

FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LODOS DEL TRATAMIENTO DE AGUA Y OTROS DESECHOS

• Sergio Juárez-Hernández • Alejandra Castro-González* •
Universidad Nacional Autónoma de México

*Autor de correspondencia

Resumen

El proyecto *Ecovía* se desprende de una de las líneas de investigación del macroproyecto de la UNAM: “La Ciudad Universitaria y la Energía”, cuyo objetivo central es transformar a la Ciudad Universitaria (CU) en un modelo de uso eficiente de energía. El *Ecovía* es un automóvil híbrido, el primero en el ámbito nacional que funciona con baterías y celda de combustible de hidrógeno (H_2). La celda de combustible consume $10.6587 \text{ gH}_2/\text{min}$, que se traducen en diez millones de pesos al año. Para la producción del hidrógeno existe una tecnología innovadora llamada fermentación oscura de desechos orgánicos; por ello se propone una planta semi-industrial aplicando esta tecnología. Los lodos de desecho de la planta de tratamiento de aguas residuales de CU se estiman en 45 ton/día , que sumadas a los residuos orgánicos de una granja porcina y restaurantes de CU, alcanzan 46.18 ton/día , lo cual generará 14.2678 kgH_2 sin purificar, o bien 9.98746 kgH_2 a 99.999% de pureza, tal como lo exige la celda de combustible del *Ecovía*. La propuesta de la planta de hidrógeno, factible en términos técnicos, financieros y económicos, se estimó que requeriría cerca de 4.5 millones de pesos como inversión inicial, los cuales se recuperarían en el primer año de funcionamiento de la planta. Asimismo, se disminuirían los costos derivados de la recolección y el transporte de los residuos (\$1 540 080 pesos/año). La contribución ambiental del proyecto es la reducción de emisiones en $131.901 \text{ ton métricas de CO}_2$ equivalentes al día y la minimización de desechos sin tratamiento al medio ambiente.

Palabras clave: fermentación oscura, residuos, lodos, planta de tratamiento de aguas residuales, hidrógeno, factibilidad.

Introducción

Los combustibles fósiles han generado contaminación junto con el problema de que las reservas se están agotando. El hidrógeno produce sólo agua al quemarse cuando se utiliza como combustible o es convertido en electricidad (Wang y Wan, 2008a y b). Existen varias formas de producción de hidrógeno (Tanisho e Ishiwata, 1995; Sparling *et al.*, 1997; Tanisho *et al.*, 1998; Liang *et al.*, 2001; Mizuno *et al.*, 2000a). La producción de hidrógeno por métodos biológicos a partir de materia orgánica se considera como una de las más importantes

promesas alternativas para la producción de energía verde sustentable. Los procesos biológicos difieren de acuerdo con la presencia de luz, como el proceso de fotólisis o fotofermentación y los procesos independientes de la luz, como la fermentación oscura (Hallenbeck y Benemann, 2002). La fermentación oscura es un proceso en el cual la bacteria anaerobia utiliza compuestos orgánicos para producir hidrógeno en ausencia de luz. Este proceso tiene dos beneficios ambientales, tales como la reducción del desecho y la producción de energía. Asimismo, este proceso usa de manera principal materiales de desecho orgánicos, por lo

que recientemente ha incrementado la atención en varias investigaciones (Wang y Wan, 2008c; Kraemer y Bagley, 2004; Kim, 2002). Las fuentes utilizadas han sido aguas residuales de alta carga (Bolliger *et al.*, 1985; Liu *et al.*, 1995; Ueno *et al.*, 1996; Zhu *et al.*, 1999), desechos sólidos (Lay *et al.*, 1999; Mizuno *et al.*, 2000b) o algunas soluciones diluidas de melazas (Tanisho e Ishiwata, 1994), glucosa (Kataoka *et al.*, 1997; Lin y Chang, 1999), celulosa (Lay, 2001), peptona (Bai *et al.*, 2001) almidón (Lay, 2000) y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (Xiao y Liu, 2009; Gómez *et al.*, 2009; Lee y Ting, 2007). La mayoría de las tecnologías de bioproducción de hidrógeno se han llevado a cabo a escala de laboratorio. La implementación técnica para la producción de hidrógeno por luz hoy día está restringida por los requerimientos de espacio (Levin *et al.*, 2004). En la actualidad existen muy pocos estudios técnicos y económicos sobre bioproducción de hidrógeno (Liu *et al.*, 2005; Petrovic *et al.*, 2005; Hemmes *et al.*, 2003). Considerando las tasas de producción de hidrógeno que reportaron Levin *et al.* (2004), la fermentación oscura es el único método que tiene en el diseño dimensiones factibles para aplicaciones prácticas. En segundo lugar, la bioproducción de hidrógeno por fermentación oscura es una opción más interesante para la conversión de desechos orgánicos debido a su analogía con los sistemas de degradación anaerobia (Kapdan y Kargi, 2006) y actualmente hay estudios donde confirman su factibilidad comercial (Hawkes *et al.*, 2007). Por ello, en el presente estudio se planteó la factibilidad técnica, económica y ambiental para la implementación de una planta piloto para la producción de hidrógeno, a partir del tratamiento por fermentación oscura, utilizando los desechos de una planta de tratamiento de aguas residuales y otros residuos. El hidrógeno obtenido será utilizado por el auto *Ecovía*, que consume hidrógeno y electricidad para su operación, y que fue diseñado por la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Salinas-Flores, 2009). La planta de

hidrógeno proyectada abastecerá al auto como un modelo único en México.

Metodología

En la UNAM se encuentra un vehículo ecológico multifuncional (*Ecovía*), un automóvil híbrido, operado con electricidad e hidrógeno por medio de una celda de combustible. La celda de combustible tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*, por sus siglas en inglés), con un consumo de hidrógeno (H_2) teórico de 10.6587 g H_2 /min, con una pureza mayor o igual a 99.999%, comprimido a 41.37 MPa en un par de tanques de alta presión, con una capacidad máxima de 0.5 kg de H_2 cada uno. En Ciudad Universitaria (CU) se tiene una flotilla de 150 vehículos para la vigilancia de un área de más de 7 millones de m². Se espera que en un futuro, el *Ecovía* sustituya estas unidades que consumen gasolina, emitiendo aproximadamente 2.32 kgCO₂/L de combustible (Timilsina y Shrestha, 2009). El gasto económico del *Ecovía* es de 10.4 millones de pesos para operar ocho horas continuas por día durante un año. Por tal razón, es de suma importancia llevar a cabo un análisis de factibilidad para suministrar el hidrógeno necesario. En el cuadro 1 se aprecian los costos estimados de producción de hidrógeno de las principales metodologías disponibles a la fecha.

Potencial de los residuos orgánicos generados en CU para la producción de hidrógeno

La materia prima la constituyen los lodos o biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNAM (PTAR), la fracción orgánica de los residuos sólidos (FORS) de 16 comedores y seis barras de alimentos ubicadas al interior de CU, así como los residuos orgánicos (excremento) de una granja porcina de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM (FMVZ). Diariamente se dispondría de 46 184 kg (46.18 ton) de residuos orgánicos, integrados de la

Cuadro 1. Costos estimados de producción de hidrógeno de algunos de los métodos más representativos (adaptada de De Vrije y Claassen, 2005; Pant y Gupta, 2009; Sørensen, 2005).

Método de producción	Costo de producción estimado	Unidades	Año de la estimación
Reformación de gas natural	€ 0.32	Nm ³ de H ₂	2005
Electrólisis con electricidad convencional	€ 0.23	Nm ³ de H ₂	2005
Electrólisis con electricidad de bajas emisiones de CO ₂	€ 0.27 - 0.36	Nm ³ de H ₂	2005
Bioproceso de dos etapas (fermentación oscura-fotofermentación) utilizando biomasa	€ 0.25	Nm ³ de H ₂	2005
Reformación de biometano	€ 0.32	Nm ³ de H ₂	2005
Electrólisis con electricidad generada a partir de energía eólica	€ 0.25	Nm ³ de H ₂	2005
Electrólisis con electricidad generada a partir de celdas fotovoltaicas	€ 2.95	Nm ³ de H ₂	2005
Fermentación oscura de biomasa	€ 0.29	Nm ³ de H ₂	2005
Gasificación de carbón	US\$ 0.96	kg de H ₂	2003
Gasificación de biomasa y reacción de intercambio	US\$ 9.0 - 14.0	GJ de H ₂	2002
Pirólisis de biomasa	US\$ 3.80	kg de H ₂	2003
Rompimiento térmico de la molécula del agua utilizando energía nuclear	US\$ 1.63	kg de H ₂	2003
Algas fotosintéticas –mutación de <i>Rhodobacter sphaeroides</i>	US\$ 188.0 - 460.0	GJ de H ₂	2002

Nm³, metro cúbico normal.

forma siguiente: 1) lodos o biosólidos (LB) de la PTAR: 45 000 kg (97.43%), con 103 500 gDQO/día (DQO= demanda química de oxígeno) y, por tanto, 124.2 gH₂/día (Wang *et al.*, 2003); 2) FORS de los comedores: 848.4 kg (1.84%) y FORS de las barras de alimentos: 281.6 kg (0.61%), que siendo 150 mLH₂/g FORSM (Lay *et al.*, 1999), equivaldrían a 14.1436 kgH₂/día; 3) residuos orgánicos de la granja porcina (ROGP) de la FMVZ: 53.9 kg (0.12%), que generan 0.41 mmol H₂/L substrato (Thompson, 2008) y que equivaldría a 0.04463 gH₂/día.

Operaciones para la producción, almacenamiento y suministro de hidrógeno

Recepción, trituración de los desechos y depósito temporal. Los FORS se verterían en una tolva receptora que los conduciría hacia un triturador de 3 HP a 1 450 rpm, con una velocidad de 400 kg/h. Al concluir el proceso, se obtendría una mezcla y se almacenaría en un depósito temporal de 50 m³. Los ROGP y los LB se depositarían en el almacenamiento temporal.

Inóculo. El ROGP funciona como inóculo adecuado de generadores de hidrógeno. Se expondrían a un pre-tratamiento térmico a alta temperatura entre 80 y 100 °C, para eliminar las cepas de microorganismos consumidores de hidrógeno o hidrogenófilos (Campos *et al.*, 2005; Thompson, 2008).

Fermentador. Los parámetros a controlar más importantes son la temperatura, el pH y el mezclado (Wang y Wan, 2008d). El volumen del fermentador deberá ser de 260 m³, de forma cilíndrica, con un diámetro y altura de 8.71 m y 4.35 m, respectivamente. La fermentación oscura operaría a condiciones termofílicas (Shin *et al.*, 2004). Se utilizará un sistema de mezclado mecánico, con una velocidad de mezclado que no exceda las 120 rpm (Chia-Hung *et al.*, 2008). El intervalo de pH variará de 5.0 a 6.0 (Chen *et al.*, 2001; Fang y Liu, 2002; Khanal *et al.*, 2004; Lay, 2001). Una variación gradual del pH podría ocasionar el cese de la producción de hidrógeno (Dabrock *et al.*, 1992). Conforme la concentración de hidrógeno crece, la síntesis

de hidrógeno decrece; sin embargo, a medida que la temperatura se incrementa, el proceso es menos vulnerable a la concentración de hidrógeno (Levin *et al.*, 2004). La síntesis continua de hidrógeno a una temperatura de 60 °C requiere una presión parcial < 50 kPa (Lee y Zinder, 1988); a 70 °C, < 20 kPa (van Niel *et al.*, 2002), y a 98 °C, < 2 kPa (Adams, 1990). El biogás generado en el fermentador deberá extraerse con regularidad. La síntesis de hidrógeno alcanza un ritmo de hasta de 77 mmol H₂/h por litro de cultivo (Kumar y Das, 2002). Para la cantidad de residuos orgánicos disponibles de 14.2678 kgH₂/día se tendrá un volumen de cultivo (*L_c*) de 3 829.71 L. El TRH apropiado es de cinco días, dado que permitiría obtener el mayor volumen de hidrógeno sin que la concentración de alcoholes que inhiben la producción alcance niveles críticos (Lay *et al.*, 1999).

Sistema de separación, purificación y almacenamiento de hidrógeno. La tecnología de purificación conocida como PSA (*Pressure Swing Adsorption*, por sus siglas en inglés) es la que mejor calificaría para este propósito. El costo por almacenamiento en estado líquido es elevado (Carpetis, 1994; Schwarz y Amonkwah, 1993). Se propone el sistema de compresión y que se deposite en un tanque de almacenamiento con una capacidad de 70 kg y una presión de operación de alrededor de 24 MPa.

Estación de abastecimiento de hidrógeno. El sistema para el suministro del combustible utilizaría un segundo compresor, que aprovecharía la presión del hidrógeno contenido en el tanque de almacenamiento de la planta (24 MPa) para recargar con facilidad los depósitos presurizados del *Ecovía* a su presión nominal de 41.3678 MPa.

Desechos digeridos. Eventualmente, estas sustancias podrían ser convertidas también en hidrógeno por vía de otro proceso biológico, como la foto-fermentación o bien en metano (CH₄), por medio de un reactor anaerobio adicional (de Vrije y Claassen, 2005).

Análisis financiero

Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Mínima de Rendimiento Aceptable (TMRA)

$$VAN = -P + \frac{f_{NE1}}{(1+i)} + \frac{f_{NE2}}{(1+i)^2} + \frac{f_{NE3}}{(1+i)^3} + \frac{f_{NE4}}{(1+i)^4} + \dots + \frac{f_{NE n}}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Donde *P* se refiere a la inversión inicial del proyecto; *i* es la TMRA o costo del capital; *n*, el horizonte del proyecto, y *f_{NE}* son los flujos netos de efectivo.

Tasa Interna de Retorno (TIR)

$$P = \frac{f_{NE1}}{(1+i)} + \frac{f_{NE2}}{(1+i)^2} + \frac{f_{NE3}}{(1+i)^3} + \frac{f_{NE4}}{(1+i)^4} + \dots + \frac{f_{NE n}}{(1+i)^n} \quad (2)$$

Donde *i* representa la TIR.

Relación Costo-Beneficio (RCB)

$$RCB = \frac{\frac{f_{NE1}}{(1+i)} + \frac{f_{NE2}}{(1+i)^2} + \frac{f_{NE3}}{(1+i)^3} + \frac{f_{NE4}}{(1+i)^4} + \dots + \frac{f_{NE n}}{(1+i)^n}}{P} \quad (3)$$

Resultados y discusión

Factibilidad técnica

En la figura 1 se presenta el tren de tratamiento de los desechos hasta el aprovechamiento del hidrógeno. La capacidad de producción de hidrógeno, de acuerdo con las estimaciones realizadas, alcanzaría los 14.2678 kgH₂/día. Sin embargo, el sistema de separación y purificación PSA sólo recupera el 70% del hidrógeno presente en el biogás; la producción de hidrógeno, con el 99.999% de pureza para ser utilizado en el *Ecovía* será de 9.9874 kgH₂/

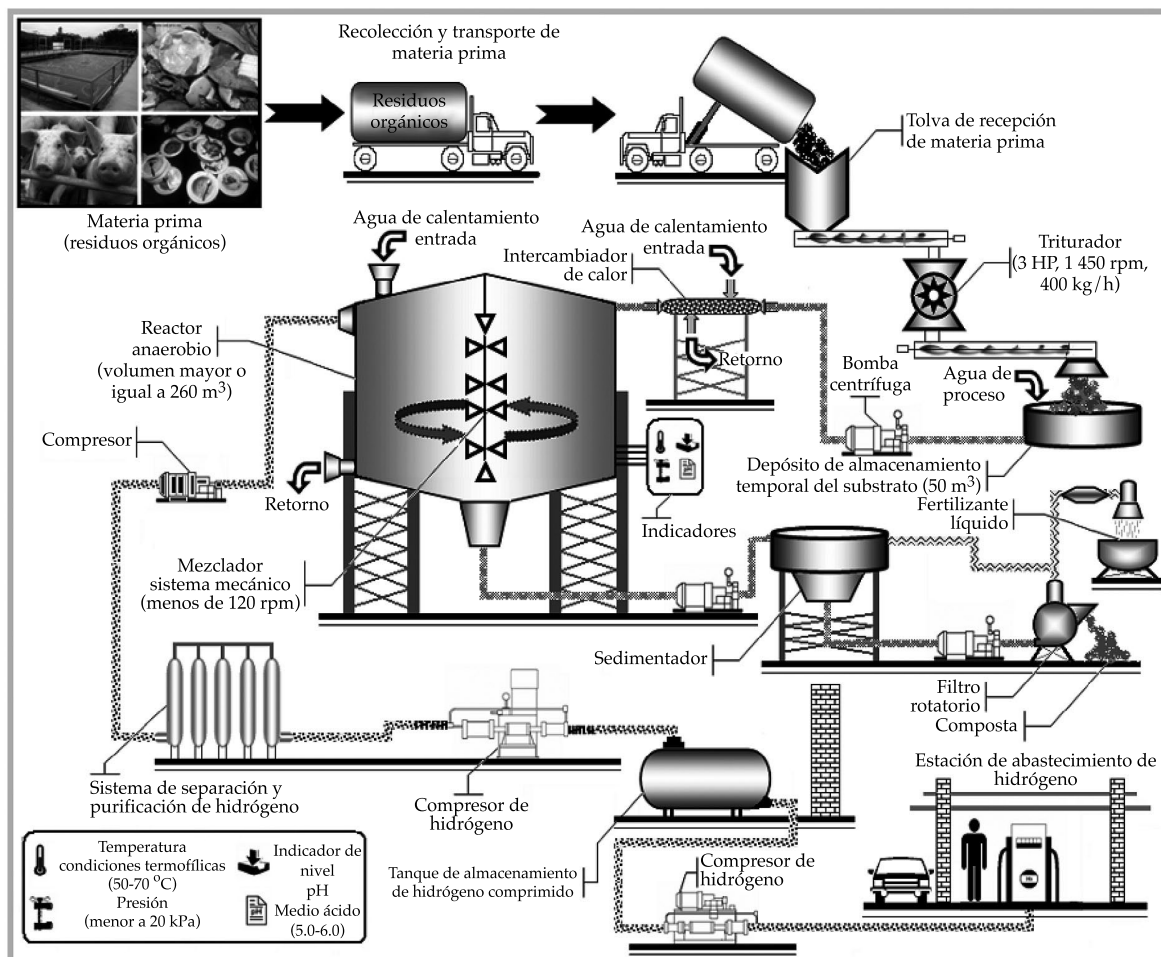


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de producción de hidrógeno mediante la técnica de fermentación oscura de residuos orgánicos.

día. En el cuadro 2 se presentan los valores estimados en relación con la capacidad de producción de hidrógeno de la planta.

Factibilidad ambiental

La producción de hidrógeno por fermentación oscura genera dióxido de carbono, producido en proporción 1:2 ($\text{CO}_2:\text{H}_2$ v/v), y que es reconocido como uno de los gases de efecto invernadero que contribuyen al agravamiento del fenómeno del calentamiento global. No obstante, puesto que el CO_2 proviene de materia orgánica, biomasa, se considera que

no hay emisiones netas de este gas, ya que se simula el ciclo natural del carbono, por lo tanto la fermentación oscura se clasifica como un proceso neutral de CO_2 (de Vrije y Claassen, 2005). La descomposición natural de la materia orgánica origina la emisión incontrolada de otro gas, el metano (CH_4), veinte veces superior al del CO_2 . El potencial máximo de generación de metano en un vertedero para residuos rápidamente degradables (RRD) depende de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, los residuos ganaderos y los fangos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que es de $0.20 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg RRD}$ (Campos *et*

Cuadro 2. Estimación de la capacidad de producción de hidrógeno.

Estimado de la disponibilidad de desechos		Estimado de la producción diaria de hidrógeno		Estimado de la producción anual de hidrógeno (217 días)
Residuos orgánicos de comedores y barras de alimentos: 1 130.04 kg/día (2.45%)	46 183.94 kg/día (100%)	Residuos orgánicos de comedores y barras de alimentos: 14.1436 kgH ₂ /día (99.1293%)	14.2678 kgH ₂ /día sin purificar (100%) 9.9874 kgH ₂ /día con el 99.999% de pureza	3 096.1126 kgH ₂ /día sin purificar
Residuos orgánicos de la granja porcina FMVZ-UNAM: 53.9 kg/día (0.12%)		Residuos orgánicos de la granja porcina FMVZ-UNAM: 0.04463 gH ₂ /día (0.0003%)		2 167.2788 kgH ₂ /día con el 99.999% de pureza
Biosólidos de la PTAR: 45 000 kg/día (97.43%)		Biosólidos de la PTAR-UNAM: 124.2 gH ₂ /día (0.8704%)		

al., 2005). De ahí que aprovechar 46.18 ton de residuos orgánicos de CU frena la emisión de metano en la proporción de 9 236.79 m³/día, es decir, 131.901 ton métricas de CO₂ equivalentes al día (EPA, 2009), lo cual representa una medida de seguridad y de política ambiental altamente efectiva.

Factibilidad económica

En el cuadro 3 se muestra un estimado de la inversión inicial. Para el costo capital anual de los equipos se asume que representa el 15% de su valor de adquisición, mientras que el gasto anual por concepto de energía equivale al 10% del mismo (de Vrije y Claassen, 2005). En el cuadro 4 se observan las estimaciones de los costos capitales y por consumo de energía por año de la planta de producción de hidrógeno, asumiendo como nulo el costo de adquisición de la materia prima y sin considerar los costos derivados del transporte de la materia prima y del pago al personal adscrito a la planta. Dado que se espera que la producción anual de hidrógeno al 99.999% de pureza alcance los 2 167.2788 kg y que los costos anuales totales de la planta asciendan a \$1 037 305.9, el costo

estimado de producción por kilogramo de hidrógeno resulta ser igual a \$478.62/kgH₂.

Factibilidad financiera

En la determinación del VAN del proyecto de la planta de hidrógeno, los flujos netos de efectivo serán por anualidades; los egresos están representados por las estimaciones de los costos totales por año (\$1 037 305.90 pesos) y se supondrá que éstos aumentarán cada año a un ritmo del 15%. El estimado de la producción de hidrógeno en el mismo lapso (2 167.2788 kgH₂/año) constituirá los ingresos de la planta, puesto que se traduce en el "ahorro" que se tendrá al evitar la compra del hidrógeno al precio comercial de \$4 688.43 pesos por 0.5 kg de H₂, y para el cual se contemplará un incremento del 5% anual. El horizonte del proyecto será de 15 años, periodo de vida máximo de la mayoría de los fermentadores. Si la TMRA es del 20%, el VAN es igual a \$129 948 717.00 pesos; en tanto que cuando la TMRA es del 40%, el VAN resulta ser de \$59 573 094.80 pesos. En ambos casos, el VAN es positivo, y se traduce en que la inversión sí se recuperaría a la TMRA correspondiente en un

Cuadro 3. Estimación de la inversión inicial para el proyecto
(adaptada de Amos, 1998; Castro, 2009; de Vrije y Claassen, 2005).

Equipo	Costo estimado	Equipo	Costo estimado
Triturador (3 HP, 400 kg/h)	\$129 794.00	Sedimentador (260 m ³)	\$293 603.00
Depósito de almacenamiento temporal (50 m ³)	\$220 560.00	Líneas de conducción de materia prima (30 m)	\$3 731.00
Bomba centrífuga (3 kW)	\$55 140.00 (× 3)	Líneas de calentamiento (100 m)	\$137 850.00
Intercambiador de calor (20 kW)	\$151 635.00	Otros accesorios	\$200 218.00
Reactor anaerobio		Sistema de separación y purificación PSA	\$652 474.00
Tanque (260 m ³)	\$661 680.00	Compresor de hidrógeno (240 bar)	\$360 057.00
Mezclador sumergido (7.5 kW)	\$159 906.00	Compresor de hidrógeno (6 000 psi)	\$407 691.00
Sistema de calentamiento (72 kW)	\$275 700.00	Tanque de almacenamiento de hidrógeno comprimido (70 kg)	\$92 610.00
Sistema de recuperación de biogás	\$333 647.00	Otros	\$260 996.00
Inversión inicial estimada = \$4 507 572.00 pesos			

Cuadro 4. Estimación de los costos capitales y por consumo de energía anuales al año 2009.

Equipo	Costo capital anual estimado	Costo por consumo de energía anual estimado	Equipo	Costo capital anual estimado	Costo por consumo de energía anual estimado
Triturador	\$19 469.10	\$12 979.40	Sedimentador	\$44 040.45	\$29 360.30
Depósito de almacenamiento temporal	\$33 084.00	\$22 056.00	Líneas de conducción de materia prima	\$559.65	--
Bombas centrífugas	\$24 813.00	\$16 542.00	Líneas de calentamiento	\$20 677.50	--
Intercambiador de calor	\$22 745.25.00	\$15 163.50	Otros accesorios	\$30 032.70	\$20 021.80
Reactor anaerobio			Sistema de separación y purificación PSA	\$97 871.10	\$65 247.40
Tanque	\$99 252.00	--	Compresor de hidrógeno (240 bar)	\$54 008.55.00	\$36 005.70
Mezclador sumergido	\$23 985.90	\$15 990.60	Compresor de hidrógeno (6 000 psi)	\$61 153.65	\$40 769.10
Sistema de calentamiento	\$41 355.00	\$27 570.00	Tanque de almacenamiento de hidrógeno comprimido	\$13 891.50	--
Sistema de recuperación de biogás	\$50 047.05	\$33 364.70	Otros	\$39 149.40	\$26 099.60
Total estimado	\$314 751.30	\$143 666.20	Total estimado	\$361 384.50	\$217 503.90

Estimación de los costos totales anuales = \$ 1 037 305.90 pesos

periodo no mayor de un año de acuerdo con los flujos netos de efectivo calculados y con una ganancia adicional; por lo tanto, el proyecto se califica como económicamente viable. La TIR es igual a 432.62%, valor que también supone que el proyecto es viable, dado que es una cifra muy superior a las TMRA usuales. El cálculo de la RCB se realizó con dos TMRA; así, la RCB correspondiente para cada TMRA es de 29.83 y 14.22. En los dos planteamientos, la RCB es mayor a uno, lo cual significa que el proyecto resulta factible desde el punto de vista económico.

Conclusiones

La factibilidad de una planta de hidrógeno en Ciudad Universitaria es ampliamente aceptable tanto para el rubro técnico como ambiental y económico. La disposición de residuos para transformarlos en energía es muy viable y crea un sistema de cogeneración dentro de la universidad. La conclusión esencial de este proyecto es que se diseñó para la universidad un ciclo para cero residuos y su aprovechamiento. Es factible tener un modelo energético de hidrógeno en su producción y uso en México.

Agradecimientos

Los autores agradecen al rector, doctor Juan Ramón de la Fuente, que creó el Programa Transdisciplinario en Investigación y Desarrollo para Facultades y Escuelas de la UNAM; a la doctora Rosaura Ruiz, titular de la Secretaría de Desarrollo Institucional; al doctor Alipio Calles Martínez, jefe de la Unidad de Apoyo a la Investigación en Facultades y Escuelas; al Comité Interno del macroproyecto "La Ciudad Universitaria y la Energía", conformado por el maestro en Administración José Gonzalo Guerrero Zepeda, director de la Facultad de Ingeniería; el doctor Ramón Peralta y Fabi, director de la Facultad de Ciencias; el licenciado Luis Jiménez Escobar, secretario administrativo de la Facultad de Ingeniería; el maestro en Ciencias, Javier García García, secretario de Vinculación de la Facultad de Ciencias; el doctor Eduardo Arriola Valdés, coordinador del macroproyecto, y el maestro en Ingeniería Carlos Villanueva Moreno, coordinador académico.

Al maestro en Ingeniería Hilario García, responsable de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria de la UNAM.

Al maestro Gerardo Arzate Pérez, coordinador y jefe de Diseño del proyecto *Ecovía*, Vehículo Ecológico Multifuncional.

Los autores agradecen también el apoyo otorgado por DGAPA en el proyecto PAPIME 100810: "Prototipos de Sistemas de Energía y Biocombustibles".

Recibido: 20/01/10

Aceptado: 06/09/12

Referencias

- ADAMS, M. The metabolism of hydrogen by extremely thermophilic sulphur-dependent bacteria. *FEMS Microbiol. Rev.* No. 75, 1990, pp. 219-238.
- AMOS, W. *Costs of Storing and Transporting Hydrogen*. Golden, USA: National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- BAI, M.D., CHENG, S.S., and TSENG, I.C. *Bio hydrogen produced due to peptone degradation by pretreated seed sludge*. Fukuoka, Japan: The IWA Asia-Pacific Regional Conference (WaterQual 2001), 2001.
- BOLLIGER, R., ZÜRRER, H., and BACHOFEN, R. Photoproduction of molecular hydrogen from wastewater of a sugar refinery by photosynthetic bacteria. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* No. 23, 1985, pp. 147-151.
- CAMPOS, E., ELÍAS, X. y FLOTATS, X. Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje. En: *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Elías, X (editor). Madrid: Fundación Universitaria Iberoamericana Díaz de Santos, 2005, pp. 617-648.
- CARPETIS, C. A Technology and Costs of Hydrogen Storage. *TERI Information Digest on Energy*. Vol. 4, No. 1, 1994, pp. 1-13.
- CASTRO, A. *Apuntes de la asignatura "Planeación e Instalación de Sistemas de Bioenergía"*. México D.F.: Licenciatura en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- CHEN, C., LIN, C., and CHANG, J. Kinetics of hydrogen production with continuous anaerobic cultures utilizing sucrose as limiting substrate. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* No. 57, 2001, pp. 56-64.
- CHIA-HUNG, C., CHENG-WEI, W., CHIEH-CHEN, H., and JIUNN-JYI, L. Pilot study of the influence of stirring and pH on anaerobes converting high-solid organic wastes to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 33, No. 5, 2008, pp. 1550-1558.
- DABROCK, B., BAHL, H., and GOTTSCHALK, G. Parameters affecting solvent production by *Clostridium*

- pasteurium. *Appl. Environ. Microbiol.* No. 58, 1992, pp. 1233-1239.
- DE VRIJE, T., and CLAASSEN, P. *Dark Hydrogen Fermentations*. En: *Bio-Methane & Bio-Hydrogen: Status and Perspectives of Biological Methane and Hydrogen Production*. Reith, J., Wijffels, R., and Barten, H. (editors). Petten, Holland: Dutch Biological Hydrogen Foundation, 2005, pp. 103-120.
- EPA. *Converter. Documents, Tools and resources. Coalbed Methane Outreach Program (CMOP)* [en línea]. Publicación de la U.S. Environmental Protection Agency. 2009. USA. Disponible para World Wide Web: <http://www.epa.gov/cmop/resources/converter.html>.
- FANG, H. and LIU, H. Effect of pH on hydrogen production from glucose by mixed culture. *Bioresour. Technol.* No. 82, 2002, pp. 87-93.
- GÓMEZ, X., CUETOS, M., PRIETO, J., and MORÁN, A. Bio-hydrogen production from waste fermentation: Mixing and static conditions. *Renewable Energy*. Vol. 34, No. 4, 2009, 970-975.
- HALLENBECK, P. and BENEMANN, J.R. Biological hydrogen production: fundamentals and limiting processes. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 27, No. 11-12, 2002, pp. 1185-1193.
- HAWKES, F.R., HUSSY, I., KYAZZE, G., DINSDALE, R., and HAWKES, D.L. Continuous dark fermentative hydrogen production by mesophilic microflora: Principles and progress. *International Journal of Hydrogen Energy*. No. 32, 2007, pp. 172-184.
- HEMMES, K., DE GROOT, A., and DEN UIL, H. *BIO-H2 application potential of biomass related hydrogen production technologies to the Dutch energy infrastructure of 2020-2050*. ECN-C-03-028, 2003. Países Bajos: The Units Biomass and Clean Fossil Fuels of the Energy Research Centre of the Netherlands (ECN).
- KAPDAN, I. and KARGI, F. Bio-hydrogen production from waste materials: Review. *Enzyme and Microbial Technology*. No. 38, 2006, pp. 569-582.
- KATAOKA, N., MIYA, A., and KIRIYAMA, K. Studies on hydrogen production by continuous culture system of hydrogen-producing anaerobic bacteria. *Water Sci. Technol.* Vol. 36, No. 6-7, 1997, pp. 41-47.
- KHANAL, S., CHEN, W., LI, L., and SUNG, S. Biological hydrogen production: Effects of pH and intermediate products. *International Journal of Hydrogen Energy*. No. 29, 2004, pp. 1123-1131.
- KIM, M.S. An integrated system for the biological hydrogen production from organic wastes and waste-waters. *Proceedings of international symposium on hydrogen and methane fermentation of organic waste*. Tokyo, Japan, March 6, 2002, p. 11-18.
- KRAEMER, J.T. and BAGLEY, D.M. Effects of recycle in two-phase mesophilic fermentative hydrogen production. *Proceedings of 33rd annual WEAO technical symposium*. London, Ontario, Canada, April 18-20, 2004.
- KUMAR, N. and DAS, D. Continuous hydrogen production by immobilized *Enterobacter cloacae* IIT-BT 08 using lignocellulosic materials as solid matrices. *Enzyme Microbiol. Technol.* No. 29, 2002, pp. 280-287.
- LAY, J. Biohydrogen generation by mesophilic anaerobic fermentation of microcrystalline cellulose. *Biotechnol. Bioeng.* No. 74, 2001, pp. 281-287.
- LAY, J., LEE, Y., and NOIKE, T. Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste. *Water Res.* No. 33, 1999, pp. 2579-2586.
- LAY, J. Modeling and optimization of anaerobic digested sludge converting starch to hydrogen. *Biotechnol. Bioeng.* No. 68, 2000, pp. 269-278.
- LEE, D. and TING, C. Production of hydrogen and methane from wastewater sludge using anaerobic fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, No. 6, 2007, pp. 677-682.
- LEE, M. and ZINDER, S. Hydrogen partial pressures in a thermophilic acetate-oxidizing methanogenic co-culture. *Appl. Environ. Microbiol.* No. 54, 1988, pp. 1457-1461.
- LEVIN, D.B., PITT, L., and LOVE, M. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 29, No. 2, 2004, pp. 173-85.
- LIANG, T.M., WU, K.L., and CHENG, S.S. *Hydrogen production of chloroform inhibited granular sludge*. The IWA Asia-Pacific Regional Conference (WaterQual 2001), Fukuoka, Japón, 2001.
- LIN, C.Y. and CHANG, R.C. Hydrogen production during the anaerobic acidogenic conversion of glucose. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* No. 74, 1999, pp. 498-500.
- LIU, H., CHENG, S., and LOGAN, B.E. Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*. Vol. 39, No. 2, 2005, pp. 658-662.
- LIU, S.J., YANG, W.F., and ZHOU, P.Q. The research on hydrogen production from the treatment of bean products wastewater by immobilized photosynthetic bacteria. *Environ. Sci.* No. 16, 1995, pp. 42-44.
- MIZUNO, O., DINSDALE, R., HAWKES, F.R., HAWKES, D.L., and NOIKE, T. Enhancement of hydrogen production from glucose by nitrogen gas sparging. *Biores. Technol.* No. 73, 2000a, pp. 59-65.
- MIZUNO, O., OHARA, T., SHINYA, M., and NOIKE, T. Characteristics of hydrogen production from bean curd manufacturing waste by anaerobic microflora. *Water Sci. Technol.* Vol. 42, No. 3-4, 2000b, pp. 345-350.
- PANT, K. and GUPTA, R. *Fundamentals and use of hydrogen as a fuel*. En: *Hydrogen fuel: Production, transport and storage*. Gupta, R. (editor). Boca Raton, USA: CRC Press, 2009, pp. 4-29.

- PETROVIC, T.J., WAGNER, H.J., LENTE, A., KRUPP, M., and WIDMANN, R. *Photobiologische Wasserstoffherzeugung durch Mikroalgen –Beschreibung konkurrierender Systeme zur H₂-Erzeugung*. Ruhr: Förderungskennziffer: 85.65.69-T-170, Stärkung der technologischen Position an den Ruhruniversitäten Teilprojekt 8 ef.Ruhr, 2005.
- SALINAS-FLORES, O. *Proyecto Ecovía*. Conferencia magistral en la Feria Internacional de Diseño en México. DesignFest 2009, Guadalajara, Jalisco, México, 2009.
- SCHWARZ, J. and AMONKWAH, K. *Hydrogen Storage Systems*. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1993.
- SHIN, H., YOUN, J., and KIM, S. Hydrogen production from food waste in anaerobic mesophilic and thermophilic acidogenesis. *International Journal of Hydrogen Energy*. No. 29, 2004, pp. 1355-1363.
- SØRENSEN, B. *Hydrogen and Fuel Cells Emerging Technologies and Applications*. New York: Elsevier Academic Press, 2005, pp. 349-359.
- SPARLING, R., RISBEY, D., and POGGI-VARALDO, H.M. Hydrogen production from inhibited anaerobic composters. *Int. J. Hydro. Energy*. No. 22, 1997, pp. 563-566.
- TANISHO, S. and ISHIWATA, Y. Continuous hydrogen production from molasses by the bacterium *Enterobacter aerogenes*. *Int. J. Hydro. Energy*. No. 19, 1994, pp. 807-812.
- TANISHO, S. and ISHIWATA, Y. Continuous hydrogen production from molasses by fermentation using urethane foam as a support of flocks. *Int. J. Hydro. Energy*. No. 20, 1995, pp. 541-545.
- TANISHO, S., KUROMOTO, M., and KADOKURA, N. Effect of CO₂ removal on hydrogen production by fermentation. *Int. J. Hydro. Energy*. No. 23, 1998, pp. 559-563.
- THOMPSON, R. *Hydrogen Production by Anaerobic Fermentation Using Agricultural and Food Processing Wastes Utilizing a Two-Stages Digestion System*. Tesis (Maestría en Ciencias). Utah: Utah State University, 2008, pp. 1-44.
- TIMILSINA, G. and SHRESTHA, A. Transport sector CO₂ emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options. *Energy Policy*. No. 37, 2009, pp. 4523-4539.
- UENO, Y., OTAUKA, S., and MORIMOTO, M. Hydrogen production from industrial wastewater by anaerobic microflora in chemostat culture. *J. Ferment. Bioeng.* Vol. 82, 1996, pp. 194-207.
- VAN NIEL, E., CLAASSEN, P., and STAMS, A. Substrate and product inhibition of hydrogen production by the extreme thermophile *Caldicellulosiruptor saccharolyticus*. *Biotechnol. Bioeng.* No. 81, 2002, pp. 255-262.
- WANG, J.L. and WAN, W. Effect of Fe₂ concentration on fermentative hydrogen production by mixed cultures. *Int. J. Hydrogen Energy*. No. 33, 2008a, pp. 1215-1220.
- WANG, J.L. and WAN, W. Comparison of different pretreatment methods for enriching hydrogen-producing cultures from digested sludge. *Int. J. Hydrogen Energy*. No. 33, 2008b, pp. 2934-2941.
- WANG, J.L. and WAN, W. Effect of temperature on fermentative hydrogen production by mixed cultures. *Int. J. Hydrogen Energy*. No. 33, 2008c, pp. 5392-5397.
- WANG, J. and WAN, W. Factors influencing fermentative hydrogen production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 34, No. 2, 2008d, pp. 799-811.
- WANG, C., CHANG, C., CHU, C., LEE, D., CHANG, B., and LIAO, C. Using filtrate of waste biosolids to effectively produce bio-hydrogen by anaerobic fermentation. *Water Res.* No. 37, 2003, pp. 2789-2793.
- XIAO, B. and LIU, J. Biological hydrogen production from sterilized sewage sludge by anaerobic self-fermentation. *Journal of Hazardous Materials*. No. 168, 2009, pp. 163-167.
- ZHU, H., SUZUKI, T., TSYGANKOV, A.A., ASADA, Y., and MIYAKE, J. Hydrogen production from tofu wastewater by *Rhodobacter sphaeroides* immobilized in agar gels. *Int. J. Hydro. Energy*. No. 24, 1999, pp. 305-310.

Abstract

JUÁREZ-HERNÁNDEZ, S. & CASTRO-GONZÁLEZ, A. Technical and economic feasibility of hydrogen production using sludge from wastewater treatment and other wastes. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 2, April-June, 2013, pp. 137-147.

ECOVIA is a project from one of the lines of research of the UNAM's macro-project "La Ciudad Universitaria y la Energía" (University City and Energy). Its main objective is to transform University City (UC) into a model of efficient energy use. ECOVIA is a hybrid car – the first nationally – which operates with batteries and a hydrogen fuel cell (H₂). This fuel cell consumes 10.6587 gH₂/minute which translate into 10 million pesos per year. Since dark-fermentation is an innovative technology for the production of hydrogen, a semi-industrial plant to apply this technology is proposed. Sludge from the wastes from the UC wastewater treatment plant is estimated to be 45 tons/day, which added to organic wastes from a pig farm and restaurants in CU, results in a total of 46.18 ton/day. This generates 14.2678 kgH₂ without purification or 9.98746 kgH₂ with a purity of 99.999%, as required by the ECOVIA fuel cell. The proposal for the hydrogen plant – which is technically, economically, and financially feasible – estimates the need for an initial investment of 4.5 million pesos, which can be recovered in the first year of the plant's operations. At the same time, costs of waste collection and transportation would decrease (\$1 540 080 pesos/year). The environmental impact of the project is a reduction in emissions of 131.901 CO₂ metric tons/day and minimization of the release of untreated wastes into the environment.

Keywords: dark-fermentation, wastes, sludge, wastewater treatment, hydrogen, feasibility.

Dirección institucional de los autores

M. en I. Sergio Juárez-Hernández

Dra. Alejandra Castro-González

Departamento de Sistemas Energéticos
Posgrado de la Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Circuito exterior s/n, Ciudad Universitaria,
Delegación Coyoacán
04510 México, D.F., MÉXICO
Teléfono y fax: +52 (55) 5622 3899, extensión 44190
alcastro@unam.mx
xerxio.jh@gmail.com