencia o no de interacciones entre las diferentes variables de operación,** analizando su efecto (en caso de existir), sobre las diferentes respuestas en el sistema objeto de estudio.

En este trabajo el objetivo del estudio se centra en el análisis de aquellas variables de operación que tienen un mayor efecto en las respuestas (determinadas en el referido análisis de sensibilidad).

Objetivo

Analizar el comportamiento de los reactores de reformación catalítica de LPG ante diferentes cambios en las condiciones de trabajo, relacionado principalmente con: la existencia de interacciones

entre las variables de operación y su efecto sobre la formación de hidrógeno y de metano.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

El equipamiento utilizado consistió en los reactores de reformación catalítica de LPG y laboratorios de la planta de hidrógeno, pertenecientes a la empresa Comandante "Pedro Sotro Alba", ubicada en Moa, Holguín. Se empleó como herramienta de trabajo un software denominado REFORM, conformado por: el modelo matemático pseudohomogeneo bidimensional, un algoritmo y un programa de computación, desarrollados y validados en el estudio de estos reactores /1/.

También se utilizaron los métodos estadísticos y el programa profesional SATATISTIC, para el análisis y procesamiento de datos, así como para la interpretación y análisis de los resultados.

Resultados y discusión

Habiendo determinado mediante un análisis de sensibilidad /2/, las variables de operación que

mayor influencia tienen en los resultados para la formación de hidrógeno y metano, se realizó un nuevo estudio de simulación con el objetivo de analizar el comportamiento de los reactores ante diferentes cambios en las condiciones de trabajo, relacionado principalmente con: la existencia de interacciones entre las variables de operación.

El estudio de simulación esta vez consistió en seleccionar una corrida base cuyas variables de trabajo se encontraran muy próximas a sus respectivos valores medios (referidos al dominio total de variación de las mismas durante el período que se estudió) y se simularon otras corridas en las cuales se consideró el valor máximo y/o mínimo de determinada variable de operación, manteniendo todas las demás en sus valores medios. En la tabla uno se presentan los detalles.

Se analizaron diferentes combinaciones de las variables, observando que las que ocasionaron mayores efectos en las diferentes respuestas (fundamentalmente en el hidrógeno y metano), son: la presión con la temperatura de pared del punto uno (T_{p1}) y la presión con la relación vapor-carbono (V/C).

Tabla 1
Condiciones de operación y respuestas en la corrida base utilizada en la determinación de la existencia o no de interacciones entre las variables de trabajo

VARIABLE (Parámetro)	CORRIDA BASE (Nivel medio)
G ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	2,15
F_0 ($\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$)	0,003 579 04
Re_0	1 184,00
T_0 (K)	581,99
T_{p1} (K)	1 204,15
T_{p2} (K)	1 207,65
T_{p3} (K)	1 216,15
V/C*	5,96
$P\cdot 10^{-3}$ (Pa)	236,71
Y_{CO} (% en moles)	9,118
Y_{CH_4} (% en moles)	0,006 6
Y_{CO_2} (% en moles)	16,31
Y_{H_2} (% en moles)	74,56

* En la tabla V/C significa relación vapor-carbono utilizada el nivel de operación seleccionado.

Se pudo comprobar que existen interacciones entre las variables:

- Presión y temperatura de pared del punto uno en el reactor.
- Presión y relación vapor-carbono (V/C).

Los resultados que se presentan a continuación, conciernen específicamente al comportamiento de los reactores de reformación catalítica de LPG utilizados en la planta de Moa y las conclusiones del trabajo se consideran válidas sólo para el caso en que los valores de las variables de operación se encuentren dentro del dominio total de variación de cada una de las respectivas variables [1], correspondiente a dos años de trabajo durante los cuales se estudia el comportamiento de los citados reactores, en presencia de un catalizador específico.

Comprobación de la existencia de interacciones entre la presión y la relación vapor-carbono (V/C)

Para el hidrógeno

En la figura uno se observa como al aumentar la relación V/C la producción del hidrógeno se favorece significativamente e independientemente del nivel de presión con que operen los reactores, sin embargo es evidente que para cualquier relación V/C, dentro del dominio en que esta puede variar, un cambio en la presión provoca siempre el mismo efecto en la concentración de hidrógeno, lo que denota que entre estas variables no existe interacción.

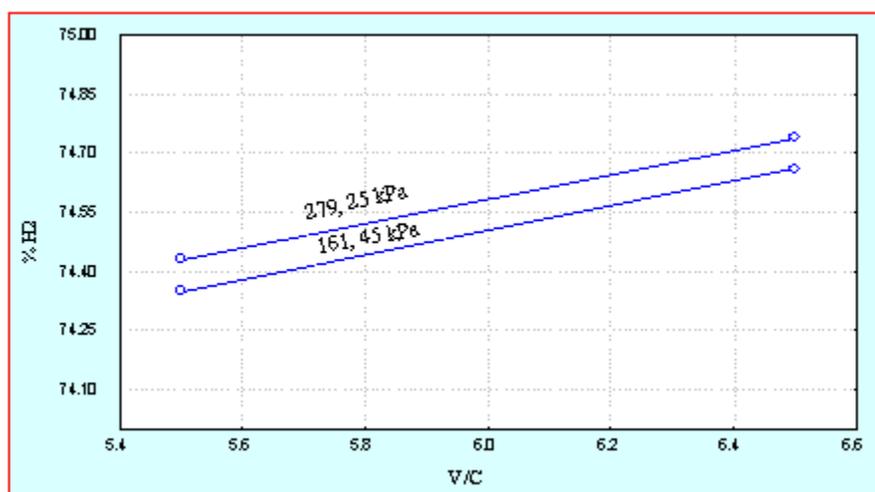


Fig. 1 Efecto de la presión y la relación vapor-carbono (V/C), sobre la producción de hidrógeno.

Para el metano

En la figura dos se representa gráficamente el efecto de la presión y la relación V/C sobre la producción de metano. Se puede apreciar que en el nivel de presión de 279,25 kPa, la relación V/C tiene un efecto muy marcado sobre la composición del metano, en comparación con el nivel más bajo de presión (161,45 kPa); por ejemplo, al analizar la tabla dos se aprecia que; cuando la presión de operación es 279,25 kPa, un aumento de una unidad en la relación V/C provoca una disminución en la

concentración de metano igual a 0,0047 %, mientras que cuando se opera con una presión menor (161,45 kPa), un cambio igual en la relación V/C, ocasiona una disminución en la concentración de CH₄ igual a 0,00068 % (% molares).

Este análisis permite afirmar que el mismo cambio en la relación (V/C), cuando se trabaja en un nivel de presión máximo (279,25 kPa), provoca en el CH₄ una disminución 6,7 veces mayor que cuando se trabaja en un nivel mínimo (161,45 kPa); lo que prueba la marcada interacción que existe entre estas variables.

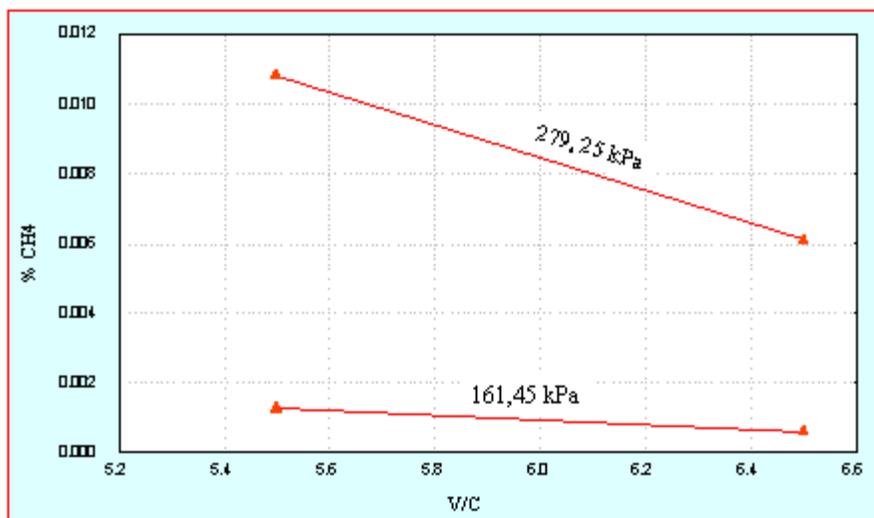


Fig. 2 Efecto de la presión y la relación vapor-carbono (V/C), sobre la producción de metano.

Comprobación de la existencia de interacciones entre la presión y la temperatura de pared del punto uno (T_{p1})

Para el hidrógeno

Como se ilustra en la figura tres, para cualquier nivel de T_{p1} , un cambio de presión va a

provocar efectos similares en la concentración de hidrógeno, lo que demuestra que no existe interacción entre estas variables. Según se observa, todo indica que aumentando la presión y disminuyendo T_{p1} podrá obtenerse mayor volumen de producción de hidrógeno, siendo importante considerar el efecto que tendrá la combinación de estas variables sobre el metano.

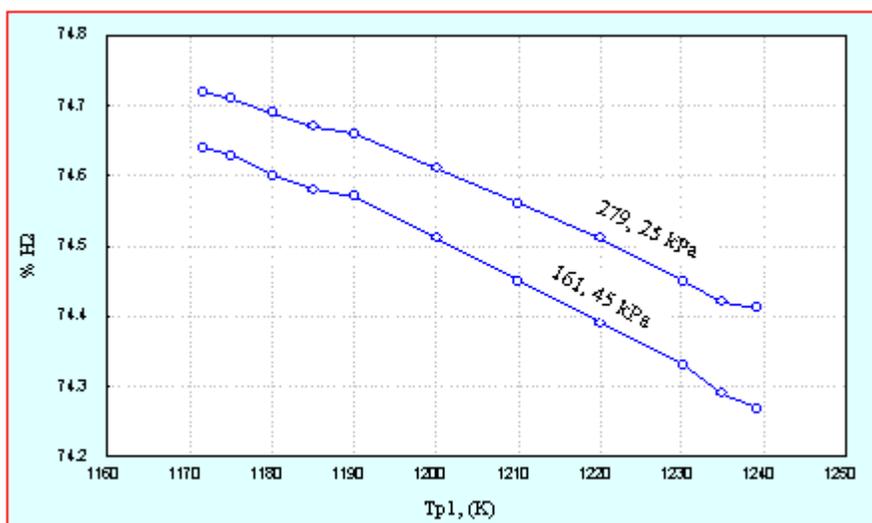


Fig. 3 Efecto de la presión y la temperatura de pared del punto (T_{p1}), sobre la producción de hidrógeno.

Para el metano

Es notable el aumento que experimenta la concentración de metano, cuando manteniendo la temperatura de pared del punto uno (T_{p1}) constante en el máximo nivel, se aumenta la presión desde 161,45 a 279,25 kPa; mientras que manteniendo constante T_{p1} (en un nivel mínimo), la magnitud del cambio que experimenta el metano al aumentar la presión es mucho menor (ver figura cuatro), lo que refleja la gran interacción existente entre estas varia-

bles y de acuerdo con esto deberán extremarse las precauciones, evitando la combinación de la presión máxima con T_{p1} máxima, la que podría conducir a elevados niveles de metano con las consecuentes afectaciones de calidad del producto principal en el proceso.

Las diferentes figuras indican que deben tenerse en cuenta los niveles en que se encuentran estas variables de operación para realizar cualquier cambio en ellas, pues pueden producirse efectos indeseados, aún estando dentro del rango de control de las mismas.

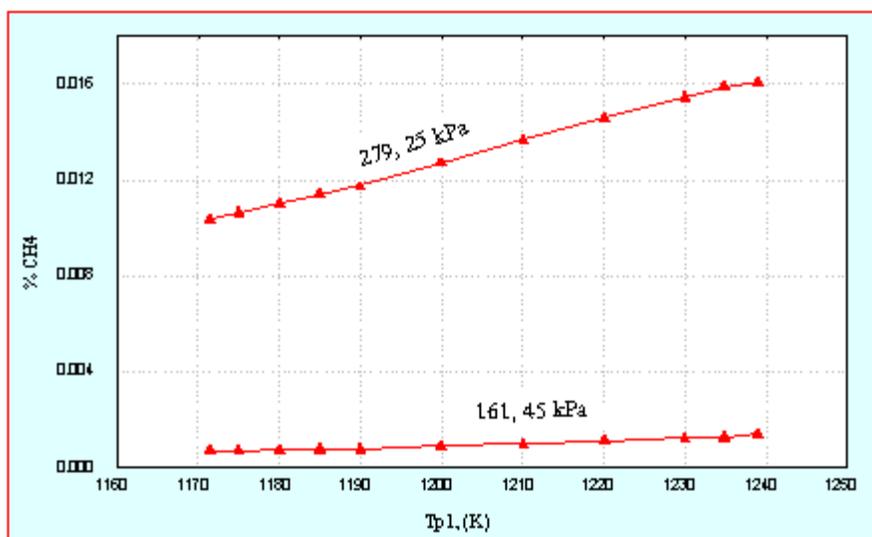


Fig. 4 Efecto de la presión y la temperatura de pared del punto uno (T_{p1}), sobre la producción de metano.

Conclusiones

El estudio de simulación desarrollado para determinar la existencia de interacciones entre las variables de operación y el análisis de sus resultados, permite concluir que:

1. La interacción más conveniente, porque favorece la producción de mayor volumen de hidrógeno con los mínimos niveles de metano, es la de la presión con la relación vapor-carbono, estando la presión en un nivel mínimo y la relación vapor-carbono en un nivel máximo.
2. La temperatura de pared del punto uno, debe controlarse no sólo por la afectación que puede provocar en la vida útil de los tubos de los

reactores, sino también porque las combinaciones de esta variable, con otras como la presión (ambas en los niveles máximos), podrían incrementar notablemente el contenido de metano, ocasionando serias e indeseables afectaciones en la calidad del hidrógeno y de los sulfuros de Ni y Co.

3. Las interacciones de algunas de las variables más importantes ocasionan mayores efectos en el proceso que las variables independientes. Los resultados sugieren que una conducta consecuente para tener un sistema más eficaz y obtener mejor calidad en el producto es operar el reactor con niveles de presión mínima, temperaturas de pared lo más bajas posible, dentro de los valores permisibles y alta relación vapor-carbono.

4. El estudio realizado puede ser de gran utilidad para la toma de decisiones, ante el efecto negativo ocasionado por determinados cambios en las variables de operación; estos permiten hacer indicaciones para la manipulación de estas variables con propósitos de control.

Nomenclatura

F₀: flujo de alimentado (kmol.s⁻¹).

G: masa velocidad (kg de mezcla/m². s).

LPG: gas licuado del petróleo.

P: presión de la mezcla, kPa. (P₀: presión a la entrada del reactor, en kPa).

Re: número adimensional de Reynolds (Re=dp.G/μ).

Tp₁: temperatura de pared del punto uno en el reactor (K).

Tp₂: temperatura de pared del punto dos en el reactor (K).

Tp₃: temperatura de pared del punto tres en el reactor (K).

V/C: relación vapor – carbono (s/u).

s/u: sin unidades (para los términos adimensionales).

0: indica las condiciones a la entrada del reactor.

Bibliografía

1. Rivera M. “Modelo Matemático para los reactores utilizados en la producción de Hidrógeno a partir de la reformación catalítica de LPG con vapor de agua”. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, 2007.
2. Rivera, M., Hernández P. C., Viera A. R., Matos R. “Sensibilidad paramétrica relacionada con la operación de reactores de reformación catalítica de LPG” vol. XXIX. Nº 1. Revista de Tecnología Química, 2009.