

## Producción de biohidrógeno en un reactor continuo UASB

### *Biohydrogen production in a UASB continuous reactor*

Ing. Sergio A. Morales-Hernández<sup>III</sup>, MSc. Pavel Rizo-Acosta<sup>I</sup>, Dra. C. María E. Hernández-Rojas<sup>II</sup>, Dr. C. José A. Dávila-Gómez<sup>III</sup>

01samh@gmail.com, pavel601@gmail.com, mariahrojas@hotmail.com,  
jadg@azc.uam.mx,

<sup>I</sup>Instituto Mexicano del Petróleo; <sup>II</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Lerma;  
<sup>III</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, D. F., México

Recibido: septiembre 2014

Aprobado: octubre 2014

---

### Resumen

Este trabajo fue realizado con enfoque de reactores químicos. Un reactor anaerobio de lodos de flujo ascendente (UASB) fue operado continuamente, en dos periodos, por un total de 180 días, para producir hidrógeno por medio de la fermentación, utilizando como sustrato melazas diluidas y un método experimental de ascenso acelerado para la caracterización de las respuestas. El inóculo provino de lodos activados. En el primer periodo (60 d), se determinaron las condiciones de temperatura, pH, parámetros Gompertz de cinética de reacción, así como de las condiciones sin recirculación de alimentación y entrega. El segundo periodo, retomado en este trabajo, se dividió en cinco etapas: la primera, de estabilización de las condiciones con recirculación y las cuatro restantes de manipulación de factores significativos: tasas de alimentación y de recirculación. El rendimiento promedio de resultados muestra que la velocidad de recirculación y el flujo de alimentación regulan el comportamiento del reactor.

**Palabras clave:** hidrógeno, biorrefinería, fermentación anaeróbica, reactor UASB, ecuación de Gompertz.

### Abstract

This paper was carried out with chemical reactors approach. An anaerobic reactor of sludge upflow (UASB) was continuously operated in two periods, for a total of 180 days, to produce hydrogen by fermentation, using as substrate, diluted molasses and an experimental method of accelerated promotion for responses characterization. Inoculum was obtained from active sludge from a residual waste water treatment. In the first period (60 d), the conditions of temperature, pH, reaction kinetics Gompertz parameters (critical initial time, maximum rate and max production plafond) and conditions without recirculation supply and delivery were determined. Second and last period was divided in five stages: the first one, continuous feed and recirculating flow conditions stabilization and four stages on manipulating significant factors like feeding and recirculation rates. Average results performance showed that both, recirculation rate and feeding flow have effect on the reactor behavior.

**Keywords:** hydrogen, biorefinery, anaerobic fermentation, UASB reactor, Gompertz equation.

## Introducción

### *Hidrógeno, importancia del método y pureza*

Debido al interés mundial por obtener hidrógeno en grandes cantidades, una opción económica, viable y, a la vez, competitiva respecto a la reformación de hidrocarburos, es obtenerlo “sucio”, es decir, mezclado con otros componentes producidos en equilibrio por las múltiples reacciones químicas y biológicas en las que participa.

La mayoría de las aplicaciones actuales biológicas y químicas, digestores y reactores batch, por lotes, presentan la desventaja de pequeñas escalas y seguimiento obligatorio permanente durante el tiempo de reacción-operación. Trabajar en continuo permite manipular grandes volúmenes con seguimientos periódicos no continuos, por ejemplo, chequeos diarios y correcciones esporádicas. Se ahorra tiempo-operador y seguridad en continuo, ejemplo de ello es la degradación de aguas residuales de alto contenido orgánico y la revalorización de desechos industriales, que han permitido disminuir los impactos al medioambiente. En el trabajo que se reporta, se trabajaron, en dos periodos, un total de 180 días continuos en un reactor experimental de laboratorio de vidrio UASB, equivalente a un total de 60 experiencias “por lotes”, de tres días de seguimiento constante cada una, con atención de dos a tres horas diarias de lunes a viernes solamente.

La tabla 1 muestra algunos usos de interés de biogás hidrogenado, orientados al resultado de este trabajo [1, 2].

**TABLA 1. USOS DE INTERÉS DEL BIOGÁS  
HIDROGENADO**

Combustión para producción de energía
Previa purificación (+O <sub>2</sub> )
• CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub>
Celdas de hidrógeno sucio PEMFC
• CO <sub>&lt;5%</sub> + H <sub>2</sub> ⇌ 2H <sup>+</sup>
Híper-combustión de mezclas H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> (1:1 a 4:1)
Reacción de gas húmedo:
• CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> ⇌ CO + H <sub>2</sub> O
Reacción de Paul Sabatier
• CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> ⇌ 2H <sub>2</sub> O + CH <sub>4</sub> (1:4)
Reacción de Bosch
• CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> ⇌ 2H <sub>2</sub> O + C (1:2)

Si bien estas reacciones, salvo la primera, son de equilibrio con catalizadores y temperaturas controladas, las energías de activación permiten pasar de un sentido al otro, como ha sido mostrado en los trabajos referenciados.

### ***Reactores anaeróbicos***

Los reactores anaeróbicos han sido objeto de estudio desde la década de 1960 [3, 4], gracias a que contribuyen a la degradación de aguas residuales y recuperan energía en forma de biogás. Uno de los reactores que se ha mantenido desde la década de 1970 ha sido el reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), debido a su bajo costo operacional y baja generación de lodos, por lo que ha sido renovado con aproximadamente 3 000 escalamientos de exitosos reactores basados en esta tecnología [5].

La necesidad de producir hidrógeno para múltiples aplicaciones se ha visto incrementada en los últimos años [6]; sin embargo, son necesarios otros tipos de tecnologías, ya que no se obtiene de forma natural. Para algunos, la quema de este material es un buen sustituto para la quema de combustibles fósiles, debido a su combustión limpia, por lo general al 100 %, y a que es reciclable en potencia. Una tecnología que ha sido estudiada para producir dicho combustible por métodos biológicos, es la de fermentación oscura de aguas residuales con diferentes tipos de inóculos mixtos. Smith y Gibson [7] realizaron la producción de H<sub>2</sub> por fermentación a través de *clostridium* sp. y *enterobacter* sp. El proceso se conoce como "fermentación oscura". Las bacterias anaeróbicas similares mostraron valores interesantes de concentración de H<sub>2</sub> en el biogás producido.

Los procesos anaeróbicos permiten la recuperación de una fracción importante de la energía de entrada en forma de biogás (H<sub>2</sub> o CH<sub>4</sub>), además de presentar una operación más fácil de realizar, la producción anaeróbica se asocia principalmente con reacciones enzimáticas, con las que normalmente se obtiene una tasa de producción significativa de H<sub>2</sub>.

Los reactores UASB han tenido éxito en el tratamiento de aguas residuales industriales de alta resistencia, ya que trabajan con sustratos hidrolizables, tales como residuos de la industria del azúcar, residuos de destilería y residuos cerveceros [8, 9]. Diferentes reportes han sugerido otras aplicaciones de la tecnología UASB, como en el tratamiento de clorofenoles [10], la desformización de aguas residuales, entre otros [11-13]. El proceso UASB para el tratamiento de aguas residuales sufre de una serie de

deficiencias, tales como el momento de la puesta del sol, la producción de gas con grandes proporciones de gases indeseables, baja susceptibilidad a cargas de impacto y la erosión del gránulo [14]. Los intentos de resolver estos problemas se encuentran en la actualidad entre las principales iniciativas que se toman para mejorar el alcance de la tecnología UASB [15].

En la primera fase del presente trabajo, Sandoval y Yáñez [16] trabajaron en el reactor UASB continuo de esta segunda fase con un volumen activo de 1,9 L, operado a una temperatura de 33 °C. Se controló el pH mediante la adición de NaHCO<sub>3</sub> en la alimentación, con el objetivo de mantener el pH en el reactor en un promedio de 5,5. Estos investigadores encontraron valores ideales de las condiciones del reactor, tales como: pH de 5 y temperatura de 35 °C.

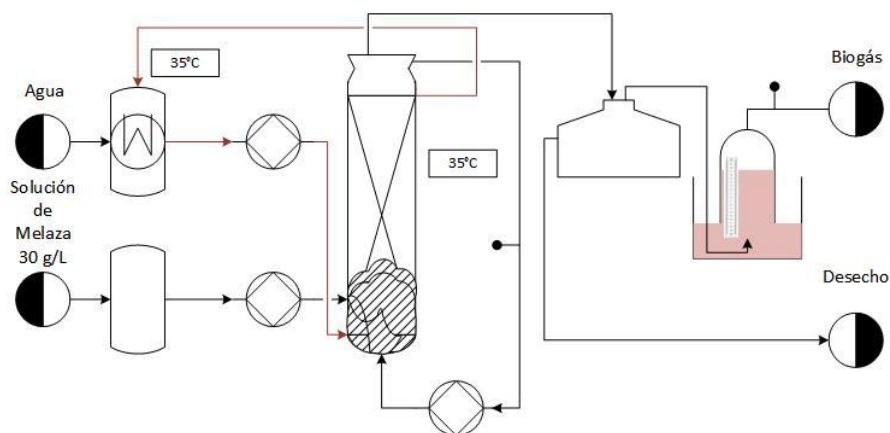
Por lo tanto, se decidió llevar a cabo una nueva fase de estudio, con el objetivo de determinar las condiciones de operación requeridas en un fermentador UASB, con altas relaciones de H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> como producto, empleando melaza como sustrato; basado en el estudio cinético de la velocidad potencial y la producción de lotes de hidrógeno [10]; se manipularon las variables pH, tiempo de residencia y concentración anaeróbica de inóculo, lo que evidenció el impacto que tiene el factor de recirculación como técnica para el aumento del mezclado dentro del reactor.

En el biogás producido en el reactor UASB por la digestión del sustrato, se comprobó la producción de biogás que estudió la relación de hidrógeno en el dióxido de carbono. Esto se realiza para avanzar en el estudio de un reactor en la planta piloto, así como proporcionar biogás de experimentación, que podría ser utilizado en paralelo, aplicándolo en ensayos de hiper-combustión o ser usado en las celdas de hidrógeno que aceptan hidrógeno sucio, también estudiadas por el grupo de investigación [17].

### *Equipo y procedimiento experimental*

Como se muestra en la figura 1, el reactor está conformado por un cilindro de vidrio con una chaqueta para el control de temperatura, altura efectiva de 40 cm y radio de 4 cm, que se alimenta por la primera y la segunda entradas en la base. La primera entrada pertenece al reciclado, y la segunda a la solución de melaza. Consiste de dos salidas en la parte de la cúpula: la primera, para la salida de recirculación y la segunda, sin retorno, conectada a un matraz Erlenmeyer de 250 mL, que lleva consigo el flujo de salida de efluentes líquido y gaseoso. Este último se encuentra conectado a una trampa. Por la parte superior del matraz sale el gas, que pasa luego a un estanque con solución acuosa

salina saturada, para allí ser atrapado y medido su volumen desplazado cada 24 h. La melaza y el inóculo se introducen por la parte inferior del reactor en función de la corrida experimental y las necesidades de operación del mismo.



**Figura 1. Diagrama del reactor**

Para la operación del reactor se necesitaron tres bombas: la primera para la alimentación de la solución de melaza fresca, la segunda para la recirculación y la última para el control de la temperatura (con circuito externo de agua). Todas las conexiones hacia y desde el reactor fueron de látex y las mangueras internas de las bombas peristálticas, de tygon.

A partir de las últimas condiciones del primer periodo de prueba, se propuso un diseño de experimentos para determinar la dirección del ascenso acelerado hacia las mejores condiciones de operación-entrega de biohidrógeno.

La tabla 2 muestra las condiciones de operación de las cuatro etapas del segundo periodo de 120 días de experimentación en el reactor UASB, cuyos resultados se reportan.

**TABLA 2. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LAS DIFERENTES ETAPAS EXPERIMENTALES**

Etapa/ términos	Flujo de alimentación ( <i>mL/min</i> )	Flujo de recirculación ( <i>mL/min</i> )	Carga volumétrica ( <i>g/Ld</i> )	Velocidad de ascenso ( <i>m/h</i> )
1	0,66	18,0	9,3	0,36
2	0,66	12,0	9,3	0,24
3	1,26	12,0	8,0	0,24
4	1,26	18,0	8,0	0,36

La aplicación del diseño de experimentos requiere una codificación de datos, la cual se realizó de la forma  $F^n$ , donde  $F$  es 2: flujo de alimentación (FA) y flujo de recirculación (FR), y  $n$ , de igual manera, fueron dos, ya que se experimentó con un nivel bajo y un nivel alto para cada factor, por lo que el valor de flujo de alimentación de 0,66 pasó a -1, y su valor homólogo mayor a +1, de manera análoga el valor de 18 del flujo de recirculación pasó a +1 y su inferior a -1. La experimentación codificada quedó como se muestra en la tabla 3.

**TABLA 3. CONDICIONES DE OPERACIÓN  
FACTORIZADAS**

Corrida/ Factores	FA alimentación	FR recirculación
1	-1	1
2	-1	-1
3	1	-1
4	1	1

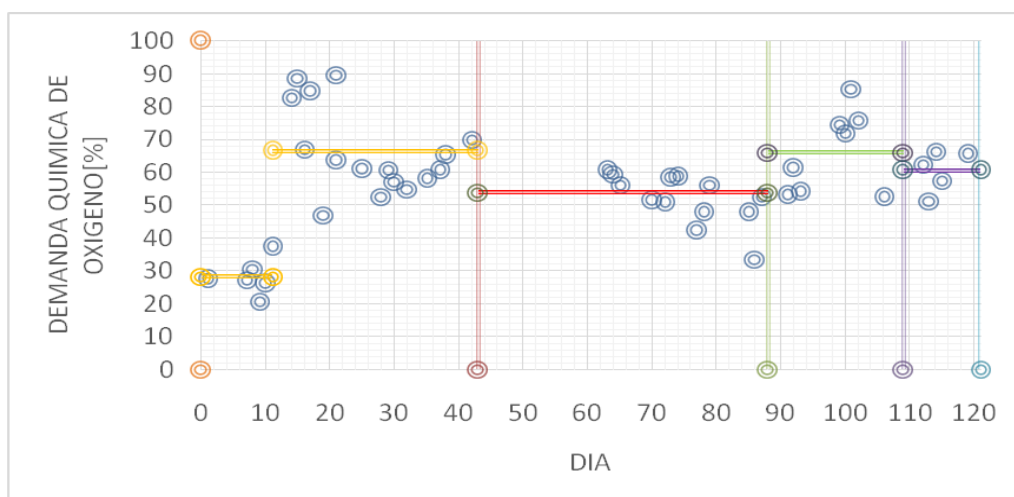
## Resultados experimentales y discusión

La duración total de estos experimentos fue de 120 días de acuerdo con las etapas en que se dividieron. Cada una de ellas tuvo una duración variable en función de la calidad de las muestras diarias obtenidas. Así, la primera y la segunda etapas o corridas experimentales 1 y 2 se realizaron en seis semanas cada una; la tercera, 3, en tres semanas y la cuarta, 4, en dos.

Los análisis realizados sobre las alícuotas diarias fueron: demanda química de oxígeno, carbohidratos, gases del biogás: hidrógeno, dióxido de carbono (por separado) y volumen total de biogás diario producido.

### *Degradación de DQO*

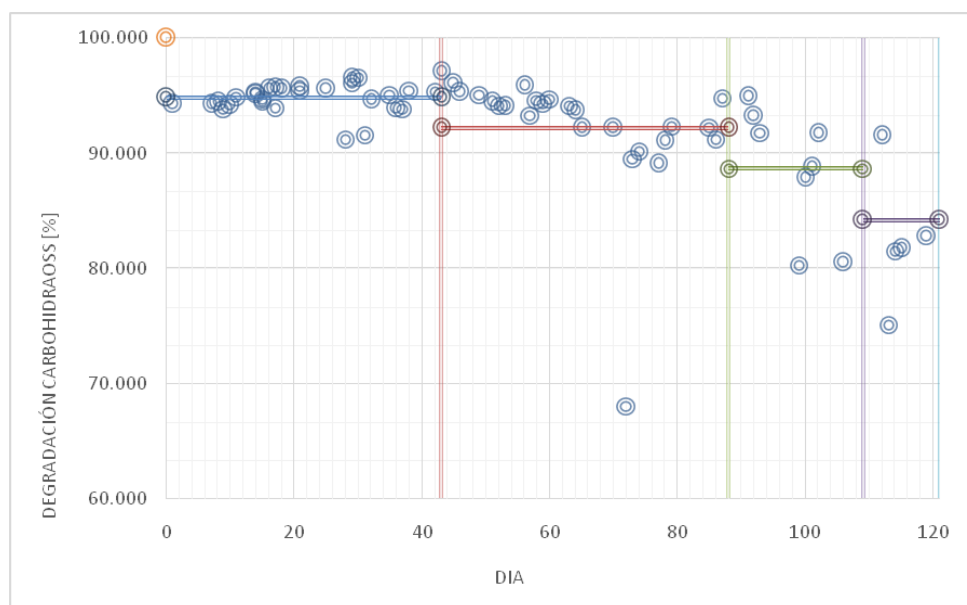
La demanda química de oxígeno DQO se determinó por el método de reflujo cerrado de acuerdo con "Standard Methods". Las muestras se centrifugaron a 10 000 rpm durante 25 min, y se tomaron 2 mL del sobrenadante para los análisis, al cual se le adicionó 1 mL de solución digestora y 2 mL de solución catalítica; se colocó 2 h en una parrilla a 150 °C, se dejó enfriar y se midió su absorbancia a 620 nm. La figura 2 muestra la determinación del DQO obtenida para el conjunto de las etapas.



**Figura 2. Determinación por DQO**

### *Degradación de carbohidratos*

Se determinaron por el método fenol-sulfúrico. Las muestras se centrifugaron a 10 000 rpm durante 25 min, y se tomó 1 mL de sobrenadante para el análisis. Al 0 mL de sobrenadante se le adicionó 1 mL de fenol al 5 % y 5 mL de ácido sulfúrico concentrado con sulfato de hidracina al 0,5 % (esta última fue ingresada lentamente por las paredes). Se mezcló con cuidado y se dejó enfriar durante 10 min con ayuda de agua corriente. La absorbancia se determinó a 490 nm. La figura 3 muestra la degradación diaria de carbohidratos obtenida para el conjunto de las etapas.



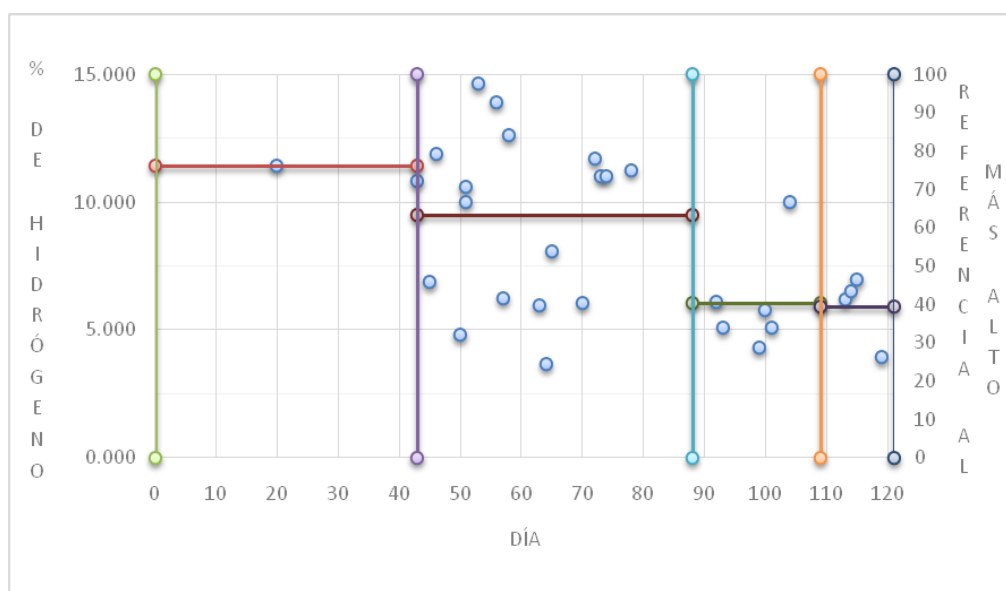
**Figura 3. Determinación de degradación de carbohidratos**

### *Cromatografía de hidrógeno*

Para analizar la composición del biogás producido se utilizó un cromatógrafo de gases, al cual se le introdujeron las alícuotas gaseosas tomadas del domo del contenedor de

biogás, las que, posteriormente, se almacenaron y etiquetaron en tubos de vidrio, con solución salina. El cromatógrafo de gases fue un GOW-MAC, serie 560; el gas acarreador que se empleó fue nitrógeno, con un flujo de 40 mL/min a una presión de 40 psi. Las temperaturas de operación fueron: 140 en columna, 120 en detector, 120 en inyector; el software que se usó fue Clarity. La duración de las corridas fue de 8 min; se ingresaron 100 µl de muestra.

En la figura 4 se presentan los valores de la concentración volumétrica del hidrógeno en el biogás. Se obtuvo que, en la primera etapa, el valor promedio fue de 11,4 % durante seis semanas, en la segunda bajó a 9,5 %, mientras que en las últimas dos descendió hasta 6 %.



**Figura 4. Determinación diaria de calidad de hidrógeno (%)**

#### *Volumen producido de biogás*

La determinación del volumen de gas se realizó por determinación directa. Se cuantificó diariamente y corrigió cada 24 h. Los resultados son mostrados en la figura 5. Se observa que la etapa 1 muestra el menor valor promedio de gas producido (474 mL/día), y que conforme aumentan las etapas aumenta la producción de biogás hasta llegar, en la etapa 4, al valor máximo del conjunto experimental (1 091 mL/día).



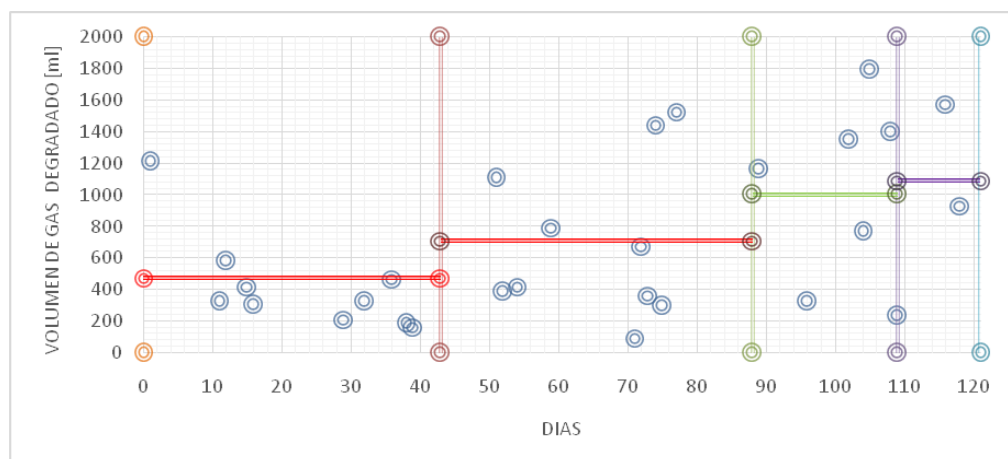


Figura 5. Volumen de biogás producido, extrapolado a 24 h

*Análisis general*

En la tabla 4 se concentran los resultados de las etapas y sus análisis y determinaciones. En la etapa uno se obtuvieron los máximos valores de degradación DQO, carbohidratos y concentración de hidrógeno, y el valor mínimo de la producción de biogás, por ende, la producción de hidrógeno se ve afectada. Asimismo, se revela el menor valor de las cuatro etapas. Por el contrario, en la etapa 4 se observan los valores menores para el promedio de las tres primeras determinaciones, sin embargo, debido a la máxima producción de biogás, su resultado de producción de hidrógeno es el segundo mejor indicado. La corrida dos, según experiencia, muestra la mejor producción de hidrógeno diario, no obstante, sus valores analíticos y de producción de biogás son intermedios.

Como conclusión preliminar de estos resultados puede afirmarse que respecto al comportamiento general del reactor se observa que a mayor tiempo de acción, la degradación de la melaza disminuye, así como la calidad del hidrógeno en el biogás; este desempeño en descenso permite explorar los aspectos tipo de reposición de microorganismos de los lodos activados o rejuvenecimiento.

**TABLA 4. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS**

1. Etapa	2. Factor 1 (FA)	3. Factor 2 (FR)	4. DQO (%)	5. CH (%)	6. H <sub>2</sub> (%)	7. Biogás (mL/día)	8. Hidrógeno (mL/día)
1	0,66	18,0	66,43	94,83	11,43	474,1	54,18
2	0,66	12,0	53,92	92,18	9,50	710,1	67,45
3	1,26	12,0	66,05	88,63	6,05	1 004,5	60,77
4	1,26	18,0	60,60	84,18	5,90	1 091,2	64,38

En la tabla 4 se muestran todos los resultados promedio obtenidos durante los 120 d de operación del segundo periodo de experimentación del reactor UASB, con los factores FA (F1) y FR (F2) decodificados. Se observa que en las columnas cuarta y quinta, los términos de degradación DQO y de carbohidratos (CH) tienden a disminuir al disminuir la recirculación relativa (FR/FA); por otro lado, en la sexta columna se muestra que al aumentar esa misma recirculación se obtiene un biogás con mayor concentración de H<sub>2</sub>, pero, a la vez, el biogás disminuye y se obtiene la menor producción de biogás (séptima columna). Finalmente, en la octava columna se tiene la producción neta promedio de hidrógeno, expresada en mL/día (54 a 67 mL/día).

Los algoritmos de las respuestas hidrógeno producido por día (columna 8) y calidad de hidrógeno, %<sub>v</sub> en el biogás (columna 6), son:

$$H_2 \text{ (mL/día)} = 61,695 + 0,880FA - 2,145FR \quad (1)$$

$$\%_v H_2 \text{ (en biogás)} = 8,220 - 2,245FA - 0,445FR \quad (2)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones 1 y 2, se deberá continuar con el ascenso acelerado, disminuyendo el flujo de recirculación e incrementando el tiempo de residencia, es decir, disminuir la velocidad del flujo dentro del reactor UASB, para así llegar al óptimo deseado, el cual es obtener más biogás con una calidad de hidrógeno alta. La figura 6 muestra la proyección de las cuatro etapas respecto a la búsqueda de un máximo en la ruta del ascenso acelerado. En ella se sugiere que tal ruta se encuentra en las inmediaciones del punto C2.

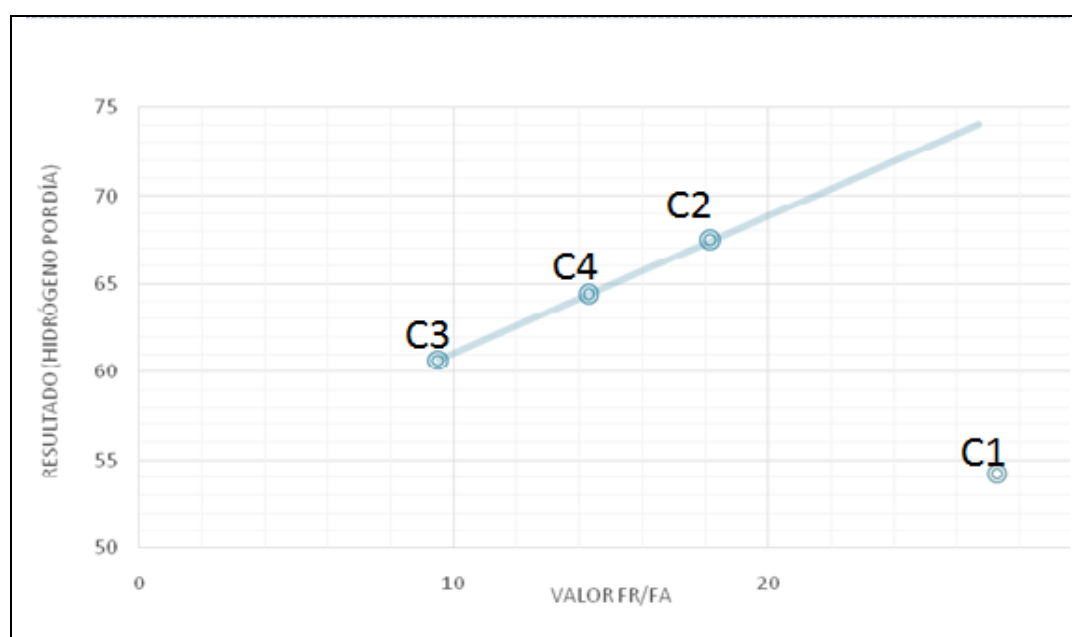
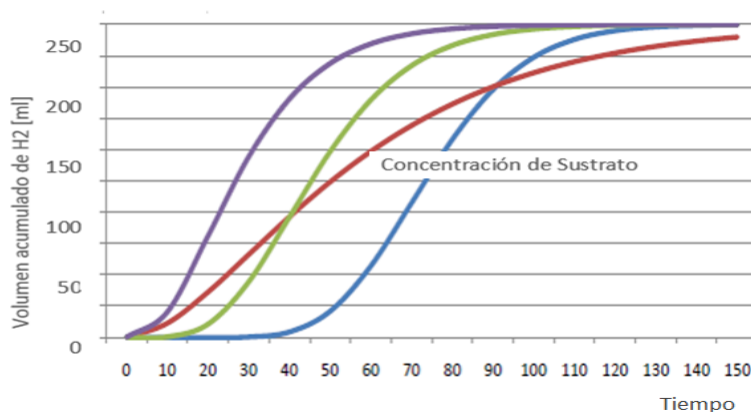


Figura 6. Análisis del diseño de experimentos

La figura 7 muestra lo correspondiente a la cinética de la reacción, obtenida en un biorreactor agitado por lotes y representada por la ecuación de Gompertz (3).

$$H(t) = H_{m\acute{a}x} \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{R_{m\acute{a}x} * e}{H_{m\acute{a}x}} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (3)$$



**Figura 7. Representación de la cinética de la fermentación oscura por Gompertz**

Los parámetros calculados de los estudios por lotes realizados por Sandoval y Yáñez [16] fueron el tiempo de latencia de producción de H<sub>2</sub> ( $\lambda$ ), la tasa de producción de H<sub>2</sub> (R) y el potencial máximo de producción de hidrógeno (H<sub>máx</sub>); de tal forma que, dependiendo del inóculo y su tratamiento, así como de la concentración de melaza y pH, sus valores pueden variar de acuerdo con:

$\lambda = 7$ a $14,6$ h	R = $6,7$ a $7,6$ mL/h	H <sub>máx</sub> = $228$ a $265$ mL
--------------------------	------------------------	-------------------------------------

En la figura 8 se exponen los valores cinéticos para dos concentraciones típicas de sustrato evaluadas por Sandoval y Yáñez, previamente citados, y que enmarcan las empleadas en el presente trabajo, indicadas, sin embargo, como el rectángulo interior; es decir, muestran un comportamiento similar al de los reactores continuos de tanque agitado (CSTR), esto deriva de la disposición con recirculación. Allí puede observarse que existe un potencial para incrementar la producción de hidrógeno de 60, promedio de estas cuatro experiencias, a un valor entre 150 y 250 mL/día, una vez realizada la mejora de la operación exclusivamente.

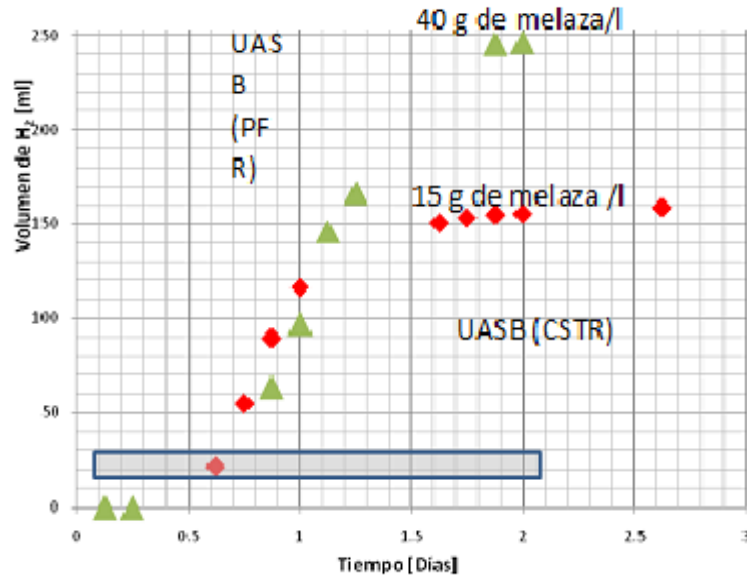


Figura 8. Cinética Gompertz (reactor PFR s/rec), contra resultados (CSTR-UASB c/rec)

## Conclusiones

*El estudio de la producción de biohidrógeno en un reactor UASB con recirculación, por medio del empleo de fermentación anaerobia oscura de carbohidratos de melaza como sustrato, y trabajando en experimentación factorial con variación del caudal de reflujo y el flujo de carga orgánica, determinó como factor de mayor incidencia la velocidad de reflujo, así como la existencia de una relación de los parámetros “recirculación a alimentación”, la cual influye en su producción en continuo.*

*Por su parte, el análisis de los resultados promedio demostró que tanto la velocidad de recirculación, como el caudal de alimentación fresca, tienen efecto en el comportamiento del reactor. El primer cambio fue la modificación del flujo tipo tubular (PFR) del reactor, cuando no existía recirculación, al de tanque agitado (CSTR), al introducirla; el segundo, que la producción continua de hidrógeno en el reactor con recirculación muestra un potencial aún no alcanzado, es decir, podría incrementarse hasta el orden de cuatro veces la producción promedio obtenida si se incrementa el tiempo de residencia en el reactor, de manera que se asegure la calidad de la recirculación.*

## Agradecimientos

Al PROMEP por el apoyo económico para realizar del presente trabajo a través del proyecto UAM-PTC-414 titulado "Producción de hidrógeno y metano mediante digestión anaerobia en dos fases utilizando desechos sólidos de frutas y verduras".

## Referencias bibliográficas

1. CRUZ ARREOLA, SERGIO, Estudio de una celda de combustible tipo PEM alimentada con hidrógeno parcialmente purificado y oxígeno del aire, Asesores: G. Vázquez Huerta y J. A. Dávila Gómez, UAM-Azcapotzalco, Proyecto de Integración IQ, 2012.
2. ARENAS BRISEÑO, SALVADOR OSVALDO, Evaluación de catalizadores anódicos nanoestructurados de platino para celdas de combustible tipo PEM utilizando hidrógeno puro y contaminado con CO, Asesores G. Vázquez Huerta y J. A. Dávila Gómez, UAM-Azcapotzalco, Proyecto de Integración IQ, 2014.
3. YOUNG, J. C.; MCCARTY, P. L., "The anaerobic filter for wastewater treatment", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1969, 41, 160-166.
4. BLONSKAJA, V.; MENERT, A.; VILU, R., "Use of two-stage anaerobic treatment for distillery waste", *Advances in Environmental Research*, 2003, 7, 671-678.
5. LETTINGA, G.; HULSHOFF, L. W., "UASB, process design for various types of wastewaters", *Water Science and Technology*, 1991, 24, 87-107.
6. EIA - U. S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, Annual Energy Review 2011, U. S. Department of Energy, DOE/EIA-0384(2011), September 2012.
7. SCHMID, E.; GIBSON, J., "Microorganisms and methods for increased hydrogen production using diverse carbonaceous feedstock and highly absorptive materials", USA, US Patent 2009/0137013.A1.
8. LETTINGA, G.; VAN VELZEN, A. F. M., *Anaerobic treatment of low strength wastewater (in Dutch)*, England, Wiley, 1994.
9. ABBASI, T.; ABBASI, S. A., "Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14, 919-937.
10. ABBASI, T.; ABBASI, S. A., *Renewable energy sources: their impact on global warming and pollution*, New Delh, 2010, ISBN 978-81-203-3994-1.
11. ARSHAD, A.; HASHMI, H. N.; QUREASHI, I. A., "Anaerobic digestion of chlorphenolic wastes", *International Journal of Environmental Research*, 2011, 5 (1), 149-158.
12. EL-KAMAH, H.; MAHMOUD, M.; TAWFIK, A., "Performance of down-flow hanging sponge (DHS) reactor coupled with up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor

for treatment of onion dehydration wastewater”, *Bioresource Technology*, 2011, 102 (14), 7029-7035.

13. TANG, C. J.; ZHENG, P.; WANG, C. H.; MAHMOOD, Q.; ZHANG, J. Q.; CHEN, X. G., et al. “Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge”, *Water Research*, 2011, 45 (1), 135-144.

14. JIN, R. C.; MA, C.; MAHMOOD, Q.; YANG, G. F.; ZHENG, P., “Anammox in a UASB reactor treating saline wastewater”, *Process Safety and Environmental Protection*, 2011, 89, 342-348.

15. VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G., “Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate”, Chichester, 1974, 7, 281.

16. SANDOVAL SANTA-ANA, M.; YÁÑEZ REYES, J. J., Estudio Cinético de un Reactor por Lotes para la Producción de Bio-Hidrógeno por Fermentación de Melazas, Asesores: María Elena Hernández Rojas y J. A. Dávila Gómez, UAM-Azcapotzalco, Proyecto de Integración IQ, 2014.

17. HERNÁNDEZ LÓPEZ, J. C., Hipercombustión de combustibles hidrogenados con dióxido de carbono como comburente, Asesor: J. A. Dávila Gómez, UAM-Azcapotzalco, Proyecto de Integración IM, 2014.