

DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE VARIANZA APLICADOS A LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y OXÍGENO DE UN REACTOR ELECTROLÍTICO, MODIFICANDO TEMPERATURA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA, PARA ESTIMAR SUS CONDICIONES ÓPTIMAS DE FUNCIONAMIENTO

Experimental Design and Variance Analysis Applied to the Production of Hydrogen and Oxygen of an Electrolytic Reactor, Modifying Temperature and Chemical Composition, to Estimate their Optimum Conditions of Operation

William Eduardo Fagiani Cruz

Mtro. en Estadística Aplicada

Correspondencia al autor: wefagiani@ing.usac.edu.gt

Recibido: 21 de febrero 2018 | Revisado: 28 de febrero 2018 | Aprobado: 06 de marzo 2018

Asesorado por: Dr. en Química Orgánica **Adolfo Narciso Gramajo Antonio** angramajo@ing.usac.edu.gt

Resumen

El objetivo de este estudio es evaluar el comportamiento del flujo de hidrógeno y oxígeno producido en un reactor electrolítico, al modificar la temperatura y la concentración de su medio acuoso, para generar datos que permitan establecer el diseño experimental más apropiado. Se utiliza un diseño anidado, porque permite ahorrar tiempo y materiales durante las mediciones de producción gaseosa al controlar la temperatura. El experimento detecta significativamente las diferencias en el flujo al modificar los factores, sin embargo, una de las covariables (conductividad y corriente eléctrica) al incluir sus interacciones es irrelevante en la explicación de la variabilidad.

Como producto de la experimentación se ha generado un modelo matemático que explica aproximadamente un 85.86 % de la variación presentada por la producción gaseosa del reactor, y su tendencia creciente muestra que las condiciones óptimas son los valores máximos de temperatura y concentración.

Palabras clave

Hidrógeno, reactor, combustión, experimental, variación.

Abstract

The main goal of this study is to evaluate the behavior of the hydrogen and oxygen flow produced in an electrolytic reactor, by modifying the temperature and the concentration of its aqueous medium, in order to generate data and from this data establish the most appropriate experimental design. A nested design is used, as this saves time and materials during gaseous production measurements when controlling temperature. The experiment significantly detects differences in flow by modifying the factors, however, one of the covariates by including (conductivity and electric current) interactions is irrelevant in explaining the variability.

As a result of the experimentation a mathematical model has been generated that explains approximately 85.86 % of the variation presented by the gaseous production of the reactor, and its increasing tendency shows that the optimum conditions are present in the maximum temperature values and concentration.

Keywords

Hydrogen, reactor, combustion, experimental, variation.

Introducción

La combustión, como proceso de transformación energética, permite aprovechar el potencial químico de un combustible en forma de transferencia de calor. La composición del combustible afecta directamente la calidad del proceso y, por consiguiente, la cantidad de subproductos no deseados que pueden causar contaminación ambiental; este fenómeno depende de tantas variables, que deben ser aisladas para predecir su comportamiento.

Un reactor electrolítico es un dispositivo que puede generar un aditivo instantáneo para el combustible, hidrógeno gaseoso, en el momento de llevarse a cabo sus reacciones y adicional a esto un comburente, el oxígeno, que mejora la eficiencia del proceso.

El estudio estadístico del funcionamiento de un reactor electrolítico es importante para generar información sobre sus posibles ventajas, mediante un experimento que cuantifica su comportamiento al controlar los parámetros de entrada para optimizar su producción gaseosa.

Desarrollo del estudio

La evidencia cuantitativa se recauda con un reactor electrolítico de uso común en vehículos, que se adapta para su monitoreo en el laboratorio.

El sistema utilizado es el que se muestra en la figura 1, y consta de una fuente (+/-) que alimenta el reactor a un voltaje constante de 20V, con un medidor de amperaje (i/mA) colocado en serie. La producción de gases se realiza mediante un reflujio con un depósito elevado para aprovechar la gravedad y la convección impulsada por el potencial eléctrico. En dicho depósito se mide la temperatura ($T/^{\circ}C$) y la conductividad eléctrica [$k_E/(mS/cm)$] a intervalos de tiempo en los que el reactor está desactivado. Finalmente, el flujo de gases es cuantificado, luego de un filtrado, mediante un medidor de flujo [$V/(dm^3/min)$].

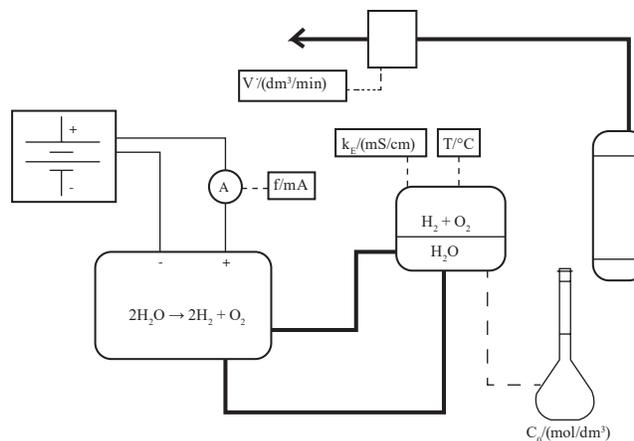


Figura 1. Funcionamiento del equipo experimental utilizado.

El diseño experimental consiste, convenientemente, en dos bloques (Montgomery, 2004, p. 127) representados por la identidad de la sustancia que sirve de electrolito conductor dentro del reactor, con dos variantes, hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH).

Los factores principales de influencia son la temperatura y la concentración de dicho electrolito, para los que se establecen 5 niveles a intervalos consistentes con los resultados de pruebas previas sobre las condiciones de funcionamiento, dentro de un vehículo.

Los niveles son aleatorizados, de tal manera que se reduzca la influencia de variables no controladas en el entorno del experimento, pero se anidan para minimizar el tiempo en que las mediciones se realizan al modificar la temperatura y para ahorrar materiales.

El experimento cuenta, además con dos covariables asociadas (conductividad eléctrica y corriente eléctrica de paso) y los bloques establecidos son las sales disueltas (hidróxido de sodio y potasio). Los datos obtenidos se ponen a prueba mediante el análisis de varianza, transformando las variables mediante el modelo teórico de Arrhenius para el efecto de la temperatura, una ley de velocidad para el efecto directo de la concentración, el modelo de Ohm para la corriente eléctrica y la teoría de Debye-Hückel para la relación entre la conductividad y la concentración.

Resultados obtenidos

El comportamiento generalizado es ascendente para la producción de hidrógeno y oxígeno, cómo se muestra en la figura 2:

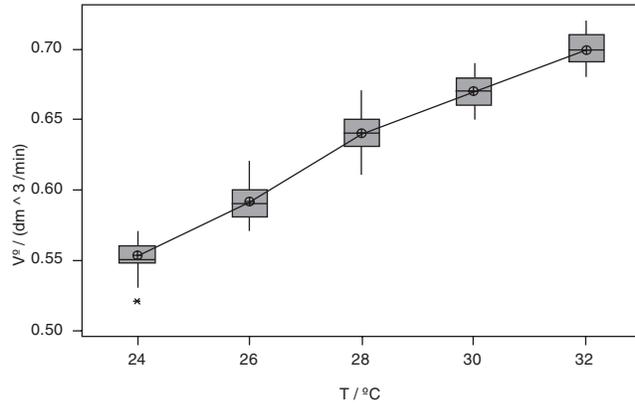


Figura 2. Tasa de hidrógeno y oxígeno en función de la temperatura con una concentración 0.4M de KOH

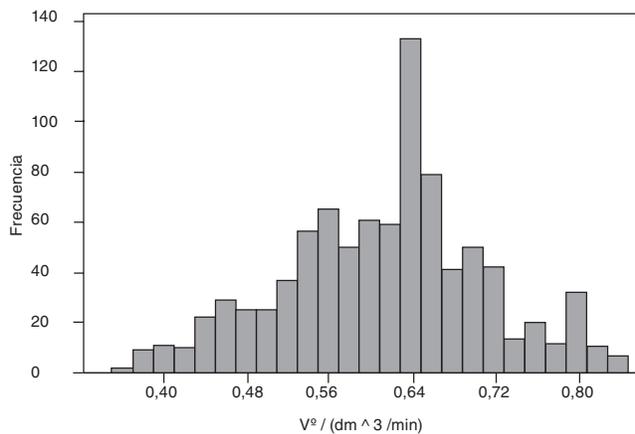


Figura 3. Distribución global de flujo volumétrico de gases producidos.

El análisis de varianza para el experimento evalúa la significancia sobre la producción gaseosa utilizando el estadístico F de Fisher.

Tabla I. Análisis de varianza transformado.

Fuente de variación	F	P
Electrolito (bloque)	541.28	<0.0001
Concentración	61.35	<0.0001
Temperatura	499.5	<0.0001
Corriente eléctrica	0.77	0.3797
Conductividad eléctrica	97.08	<0.0001

Los valores de F y su probabilidad permiten discriminar los factores que no presentan efecto significativo, en este caso la corriente eléctrica es eliminada y el modelo de predicción obtenido presenta dos ecuaciones para cada soluto en solución, KOH y NaOH respectivamente:

$$\left(\frac{\dot{V}}{\text{dm}^3/\text{min}}\right) = K * e^{\left(\frac{-1745}{T/K}\right)} * \left(\frac{C_0}{\text{mol}/\text{dm}^3}\right)^{-5.5 + \frac{1643}{(T/K)}} * \left(\frac{\frac{k_E}{\text{mS}/\text{mm}}}{\sqrt{\frac{C_0}{\text{mol}/\text{dm}^3}}}\right)^{0.7379}$$

donde:

\dot{V} : flujo de oxígeno e hidrógeno en dm^3/min

T : temperatura en grados Kelvin

C_0 : concentración inicial de electrolito en mol/dm^3

k_E : conductividad eléctrica en ms/mm

K : constante empírica de 251.14 para el KOH y 233.2 para NaOH

Discusión de resultados

El experimento diseñado describe aceptablemente el comportamiento de la producción de hidrógeno y oxígeno del reactor, con una potencia significativa en el rango de temperaturas y concentraciones antes expuesto. Las variaciones muestran hipotéticamente que la temperatura afecta al acelerar las partículas contra las placas del reactor y la presencia del electrolito aumenta la velocidad del proceso. El modelo de Arrhenius (Atkins, 1991, p. 863) y el de Debye-Hückel (Levine, 2004, p. 365) postulan suposiciones que no provocan desviaciones impor-

tantes del comportamiento experimental, ya que están basadas en la probabilidad de colisión exitosa para una transformación molecular.

El análisis gráfico y algunas pruebas sobre los residuos del modelo de predicción (Navidi, 2006, p.634) muestran que estos se comportan en forma significativamente normal y homosedástica, lo que le confiere validez. La co-variable de la corriente eléctrica es considerada un factor irrelevante posiblemente porque se asocia al paso de cargas por el circuito del reactor, lo que también es descrito numéricamente por la conductividad eléctrica del medio acuoso, que es la principal resistencia.

Conclusiones

Para los intervalos establecidos en cada factor se puede afirmar lo siguiente para el reactor analizado.

1. El efecto de la temperatura y la concentración son significativos y presentan una mayor producción gaseosa en sus valores máximos.
2. El diseño anidado con dos covariables y un bloqueo en la identidad de la sustancia, permite describir diferencias significativas en la producción de hidrógeno.
3. Las transformaciones logarítmicas e inversas para los modelos de Arrhenius y Debye-Huckel, presentan un mejor ajuste para las ecuaciones de predicción que un modelo lineal generalizado, explicando hasta un 85.78% de su variabilidad.

Recomendaciones

Para continuar una investigación más profunda, se recomienda lo siguiente:

1. Introducir la temperatura como una co-variable más, ya que el reactor presenta un calentamiento natural de sus conductores.
2. Adicionar al modelo experimental diferentes variables de diseño, que puedan optimizar el uso de materiales y factores de forma.

Referencias bibliográficas

- Atkins, P., (1991). *Fisicoquímica*. (3ª ed.). Delaware, E.U.A.: Editorial Addison-Wesley Iberoamericana.
- Levine, I., (2004). *Fisicoquímica*. (5ª ed.). Madrid, España: Editorial McGraw-Hill.
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. (2ª ed.). México D.F., México: Editorial Limusa Wiley.
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. (1ª ed.). México D.F., México: Editorial McGraw-Hill.

Información del autor

Ingeniero Químico, William Eduardo Fagiani Cruz, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011.

Maestro en Artes en Estadística aplicada, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018.

Afiliación laboral: Área de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.