



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

GENERACIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE
DESECHOS POR FERMENTACIÓN OSCURA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R O
Q U Í M I C O
P R E S E N T A:
ZAMBRANO MATUS PAUL.



MÉXICO, D. F.

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE	Profesor: I.Q. Jose Antonio Ortiz Ramirez
VOCAL	Profesor: I.Q. Rodolfo Torres Barrera
SECRETARIO	Profesor: Dra. Alejandra Castro González
1 ^{er} SUPLENTE	Profesor: MC. Ezequiel Millan Velasco
2 ^{do} SUPLENTE	Profesor: Dr. Agustin Garcia Reynoso

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio Ingeniería Ambiental Posgrado de la Facultad de Ingeniería, CU-UNAM, dentro del proyecto "Aprovechamiento de biogás a partir de biomasa, obteniendo hidrógeno para transporte vehicular". Macroproyecto "Ciudad Universitaria y la Energía".

Dra. Alejandra Castro González
Asesora

Paul Zambrano Matus
Sustentante

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la UNAM
Facultad de Química
Profesores, compañeros y amigos

A mis sinodales:
I.Q. Jose Antonio Ortiz Ramirez
I.Q. Rodolfo Torres Barrera
Dra. Alejandra Castro González

A el Posgrado de Facultad de ingeniería de la UNAM
Ing. Marisol Escalante Mora coordinadora de los laboratorios sanitaria
y ambiental, Ing. Dulce Maria Cisneros Peralta y personal de el
laboratorio de Ingeniería Ambiental

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. A.C.
IPICYT

Agradezco el apoyo de beca económica de la UNAM del
Macroproyecto "Ciudad Universitaria y la Energía"

A mis compañeros en el laboratorio:
Erika Ayala Rodriguez
Andrés Gabayet Muñoz

A todas las personas que han estado junto a mí y de las cuales he
aprendido mucho.

DEDICATORIA

A mi madre y hermanos.

Gracias por todo.

ÍNDICE

	Págs.
Índice de figuras	6
Índice de tablas	9
Resumen	11
Glosario de términos	12
Capítulo 1	
Introducción	14
Objetivos	16
Capítulo 2 Fundamentos	
2.1 Energías renovables	17
2.1.1. Biomasa	25
2.1.2. Hidrógeno y biogás	29
2.2 El hidrógeno	35
2.2.1 Procesos productores de hidrógeno	37
2.2.2 Usos del hidrógeno	42
2.2.3 Automóviles con hidrógeno	47
2.2.4 Aplicaciones en México	61
2.3 Degradación anaerobia convencional	67
2.3.1 Proceso de degradación anaerobia	67
2.3.2 Tipos de reactores anaerobios	73
2.3.3 Aplicaciones del biogás	77
2.3.4 Parámetros de control de sistemas anaerobios	79
2.4 Producción de hidrógeno a partir de la fermentación obscura	85
2.4.1 Inóculo	85
2.4.1.1 Cultivos puros	92
2.4.1.2 Cultivos Mixtos	94

2.4.2 Sustrato	95
2.4.3 Tipo de reactor	96
2.4.4 Nitrógeno y fosfato	100
2.4.5 Iones metálicos	101
2.4.6 Temperatura	102
2.4.7 pH	105
2.4.8 Arranque	107

Capítulo 3 Metodología y experimentación

3.1 Diseño experimental del reactor	116
3.2 Caracterización de la materia orgánica	118
3.3 Inoculación	119
3.4 Parámetros de arranque	120
3.4.1 Fase líquida-sólida	121
3.4.2 Fase Gas	121

Capítulo 4 Resultados

4.1 Operación	124
4.2 Cambio pH	129
4.3 Cambios TRH	131
4.4 Efecto rpm	135
4.5 Eficiencia	135

Capítulo 5 Conclusiones

Referencias	142
-------------	-----

Anexo A	168
---------	-----

Índice de Figuras

Figura 2.1. Efecto del tiempo en la velocidad de producción de hidrógeno con la temperatura	32
Figura 2.2. Efecto de la temperatura en la producción de hidrógeno	33
Figura 2.3. Velocidad de producción de hidrógeno en la investigación de Fang y Liu	35
Figura 2.4. Cohete Atlantis	46
Figura 2.5. Dirigible Hindenburg	47
Figura 2.6. Diagrama conversión a energías limpias	48
Figura 2.7. Diagrama conversión a combustible limpio	48
Figura 2.8. Nuevo autobús eléctrico Daimler-Benz	49
Figura 2.9. Mercedes-Benz ncar 5	49
Figura 2.10. Ford focus 2003 que funciona con gasolina e hidrógeno	50
Figura 2.11. Automóvil experimental que funciona con hidrógeno GM hummer h2h 2004	50
Figura 2.12. Auto mini de transporte Peugeot	51
Figura 2.13. Camioneta gaz h2-van 2005	52
Figura 2.14. Camioneta f 250 super chief tri-fuel truck ford	53
Figura 2.15. Auto Mazda rx-8 hydrogen re mazda 2006	53
Figura 2.16. Auto BMW serie 7 a hidrógeno	54
Figura 2.17. Camioneta GMC silverado a hidrógeno	54
Figura 2.18. Auto Mazda premacy hydrogen re	56
Figura 2.19. Auto provoq general motors 2008	57
Figura 2.20. Camioneta highlander fchv-adv toyota	58
Figura 2.21. Auto Chevrolet equinox fuel cell suv	60
Figura 2.22. Avión tupolev tu-156	61

Figura 2.23. Esquema producción hidrógeno macroproyecto UNAM	64
Figura 2.24. Autobús Mercedes- Benz	65
Figura 2.25 Auto Ecovía	65
Figura 2.26 Etapas degradación anaerobia	71
Figura 2.27 Cantidad de hidrógeno producido con diferentes inóculos	86
Figura 2.28 Concentración de ácidos grasos producido con diferentes inóculos	86
Figura 2.29 DQO removida en un experimento afectando el TRH	108
Figura 2.30 Conversión de materia orgánica con respecto al TRH aplicado	109
Figura 2.31 Efecto pH con respecto a la carga orgánica	109
Figura 2.32 Producción y rendimiento de hidrógeno	110
Figura 3.1 Diagrama base para el diseño del reactor fermentador	116
Figura 3.2 Reactor fermentador de 5L	117
Figura 3.3 Arreglo de las pruebas a menor escala	118
Figura 4.1 Cambio pH inicial y final en los 4 experimentos	129
Figura 4.2 pH respecto a mLH ₂ /gDQOremovida	130
Figura 4.3 Combinación ml H ₂ /gDQOremovida, TRH, pH y días de operación	130
Figura 4.4 Variación de % remoción de DQO, ml H ₂ /día por día de operación	131
Figura 4.5 Efecto del TRH en la producción de hidrógeno	132
Figura 4.6 Efecto del % remoción de DQO y el TRH	132
Figura 4.7 Efecto del % remoción de ST y el TRH	133
Figura 4.8 Efecto del TRH y la producción en mLH ₂ /gDQO removida	134

Figura 4.9 Efecto del % remoción SSV y TRH	134
Figura 4.10 Efecto de las rpm, % remoción DQO y % H ₂	135
Figura 4.11 mLbiogás/gDQOremovida con respecto a la remoción de ST	136
Figura 4.12 Sólidos medidos en los 4 experimentos	136
Figura 4.13 % Remoción de ST en los 4 experimentos	137
Figura 4.14 Porcentaje de remoción de DQO	138
Figura 4.15 Combinación % remoción SSV, producción de hidrógeno y días de operación	138
Figura 4.16 Variación mLH ₂ /g DQO removida en los 4 experimentos	139
Figura 4.17 Producción de gases CH ₄ , CO ₂ e H ₂	139

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Porcentaje fuentes de energía renovable utilizadas a nivel mundial	26
Tabla 2.2 Potencial biomasa estados de la república mexicana	28
Tabla 2.3 Composición biogás	30
Tabla 2.4 Condiciones experimentales de producción de hidrógeno en un experimento con diferentes variables	34
Tabla 2.5 Materia prima para la producción de hidrógeno	42
Tabla 2.6 Resumen de vehículos propulsados con hidrógeno.	62
Tabla 2.7 Principales ventajas y desventajas que presenta la digestión o tratamiento anaerobio	72
Tabla 2.8 Características del proceso de digestión, de acuerdo al intervalo de temperatura	80
Tabla 2.9 Bacterias utilizadas para la producción de hidrogeno por medio de la fermentación	92
Tabla 2.10 Comparación de diversos métodos de tratamiento previo para el enriquecimiento de bacterias productoras de hidrógeno	96
Tabla 2.11 Inóculos con método de pretratamiento	97
Tabla 2.12 Reactores mas utilizados para la producción de hidrógeno por medio de la fermentación	98
Tabla 2.13 Efecto de C/N y C/P en la producción de hidrógeno	102
Tabla 2.14 Efecto de la concentración de iones metálicos en la producción de hidrógeno por medio de la fermentación	103
Tabla 2.15 Efecto de la temperatura en la producción de hidrógeno	104
Tabla 2.16 Efecto del pH inicial en la producción de hidrógeno en reactores batch	106

Tabla 2.17 Parámetros de arranque en fermentadores productores de hidrógeno	111
Tabla 3.1 Especificaciones reactor fermentador	117
Tabla 3.2 Caracterización de los desechos de frutas y verduras utilizado como sustrato para la fermentación	120
Tabla 3.3 Parámetros de arranque	121
Tabla 3.4 Análisis en la fase líquida en el reactor anaerobio	122
Tabla 3.5 Análisis en la fase gas en el reactor anaerobio	122
Tabla 3.6 Condiciones de operación del cromatógrafo	123
Tabla 4.1. Resumen de condiciones durante el experimento	124
Tabla A.1. Producción de biogás	168
Tabla A.2. Análisis sólidos totales	169
Tabla A.3. Análisis sólidos suspendidos totales	170
Tabla A.4. Análisis de sólidos suspendidos volátiles	172
Tabla A.5 Análisis demanda química de oxígeno	173
Tabla A.6 Análisis pH	174

Resumen

Este trabajo resume varios factores que influyen en la producción de hidrógeno a partir de desechos en un proceso de fermentación oscura. La revisión de variables incluidas fueron inóculo, sustrato, tipo de reactor, temperatura, pH, rpm en el mezclado e inhibición de la etapa metanogénica. Entre los más importantes y encontrando como condiciones más idóneas para una mayor producción de hidrógeno fue a temperatura de 37°C, pH entre 6 y 7 en un reactor continuo y con el inóculo obtenido de excremento de vaca. Los resultados obtenidos demuestran una gran dependencia del tiempo de residencia hidráulico (TRH) con la remoción de la materia orgánica (medida indirectamente como demanda química de oxígeno, DQO); la cual alcanzó un máximo de 60 %. La remoción de los sólidos totales (ST) también tiene por consiguiente una gran dependencia al cambio del TRH. A mayor TRH, mayor porcentaje de remoción de ST al mismo tiempo de una mayor producción de hidrógeno. Por otro lado, con lo que respecta al pH, la mayor producción de hidrógeno se encontró a valores de pH cercanos al neutro. El efecto de la velocidad de mezclado se mostró independiente a las condiciones de operación, lo cual no produjo efecto significativo en la producción de hidrógeno. Los resultados de esta investigación fueron discrepantes con los resultados de otros trabajos reportados.

Glosario

AGV: Ácidos grasos volátiles

CILG: Cama inducida de lodos granulares (Por sus siglas en ingles CIGSB)

RCA: Reactor Continuo Agitado (Por sus siglas en ingles CSTR)

DQO: Demanda Química de Oxígeno

RALF: Reactor anaerobio tubular de lecho fluidizado (Por sus siglas en ingles DTFBR)

RBF: Reactor biológico fluidizado (Por sus siglas en ingles FBR)

RBM: Reactor biológico de membrana (Por sus siglas en ingles MBR)

NR: No reporta

FOSAR: Fracción orgánica de sólidos en el agua residual (Por sus siglas en ingles OFMSW)

pH: Potencial de hidrógeno

RLE: Reactor de lecho empacado (Por sus siglas en ingles PBR)

EMA: Efluente de molino de aceites (Por sus siglas en ingles POME)

SDF: Sólidos disueltos fijos

SDV: Sólidos disueltos volátiles

SDT: Sólidos disueltos totales

SSF: Sólidos suspendidos fijos

SST: Sólidos suspendidos totales

SSV: Sólidos suspendidos volátiles

ST: Sólidos totales

STF: Sólidos totales fijos

STV: Sólidos totales volátiles

SV: Sólidos volátiles

RBT: Reactor biológico de goteo (Por sus siglas en ingles TBR)

TJ: Tera Joules

TRH: Tiempo de residencia hidráulico

FACA: Filtro anaerobio de contacto ascendente (Por sus siglas en ingles UACF)

RALLFA: Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (Por sus siglas en ingles UASB)

RLFFA: Reactor de lecho fijo de flujo ascendente (Por sus siglas en ingles UFBR)

rpm: Revoluciones por minuto

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

México tiene una alta dependencia de combustibles fósiles; el promedio mundial es de alrededor del 60 por ciento. México depende del 75 por ciento de combustóleo, que es el resultado de la refinación del petróleo. El combustóleo tiene alto contenido de azufre altamente contaminante y con ello se genera el 65% de la electricidad en México. La única forma de cumplir con el compromiso de Kyoto, es usar fuentes de energía renovable. Dichas energías promueven el desarrollo sustentable, la protección ambiental, la reducción de los gases invernadero, el crecimiento laboral y económico como una fuente realmente de desarrollo económico y pueden ser motor de desarrollo regional.

Al estar los combustibles fósiles totalmente ligados a la sobre explotación y con la certeza de que alcanzará un punto de declive, se llega a la conclusión de que es necesario ampliar las opciones en materia de combustibles. Como consecuencia de lo anterior, diversos países, a través de la investigación se han dado a la tarea de encontrar combustibles libres de contaminantes que les permitan diversificar sus opciones energéticas. Los resultados obtenidos apuntan hacia el hidrógeno como un vector energético que permita la diversificación y gradual sustitución de las fuentes de energía no renovables. Una forma en la cual se puede obtener es a partir de biomasa. Aunque el uso del vapor para reformar el gas natural ha demostrado ser la forma más barata de producción de hidrógeno en la actualidad con fines comerciales, se sigue basando en hidrocarburos con emisiones de CO₂ en el proceso. Es cuestionable que los esfuerzos no estén mayoritariamente enfocados a la

obtención de hidrógeno a partir de nuevas fuentes renovables de energía.

Actualmente se tienen varios estudios sobre sistemas de tratamiento anaerobio que generan hidrógeno en el biogás, pero éstos estudios están iniciándose en los últimos años. En éste trabajo, se estudiará precisamente éste tema, la optimización de la degradación anaerobia para la generación de hidrógeno. La conversión biotecnológica de éstos procesos es particularmente catalizada por medio de microorganismos en un medio acuoso a bajas temperaturas y bajas presiones. Las técnicas para obtener esta energía son fáciles de reproducir a mayor escala instalándose prácticamente en el mismo lugar donde se obtiene la materia prima evitando costos por transportación.

Durante la pasada década, se ha puesto más atención en los usos del gas hidrógeno y su potencial uso en automóviles y producción de electricidad ya que éste nos da una alta energía de 122 kJ/g y no contribuye al efecto invernadero debido a que en su combustión éste se transforma simplemente en agua. La forma más fácil y rentable de obtener el hidrógeno es a partir de biomasa de desecho por medio de microorganismos. Éstos han sido investigados en un principio en Japón a principio del año 1990, los principales factores que se deben controlar para proliferación de estos microorganismos son la agitación, nutrientes para la vida de éstos, concentración de materia orgánica, temperatura y presión en un reactor. A pesar de estos estudios realizados aún no se conoce a fondo éste proceso.

En este trabajo se espera tener óptimos resultados en la producción de hidrógeno a partir de desechos con alto contenido de azúcares. Los desechos utilizados serán de Ciudad Universitaria para su posible uso del hidrógeno en el transporte.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Generar hidrógeno a partir de la fermentación oscura a nivel laboratorio de materia de desecho de frutas y verduras, cambiando los parámetros operacionales como tiempo de residencia, pH y mezclado.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Obtener una producción de hidrógeno mayor al 40% en el biogás.
- Aplicar técnicas de inhibición de la etapa metanogénica.
- Encontrar los parámetros operacionales de control adecuados para una mayor producción de hidrógeno.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS

2.1 Energías renovables

La electricidad ha revolucionado la calidad de la vida humana desde finales del siglo XIX permitiendo un uso más sencillo de las fuentes de energía disponibles. Los primeros dispositivos y aplicaciones como el dínamo y la iluminación eléctrica motivaban la corriente directa. Más adelante el alternador y la corriente alterna permitieron transmitir la energía eléctrica a gran escala.

Actualmente, la oscilación de la demanda energética se cubre mediante el encendido o apagado de generadores. Sin embargo, la electricidad es difícil de almacenar para usarla más adelante. El mejor sistema en lo que a eficiencia y coste se refiere y más extendido además para el almacenamiento de energía de una red a gran escala, es el almacenamiento por bombeo, que consiste en bombear agua hasta una presa superior y generar la electricidad demandada mediante hidroelectricidad. Sin embargo, éste método no sirve para aplicaciones móviles de almacenaje de energía. Existen alternativas más reducidas de almacenaje como condensadores pero tienen el problema de la baja densidad de energía. Las baterías tienen también baja densidad de energía y además tardan en cargarse y descargarse. El almacenamiento en una batería inercial es más eficiente que las baterías de tamaño similar, pero acarrea preocupaciones de seguridad debido a que se puede romper explosivamente. Además, la inestabilidad del mercado petrolero internacional afecta el mercado de combustibles los cuales se emplean también para la generación de electricidad, gas natural, carbón y diesel. Pero ahora, la biotecnología está jugando un papel

primordial en la producción de energías renovables como metano, hidrógeno, bioetanol y acetona-butanol-etanol (Kosaric y Velikonja, 1995; Claassen y col., 1999).

Casi al mismo tiempo que empezó a funcionar la electricidad, se descubrió una fuente de energía portable. Se trata naturalmente de los motores de combustión interna, los cuales queman hidrocarburos. Los motores de combustión interna arrasaron a sus competidores de esa época, como por ejemplo el aire comprimido, o los automóviles eléctricos accionados por baterías, porque proporcionan mayores posibilidades, en virtud de la eficacia del motor de combustión interna y de la alta densidad energética del combustible. El alto cociente de potencia másica de los motores de combustión interna también ha permitido construir un avión de densidad más alta que el aire (Rojas, 2006).

Nuestro ambiente está cambiando considerablemente, la percepción que se tiene es que las estaciones no se comportan de forma regular, hace más calor o más frío y si se preguntará que es lo que está sucediendo, se tendría que pensar en las actividades que realizamos. Cada una de ellas requiere de cierto grado de consumo de energía, ya sea, para iluminación, baños, la preparación de alimentos, el transporte, etcétera y esta energía no es gratuita ni en el sentido económico ni en el ambiental (Rojas, 2006).

El combustible fósil puede utilizarse directamente, quemándose para producir calor y movimiento, en hornos, estufas, calderas y motores aunque con el paso del tiempo se acabarán y tal vez sea necesario disponer de millones de años de evolución similar para contar nuevamente con ellos. Hay quien piensa que las celdas de combustible de hidrógeno son el equivalente a los viejos motores de combustión interna, los cuales podrían ir mitigando el uso de estos

combustibles. Además, la utilización de combustibles fósiles es responsable del aumento de emisión a la atmósfera de dióxido de carbono, gas que contribuye al aumento del efecto invernadero y al calentamiento global, según informes emitidos por numerosos científicos pertenecientes a esta área del conocimiento (Rojas, 2006; Yang y col., 2007; Haijun y col., 2006).

El decremento con el paso del tiempo de estas energías no renovables (petróleo, gas, carbón, nuclear, etc.) ha sido desde ya hace mucho tiempo el punto de partida de energías renovables tales como: La energía solar (sol), eólica (el viento), hidráulica (ríos y corrientes de agua dulce), mareomotriz (el océano) y geotérmica (el calor de la tierra). Las energías no contaminantes (que son las realmente renovables), se obtienen a partir de la materia orgánica o biomasa como madera u otra materia vegetal sólida (de la cual se hablará en el apartado 2.1.1), las cuales se pueden utilizar directamente como combustible.

Las energías de fuentes renovables contaminantes tienen el mismo problema que la energía producida por combustibles fósiles: En la combustión emiten dióxido de carbono, gas de efecto invernadero, y a menudo son aún más contaminantes puesto que la combustión no es tan limpia, emitiendo hollines y otras partículas sólidas. Sin embargo, se encuadran dentro de las energías renovables porque el dióxido de carbono emitido ha sido previamente absorbido al transformarse en materia orgánica mediante fotosíntesis. También se puede obtener energía a partir de los residuos sólidos urbanos, que también son contaminantes aunque en menor proporción pero a los cuales se les puede dar utilización y sacarles un gran provecho no solo como fertilizantes sino como materia para la producción de energía (Yang y col., 2006; Freda y col., 2006; Rojas, 2006).

Las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica. La navegación a vela y los molinos de viento son ejemplos simples de la aplicación de la energía eólica; en los molinos de agua también puede apreciarse la aplicación de la energía hidráulica; así como en las disposiciones constructivas de los edificios para aprovechar la del sol, son buenos ejemplos de la utilización de estas energías. Con el invento de la máquina de vapor por James Watt, se van abandonando estas formas de aprovechamiento, por considerarse inestables en el tiempo y caprichosas y se utilizan cada vez más los motores térmicos y eléctricos. En una época en que todavía había escaso consumo, no hacía prever un agotamiento de las fuentes, ni otros problemas ambientales que más tarde se presentaron y por los cuales ahora ya se están pagando altos precios en desastres naturales (Rojas, 2006).

Por ejemplo, la energía solar es fuente de vida y origen de la mayoría de las demás formas de energía en la Tierra. Cada año, la radiación solar aporta a la Tierra la energía equivalente a varios miles de veces la cantidad de energía que consume la humanidad. Recolectando de forma adecuada la radiación solar, ésta puede transformarse en otras formas de energía como energía térmica o energía eléctrica utilizando paneles solares. Mediante colectores solares, la energía solar puede transformarse en energía térmica; y utilizando paneles fotovoltaicos la energía luminosa puede transformarse en energía eléctrica. Ambos procesos nada tienen que ver entre sí en cuanto a su tecnología. Así mismo, en las centrales térmicas solares se utiliza la energía térmica de los colectores solares para generar electricidad. Puesto que ciertas fuentes de energía renovable proporcionan energía de una intensidad relativamente baja, distribuida sobre grandes superficies, son necesarios nuevos tipos de "centrales" para convertirlas en fuentes utilizables. Para 1,000 kWh de electricidad, consumo anual per cápita

en los países occidentales, el propietario de una vivienda ubicada en una zona nublada de Europa debe instalar 8m^2 de paneles fotovoltaicos (suponiendo un rendimiento energético medio del 12.5%). Sin embargo, con 4m^2 de colector solar térmico, un hogar puede obtener gran parte de la energía necesaria para el agua caliente sanitaria. Aunque, debido al aprovechamiento de la simultaneidad, los edificios de pisos pueden conseguir los mismos rendimientos con menor superficie de colectores y, lo que es más importante, con mucha menor inversión por vivienda.

La formación de biomasa a partir de la energía solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis vegetal que a su vez es desencadenante de la cadena biológica. Mediante la fotosíntesis, las plantas que contienen clorofila transforman el dióxido de carbono y el agua, productos minerales sin valor energético, en materiales orgánicos con alto contenido energético y a su vez sirven de alimento a otros seres vivos. La biomasa mediante estos procesos almacena a corto plazo la energía solar en forma de carbono. La energía almacenada en el proceso fotosintético puede ser posteriormente transformada en energía térmica, eléctrica o carburantes de origen vegetal, la cual no genera gases de efecto invernadero que atenuen el cambio climático (Yang y col., 2006).

En la energía hidráulica, el potencial acumulado en el agua puede ser transformado en energía eléctrica. Las centrales hidroeléctricas aprovechan energía de los ríos para poner en funcionamiento unas turbinas que arrastran un generador eléctrico (SENER, 2007).

Por su parte, la energía eólica es la energía obtenida de la fuerza del viento, es decir mediante la utilización de la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire. Esta energía ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus

aspas. Es un tipo de energía verde. La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales (gradiente de presión) los cuales, deben de tener una velocidad mínima de 12 km/h (Gat to, 2004).

La energía geotérmica es parte del calor interno de la Tierra (5, 000 °C) y que llega a la corteza terrestre. En algunas zonas del planeta cerca de la superficie, las aguas subterráneas pueden alcanzar temperaturas de ebullición, y, por tanto, servir para accionar turbinas eléctricas o para calentar. El calor del interior de la Tierra se debe a varios factores, entre los que cabe destacar el gradiente geotérmico, el calor radiogénico, etc. La energía geotérmica no solo se encuentra muy restringida geográficamente sino que algunas de sus fuentes son consideradas contaminantes.

La energía mareomotriz se debe a las fuerzas gravitatorias entre la Luna, la Tierra y el Sol, que originan las mareas, es decir, la diferencia de altura media de los mares según la posición relativa entre estos tres astros. Esta diferencia de alturas puede aprovecharse en lugares estratégicos como golfos, bahías o estuarios utilizando turbinas hidráulicas que se interponen en el movimiento natural de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable. La energía mareomotriz tiene la cualidad de ser renovable en tanto que la fuente de energía primaria no se agota por su explotación, y es limpia, ya que en la transformación energética no se producen subproductos contaminantes durante la fase de explotación. Sin embargo, la

relación entre la cantidad de energía que se puede obtener con los medios actuales y el coste económico y el impacto ambiental de instalar los dispositivos para su proceso han impedido una proliferación notable de éste tipo de energía. Otras formas de extraer energía del mar son la energía undimotriz, que es la energía producida por el movimiento de las olas; y la energía debida al gradiente térmico oceánico, que marca una diferencia de temperaturas entre la superficie y las aguas profundas del océano (ITER, 2000).

Las fuentes de energía renovables son distintas a las de combustibles fósiles o centrales nucleares debido a su diversidad y abundancia. Se considera que el Sol abastecerá estas fuentes de energía (radiación solar, viento, lluvia, etc.) durante los próximos cuatro mil millones de años. Un problema inherente a las energías renovables es su naturaleza difusa, con excepción de la energía geotérmica la cual, sólo es accesible donde la corteza terrestre es fina, como las fuentes calientes y los géiseres; no obstante, algunos sistemas de energía renovable generan problemas ecológicos particulares. Así pues, los primeros aerogeneradores eran peligrosos para los pájaros, pues sus aspas giraban muy deprisa, mientras que las centrales hidroeléctricas pueden crear obstáculos a la emigración de ciertos peces, un problema serio en muchos ríos del mundo, (en los del noroeste de Norteamérica que desembocan en el Océano Pacífico, se redujo la población de salmones drásticamente).

Como ya se mencionó las fuentes de energía renovable están basadas en energía solar que no es disponible por medio de celdas fotovoltaicas, energía eólica y energía química por medio de biomasa. Ésta última jugará un papel muy importante en los próximos años en la producción de energía eléctrica así como la utilización de biogás para el funcionamiento de automóviles. Una distinción se puede hacer

en el uso de biomasa seca (madera) y biomasa húmeda (desechos orgánicos) que debe ser preferentemente por conversión térmica y biodegradación respectivamente. Esta conversión de biomasa nos puede dar gases para la utilización en biocombustibles como hidrógeno y diesel por medio de la conversión de la síntesis de Fischer-Tropsch (Hamelinck y col., 2003).

La diversidad geográfica de los recursos es también significativa. Algunos países y regiones disponen de recursos sensiblemente mejores que otros, en particular en el sector de la energía renovable. Algunos países disponen de recursos importantes cerca de los centros principales de viviendas donde la demanda de electricidad es importante. La utilización de tales recursos a gran escala necesita, sin embargo, inversiones considerables en las redes de transformación y distribución, así como en la propia producción.

Las energías renovables tienen mínimos impactos al ambiente y a la salud y los precios no dependen de la fluctuación de los costos de los energéticos a nivel internacional. Los recursos renovables promueven el desarrollo regional sustentable y crean empleos permanentes y bien remunerados como ha sucedido en países de Europa (Pankhurst, 1983).

Así pues, debido al elevado coste de almacenamiento de la energía, un pequeño sistema autónomo resulta raramente económico. Excepto en situaciones aisladas, cuando la conexión a la red de energía implica costes más elevados.

Hacia la década de los años 1970, las energías renovables se consideraron una alternativa a las energías tradicionales, tanto por su disponibilidad presente y futura garantizada, a diferencia de los combustibles fósiles que precisan miles de años para su formación.

Así mismo por su menor impacto ambiental en el caso de las energías limpias, y por esta razón fueron llamadas energías alternativas. Actualmente muchas de estas energías son una realidad, no una alternativa, por lo que el nombre de alternativas ya no debe emplearse.

2.1.1 Biomasa

La biomasa es una abreviatura de masa biológica, cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico. El término es utilizado con mayor frecuencia en las discusiones relativas a la energía de biomasa, es decir, al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La energía de biomasa que procede de la madera, residuos agrícolas y estiércol, continúa siendo la fuente principal de energía de las zonas en desarrollo. En términos energéticos, se utiliza como energía renovable, como es el caso de la leña, del biodiesel, del bioetanol, del biogás y del bloque sólido combustible. La biomasa podría proporcionar energías sustitutivas, gracias a biocarburantes tanto líquidos como sólidos (CONAE 2008).

En lo que se refiere a la biomasa, es cierto que almacena activamente el carbono del dióxido de carbono, formando su masa con él y crece mientras libera el oxígeno de nuevo, al quemarse vuelve a combinar el carbono con el oxígeno, formando de nuevo dióxido de carbono. Teóricamente el ciclo cerrado arrojaría un saldo nulo de emisiones de dióxido de carbono, al quedar las emisiones fruto de la combustión fijadas en la nueva biomasa (Dávila y col., 2007; García, 2006).

En la actualidad, las fuentes de energías renovables representan un 20% del consumo mundial de electricidad; de éste 20% el 90% es

de origen hidráulico y el resto es decir el 10%, es obtenido por energías renovables como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Porcentaje fuentes de energía renovable utilizadas a nivel mundial (García, 2006)

Fuente de energía	Porcentaje %
Biomasa	5.5
Geotérmica	1.5
Eólica	0.5
Solar	0.5

Alrededor de un 80% de las necesidades de energía en las sociedades industriales occidentales se centran en torno a la industria, la calefacción, la climatización de los edificios y el transporte (coches, trenes, aviones). Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones a gran escala de la energía renovable se concentra en la producción de electricidad (García, 2006).

Greenpeace presentó su informe anual 2006 (García, 2006), en el que sostiene que la utilización de energías renovables para producir el 100% de la energía es técnicamente viable y económicamente asumible. Por lo que, según la organización ecologista, lo único que falta para que en España se dejen a un lado las energías sucias, es voluntad política. Para lograrlo, son necesarios dos desarrollos paralelos: De las energías renovables y de la eficiencia energética (eliminación del consumo superfluo).

En México se comienza a tener una mayor conciencia del potencial que ofrece el aprovechamiento de residuos, principalmente urbanos, dados los volúmenes que se manejan en las grandes ciudades del país. Estos residuos y los desechos de animales, desde hace tiempo

se han venido utilizando en instalaciones a nivel de prototipo en el Instituto de Investigaciones Eléctricas y en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. La cuantificación del recurso de la biomasa es una tarea complicada y no existen en México datos precisos, salvo las estadísticas que presenta anualmente el balance nacional de energía en el que se consignan las cantidades consumidas de leña y bagazo de caña. Se estima que el consumo anual de los particulares es de 87,820 Tera Joules (TJ) de bagazo de caña y 247,400 TJ de leña, lo cual da un total de 335,220 TJ (CONAE, 2008).

El incremento de la utilización de energía renovable es una estrategia clave en la Unión Europea en orden para los objetivos ambientales. Se ha estimado que México cuenta con un potencial de reducción y captura de emisiones cercanas a los 81 millones de toneladas de CO₂/año entre el 2008 y 2012. En el mercado del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), esto podría traducirse en ingresos de alrededor de 500 millones de dólares por año. Estos ingresos ayudarán a promover el desarrollo de sectores energético, industrial, agrícola y forestal de México (Morrison, 2004; Rang, 2004).

En la Tabla 2.2 se puede observar el potencial de biomasa en los estados de la república mexicana. Para éstos casos se consideró: El uso de residuos agrícolas, y a sea de ingenios azucareros o algún otro cultivo, la existencia de un relleno sanitario y la posibilidad de aprovechar desechos animales, en estos casos se consideró al estado como muy bueno y la falta de alguno de estos elementos como pobre (CONAE, 2008).

Los esfuerzos para promover el desarrollo de energía renovable en varios estados miembros han mostrado resultados como el uso del viento (Dinamarca, Alemania y España) y bioenergía (Suiza, Finlandia y Austria) (Ghaffar, 1995).

Tabla 2.2 Potencial biomasa estados de la república mexicana
(CONAE, 2008)

ESTADO	BIOMASA
Aguascalientes	MUY BUENO
Baja California	POBRE
Baja California Sur	POBRE
Campeche	POBRE
Chiapas	BUENO
Chihuahua	MUY BUENO
Coahuila	MUY BUENO
Colima	POBRE
Durango	MUY BUENO
Hidalgo	MUY BUENO
Guanajuato	POBRE
Guerrero	POBRE
Jalisco	MUY BUENO
Edo. de México y D.F.	MUY BUENO
Michoacán	MUY BUENO
Morelos	MUY BUENO
Nayarit	POBRE
Nuevo León	MUY BUENO
Oaxaca	POBRE
Puebla	POBRE
Querétaro	POBRE
Quintana Roo	MUY BUENO
San Luís Potosí	BUENO
Sinaloa	POBRE
Sonora	POBRE
Tabasco	POBRE
Tamaulipas	MUY BUENO
Tlaxcala	POBRE
Veracruz	MUY BUENO
Yucatán	POBRE
Zacatecas	POBRE

La bioenergía se ha identificado como la más importante fuente de energía renovable. La bioenergía se enfoca a la reducción de emisiones de dióxido de azufre y de carbono, electricidad y generación de fuentes de calor, uso de biogás y obtención de energía a través de desechos. Una transformación bioquímica de la biomasa en energía es la degradación anaerobia. La degradación anaerobia de un desecho orgánico produce biogás y biomasa estabilizada. El biogás es una mezcla de metano, bióxido de carbono, hidrógeno, ácido sulfhídrico, amoníaco, oxígeno y vapor de agua dependiendo de diferentes materiales degradados en un digestor. El biogás es generado por la fermentación de materia orgánica bajo condiciones anaerobias y es uno de los recursos de energía renovable y que en países de alta población son muy utilizados (Fernández y col., 2005; Sharma y col., 1999). El biogás es una tecnología de desecho cero pues es utilizado para cocinar, los desechos del tratamiento son utilizados como abono para la agricultura y horticultura (Prasertsan y Sajjakulnukit, 2006).

2.1.2 Hidrógeno y biogás

Es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos anaerobios y otros factores, en ausencia de aire (ambiente anaerobio). La digestión o tratamiento anaerobio es un proceso natural que ocurre cuando compuestos biodegradables son expuestos a la acción biológica en ausencia de oxígeno molecular siendo convertidos a dióxido de carbono, metano, ácido sulfhídrico y amoníaco. Cuando la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno, actúa este tipo de bacterias, generando biogás (Jiménez y Martínez, 1995).

La producción de biogás por descomposición anaerobia es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables, ya que produce un combustible de valor; además de generar un efluente que puede aplicarse como mejorador de suelo o abono genérico. El biogás tiene como promedio un poder calorífico entre 4,500 a 5,600 kcal/m³. Este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, en hornos, estufas, secadores, calderas, u otros sistemas de combustión a gas, debidamente adaptados para tal efecto. Se llama biogás a la mezcla constituida por metano (CH₄) en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono, conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. De forma general, al biogás se le ha definido como la mezcla de gases, cuya composición varía de acuerdo a los detalles de su producción. Según Prats (1996), la composición del biogás procedente de la degradación anaerobia de los excrementos de animales se presenta en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Composición biogás (Prats, 1996)

Compuesto	%
CH ₄	50 - 70
CO ₂	30 - 50
H ₂ S	1
H ₂	2

La aplicación del desarrollo de biodigestores para la producción de biogás, a partir de la degradación de materia orgánica, es una aplicación tecnológica para uso de energía renovable en México y países del tercer mundo. A partir del biogás se generarán fuentes energéticas como amoníaco (enfriamiento y refrigeración), metano (calentamiento y electricidad) e hidrógeno (combustión) (Karpenstein, 2001). Las aplicaciones de la biotecnología aportarán la

dimensión tecnológica como centro medular en el Desarrollo Sostenible.

El fenómeno de biodigestión ocurre porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaerobios presentes en el material fecal que, al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH_4) e hidrógeno (H_2) el ya mencionado biogás y el cual es sumamente eficiente si se emplea como combustible. Como resultado de éste proceso, se generan residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas. En los sistemas de digestión se deben controlar ciertas condiciones pH, presión y temperatura a fin de que se pueda obtener un óptimo rendimiento en un biodigestor para la producción de biogás en éste caso hidrógeno (Yang y col., 2007; Yong y col., 2007).

En México existen diversas regiones donde la actividad económica preponderante es la crianza y aprovechamiento integral del ganado vacuno y porcino, principalmente. En éste sentido, hay zonas en el país que se han especializado en éste tipo de actividad económica, donde predomina la existencia de establos y granjas para éste tipo de ganado, con los consiguientes problemas en lo que se refiere al manejo de desperdicios y excretas, así como los problemas de contaminación que esto significa. A la fecha existen proyectos que han desarrollado alternativas para un manejo adecuado de estos desperdicios. De tal manera que se aproveche su contenido energético como fuente de generación de metano, esto considerando y tomando en cuenta estudios realizados en otros países. Cada cabeza de ganado vacuno genera 10 kg/día aproximadamente de excreta con un alto contenido biomásico. Si en México se cuenta, de

acuerdo a datos oficiales del año 2003, con una población estimada de más de 3.5 millones de cabezas de ganado vacuno (cárnico y lechero); sin considerar a la población del ganado porcino, esto significa que anualmente se generan poco menos de 13 millones de toneladas de estiércol ganadero sin ningún aprovechamiento energético, razón por la cual se considera que esto representa una área de oportunidad que podría redituar muchos beneficios en términos de generación de energía y con impactos favorables al ambiente (CONAE, 2008).

Las Figuras 2.1 y 2.2 muestran los resultados de diferentes experimentos para la producción de hidrógeno, tomando en cuenta el efecto de la temperatura y tiempo de estabilización en digestores. A nivel mundial, el proceso de la degradación anaerobia se ha utilizado para la producción de hidrógeno. De esta forma se han estudiado las condiciones más idóneas para el desarrollo de digestores productores de hidrógeno (Yong y col., 2007).

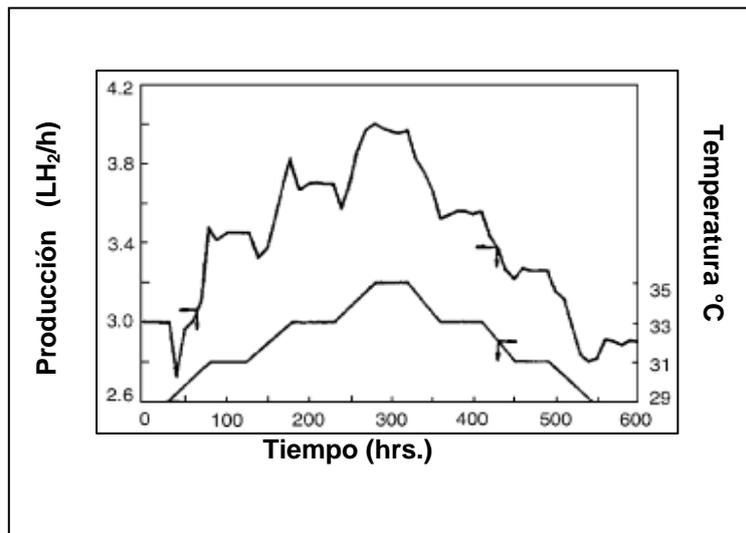


Figura 2.1 Efecto del tiempo en la velocidad de producción de hidrógeno con la temperatura (Yong y col., 2007)

Como se puede ver con las Figuras 2.1, 2.2 y la Tabla 2.4 las condiciones más idóneas para la producción óptima de hidrógeno será entre los 35 y 40 °C a un pH de 5.5 y un tiempo de residencia promedio de 25 días, estos datos serán de gran utilidad para el arranque de cualquier proceso anaerobio.

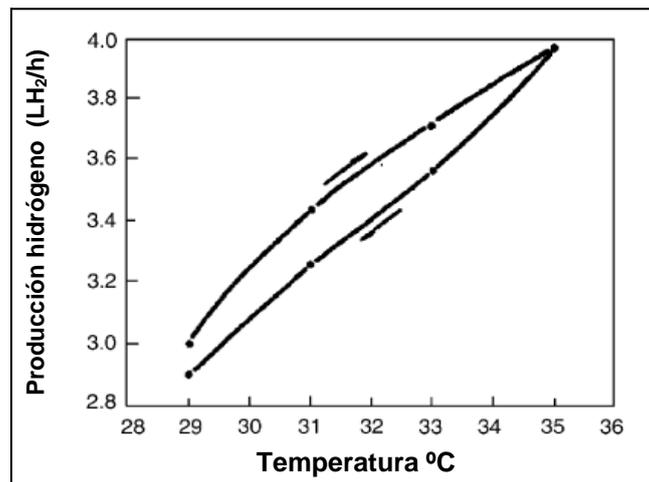


Figura 2.2 Efecto de la temperatura en la producción de hidrógeno de (Yong y col., 2007)

En la Tabla 2.4 se puede observar la influencia en la combinación del pH y la temperatura para quince corridas realizadas por estudios de Yang y col. (2007).

En el pasado se han desarrollado diferentes procesos para el tratamiento de residuos orgánicos y tratamiento de aguas, los más comunes son por medio de reactores anaerobios en los cuales se lleva a cabo la degradación de materia orgánica. La conversión de materia orgánica en estos productos ocurre en tres pasos: El primero es la hidrólisis en la cual se obtienen aminoácidos, monosacáridos y ácidos grasos, entre otros. El segundo paso es la acetogénesis en el cual se produce etanol, H₂ y CO y por último la metanogénesis donde se produce el metano y dióxido de carbono (Metcalf y Eddy, 1991;

Hariklia y col., 2005). De todo esto se hablará más ampliamente en el apartado 2.3.4 en la producción de hidrógeno.

Tabla 2.4 Condiciones experimentales de producción de hidrógeno en un experimento con diferentes variables (Yang y col., 2007)

Corrida	pH	Temperatura °C	Sustrato inicial/Concentración de microorganismo
1	6.0	30	4.7
2	5.0	40	4.7
3	6.0	40	3.1
4	5.0	40	3.1
5	5.0	30	4.7
6	5.0	30	3.1
7	6.0	30	3.1
8	6.0	35	4.7
9	5.5	35	3.9
10	5.5	25	5.5
11	5.5	35	3.9
12	6.5	35	3.9
13	5.5	35	2.3
14	5.5	45	3.9
15	4.5	35	3.9

Con el paso del tiempo se han hecho investigaciones para la mayor producción de hidrógeno. Algunas investigaciones se realizan con sustratos específicos y se ha llegado a resultados con sustratos como glucosa, que el sistema de un reactor anaerobio de dos etapas es un diseño óptimo para operarlo en un intervalo de temperatura de 20 a 50°C en un óptimo entre 25 y 40°C (temperaturas mesofílicas) (Fang y Liu, 2002; Lin y Chang, 1999).

Otros experimentos se han realizado con sacarosa como sustrato para la producción de hidrógeno. En la Figura 2.3 se observa una gráfica de operación de un reactor a un pH de 5.5 a una temperatura de 35°C con 25 g/L de sacarosa y 6.4 gSSV/L como biomasa (Fang y Liu, 2002). De dicha Figura se puede observar que con sacarosa en 14.6 horas se obtuvo la mayor cantidad de hidrógeno y a partir de ahí la pendiente se volverá negativa empezando un decaimiento en la producción de hidrógeno.

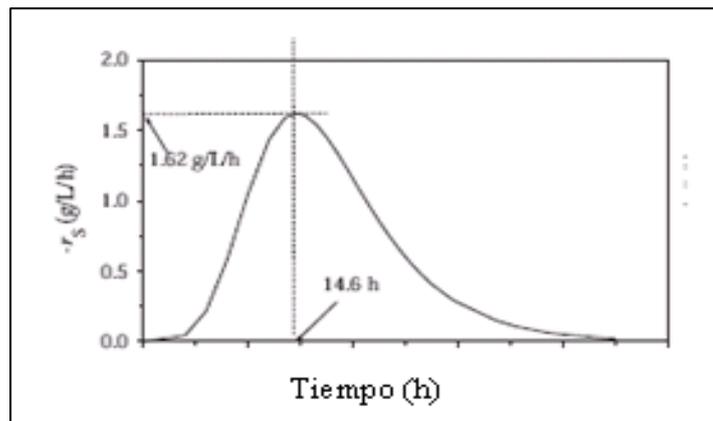


Figura 2.3 Velocidad de producción de hidrógeno en la investigación de Fang y Liu (2002)

2.2 El hidrógeno

El hidrógeno en condiciones normales de presión y temperatura, es un gas diatómico (H_2) incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente inflamable. Con una masa atómica de 1.00794 uma, el hidrógeno es el elemento químico más ligero y es, también, el elemento más abundante, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia del universo (NASA, 2006).

En su ciclo principal, las estrellas están compuestas por hidrógeno en estado de plasma. El hidrógeno elemental es muy escaso en la Tierra y es producido industrialmente a partir de hidrocarburos como, por ejemplo, el metano. La mayor parte del hidrógeno elemental se

obtiene "in situ", es decir, en el lugar y en el momento en el que se necesita. Sus principales aplicaciones industriales son el refinado de combustibles fósiles (por ejemplo, el hidrocracking) y la producción de amoníaco (usado principalmente para fertilizantes). El hidrógeno puede obtenerse a partir del agua por un proceso de electrólisis, pero resulta un método mucho más caro que la obtención a partir del gas natural (Gary, 1994; Haijun y col., 2006).

El hidrógeno puede formar compuestos con la mayoría de los elementos y está presente en el agua y en la mayoría de los compuestos orgánicos. Desempeña un papel particularmente importante en la química ácido-base, en la que muchas reacciones conllevan el intercambio de protones entre moléculas solubles.

Gracias a su estructura atómica relativamente simple, consistente en un solo protón y un solo electrón, el átomo de hidrógeno junto con su espectro de absorción ha sido un punto central en el desarrollo de la teoría de la estructura atómica. Además, la consiguiente simplicidad de la molécula de hidrógeno diatómico y el correspondiente catión H_2^+ , permitió una comprensión más completa de la naturaleza del enlace químico, que continuó poco después con el tratamiento mecano-cuántico del átomo de hidrógeno, que había sido desarrollado a mediados de la década de 1920 (Cruz y col., 2002).

En el universo, el hidrógeno se encuentra principalmente en su forma atómica y en estado de plasma, cuyas propiedades son bastante diferentes a las del hidrógeno molecular. Como plasma, el electrón y el protón del hidrógeno no se encuentran ligados, por lo que presenta una alta conductividad eléctrica y una gran emisividad (origen de la luz emitida por el Sol y otras estrellas). Las partículas cargadas están fuertemente influenciadas por los campos eléctricos y magnéticos.

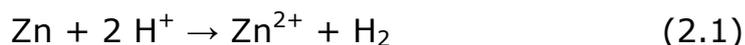
El hidrógeno gaseoso en la Tierra es producido por algunas bacterias y algas, y es un componente natural de las flatulencias de los animales y humanos. El metano es una fuente de enorme importancia para la obtención del hidrógeno (Hawkes y col., 2002; Troshinaa y col., 2002).

El hidrógeno es el único elemento con diferentes nombres comunes para cada uno de sus isótopos (naturales). Durante los inicios de los estudios sobre la radiactividad, a algunos isótopos radiactivos pesados les fueron asignados nombres, pero ninguno de ellos se sigue usando). Los símbolos D y T (en lugar de ^2H y ^3H) se usan a veces para referirse al deuterio y al tritio, pero el símbolo P corresponde al fósforo y, por tanto, no puede usarse para representar al protio. La IUPAC declara que aunque el uso de estos símbolos sea común, no es lo aconsejado.

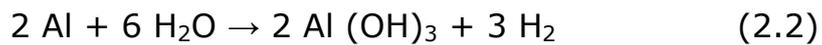
2.2.1 Procesos productores de hidrógeno

El hidrógeno se obtiene en laboratorios de Química y de Biología, a menudo como subproducto de otras reacciones. En la industria se obtiene hidrógeno para la hidrogenar sustratos insaturados; y en la naturaleza como medio para expele r equivalentes reductores e n las reacciones bioquímicas.

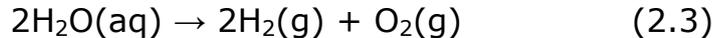
En el laboratorio, el hidrógeno suele obtenerse por la reacción 2.1 de ácidos con metales, tales como el zinc.



En el caso del aluminio, no sólo se genera hidrógeno cuando es tratado con un ácido, sino que también lo hace cuando se le trata con una base como se muestra en la reacción 2.2.



La electrólisis del agua es un método simple de producir hidrógeno, (reacción 2.3), aunque el gas resultante posee necesariamente menos energía de la requerida para producirlo. Una corriente de bajo voltaje atraviesa el agua, formándose oxígeno gaseoso en el ánodo e hidrógeno gaseoso en el cátodo. Generalmente, cuando se produce hidrógeno que va a ser almacenado se emplea un cátodo de platino o de algún otro metal inerte. Por el contrario, si el hidrógeno va a ser consumido "in situ", es necesaria la presencia de oxígeno para que se produzca la combustión y se procura que ambos electrodos (tanto ánodo como cátodo) sean de metal inerte. Si se empleara un metal no inerte, por ejemplo el hierro, éste se oxidaría y disminuiría la cantidad de oxígeno que se desprende.



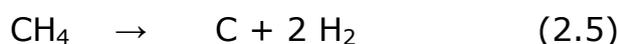
Desafortunadamente solo el 4% del hidrógeno que se produce actualmente procede de la electrólisis del agua, ya que los costos actuales de la electricidad empleada en el proceso hacen que no resulte competitiva en relación con la reformación del gas natural. Los precios de electricidad pueden llegar a ser 3 ó 4 veces superior al de los materiales para obtener hidrógeno a partir del gas natural.

De manera industrial, el hidrógeno puede obtenerse de distintas maneras, pero las más económicas implican su extracción a partir de hidrocarburos (petróleo). El hidrógeno comercial se produce generalmente mediante el reformado con vapor del gas natural (Oxtoby y col., 2002; Gary, 1994). Éste proceso consiste en la reacción de una corriente de vapor de agua con metano para originar

monóxido de carbono e hidrógeno, a una temperatura entre 700 °C a 1,100 °C, reacción 2.4.

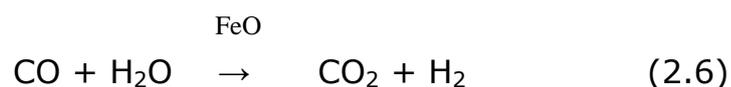


Esta reacción está favorecida a bajas presiones, sin embargo, se lleva a cabo a altas presiones (20 atm) ya que el H₂ de alta presión es el producto más comercializable. La mezcla producto se conoce como "gas de síntesis" porque a menudo se usa directamente para la producción de metanol, electricidad y otros compuestos relacionados. A parte del metano, pueden usarse otros hidrocarburos para generar el gas de síntesis con distintas proporciones de los componentes productos. Una de las complicaciones de la reacción 2.5 es que se presenta en esta tecnología altamente optimizada es la formación de coque o carbón:

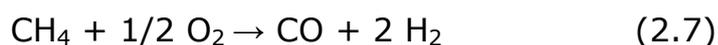


Para evitarlo, el reformado con vapor suele emplear un exceso de H₂O.

Puede recuperarse hidrógeno adicional en éste proceso a partir del monóxido de carbono, mediante una reacción de desplazamiento del agua gaseosa, especialmente con un catalizador de óxido de hierro. La reacción 2.6 también se emplea industrialmente como fuente de dióxido de carbono (Oxtoby y col., 2002; Gary, 1994):



Otros métodos importantes para la producción de hidrógeno incluyen la oxidación parcial de hidrocarburos como en la reacción 2.7.



La reacción 2.8 del carbón puede servir como preludeo a la reacción de desplazamiento mencionada anteriormente (Oxtoby y col., 2002; Gary, 1994).



Muchas veces el hidrógeno es producido y consumido en el mismo proceso industrial, sin necesidad de ser separado. En el proceso Haber-Bosch para la síntesis de amoníaco (el quinto compuesto más producido industrialmente en el mundo), el hidrógeno se obtiene a partir del gas natural.

El hidrógeno también se produce en cantidades significativas como un subproducto en la mayoría de los procesos petroquímicos de cracking con vapor y reformado. La electrólisis de la salmuera para obtener cloro también genera hidrógeno como subproducto (Gary, 1994).

De igual forma el hidrógeno es un producto de algunos tipos de metabolismo anaerobio y es generado por muchos microorganismos, generalmente a través de reacciones catalizadas por enzimas que contienen hierro o níquel, llamadas hidrogenasas. Estas enzimas catalizan la reacción redox reversible entre el hidrógeno y sus dos protones y dos electrones. La evolución del hidrógeno gaseoso tiene lugar en la transferencia de equivalentes reductores al agua, producidos durante el metabolismo del piruvato.

La separación del agua, en la que ésta se descompone en sus protones, electrones y oxígeno, tiene lugar en las reacciones de la fase luminosa del metabolismo de los organismos fotosintéticos. Algunos de esos organismos, incluyendo el alga *Chlamydomonas reinhardtii* y las cianobacterias productoras de hidrógeno; han

evolucionado desarrollando un segundo paso en las reacciones de la "fermentación oscura" en el que los protones se reducen para formar hidrógeno gaseoso por la acción de hidrogenasas especializadas en los cloroplastos (Hawkes y col., 2002; Troshina y col., 2002). Se han realizado esfuerzos para modificar genéticamente las hidrogenasas bacterianas para sintetizar hidrógeno gaseoso de manera eficiente incluso en presencia de oxígeno.

La producción de hidrógeno por microorganismos puede ser dividida en dos principales categorías: Una es la fotosintética bajo condiciones anaerobias con luz y la otra es por medio de la bacteria *quimiotrófica* esta segunda tiene la habilidad de generar energía sin luz. Muchos estudios muestran el uso de cultivos de una bacteria anaerobia de nombre *Clostridium sp* de la cual se hablará más adelante, con la conversión de carbohidratos a gas hidrógeno. (Haijun y col., 2006; Hang y col., 2004; Hariklia y col., 2005; Yang y col., 2007; Yasunori y Naoe, 2005; Yong y col., 2007). Algunas investigaciones se basan en microorganismos anaerobios naturales utilizados en degradación anaerobia de lodos y composta generando hidrógeno a partir de celulosa (Yang y col., 2007).

El impacto ambiental, depende de la forma de extracción que se utilice para la obtención del hidrógeno; hoy aproximadamente, el 95% de la producción del hidrógeno se realiza a través de la quema de combustibles fósiles. Por tanto las emisiones de gases efecto invernadero a la atmósfera están presentes en estas extracciones.

Actualmente, hay dos principales aplicaciones para el hidrógeno. Casi la mitad se emplea para producir amoníaco (NH_3) mediante el proceso de Haber, el cual se utilizará sobre todo como fertilizante, directa o indirectamente. A causa de la explosión demográfica, la agricultura crece, debido a esto la demanda del amoníaco y por tanto

la de hidrógeno también. La otra mitad de la producción actual del hidrógeno se utiliza para convertir cadenas largas de hidrocarburos (que son la mayoría en el petróleo sin refinar) en fracciones más ligeras, convenientes para su uso como combustibles. Este último proceso se conoce como hydrocracking. Hydrocracking representa un área incluso de mayor crecimiento que la del amoníaco, los incrementos en los precios del petróleo animan a las compañías petroleras a extraer un material más pobre, como pueden ser arenas de alquitrán y pizarra de petróleo (Gary, 1994). En la Tabla 2.5 se muestra las materias primas para la producción de hidrógeno a nivel industrial.

Tabla 2.5 Materia prima para la producción de hidrógeno (Gary, 1994)

Producción hidrógeno	Porcentaje %
Gas natural	48
Aceite	30
Carbón	18
Electrólisis	4

El gran mercado y el incremento del uso del hidrógeno han estimulado a la creación de un gran interés, en busca de métodos alternativos más baratos para la producción de hidrógeno.

2.2.2 Usos del hidrógeno

La economía del hidrógeno utilizaría una fuente energética no basada en combustibles fósiles (energías renovables/nuclear/fusión), utilizando varios métodos (electrólisis, hydrocracking, etc.) para producir el gas de hidrógeno para uso en los múltiples sectores como fuente de energía almacenada. Si la energía se utiliza para producir hidrógeno, entonces el hidrógeno se podría utilizar como forma de

almacenaje de energía sustituyendo el gas y el petróleo causantes de emisiones de gases de efecto invernadero.

En una economía del hidrógeno, los grandes generadores de hidrógeno se combinarían con un sistema de distribución como el sistema de la distribución del gas natural que conocemos actualmente, pero capaz de satisfacer los desafíos adicionales como lo es el transporte impulsado por hidrógeno. En la distribución de energía, el usuario intermedio y final podría utilizar celdas de combustible para satisfacer sus necesidades, sustituyendo los actuales sistemas de generación y distribución local y los vehículos de combustión interna. Sistemas similares se utilizan actualmente con el gas natural para producir electricidad, en instalaciones urbanas con co-generación donde además se aprovecha el calor residual.

La fuente de energía primaria para producir hidrógeno podría ser combustible nuclear o fósil. En una economía del hidrógeno, incluso las fuentes eléctricas primarias como la energía hidráulica y la eólica se podrían utilizar para la producción de hidrógeno. El equilibrio apropiado entre la distribución del hidrógeno y la distribución eléctrica es una de las preguntas básicas a resolver en la economía del hidrógeno. Los grandes generadores que produjesen hidrógeno de fuentes de energía fósiles generarían cantidades enormes de contaminación, pero al centralizar las emisiones, los sistemas de control de emisión serían más fáciles de examinar. La quema de combustibles fósiles en centrales grandes es mucho más eficiente que en automóviles o pequeñas centrales y por lo tanto las emisiones en las ciudades quedarían limpias de contaminación, ya que las emisiones de las centrales se descargarían en zonas despobladas.

Sin embargo, existen aún ciertas barreras tecnológicas que impiden que esta economía pueda llevarse a cabo, mientras, las investigaciones continúan.

En la industria química y petroquímica se requieren grandes cantidades de H_2 . La aplicación principal del hidrógeno es para el procesamiento (refinado) de combustibles fósiles y en la síntesis de amoníaco. Los procesos fundamentales que consumen H_2 en una planta petroquímica son la hidrodeshidrogenación, la hidrodeshidrosulfurización y el hidrocracking (Gary, 1994). El H_2 posee otros usos como agente hidrogenante, particularmente en el incremento de la saturación de grasas y aceites insaturados (que se encuentran en productos como la margarina), y en la producción de metanol. Es empleado también en la manufactura del ácido clorhídrico y como agente reductor para minerales metálicos.

Además de sus usos como reactivo, el hidrógeno posee muchas aplicaciones en Física e Ingeniería. Se usa para el escudo de gas en métodos de soldadura tales como la soldadura con hidrógeno atómico. El hidrógeno se emplea como refrigerante en generadores eléctricos en las estaciones eléctricas, ya que es el gas con mayor conductividad térmica. El hidrógeno líquido se usa en la investigación criogénica, incluyendo el estudio de la superconductividad.

Los isótopos del hidrógeno también tienen sus aplicaciones particulares. El deuterio (2H) posee aplicaciones en el campo de la fisión nuclear, como moderador para frenar neutrones, y también tiene aplicaciones en reacciones de fusión nuclear. Los compuestos de deuterio tienen usos en Química y Biología, sobre todo en los estudios de efectos isotópicos. El tritio (3H), generado en los reactores nucleares, se usa en la producción de bombas de hidrógeno, como

radiomarcador en Ciencias Biológicas, y como fuente de radiación en pinturas luminiscentes.

El spin o giro de la molécula de hidrógeno puede ser alineado homogéneamente mediante ondas de radiofrecuencia. Esta propiedad es el fundamento de la resonancia magnética nuclear, dispositivo de obtención de imágenes que es capaz de recoger información en función de la diferente velocidad de recuperación del spin original de las moléculas de hidrógeno (presentes en el agua) de los diferentes tejidos de un ser vivo.

El hidrógeno gaseoso es muy inflamable y arde en concentraciones muy bajas en aire (4% de H₂). La entalpía de combustión del hidrógeno es -286 kJ/mol (Rojas, 2006), y la reacción 2.9 de combustión es la siguiente:



Cuando se mezcla con oxígeno en una alta proporción, el hidrógeno explota. En el aire, el hidrógeno arde violentamente. Las llamas de oxígeno e hidrógeno puro son casi invisibles al ojo humano, como se constata al ver lo tenues que son las llamas de los motores principales de las lanzaderas espaciales, en contraposición a lo fácilmente visibles que son las llamas de los cohetes impulsores de las lanzaderas, mostradas a continuación en la Figura 2.4 (NASA, 2006).

Por este motivo, es difícil detectar visualmente si un escape de hidrógeno está ardiendo. Uno de los primeros usos que se dio al hidrógeno gaseoso fue como gas de relleno para globos aerostáticos y, más tarde, otras aeronaves. El hidrógeno gaseoso se obtenía por reacción entre el ácido sulfúrico y el hierro metálico. La alta y rápida

inflamabilidad del hidrógeno gaseoso se dejó patente en la tragedia del dirigible Hindenburg en 1937 (Figura 2.5), que se incendió cuando aterrizaba provocando la muerte de 35 personas. Debido a esta peligrosidad que presentaba el hidrógeno gaseoso, fue reemplazado posteriormente en globos y aeronaves por el helio gaseoso, un gas inerte. Las llamas que se aprecian en las fotos del dirigible Hindenburg son llamas de hidrógeno coloreadas por el material de la cubierta de la aeronave, que contenía carbono y polvo de aluminio pirofórico, así como otros materiales combustibles.

Independientemente de la causa de éste incendio, es claro que se produjo la ignición del hidrógeno, ya que en ausencia de éste gas la cubierta del dirigible habría tardado horas en quemarse. Otra característica de los fuegos alimentados por hidrógeno es que las llamas tienden a ascender rápidamente con el gas a través del aire. Lo cual también se puede apreciar en las fotografías del accidente del Hindenburg, causando menos daños que los fuegos alimentados por hidrocarburos. Dos tercios de los pasajeros del dirigible sobrevivieron al incendio, y muchas de las muertes que se produjeron fueron por caídas al vacío y por la combustión de gasolina (Bain y Van, 1999).



Figura 2.4 Cohete Atlantis (NASA, 2006)

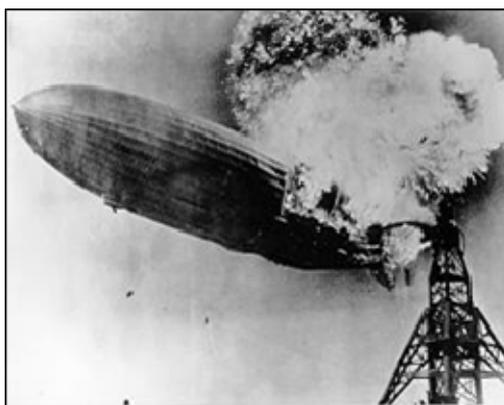


Figura 2.5 Dirigible Hindenburg (Bain y Van, 1999)

2.2.3 Automóviles con hidrógeno

El hidrógeno reacciona directamente con otros elementos oxidantes. Puede producirse una reacción espontánea y violenta a temperatura ambiente en presencia de cloro o flúor, con la formación de los correspondientes halogenuros de hidrógeno: cloruro de hidrógeno y fluoruro de hidrógeno.

Las tecnologías del hidrógeno son tecnologías relacionadas con la economía del hidrógeno y con los diversos métodos de creación, almacenamiento y proceso del hidrógeno. Las tecnologías del hidrógeno pueden desempeñar un papel importante en la prevención del cambio climático y crear energía limpia para muchos usuarios (Reith y col., 2003) por ejemplo en la producción de luz y transporte como se muestra en las Figuras 2.6 y 2.7.

Un vehículo de hidrógeno es un automóvil que utiliza hidrógeno diatómico como su fuente primaria de energía para propulsarse. Estos automóviles utilizan generalmente el hidrógeno en uno de estos dos métodos: combustión o conversión en celda de combustible. En la combustión, el hidrógeno se quema en un motor de explosión, de la misma forma que la gasolina. En la conversión de celda de

combustible, el hidrógeno se convierte en electricidad a través de celdas de combustible que mueven motores eléctricos, la celda de combustible funciona como una batería (Rojas, 2006).

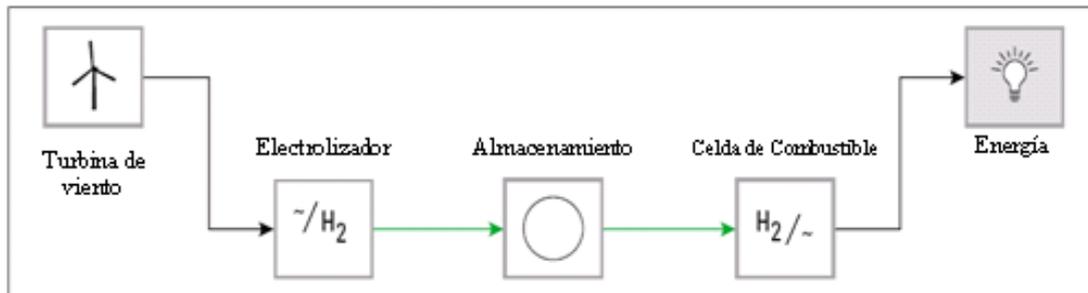


Figura 2.6 Diagrama conversión a energías limpias (Reith y col., 2003)

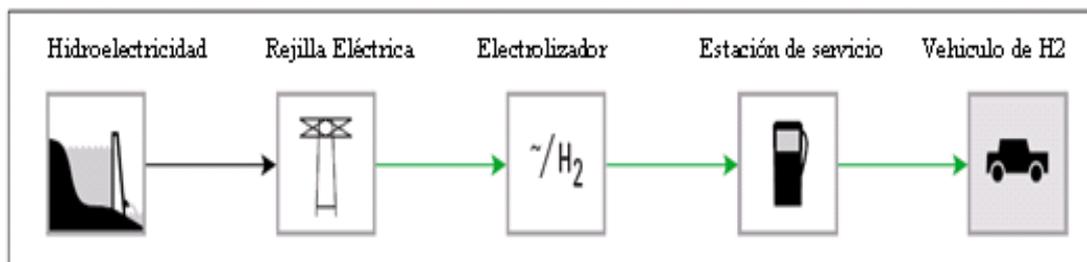


Figura 2.7 Diagrama conversión a combustible limpio (Reith y col., 2003)

Con cualquier método, el subproducto principal del hidrógeno consumido es el agua, que adicionalmente puede también moverse en una micro-turbina por ejemplo un automóvil de vapor.

Con el NEBUS (Nuevo Autobús Eléctrico en español) que se presenta en la Figura 2.8 presentado en mayo de 1997, Daimler-Benz accedió a otro campo de aplicaciones para la técnica de las celdas de combustible: el transporte público urbano. Con el depósito de hidrógeno lleno, el NEBUS alcanzaba una autonomía de 250 km, lo

cual le permitía cubrir el servicio normal de transporte urbano. Su potencia de 250 kW le permitía acelerar hasta los 80 km/h. EL NEBUS demostró su viabilidad en las redes de autobuses de Oslo, Hamburgo, Perth, Melbourne y Sacramento (Rojas, 2006).



Figura 2.8 Nuevo autobús eléctrico Daimler-Benz (Rojas, 2006)

El Mercedes-Benz Nekar 5 (Figura 2. 9) es un prototipo de automóvil desarrollado por el fabricante alemán Mercedes-Benz en el año 2000. Funciona con una celda de combustible, cuyo hidrógeno se obtiene a partir de metanol almacenado en un tanque. El metanol se mantiene en estado líquido a temperatura ambiente, así que se puede manipular y distribuir de forma similar a los combustibles habituales como la gasolina o el gasóleo. El Nekar 5 tiene una velocidad máxima de 150 km/h y una autonomía de 450 km. El sistema de la celda de combustible fue instalado en un Mercedes-Benz Clase A de serie (Rojas, 2006).



Figura 2.9 Mercedes-Benz nekar 5 (Rojas, 2006)

En julio de 2003 en Folkecenter, Dinamarca se lanzó un Ford Focus (Figura 2.10) con motor de 2.0 L, 197 kW con gasolina y 34 kW. con hidrógeno para que funcionara con gasolina e hidrógeno, almacenó 190 L de H₂ comprimido a 120 MPa, con un rango de 90 a 120 km y un consumo entre 0.24 y 0.28 Nm³/km (Folkecenter, 2003).



Figura 2.10 Ford focus 2003 que funciona con gasolina e hidrógeno (Folkecenter, 2003)

En octubre del 2004 en la apertura de una estación de llenado de hidrógeno en el Aeropuerto Internacional de los Ángeles, California, el gobernador de California mostró un vehículo experimental llamado "GM Hummer H2H" (Figura 2.11). Ésta es una versión de un motor de combustión interna V8 Vortec 6000 de 6 L, con una potencia de 190 kW con hidrógeno, almacena 5.5 kg de H₂ comprimido a 35 MPa, tiene un intervalo de 80 km y un consumo de 2.28 kWh/km.



Figura 2.11 Automóvil experimental que funciona con hidrógeno GM hummer h2h 2004 (GMC, 2004)

En 2005, el Centro Tecnológico de Investigación en Motores y Acústica de Auto móviles (CMTIMA) presentó un prototipo de auto mini de transporte de carga (Figura 2.12), de la marca Peugeot. Este auto es capaz de funcionar con gasolina e hidrógeno con un consumo entre 1.5 y 2 Kg de hidrógeno comprimido por cada 100 km, y forma parte de un proyecto de dos años patrocinado por el Consejo Regional de Investigación y Energía de Francia que ha invertido 200 mil euros desde octubre del 2004 (CMTIMA, 2005).



Figura 2.12 Auto mini de transporte (CMTIMA, 2005)

En 2005, la Asociación Nacional de Energía de Hidrógeno de Rusia (NHPA) junto con otras tres entidades presentó el prototipo de una camioneta Van a hidrógeno "GAZ H2-Van" (Figura 2.13). La camioneta tiene una capacidad para 9 pasajeros, un motor que funciona con gasolina e hidrógeno. Tiene dos tanques de hidrógeno comprimido que almacena 2 kg de hidrógeno en total, lo cual proporciona una economía de combustible de 2 kg de hidrógeno por cada 100 Km y de 6 litros de gasolina por cada 100 Km, con una velocidad de 120 km/h. La NHPA rusa planea probar una decena de estos vehículos e inaugurar una estación de llenado de hidrógeno (NHPA, 2005).

En enero de 2006, en el North América Internacional Auto Show, la empresa Ford presentó una camioneta pick up denominada "F 250

Súper Chief tri-fuel truck” (Figura 2.14), que tiene la particularidad de utilizar tres tipos de combustible, gasolina, E85 (gasolina con 15% de etanol) e hidrógeno comprimido a 70 MPa. El motor que utiliza es un V10, 6.8 L turbo cargado (solo para el hidrógeno), que tiene una potencia de 310 hp (231 kW) con gasolina y E85, y una potencia de solo 250 hp (187 kW) cuando funciona con hidrógeno. Tiene un intervalo de distancia de 800 km con los tres combustibles. Se espera que éste vehículo pueda ser comercializado en un precio cercano a los US \$50,000 y el cual se encuentra en estudios de diseño (Rojas, 2006).



Figura 2.13 Camioneta GAZ h2-van 2005 (NHPA, 2005)

En Febrero del 2006 en Hiroshima, Japón; la corporación Mazda Motor recibió permiso del Ministerio de Infraestructura Terrestre y Transporte para empezar a arrendar el auto RX-8 a hidrógeno RE (Figura 2.15), a sus dos primeros clientes corporativos. Siendo así los primeros contratos de arrendamiento de vehículos equipados con motores rotatorios a hidrógeno y a gasolina en el mundo.

El precio del arrendamiento mensual del Mazda RX-8 Hydrogen RE es de alrededor de US \$3600 que es cerca de la mitad del precio de arrendamiento mensual de un vehículo de celda de combustible ya disponible en Japón y el plazo de pago es de 30 meses. El Mazda RX-8 Hydrogen RE cuenta con un motor rotatorio de 0.654 L x 2,80 kW con H₂, 154 kW con gasolina, con un almacenamiento de 110 L de H₂

comprimido a una presión 35 MPa, con un rango de 1 00 km con H₂ (JCN, 2006).



Figura 2.14 Camioneta f 250 super chief tri-fuel truck ford (Rojas, 2006)



Figura 2.15 Mazda rx-8 hydrogen re Mazda 2006 (Rojas, 2006)

El BMW Serie 7 (Figura 2.16), es un automóvil de turismo del segmento F producido BMW. Es un sedán de cuatro puertas con motor delantero longitudinal y tracción trasera. La generación actual se ofrece con carrocería de batalla corta ("E65") y larga ("E66").

BMW planea ofrecer un coche híbrido de la Serie 7 que consume tanto gasolina como hidrógeno presentado en el Expo U.S. 2006 (Rojas, 2006).



Figura 2.16 Auto BMW serie 7 a hidrógeno (Rojas, 2006)

En Marzo del 2006 en el marco de la Annual Hydrogen Conference 2006, se presentó una camioneta pick up GMC Truck Silverado (Figura 2.17). Éste tiene un motor de combustión interna de hidrógeno V8, 6.0 L, que almacena 10.5 kg de hidrógeno comprimido en tres tanques a 35 MPa. Se espera que tenga una economía de combustible de 15.7 L de gasolina equivalente por cada 100 km y un intervalo de recarga de hidrógeno de 250 km. Se probarán 8 vehículos durante 2 años dentro del programa de la Utilización de Hidrógeno Residual Industrial en Columbia Británica, Canadá. La empresa que impulsa es Power Tech Laboratorios (Rose y Cooper, 2007).



Figura 2.17 GMC silverado a hidrógeno (Rose y Cooper, 2007)

El fabricante automovilístico estadounidense General Motors (GM) comenzará este otoño una fase de pruebas en la que estudiará la aplicación de tecnologías que utilizan el hidrógeno como combustible en vehículos de uso cotidiano. El director de la filial europea de GM, Carl-Peter Foster, consideró hoy que los vehículos que incluyan esta tecnología que aprovecha la energía que se desprende de la combinación del hidrógeno y el oxígeno, serán comparables en cuanto a las prestaciones y los costes a los automóviles que utilizan combustibles fósiles en 2010.

GM presentó su nuevo modelo Hydrogen4, del que circularán 100 unidades en todo el mundo a partir del próximo otoño, la mayor parte en EU, para comprobar el uso de la celda de combustible en las carreteras. El nuevo vehículo, marca Chevrolet, tiene un motor eléctrico de 100 caballos, alcanza una velocidad máxima de 160 km/h y tiene una autonomía de 320 kilómetros, gracias a un depósito que almacena 4.2 kg de hidrógeno. La compañía mostró el vehículo en el Salón Internacional del Automóvil de Frankfurt, que se celebró del 13 al 23 de septiembre (El Universal, 2007b).

La empresa automotriz Mazda presentó un nuevo tipo de vehículo híbrido con un motor eléctrico alimentado por hidrógeno. El híbrido Premacy Hydrogen RE (Figura 2.18) cuenta con un motor rotatorio, famoso por su operación silenciosa debido a que no tiene pistones como los motores tradicionales. El motor es alimentado por energía derivada de la combinación de hidrógeno con el oxígeno del aire, que emite agua limpia.

Un motor rotatorio tradicional usa hidrógeno almacenado en un tanque, aunque puede funcionar con gasolina si se acaba éste gas. Ejecutivos de Mazda dijeron que el nuevo híbrido es superior a sus

otros vehículos que usan hidrógeno y que el nuevo modelo tiene una autonomía de 200 kilómetros con un tanque lleno, el doble que el modelo viejo. El vehículo cuenta con una batería de iones de litio que se recarga por sí sola aprovechando la energía generada al frenar, lo que contribuye al ahorro de electricidad. Mazda no publicó quién suministra la batería. La firma automotriz japonesa indicó que el auto saldrá a la venta el año que viene. En principio, sólo estará disponible en Japón (El Universal, 2007a).



Figura 2.18 Auto Mazda premacy hydrogen re (El Universal, 2007a)

General Motors (GM) presentó en enero del 2008 en la Feria de la Electrónica de Consumo (CES) el prototipo Cadillac Provoq (Figura 2.19), un vehículo alimentado con celdas de combustible de hidrógeno. GM presentó el vehículo "como el último ejemplo del sistema de propulsión E-Flex" de la compañía y combina la nueva quinta generación de celda de combustible con una batería de litio-ion para generar electricidad. El fabricante dijo que el prototipo puede recorrer 483 kilómetros (unas 300 millas) antes de abastecer de hidrógeno.

Provoq tiene un par de tanques de hidrógeno debajo del piso de la zona de carga capaces de almacenar 6 kg de H_2 . Las celdas de combustible están localizadas debajo de la cajuela. La batería de litio-ion puede almacenar hasta 9 kilovatios/hora de electricidad y proporcionar un pico máximo de 60 kilovatios. Larry Burns, vicepresidente de GM para Investigación y Desarrollo, afirmó que

Provoq: "Es una visión de lo que vendrá, un vehículo de celda de combustible eléctrico que proporciona las características de conducción que quieren los clientes de Cadillac y sin tener que utilizar una sola gota de petróleo". El vehículo también cuenta con un panel solar integrado en el techo para alimentar accesorios, como las luces interiores o el sistema de sonido (El Universal, 2008a).



Figura 2.19. Auto provoq General Motors 2008 (El Universal, 2008a)

Toyota presentó los resultados de sus últimas investigaciones y avances en celdas de combustible realizados en sus plantas de Japón. El Highlander FCHV-adv (Figura 2.20), cuenta con un sistema de hidrógeno almacenado en el vehículo que alimenta e impulsa el vehículo en conjunción con un motor eléctrico. Por tanto, se habla de una camioneta híbrida alimentada por hidrógeno. Este vehículo de cero emisiones y de 122 hp se encuentra disponible en el país asiático bajo renta. Uno de los grandes problemas de los vehículos propulsados por hidrógeno es su escasa autonomía. De hecho, el predecesor de esta camioneta tenía una autonomía de apenas 330 km.

Ahora, con la nueva tecnología de hidrógeno, estamos hablando de una autonomía de hasta 830 km con una sola carga, teniendo en cuenta que éste vehículo es un SUV de más de 1,800 kg de peso. Se empiezan a nivelar las diferencias con los motores de gasolina. El

secreto de la autonomía es la mejora de la celda de combustible, ahora capaz de funcionar a temperaturas de hasta -30°C , con un mejor rendimiento y asociado a un nuevo depósito de alta presión. El sistema de recuperación de energía al frenar se ha mejorado extensivamente y se ha reducido la carga que tienen que soportar las baterías de una sport utility por los sistemas auxiliares del complejo sistema de propulsión. El problema para la producción y venta de estos vehículos es su altísimo precio, de ahí que sólo estén disponibles bajo renta. Encontrar una estación que surta el hidrógeno es también complicado, hay muy pocas en todo el mundo y producir hidrógeno consume aún mucha energía eléctrica. Si todos estos aspectos van mejorando poco a poco, en economías de escala puede que el hidrógeno sea una alternativa al petróleo (Mendoza, 2008).



Figura 2.20 Camioneta highlander fchv-adv Toyota (Mendoza, 2008)

La empresa automotriz General Motors Corp. mantiene un programa de vehículos futuristas propulsados por hidrógeno que podrían ser una realidad en un futuro no muy lejano. GM y empresas como Honda Motor Co. y BMW AG distribuyeron varios centenares de vehículos entre voluntarios de zonas suburbanas, de las ciudades y áreas rurales para calibrar su funcionamiento y aceptación en la rutina diaria.

Las celdas de combustible de hidrógeno han figurado en los vehículos experimentales de la industria automotriz desde hace años, y varias empresas prueban flotas reducidas de esos modelos. Sus ejecutivos se interesaron especialmente cuando el presidente George W. Bush anunció en el 2003 que el gobierno invertiría 1,200 millones de dólares para fomentar su desarrollo. La empresa seleccionó un reducido número de personas para participar en el "Proyecto Driveway", un programa que permite a sus clientes formular sugerencias y comentarios sobre el funcionamiento y manejo del Chevrolet Equinox (Figura 2.21), un vehículo impulsado por células de combustible de hidrógeno que generan electricidad.

General Motors eligió participantes que viven cerca de estaciones de servicio y en base a su nivel de interés en las celdas de combustible y su entusiasmo por la nueva tecnología. La empresa pagó el costo del combustible de hidrógeno, el seguro y el mantenimiento del vehículo. El Equinox, que contiene unos 4 kg de hidrógeno presurizado en sus tanques, genera electricidad procedente de una reacción entre el hidrógeno y el oxígeno y produce un rendimiento equivalente a unas 43 milla/galón.

Aunque el hidrógeno es muy inflamable el combustible se disiparía en el aire en una concentración no inflamable si uno de los tanques sufre una fuga o un desgarró en una colisión. Los vehículos, que no emiten contaminantes nocivos sino diminutas gotas de agua, tienen que superar muchos obstáculos para ser viables debido a la carencia de estaciones de servicio y el elevado costo de su desarrollo. Las empresas automotrices no han dado cifras de costos, pero cada vehículo puede alcanzar un precio de un millón de dólares o más porque la mayoría son prototipos fabricados enteramente a mano. (El Universal, 2008b).



Figura 2.21 Auto Chevrolet Equinox fuel cell suv (El Universal, 2008b)

Así como también en la aeronáutica tenemos por ejemplo el Tupolev Tu-154 (Designación OTAN: Careless) es un avión trimotor de medio alcance para 150-180 personas creado en la URSS en 1968. El primer Tu-154 despegó en 1971 y rápidamente se convirtió en una aeronave popular en muchos de los países del bloque socialista. La última venta de este tipo de avión fue hecha a finales de los años 90. Sin embargo, Tupolev anunció en el año 2006, la producción del Tu-154 está oficialmente finalizada. Cuenta con tres turbinas Kuznetsov NK-8-2U dispuestas en la parte posterior del avión, dos en los costados y la tercera arriba del fuselaje. En la forma y el tamaño se asemeja al exitoso Boeing 727, del que se presume que fue imitado.

Se desarrollaron 4 variantes al modelo original que básicamente mejoraron en la técnica, porque óptimamente los aviones eran los mismos: Tu-154A, Tu-154B, Tu-154S y el más moderno y eficiente Tu-154M. Además se desarrollaron a partir del Tu-154, dos prototipos basados en este avión: Tupolev Tu-155. El Prototipo usaba gas natural o metano para alimentar su motor central, realizó su primer vuelo a finales de los años 80. Tupolev Tu-156 prototipo (Figura 2.22), se adaptó para que los tres motores pudieran usar hidrógeno o gas natural (Rojas, 2006).



Figura 2.22 Avión tupolev tu-156 (Rojas, 2006)

Algunos otros de los coches que trabajan a base de hidrógeno son: BMW H2R, BMW Hydrogen 7, Chrysler Natrium, Fiat Panda Hydrogen, Fuel Cell Bus Club, General, Motors Hy-wire, General Motors Sequel, Honda FCX, Mercedes-Benz F-Cell, Morgan LIFEcar y el Peugeot Quark entre otros. La Tabla 2.6 resume los vehículos propulsados por hidrógeno.

2.2.4 Aplicaciones en México

En abril del año 2005, el Rector Dr. Juan Ramón de la Fuente, creó el programa transdisciplinario en investigación y desarrollo para facultades y escuelas de la UNAM, a cargo de la Secretaría de Desarrollo Institucional. El programa consta de siete macroproyectos coordinados por la Unidad de Apoyo a la Investigación en Facultades y Escuelas, el órgano de decisión del Macroproyecto o "La Ciudad Universitaria y la Energía". Por lo anterior, los objetivos del macroproyecto son: Diseñar y desarrollar de manera integral infraestructura, tecnología y cultura para transformar el campus universitario en un modelo de utilización inteligente de la energía y en un aula de enseñanza del tema; convertir al campus universitario en un modelo de utilización inteligente de las diferentes formas de energía necesarias para la satisfacción de sus necesidades, principalmente las energías renovables disponibles en el campus.

Tabla 2.6 Resumen de vehículos propulsados con hidrógeno.

Nombre	Fabricante	Tipo de motor	Velocidad máxima	Combustible cantidad	Distancia	Año
Nebus	Daimler-Benz	NR	80 km/h	NR	250 km	2006
Necar 5	Mercedes-Benz	NR	150 km/h	NR	450 km	2000
Focus	Ford	2.0 l	NR	190 l	120 km	2003
Hummer h2h	GMC	v8 vortec 6l	NR	5.5 kg	80 km	2004
Transporte mini	Peugeot	NR	NR	1.5-2 kg	100 km	2005
Gaz h2-van	NR	NR	120 km/h	2 kg	100 km	2005
Ford 250 súper chief tri-fuel truck	Ford	6.8 L turbo cargado	NR	NR	800 km	2006
Rx-8 hidrogeno re Mazda	Mazda	motor rotatorio de 0.654 l	NR	110 L	100 km	2006
Bmw serie 7	BMW	motor delantero longitudinal	NR	NR	NR	2006
Truck silverado	GMC	v8, 6.0 l.	NR	10.5 kg	250 km	2006
Hydrogen 4	GMC	motor eléctrico	160 km/h	4.2 kg	320 km	2007
Premacy hidrogeno-Re	Mazda	motor rotatorio	NR	NR	200 km	2007
Cadillac provoq	GMC	NR	NR	6 kg	483 km	2008
Highlander fchv-adv	Toyota	motor eléctrico	NR	NR	830 km	2008
Equinox	Chevrolet	NR	NR	4 kg	NR	2008

Para lograr los objetivos, éste macroproyecto se sustenta en las siguientes seis líneas de investigación: energía solar (6 proyectos); energía de biomasa (3 proyectos); energía del hidrógeno (3 proyectos); diagnóstico y ahorro de energía (5 proyectos); utilización

y ahorro de energía (5 proyectos); y cultura energética (1 proyecto). Una de las líneas de investigación es: Proyecto CU energía 1/03 Aprovechamiento de biogás a partir de biomasa, obteniendo hidrógeno para transporte vehicular. Entre los objetivos de este proyecto se encuentra: Implantar una logística de recolección y manejo de los desperdicios orgánicos y de jardinería generados en CU para su almacenamiento en lugares adecuados y la obtención de biomasa, el transformar esta biomasa en formas aprovechables tal como biogás y su reformación para obtener un gas rico en hidrógeno, el uso de hidrógeno como fuente de energía para la alimentación de un vehículo de 1.5 hp mejor resumido en la Figura 2.23. Además de metas tales como: Estudios preoperativos, diseño de la logística, diseño del biodigestor, estudios para la aplicación en la celda de combustible, construcción de la planta de transformación, puesta en operación de la planta, generación y manejo de subproductos obtenidos tales como abonos y otros gases, generación de hidrógeno y aplicación en transporte.

Con el objetivo de impulsar el uso del hidrógeno como fuente de energía alterna, expertos de la Facultad y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) diseñan lo que en breve se convertirá en el primer autobús foráneo (Figura 2.24), que funcione con este tipo de combustible dicha unidad utiliza un motor Mercedes-Benz de 350 caballos de fuerza y recorrerá la zona sur del país, desde la ciudad de México hasta la Península de Yucatán, en exclusiva para la compañía Autobuses de Oriente (ADO). En el proyecto denominado "Autobús a Hidrógeno Foráneo, ADO", participan el fabricante de vehículos, una empresa productora de gases, ADO, además de la Red Nacional del Hidrógeno (RNH₂) y la Facultad e Instituto de Ingeniería de la UNAM (García, 2007).

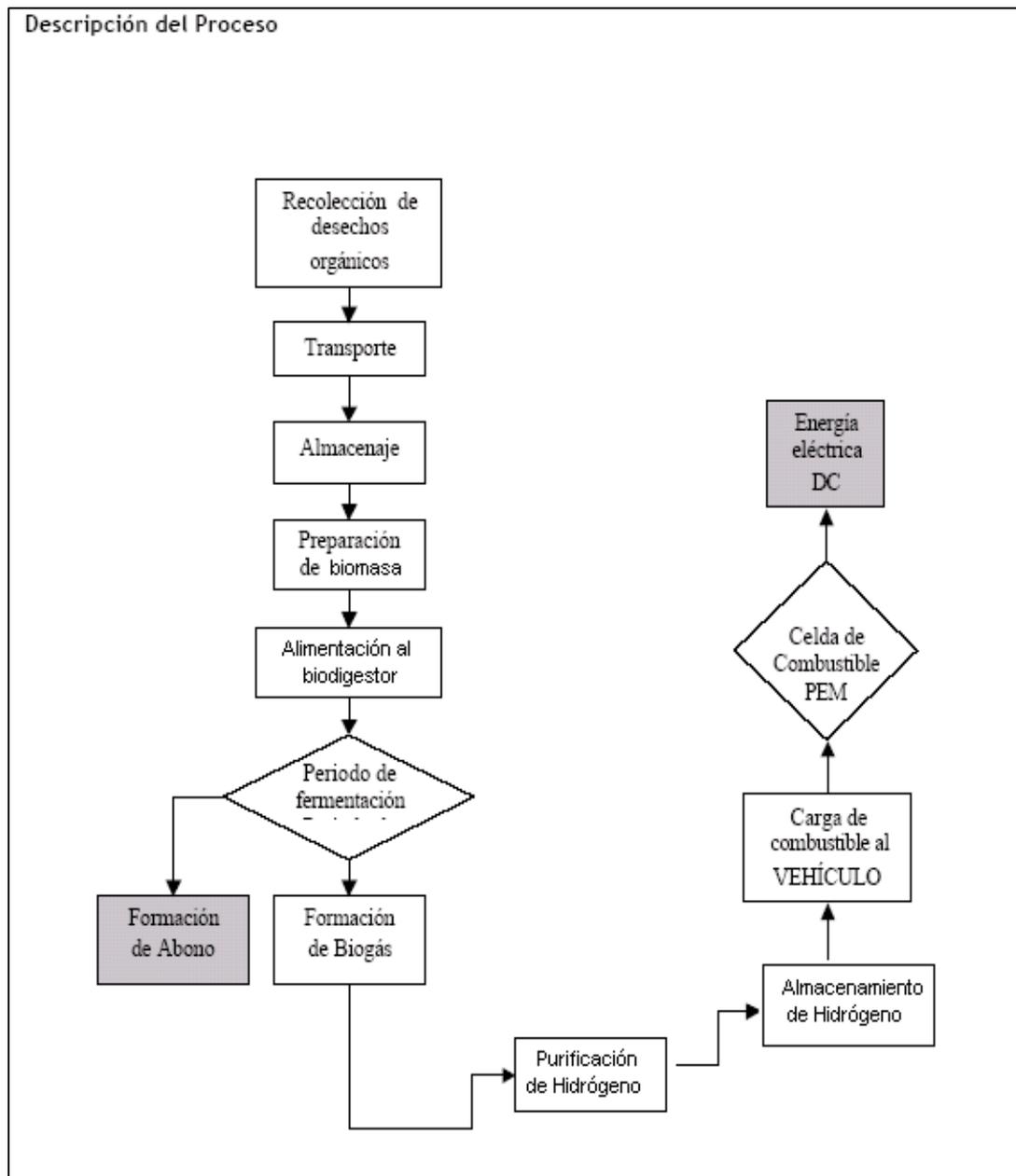


Figura 2.23 Esquema producción hidrógeno macroproyecto UNAM (Castro, 2005)

A partir del mes de noviembre del 2008, en la UNAM está listo el prototipo del primer vehículo compacto híbrido mexicano, el Ecovía (Figura 2.25), que funcionará con hidrógeno, celdas de combustible y energía eléctrica. Forma parte del macroproyecto "La Ciudad Universitaria y la Energía", que depende del Postgrado en Diseño Industrial, con sede en la Facultad de Arquitectura, enmarcado en el Programa Transdisciplinario en Investigación y Desarrollo para

Facultades y Escuelas. El Ecovía es un concepto de automóvil estrechamente relacionado con el contexto universitario. No es sólo una integración técnica que puede rodar, sino también un vehículo que podrá resolver necesidades de usuarios específicos, comentó el coordinador del Postgrado en Diseño Industrial y director de esta iniciativa, el Dr. Óscar Salinas Flores.



Figura 2.24. Autobús Mercedes- Benz (García, 2007)



Figura 2.25 Auto Ecovía (UNAM 2008)

Este vehículo ecológico y multifuncional está pensado para apoyar algunos servicios que ofrece la UNAM a su comunidad y visitantes, como vigilancia, auxilio vial y médico, transporte de personas y distribución de paquetería y correo. Ésta es la primera universidad pública del país que cubrirá totalmente los costos de un proyecto de

éste tipo. En él participa un grupo de estudiantes y profesionales de diseño Industrial y Gráfico, de las ingenierías Mecatrónica, Mecánica y Electrónica, además de Administración.

El Ecovía es un compacto, ágil, con un desplazamiento fácil dentro de CU, es un 2 más 1: En la parte delantera puede transportar dos pasajeros; y en la posterior, diferentes accesorios. En vez de llenarse con gasolina, los dos tanques se cargan con hidrógeno que, al entrar en contacto con las celdas de combustible, genera la energía eléctrica con que trabaja el motor. Apuntó el coordinador y jefe de Diseño del proyecto Ecovía, Gerardo Arzate Pérez, "este vehículo tiene otra ventaja, cuando no está en movimiento, la energía generada en las celdas de combustible se almacena en una batería para que pueda usarse posteriormente". Cuando los tanques no contengan hidrógeno, ese aditamento podrá conectarse a una toma de corriente para recargarse. El prototipo que requirió de dos años de trabajo para su obtención no generará ruido, ni emitirá bióxido ni monóxido de carbono, ni ningún otro tipo de contaminante. Por el escape sólo saldrá vapor de agua y calor. De esta manera, la UNAM hace una aportación importante para combatir el cambio climático. Así mismo, integra desarrollos propios: La carrocería y la estructura fueron hechas totalmente en la Universidad Nacional; y componentes importados: los tanques provienen de Inglaterra; la batería, de China; las celdas de combustible, de Estados Unidos, y los asientos, de Italia. Se desarrollan las celdas de combustible en el Centro de Investigación en Energía, a fin de alcanzar mayor capacidad, y lo mismo sucede con la batería y el motor. Así podrá reducirse muchísimo el costo del siguiente prototipo, resaltó el Dr. Salinas Flores. El diseño del Ecovía es una abstracción delicada de la figura de un puma, el símbolo de la UNAM. Los ojos del felino inspiraron los faros del frente; la parte posterior del cráneo y la cola del animal, la parte trasera del vehículo, y la imagen más agresiva de una

secuencia de un ejemplar en salto, los laterales, comentó el Maestro Arzate Pérez.

La UNAM posee 150 vehículos de vigilancia. Al respecto, el Maestro Arzate refirió que si todos fueran sustituidos por el Ecovía, no se tendría que comprar autos a las transnacionales automotrices, pues se podría solucionar el problema de consumo interno de vehículos y México tendría la flotilla de hidrógeno más grande del mundo. Para determinar la utilidad de éste vehículo ecológico y el perfil de los posibles usuarios, a 60 choferes, vigilantes, paramédicos y repartidores de la UNAM se les aplicó un estudio antropométrico en el Laboratorio de Ergonomía del Postgrado en Diseño Industrial. Si la parte trasera se usase como cajuela, serviría para vigilancia o de transporte de personal; si se le agregara una camilla, de auxilio médico, y si llevase un remolque, de distribución de paquetería y correo. Éste auto mide de largo de 3.40 a 3.50 metros; tiene 1.50 m de altura y 1.40 m de ancho; puede alcanzar 80 km/h, tiene 300 km de autonomía con dos tanques de hidrógeno, y 70 km con la batería cargada (UNAM, 2008).

2.3 Degradación anaerobia convencional

La digestión o tratamiento anaerobio es un proceso natural que ocurre cuando compuestos biodegradables son expuestos a la acción biológica en ausencia de oxígeno molecular, siendo convertidos a dióxido de carbono, metano, ácido sulfhídrico y amoníaco (Speece, 1983).

2.3.1 Proceso de degradación anaerobia

Se tienen dos tipos de procesos aerobios y los anaerobios de acuerdo al "aceptor final de electrones" involucrados en la vía metabólica. En

el proceso aerobio, el oxígeno es el aceptor final de electrones, favoreciendo así la síntesis de material celular. De tal modo que el 60% de la energía contenida en la materia orgánica disuelta es asimilada por las bacterias y el 40% restante se disipa en forma de calor. La incorporación de oxígeno al sistema debe ser mayor a los 2 mg/L ya que si es menor se convierte en un factor limitante para el crecimiento y la reproducción de los microorganismos aerobios. Los procesos anaerobios ocurren en ausencia total de oxígeno. En este caso otros compuestos oxidados como nitratos, sulfatos o CO_2 , actúan como aceptores finales de electrones. En los procesos anaerobios, que son esencialmente endógenos, el 90% de la energía contenida en la materia orgánica, es convertida en biogás y el 10% restante es asimilado por las bacterias (Jiménez y Martínez., 1995).

La degradación anaerobia de la materia orgánica es un ejemplo de un sistema multisustrato/multiorganismo, en el que las reacciones ocurren de manera secuenciada. Los sustratos a partir de los cuales se inicia la degradación son moléculas poliméricas, que pueden ser agrupadas en tres grandes grupos: Carbohidratos, proteínas y lípidos. Como en todo proceso biotecnológico, es necesario identificar y estudiar las variables que gobiernan la actividad microbiana de la biomasa para, posteriormente, optimizar las condiciones de operación en los bioreactores. Con ello, los microorganismos podrán desarrollar su máxima capacidad, con lo cual se alcanzarán las más altas eficiencias de remoción de la materia orgánica (Gujer y Zehnder, 1983).

Son tres las bacterias que intervienen en la transformación de la materia a hidrógeno en el tratamiento anaerobio, las primeras identificadas como "acidógenas" o "formadoras de ácidos" que convierten a los sustratos orgánicos complejos en ácido butírico, ácido propiónico y ácido láctico. Las segundas transforman a estos

ácidos orgánicos e n ácido a cético, hidrógeno y bióxido de carbono. Las terceras también llama das "metanógenas" o "formadoras d e metano" son las que se encargan de reducir el bióxido de carbono a metano, consumiendo el hi drógeno que de ot ro modo inhibiría a las primeras bacterias. Sin duda esta es una impo rtante adaptación, ya que las metanobacterias al encontrarse estrechamente unidas a las bacterias productoras de hidrógeno, lo utilizan impidiendo que éste alcance concentraciones tóxicas para las mismas bacterias productoras. Es una relación de b eneficio mutuo aunq ue lo que buscamos es inhibir al metano y favorec er a l hidrógeno lo cual explicaremos más adelante (Metcalf y Eddy, 1991).

El conocimiento de los factores microbiológicos y bioquímicos que ocurren en la fermentación acid ogénica es indis pensable para entender la cinética de éste proc eso, y esto permite controlarlo e incidir sobre ellos para obtener resultados satisfact orios. En la fermentación bacteriana intervienen poblaciones microbianas diversas, en la que se distinguen y tres etapas: Hidrólisis, acidogénesis, acet ogénesis y la metanogénesis (Scriban, 1982; Marchaim, 1992).

Al menos cuatro grupos tróficos diferentes de bacterias han s ido aislados en sistemas anaerobios, pudiendo ser diferenciados sobre la base de los sustra tos ferme ntados y los productos finales forma dos (Marchaim, 1992).

Éstos cuatro grupos metabólicos son (Malina y Pohland, 1992):

1. Las bacterias hidrolíticas y fermentativas, las cuales convierten una variedad de compuestos orgánicos como polisacárid os, lípidos y proteínas en otros productos como el ácido acético, H₂, CO₂,

compuestos monocarbonados, ácidos grasos orgánicos y otros compuestos policarbonados.

2. Las bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno, las cuales incluyen obligatoriamente a las dos especies facultativas que pueden transformar los productos del primer grupo, los ácidos orgánicos de más de dos átomos de carbono, por ejemplo el butírico y el propiónico, los alcoholes policarbonados como el etanol y el propanol en hidrógeno y acetato.

3. Las bacterias homoacetogénicas, las cuales pueden convertir un espectro amplio de compuestos multi o monocarbonados en ácido acético.

4. Las bacterias metanogénicas, que transforman el H_2 , CO_2 y compuestos monocarbonados, por ejemplo el metanol, CO y la metilamina, en acetato, o pueden formar metano de la decarboxilación del acetato.

La forma más sencilla de explicar el desarrollo del proceso anaerobio se muestra en la Figura 2.26.

Por su parte, las bacterias fermentadoras transforman los azúcares y aminoácidos en ácidos grasos volátiles (acetato, propionato, butirato y valerato), CO_2 , H_2 , y bacterias, mientras que los lípidos y los ácidos grasos de cadena larga son convertidos en ácidos grasos volátiles, CO_2 e H_2 a través de un mecanismo de beta-oxidación (Saval y Noyola, 1992).

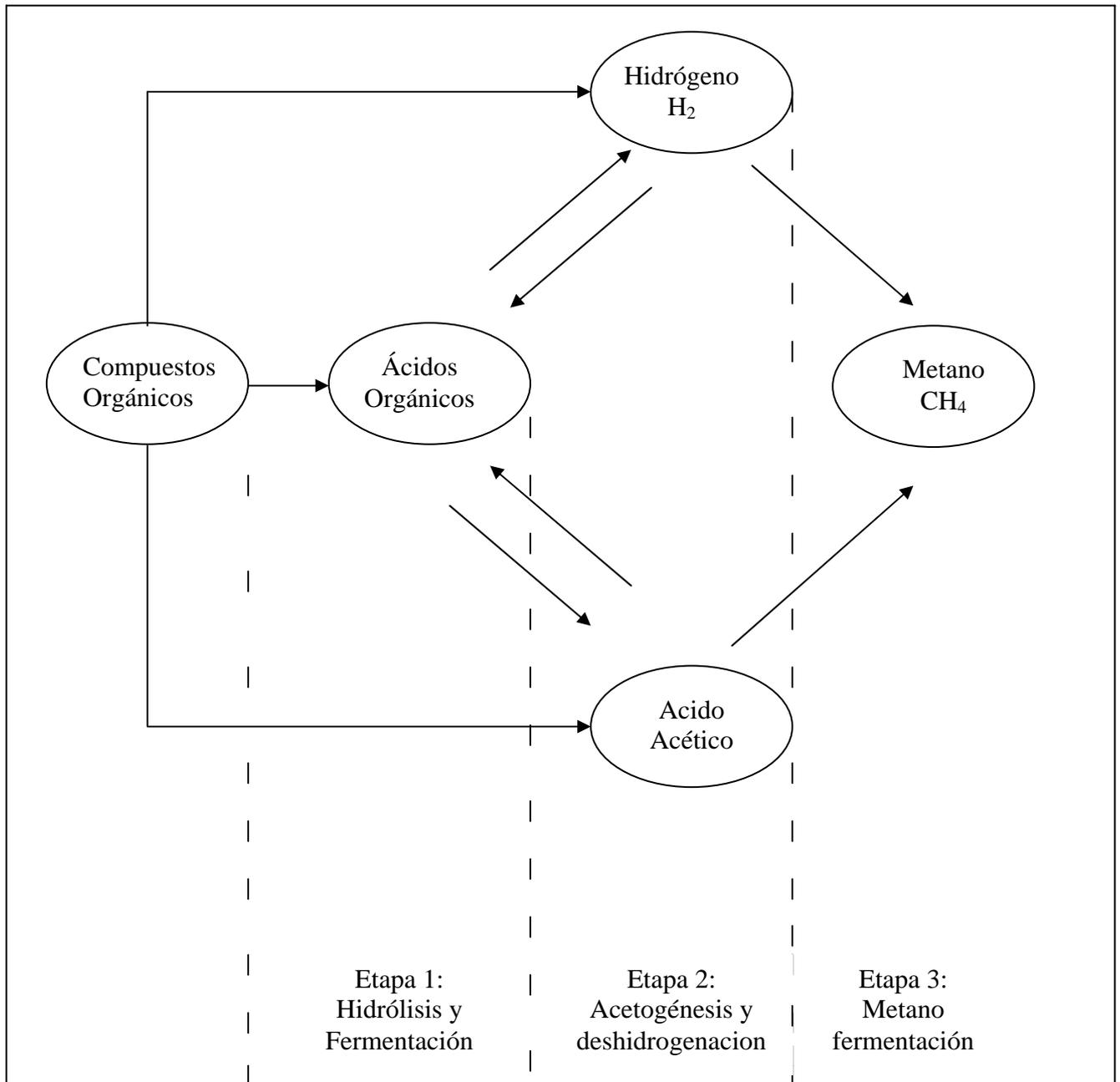


Figura 2.26. Etapas degradación anaerobia (Malina y Pohland, 1992)

Debido a las ventajas que ofrece la digestión o tratamiento anaerobio, se puede catalogar como un método de tratamiento de aguas de desecho que ahorra y produce energía. Esto le da un potencial y aplicación importante, no solo en los países altamente desarrollados, sino también en países del Tercer Mundo, debido a su relativa facilidad de operación y costos reducidos. En la Tabla 2.7 se

resumen las principales ventajas y limitaciones de los tratamientos anaerobios de aguas residuales.

Tabla 2.7 Principales ventajas y desventajas que presenta la digestión o tratamiento anaerobio (Eckenfelder y col., 1988)

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Baja producción de sólidos biológicos de desecho. 2. Altas cargas orgánicas pueden ser aplicadas. 3. La actividad de los lodos anaerobios puede preservarse después de varios meses de alimentación. 4. Producción de energía en forma de metano. 5. Bajo requerimiento de nutrimentos. 6. No requiere energía de aireación. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Las bacterias anaerobias son muy sensibles a la inhibición por varios compuestos (CHCl_3, CCl_4, CN^- y metales pesados), por temperatura, pH, etc. 2. El arranque del proceso es lento si no se dispone de un inóculo. 3. El tratamiento anaerobio demanda frecuentemente postratamiento. 4. En México existe poca experiencia sobre el proceso, tanto en sus fundamentos como en su aplicación.

El biodigestor es un sistema sencillo de implementar con materiales económicos y se está introduciendo en comunidades rurales aisladas y de países subdesarrollados para obtener el doble beneficio de conseguir solventar la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales.

La evolución de la tecnología anaerobia ha dado lugar a tres generaciones de reactores: La primera, comprende aquellos procesos en donde la biomasa se encuentra en suspensión. En los de segunda

generación, los microorganismos son retenidos en el reactor, ya sea al suministrarle un soporte para que se adhieran en forma de biopelícula, o bien por medio de su sedimentación. Los reactores de la tercera generación, tienen también los microorganismos en forma de biopelícula, pero el soporte se expande o fluidifica con altas velocidades de flujo (Jiménez y Martínez, 1995).

2.3.2 Tipos de reactores anaerobios

Los reactores anaerobios más primitivos o de primera generación son, por una parte la fosa séptica y por otra parte los digestores de tipo rural con alimentación semicontinua, de los que se tiene referencia desde el siglo pasado. Estos digestores son utilizados para la producción de biogás a partir de desechos agrícolas y ganaderos (Jiménez y Martínez, 1995).

Los sistemas son los siguientes:

- a) El tanque Imhoff es un sistema que crea dos compartimientos distintos, el de decantación y el de digestión. Esto impide en cierto modo que los productos de la hidrólisis de los lodos sean evacuados por el efluente, lo que se traduce en mejores eficiencias de tratamiento. Sus aplicaciones han sido a nivel de pequeñas comunidades, en donde la fosa séptica no sería recomendable debido al volumen que requeriría. En ambos sistemas, una evacuación periódica de los lodos acumulados es necesaria generalmente cada año para el tanque Imhoff y dos para la fosa (Noyola, 1986).
- b) Las lagunas anaerobias es otro proceso rústico empleado en aguas de desecho industriales evacuadas a temperatura superior a la del ambiente y con cierto contenido de sólidos

suspendidos sedimentables. Consiste en estanques profundos de hasta 10 m en donde las condiciones anaerobias prevalecen, con la excepción de una pequeña zona en la superficie. Las condiciones meteorológicas influyen grandemente la operación de estos sistemas. Un punto particularmente problemático son los malos olores asociados con estos sistemas. Los tiempos de resistencia hidráulica reportados en la literatura son muy variables, en general de 20 a 50 días dependiendo de las condiciones del clima (Metcalf y Eddy, 1991).

- c) El digester o reactor anaerobio convencional se ha aplicado principalmente para la estabilización de los lodos de desecho provenientes del proceso de lodos activados, aunque en la actualidad sus limitadas eficiencias han hecho que se sustituya por la versión completamente mezclada. Consiste de un tanque cerrado sin agitación y sin calentamiento, en donde el desecho por tratar se estratificará en zonas de finidas. La parte en donde se lleva a cabo prácticamente la totalidad de la actividad microbiana representa alrededor del 30 % del volumen total del digester lo que, aunado a la lentitud de la cinética de degradación bajo estas condiciones, resulta en volúmenes de reactor considerables (Jiménez y Martínez, 1995).
- d) Digester o reactor anaerobio completamente mezclado la introducción de una agitación vigorosa del medio de reacción, aunada frecuentemente a un calentamiento del reactor, se traduce en mayores eficiencias en la remoción y conversión de la materia orgánica. Su principal aplicación es en el tratamiento de los lodos de desecho de grandes plantas de lodos activados aireados (Metcalf y Eddy, 1991).

- e) Reactor de contacto anaerobio es un sistema de transición entre la primera y la segunda generación de reactores anaerobios. Consiste básicamente en un reactor completamente mezclado acoplado a un decantador que separa la biomasa para que sea recirculada hacia el reactor y es el equivalente de los lodos activados. Con la recirculación, la cantidad de microorganismos en el reactor aumenta al igual que su tiempo de residencia hidráulica, lo que provoca volúmenes de reactor más pequeños y una mayor estabilidad en el proceso. Este sistema se ha aplicado en tratamiento de aguas residuales de industrias alimentarias (Jiménez y Martínez, 1995).
- f) Ahora pasemos a los de segunda generación como el filtro anaerobio o reactor empacado introducido por Young y McCarty (1969), recomendándolo inicialmente para sustratos solubles y medianamente concentrados de materia orgánica. Consiste en un reactor de flujo ascendente empacado con soportes plásticos o con piedras de 3 a 5 cm de diámetro promedio. Debido a la distribución desordenada del soporte, las purgas de lodos no son efectivas lo que provoca una acumulación lenta pero constante de biomasa que, con el tiempo puede crear problemas de taponamiento. Este reactor puede admitir cargas de hasta 20 kgDQO/m³día.
- g) Van y Lentz (1979) desarrollaron al reactor tubular de flujo ascendente o descendente. El soporte utilizado en éste caso consiste de tubos o placas dispuestas de tal forma que se crean canales verticales. El material puede ser cerámica, cloruro de polivinilo (PVC, por sus siglas en inglés), poliéster, etc. El ordenamiento de soportes resulta en coeficientes de vacío importantes con buenas relaciones de área/volumen (menor a

150 m²/m³). Las cargas aplicadas pueden llegar hasta 30 kgDQO/m³día.

h) Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) consiste en la formación de gránulos sin el requerimiento de algún tipo de soporte para la biomasa, lo que implica un ahorro importante. Su principio de funcionamiento se basa en la buena sedimentabilidad de la biomasa producida dentro del reactor, la cual se aglomera en forma de granos o "pellets" hasta de 5 mm de diámetro, evitando de esta forma ser arrastrados por el flujo ascendente de agua residual. Estos granos cuentan con una elevada actividad metanogénica, lo que explica el potencial tan alto de depuración del proceso. El reactor es de flujo ascendente y en la parte superior cuenta con sistema de separación gas-líquido-sólido, el cual evita la salida de los sólidos suspendidos en el efluente, en caso de que los lodos no contaran con la sedimentabilidad adecuada. Favorece la evacuación del gas y la decantación de los flóculos que eventualmente llegan a la parte superior del reactor. Actualmente, una combinación en un mismo tanque del RALLFA o reactor-UASB (por sus siglas en inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor) y del "filtro" anaerobio, conocida como reactor híbrido, está generando aceptación. La principal ventaja de este arreglo es que se optimiza el volumen del reactor y se puede reducir la pérdida masiva de lodos, accidente grave que ocurre con relativa frecuencia en los RALLFA (Jiménez y Martínez, 1995).

i) Reactores de tercera generación son reactores que se encuentran básicamente aún a nivel piloto o semi-industrial, aunque ya existen algunas plantas a escala real basadas en esta modalidad. Son también reactores de película fija, pero el

soporte utilizado es lo suficientemente pequeño y ligero para que pueda ser fluidificado con recirculación del efluente. Se han reportado resultados de laboratorio en extremo prometedores (Jewell y col., 1981; Switzenbaum y Jewell, 1980). Los dos tipos de reactores, el reactor de lecho expandido y el reactor de lecho fluidificado, son semejantes entre sí, diferenciándose en el grado de fluidificación del soporte (20% para el lecho expandido y superior al 50% para el lecho fluidificado). Otra ventaja es que no presentan problemas de taponamiento; sin embargo, requieren energía para la recirculación y la fluidificación del lecho, además su arranque y operación son en extremo delicados. Las cargas aplicadas pueden sobrepasar los 40 kgDQO/m³día.

2.3.3 Aplicaciones del biogás

Los desechos finales de todos estos biodigestores son sanitizados, es decir, son eliminados los organismos patógenos presentes (Naim y Al, 2001). El metano generado en el biogás es el mismo que el gas natural utilizado actualmente en México. La producción de biogás de todos los digestores en China es de 2,000,000 m³/año. El biogás en China es usado por 25 millones de personas para cocinar o para iluminación por 8 a 10 meses en un año. Existen 400 estaciones y 800 productoras de biogás con una capacidad total de 5,800 HP y 7,800 kW respectivamente que abastece electricidad a 17,000 casas (Biswas y Lucas, 1997; Chen, 1997; Daton, 1989; Pellerin y col., 1988).

En la India, el biogás es comúnmente utilizado para cocinar e iluminación. Las actividades de uso del biogás en la India han ganado el Proyecto Nacional en el Desarrollo del Biogás en 1981 y el

Departamento de Fuentes de Energía no Renovable en 1982 (Bhattacharya y Salam 2002; Joshi y col., 1992).

En párrafos anteriores podrá observarse la gran aplicación del metano en el biogás de los sistemas anaerobios. En esta investigación se realizará un prototipo para la generación de hidrógeno a partir de la degradación anaerobia de frutas de desecho. El hidrógeno será utilizado para el funcionamiento de una moto. El prototipo podrá ofrecer una extensión de investigación en las industrias de alimentos donde la presencia de hidrógeno en el biogás es de $23 \pm 8\%$ (Van y col., 2005).

La producción de hidrógeno puede alcanzar $1\text{L-H}_2/\text{L}$ agua tratada, por lo que, puede el hidrógeno ser utilizado y comercializado por la industria alimentaria a $65,000$ dls/año. La producción de hidrógeno es una fuente de energía que a futuro será utilizada por la industria automotriz entre otras aplicaciones (Huang y Crookes, 1998; Vieira, 1985).

La economía del hidrógeno es un modelo económico futurible en la cual la energía, para los usos móviles y oscilación de carga, se almacena como hidrógeno (H_2). El hidrógeno se ha propuesto como reemplazo para la gasolina y combustibles diésel utilizados actualmente en automóviles (Rojas, 2006).

La producción del hidrógeno es un sector industrial considerable, y es cada vez mayor. En 2004, se produjeron unas 50 millones de toneladas métricas de hidrógeno, conteniendo 200 gigavatios de energía; la tasa de crecimiento es de alrededor de un 10% por año. Debido a que el almacenamiento y transporte de hidrógeno es caro, la mayor parte del hidrógeno que se produce en la actualidad se hace localmente, y es utilizado de manera inmediata, generalmente por la

misma compañía productora. En 2005, el valor económico de todo el hidrógeno producido es de aprox. 135 mil millones de USD por año (FMI, 2005).

2.3.4 Parámetros de control en sistemas anaerobios

Los microorganismos involucrados en la digestión requieren condiciones ambientales específicas para su crecimiento y actividades óptimas, que se verán manifestadas en un incremento de la biomasa, así como en altos porcentajes de remoción de la materia orgánica. Algunos parámetros están claramente tipificados, no así otros en que el intervalo no ha sido bien delimitado. Entre los parámetros ambientales más importantes que inciden en las reacciones anaerobias, se encuentran la temperatura, el pH y los nutrientes (Jiménez y Martínez, 1995).

La temperatura a la que opera un reactor influye de manera importante en la actividad de la biomasa, dado que las reacciones bioquímicas son directamente afectadas por éste parámetro. El estudio de los microorganismos según Stronach y col., (1986) se dividen, de acuerdo con su temperatura en tres categorías: Psicrófilos (inferior a 20°C), mesófilos (20 a 40°C) y termófilos (45 a 65°C).

Las bacterias productoras de hidrógeno tienen una temperatura óptima entre los 35 y 40°C. Sin embargo estas bacterias pueden adaptarse para operar fuera de éste intervalo, aunque con eficiencias menores. Los microorganismos metaogénicos presentes, así como las características del proceso difieren en cada intervalo de temperatura como se muestra en la Tabla 2.8 (Stronach y col., 1986).

Tabla 2.8 Características del proceso de digestión para la producción de metano, de acuerdo al intervalo de temperatura (Stronach y col., 1986)

Mesofílica (20 a 40°C)	Termofílica (45 a 65°C)
<ul style="list-style-type: none"> - Menos vapor de agua en el gas - Mayor población acetogénica - Menos CO₂ en el gas - Balance energético más favorable - Mayor experiencia en su aplicación 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor actividad - Menor TRH - Menor formación de lodos - Destrucción de microorganismos patógenos - Equilibrio microbiano frágil - Mayor actividad acetogénica de la biomasa

Los cambios de temperatura en el intervalo mesofílico pueden tolerarse, pero cuando la temperatura desciende, la carga del digester también debe ser disminuida de acuerdo con el descenso de la actividad esperada. No es aconsejable incrementar la temperatura de reactores mesofílicos por encima de 40°C, ya que a temperaturas más altas ocurre un rápido deterioro de las bacterias metanogénicas, productoras de metano.

Los procesos anaerobios para producción de metano generalmente se operan en el intervalo mesofílico de 25 a 40°C. En los procesos termofílicos un problema de bajo rendimiento másico (50% del rendimiento a 35°C) que trae como consecuencia arranque y adaptaciones lentos a variaciones de carga orgánica, cambios de sustratos o sustancias tóxicas.

Además, las células bacterianas mesotermófilas tienen una tendencia a "lisarse" rápidamente a altas temperaturas, por lo que solo puede existir bajo condiciones de crecimiento exponencial. Existen pocas especies capaces de crecer a altas temperaturas. Por otra parte las bacterias termofílicas producen altos niveles de ácidos grasos volátiles (AGV) residuales que llegan a ser del orden de 1,000 mg/L en lugar de los 300 mg/L encontrados en condiciones mesofílicas (Stronach y col., 1986).

De forma similar a la temperatura, el valor de pH en los reactores anaerobios ejerce una gran influencia sobre la actividad de los microorganismos. En el caso de las bacterias acidogénicas, el pH óptimo está entre 4.0 y 6.0 (Yong y col., 2007). Por lo tanto entre éste intervalo debe de mantenerse el pH en el trabajo experimental de esta investigación. Si éste parámetro se mantiene en el intervalo señalado, se considera que existe una actividad bioquímica balanceada. La influencia del pH sobre la producción de hidrógeno, se relaciona principalmente con la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) provenientes de la fase acidogénica.

Los diferentes parámetros químicos que caracterizan el ambiente anaerobio están interrelacionados y una variable puede directa o indirectamente afectar a otras variables. Por lo tanto, una estimación exacta de pH, alcalinidad, concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), contenido de CH_4 , CO_2 y H_2 en el biogás, sólidos volátiles y reducciones de demanda química de oxígeno (DQO) son esenciales para el control del sistema (Robles y Gourdon, 1999). No hay un parámetro que por sí solo sea el mejor indicador del ambiente dentro del digestor.

En el pasado, la velocidad de producción de gas fue considerado como el mejor indicador de funcionamiento de un digestor. Sin

embargo, éste parámetro no describe el ambiente dentro del digestor y, usualmente, cuando la producción de gas desaparece, el ambiente dentro del digestor está completamente desequilibrado, por lo que las medidas a tomar son muy drásticas y rápidas.

El proceso anaerobio ha sido mostrado en tres fases (sólido-líquido-gas). Cada fase está estrechamente relacionada y la información de una fase puede estar directamente relacionada al estado de las otras fases. El objetivo de un buen monitoreo es la estrategia para la caracterización de cada una de las fases. El logro de éste objetivo permite el control del proceso para la producción de los resultados deseados dentro de un camino digno de confianza. Los parámetros mencionados serán medidos de acuerdo al APHA (1992).

Una de las estrategias de arranque para reactores anaerobios a seguir de acuerdo con De Zeeuw (1988) es:

- La carga volumétrica debe aumentarse escalonadamente una vez que la reducción de DQO sea mayor que el 80-90% de diseño.
- La reducción de la DQO nunca deberá ser inferior al 50%.
- Cuidar que la concentración de A_{GV} no exceda de los 200 mg/L.

El proceso de la digestión en la fase acidogénica involucra la producción de grandes cantidades de ácidos grasos volátiles en el reactor, puede llevar a caídas del pH a valores en los cuales la actividad de la bacteria se inhibe.

El problema puede ser equilibrado por la acción neutralizante de compuestos amortiguadores que se forman con los ácidos generados durante el proceso de fermentación y sales neutras impidiendo así la acidificación del medio por la acumulación de ácidos orgánicos. El sistema amortiguador de las aguas residuales, generalmente, es el sistema "carbonático" en el cual el ion bicarbonato, principalmente reacciona con los protones H^+ , de los AGV produciendo la respectiva sal e impidiendo así un descenso en el valor del pH por aumento de la concentración de iones hidrógeno.

Las investigaciones sobre el tema, han dado como resultado que uno de los métodos más rápidos, seguro y eficaz, para el control de la acumulación de AGV en digestores sea la determinación de la capacidad amortiguadora o buffer "carbonática" del sistema, la cual puede ser utilizada para vigilar el buen funcionamiento de reactores anaerobios. Existen muchos métodos para determinar la alcalinidad de un agua residual. Sin embargo, la co-existencia en el medio de otros compuestos orgánicos e inorgánicos, con capacidad amortiguadora en el mismo intervalo del pH del bicarbonato pero sin la misma efectividad en el control de la acidificación ha dado como resultado que se hayan sugerido y ensayado varias modificaciones a los métodos tradicionales, algunos de los cuales han sido de gran ayuda para el adecuado control de operación de sistemas anaerobios.

El arranque implica el seguimiento del desarrollo del sistema no únicamente en lo relacionado con la remoción de materia orgánica, sino en su paso hacia la estabilización. En sistemas anaerobios, la población bacteriana es altamente sensible a cambios generados en el ambiente que lo rodea. Además, generalmente no está adaptada al nuevo sustrato. La adaptación es una etapa lenta que debe realizarse con cuidado. En el medio acuoso está ocurriendo una

selección de microorganismos necesarios para el metabolismo de sustratos en sus diferentes fases.

La fase acidogénica, en la cual ocurre el rompimiento hidrolítico de las complejas moléculas orgánicas, es relativamente fácil de realizar, la población microbiana rápidamente desdobla los polímeros orgánicos formando alcohol es y ácidos grasos de cadena corta. Las bacterias acidogénicas resisten pH tan bajos como 4.5, el cual es un valor fácilmente alcanzable en reactores operados incorrectamente. Indudablemente, la producción de gas continúa porque son varios los gases generados en el proceso. Sin embargo, a valores de pH bajos, el hidrógeno, que debe ser el principal constituyente del biogás tiene un bajo porcentaje. Por lo tanto, el volumen de producción de gas no puede tomarse como indicativo de un buen funcionamiento.

Una de las mejores formas para controlar un reactor, es el seguimiento de la formación de AGV en el medio. La cuantificación de los AGV puede hacerse por varios métodos, como la destilación y la cromatografía de gases, pero, a nivel operación, se necesita una respuesta rápida a los cambios que suceden o simplemente se requiere un diagnóstico del funcionamiento del sistema. En éste caso, el análisis de AGV no da una respuesta inmediata. Por esta razón, el control de la capacidad buffer o alcalinidad bicarbonática puede ser utilizada con éste fin. Las modificaciones hechas a los métodos normalizados de análisis para la determinación de la alcalinidad, permiten conocer la alcalinidad bicarbonática del sistema y la concentración de AGV en el medio. Inclusive, puede llevar a establecer una correlación entre los AGV determinados in situ, titulométricamente y los AGV analizados siguiendo los métodos normalizados. Por lo tanto, una buena aproximación del estado de equilibrio del reactor en relación con la acumulación de AGV, puede hacerse con base en la determinación de la capacidad "buffer"

existente en un momento dado. La capacidad "buffer" se mide en función de la alcalinidad bicarbonática verdadera. Por lo tanto, cualquier falla en su determinación, se puede traducir como una falla sorpresiva en el sistema. Un reactor anaerobio puede presentar una alta alcalinidad total, pero una baja "alcalinidad bicarbonática".

2.4 Producción de hidrógeno a partir de la fermentación oscura

La fermentación oscura es una tecnología de producción de hidrógeno por medio de bacterias mixtas y temperaturas mesofílicas para ser adecuadas para el desarrollo comercial.

2.4.1 Inóculo

Para la producción de hidrógeno se han hecho estudios de acondicionamiento de los inóculos para el tratamiento anaerobio, como, temperatura y pH, ya que las bacterias son tolerantes a ciertas condiciones ambientales. Sin embargo hay pocos estudios para condicionar a la producción de hidrógeno a diferentes tipos de inóculo como pueden ser lodos activados, lodo digerido, composta, desperdicio de sandía, kiwi y sedimentos de lagos. Las Figuras 2.27 y 2.28 muestran gráficas sobre éste estudio (Yasunori y Naoe, 2005) donde se describe la producción de hidrógeno por glucosa (mol de H_2 /mol de glucosa) y por sólidos volátiles (SV) de inóculo (mol de H_2 /g de SV).

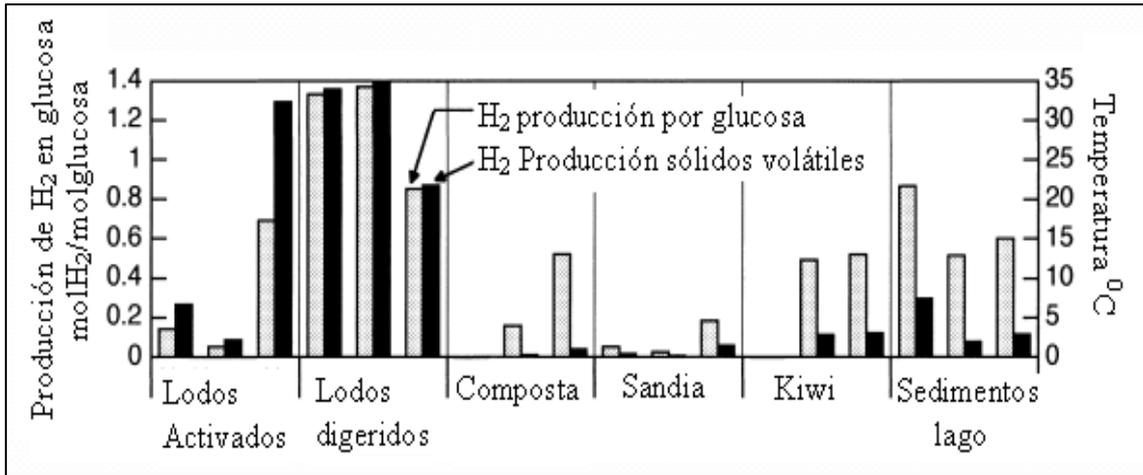


Figura 2.27 Cantidad de hidrógeno producido con diferentes inóculos (Yasunori y Naoe, 2005)

La concentración de ácidos grasos producidos en estos inóculos son ácidos butírico, acético y láctico y éstos a su vez producirán pequeñas cantidades de ácido propiónico (Figura 2.28). Aunque los importantes serán el acético y el butírico. Ya que éstos son conocidos en el metabolismo de la fermentación anaerobia del hidrógeno por carbohidratos, de los cuales son 4 y 2 moles de hidrógeno respectivamente los producidos por el ácido butírico y acético respectivamente. En contraste, el ácido propiónico no es deseable en la producción anaerobia del hidrógeno (Chang y col., 2002).

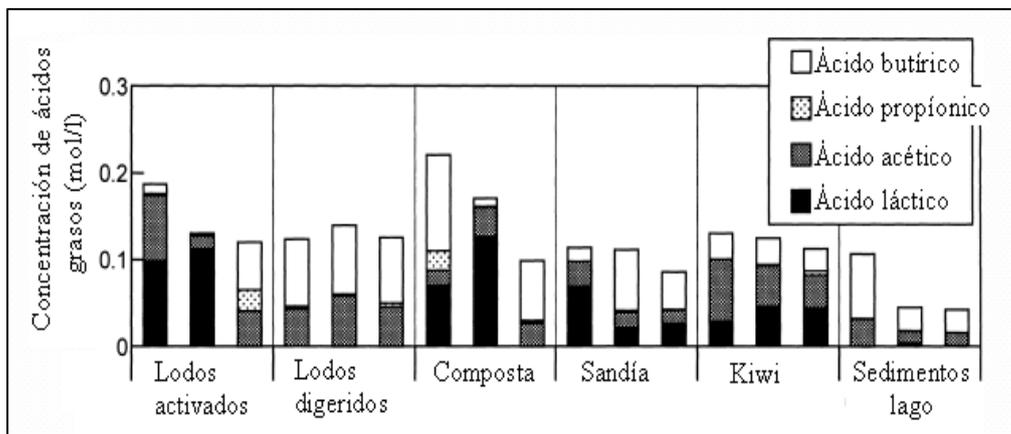


Figura 2.28 Concentración de ácidos grasos producido con diferentes inóculos (Yasunori y Naoe, 2005)

Al igual que las tecnologías de lodos activados y la digestión anaerobia para el tratamiento de aguas residuales, la producción de hidrógeno utilizando bacterias mixtas se demostró antes de los avances en la biología molecular permitiendo el estudio de las comunidades microbianas responsables.

Muchos microorganismos son capaces de producir hidrógeno de los carbohidratos, pero las técnicas moleculares han identificado especies *clostridiales* (Kim, 2006; Lay y col., 2005). Un estudio temprano de Fang y col. (2002b), analizó la especie microbiana presente en la producción de hidrógeno, (CSTH, pH 5.5, 36°C, 6.6 TRH, agua residual como inóculo) con glucosa. Ellos encontraron que el 64.4% de todos los clones presentes fueron *Clostridiaceae*, con el 43,8% estando estrechamente relacionada con *Clostridium cellulosi*, 12,5% correspondía a *Clostridium acetobutylicum* y un 8,3% de *Clostridium tyrobutyricum*. El 18.8% de todos los clones fueron afiliados (relacionados) con *Enterobacteriaceae*, y el 3,1% con *Streptococcus bovis*. Un estudio de lodos granulares a (26°C, pH 5.5, 6 TRH, utilizando sacarosa como sustrato) mostró que el 69% de los clones estaban asociados con cuatro especies de *Clostridium* y el 13,5% con *Sporolactobacillus racemicus* en el grupo de *Bacilos/Staphylococos* (Fang y col., 2002a).

La bacteria *Clostridia* es versátil y puede utilizar una serie de carbohidratos como sustrato, incluido el almidón, la celulosa y la hemicelulosa (Leschine, 2005).

A diferencia de la producción de bioetanol, sus sustratos complejos pueden ser utilizados para la producción de hidrógeno sin un pretratamiento. Sin embargo la flexibilidad metabólica de *Clostridia* permite la producción de una gama de productos finales que pueden

reducir el rendimiento de hidrógeno de un máximo teórico de 4 mol/mol hexosa que puede obtenerse cuando el acetato es el único producto final de fermentación como se muestra en la reacción 2.10.



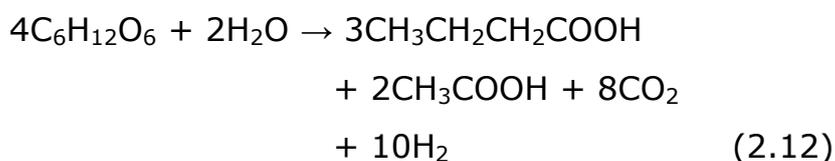
La producción de hidrógeno por *Clostridia* es gracias a la actividad de la enzima deshidrogenasa. Esta transfiere electrones de la ferredoxina reducida o NADH a protones para regenerar las formas oxidadas (Fd_{ox} y NAD^+) necesarios para la glicólisis y la descarboxilación oxidativa de piruvato y proceder a generar ATP. El efecto de la presión parcial de hidrógeno en estas reacciones se resume por Angenent y col. 2004. Si la presión parcial de hidrógeno es suficientemente baja, el NADH puede oxidarse por la hidrogenasa, produciendo hidrógeno hasta el rendimiento máximo teórico de 4 mol/mol de hexosa consumida y un máximo rendimiento de ATP. Sin embargo, bajo las condiciones normales de reacción, la mayor parte del NADH será oxidado en reacciones produciendo productos finales de la fermentación reducida, tales como butirato (Angenent y col., 2004; Svensson y Karlsson, 2005), con un menor rendimiento molar hidrógeno de acuerdo a la reacción 2.11 y menor rendimiento de la ATP.



Muchos experimentos con bacterias mixtas muestran al acetato y butirato como principales productos finales con butirato en exceso de acetato (Fang y Liu, 2002; Han y col., 2005). Kim y col., (2006) encontraron durante la operación de CSTR con sacarosa (10 a 60 g DQO/l, pH 5.5, 12 TRH) que butirato a acetato (B/A) los coeficientes son directamente proporcionales al rendimiento de 1 mol de H_2 /mol

hexosa consumida. Entonces el coeficiente de B/A podría ser un indicador cuantitativo del metabolismo sobre el sustrato y la producción de hidrógeno.

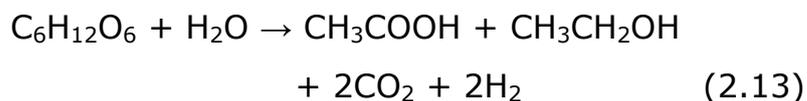
La relación o proporción de B/A de Kim y col., (2006) muestra un DQO base y cuando se convierte a una base molar entre 0,64 y 3.69. Para un ejemplo de estequiometría conocida a la relación molar de B/A es conocida a partir de la reacción 2.12 (Lungdahl y col., 1989).



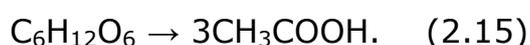
Darían un resultado teórico molar de 2.5 mol de H₂ por mol de hexosa fermentada. Sin embargo, Kim y col., (2006), predijo experimentalmente un rendimiento molar de 0,85; con aproximadamente el 11% de sacarosa, convertida a biomasa microbiana y 7,4- 10,6 % a etanol, una gran cantidad de hexosa deberán haber sido convertidos a otros productos metabólicos a cuenta de esta discrepancia.

La relación de B/A de 1.2 sobre un TOC básico (corresponde a una proporción de una base molar de 0.6 y una base de 1.5 de DQO) reportada por Fang y Liu, (2002) en condiciones estándar de temperatura y humedad y 7 g/L de glucosa (PH 5.5 y 6 TRH) se obtuvo un rendimiento molar de hidrógeno de 2.1 en lugar de alrededor de 0,65 como se predijo por Kim y col., (2006). Se requiere trabajar más para aclarar la naturaleza y utilidad de la relación de B/A para el rendimiento molar de hidrógeno.

Aunque la producción del producto final reducido de etanol de la hexosa consume NADH, El grupo de REN ha demostrado que una fermentación y producción de etanol y acetato a partir de carbohidratos en proporción cercana a 1 y la cual favorece la producción de hidrógeno. El reactor con lodo floculado a pH 4.5 podría funcionar con molases a una alta carga orgánica (OLR) dando 5.6 m³ de hidrógeno/m³ reactor d⁻¹ y OLR de 68.2 KG DQO/ m³ reactor. Aunque el rendimiento molar de hidrógeno por mol de hexosa fermentada no fue obtenido, de la reacción estequiométrica el máximo teórico es 2 mol de hidrógeno por mol de hexosa fermentada. Reacción 2.13:



Tanto el lactato como el propionato pueden ser producidos por *clostridia* o por otras bacterias que compiten en la mezcla de microflora, reduciendo el rendimiento de hidrógeno. *Clostridias* tales como *C. acetaticum* pueden disminuir el rendimiento por conversión de hidrógeno y CO₂ a acetato o pueden convertir la hexosa directamente a acetato por el proceso de homocetogénesis, reacciones 2.14 y 2.15.



Por lo tanto el incremento en la producción de acetato no es un signo de mejora del rendimiento de hidrógeno. Durante la operación sobre un sustrato de partículas de almidón (pH 5.2, 30°C, 18 HRT, inóculo tratado térmicamente) Hussy y col., (2003) observaron que el doble de la concentración de acetato no relacionadas con el incremento en el rendimiento de hidrógeno, cuando se suministra o burbujea con

nitrógeno para reducir el hidrógeno y la presión parcial de CO₂, no se observó un incremento en el acetato. Un número de bacterias incluidas *Clostridia* son homoacetogénicas y el umbral de concentración de hidrógeno y C O₂ necesarios no está bien caracterizadas (Drake y Kusel, 2005). La influencia de homoacetogénesis sobre el rendimiento de hidrógeno y las condiciones que puedan suprimir el consumo del hidrógeno homoacetogénico consumido requieren un estudio más detenido.

Las reacciones metabólicas que sirven para disminuir la relación molar del rendimiento de hidrógeno por la producción de la fermentación reducida de productos finales pudiera ser resultado de un cambio en el metabolismo dentro de las especies que forman parte de la microflora o un cambio en la abundancia de acetogénico o lactato-etanol o propionato producido por las especies. Iyer y col., (2004) y Xing y col., (2005) descubrieron por primera vez los cambios en la población bacteriana bajo diferentes condiciones en hidrógeno producido en un reactor. Ishikawa y col. (2006) estudiaron un CSTR en un pH 5,5 operando en glucosa a 10 h TRH sólo fueron detectados *Clostridiaceae*, mientras que a 30 h TRH la población fue más diversa en las poblaciones más diversas y se incluían *Bacillaceae* y *enterobacterias*, a 10 h TRH cuando la temperatura se cambió de 30 a 37 °C se detectó un cambio en la población. Cambios relacionados con poblaciones relacionadas *Clostridium acidisoli* a *C. acetobutylicum*. Xing siguió comunidades CSTR operando en melaza en un pH bajo, con bacterias acidófilas de aguas residuales, las cuales se establecieron en etanol-acetato produciendo hidrógeno después de 28 días. La tasa de producción de hidrógeno aumentó con el incremento de *Ethanoligenbacterium sp.*, *Clostridium sp.*, y *Spirochaetes*. Algunos tipos de *Clostridium sp.*, *Acidovorax sp.*, *Kluyvera sp.* y Bacteroides fueron poblaciones predominantes throughout. Tal parece que la producción de hidrógeno no solo

depende de los productores de hidrógeno, si no también depende del co-metabolismo entre de la comunidad.

2.4.1.1 Cultivos puros

Una gran cantidad de cultivos de bacterias se han utilizado para producir hidrógeno a partir de diferentes sustratos. La Tabla 2.9 resume una gran cantidad de los estudios que se han hecho para la producción de hidrógeno por medio de la fermentación. Como se muestra *Clostridium* y *Enterobacteria* fueron las más ampliamente utilizadas como inóculo para la producción de hidrógeno, como se puede observar, en la mayoría se utiliza como sustrato glucosa, aunque es mas conveniente producir a partir de desechos orgánicos (Jianlong y Wei, 2008).

Tabla 2.9 Bacterias utilizadas para la producción de hidrógeno por medio de la fermentación (Jianlong y Wei, 2008)

Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	Máxima producción de hidrógeno	Referencia
<i>Clostridium acetobutylicum</i>	Glucosa	Batch	2.0 mol/mol glucosa	Chin y col., 2003
<i>Clostridium acetobutylicum</i> ATCC 824	Glucosa	Continuo	1.08 mol/mol glucosa	Zhang y col., 2006
<i>Clostridium butyricum</i> CGS5	Xilosa	Batch	0.73 mol/mol xilosa	Lo y col., 2008
<i>Clostridium butyricum</i> CGS2	Almidón	Batch	9.95 mmol/g DQO	Chen y col., 2007
<i>Clostridium pasteurianum</i> CH4	Sucrosa	Batch	2.07 mol/mol hexosa	Lo y col., 2008
<i>Clostridium paraputrificum</i> M-21	Residuos proteínas	Batch	2.2 mol/mol sustrato	Evvyernie y col., 2001

Tabla 2.9 Continuación...

Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	Máxima producción de hidrógeno	Referencia
<i>tridium thermocellum</i> 27405	Biomasa celulosa	Batch	2.3 mol/mol glucosa	Levin y col., 2006
<i>Clostridium thermolacticum</i>	Lactosa	Continuo	3.0 mol/mol lactosa	Collet y col., 2004
<i>Clostridium sp. strain no. 2</i>	Celulosa	Continuo	0.3 mol/mol glucosa	Taguchi y col., 1996
<i>Clostridium sp</i>	Glucosa	Batch	0.2 mol/L	Pan y col., 2008
<i>Enterobacter aerogenes HO-39</i>	Glucosa	Batch	1.0 mol/mol glucosa	Yokoi y col., 1995
<i>Enterobacter aerogenes NBRC 13534</i>	Glucosa	Batch	0.05 mol/L	Ogino y col., 2005
<i>Enterobacter aerogenes</i>	Glucosa	Batch	NR	Jo y col., 2008
<i>Enterobacter aerogenes HU-101</i>	Glicerol	Batch	0.6 mol/mol glicerol	Nakashimada y col., 2002
<i>Enterobacter aerogenes</i>	Almidón	Batch	1.09 mol/mol almidón	Fabiano y col., 2002
<i>Enterobacter aerogenes E 82005</i>	Melaza	Continuo	3.5 mol/mol azucar	Tanisho, S. y Ishiwata, Y. 1995
<i>Enterobacter cloacae IIT-BT 08</i>	Glucosa	Continuo	NR	Kumar, N. y Das, D. 2001
<i>Enterobacter cloacae IIT-BT 08</i>	Sucrosa	Batch	6 mol/mol sucrosa	Kumar, N. y Das, D. 2000
<i>Enterobacter cloacae IIT-BT 08</i>	Disacarido	Batch	5.4 mol/mol Disacaridos	Kumar, N. y Das, D. 2000
<i>Escherichia coli MC13-4</i>	Glucosa	Batch	1.2 mol/mol glucosa	Ishikawa y col., 2006
<i>Escherichia coli</i>	Glucosa	Batch	2.0 mol/mol glucosa	Bisailon y col., 2006
<i>Escherichia coli</i>	Glucosa	Continuo	2.0 mol/mol glucosa	Turcot y col., 2008
<i>Pseudomonas sp. GZ1</i>	Lodos tratados	Batch	0.007 mol/g DQO	Guo y col., 2008

Tabla 2.9 Continuación...

Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	Máxima producción de hidrógeno	Referencia
<i>Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum</i> KU001	Glucosa	Batch	2.4 mol/mol glucosa	Ueno y col., 2001
<i>Thermococcus kodakaraensis</i> KOD1	Almidón	Continuo	-	Kanai y col., 2005
<i>Thermotoga elfii</i>	Glucosa	Batch	84.9 mmol/L	Van y col., 2002
<i>Hydrogen-producing bacterial</i> B49	Glucosa	Batch	0.1 mL/L	Wang y col., 2007
<i>Ruminococcus albus</i>	Glucosa	Batch	2.52 mol/mol glucosa	Ntaikou y col., 2008
<i>Hafnia alvei</i>	Glucosa	Batch	NR	Podesta y col., 1997
<i>Citrobacter amalonaticus</i> Y19	Glucosa	Batch	8.7 mol/mol glucosa	Oh y col., 2008
<i>Ethanoligenens harbinense</i> YUAN-3	Glucosa	Continuo	1.93 mol/mol glucosa	Xing y col., 2008

2.4.1.2 Cultivos mixtos

Las bacterias en cultivos mixtos son capaces de producir hidrógeno muy común en los entornos naturales como el suelo, lodos de aguas residuales, composta, etc. (Wang y Wan, 2008; Zhu y Beland, 2006). Así pues, estos materiales pueden ser utilizados como fermentadores del inóculo para la producción de hidrógeno. Actualmente, los cultivos mixtos de bacterias anaerobias de los lodos, composta y el suelo han sido ampliamente utilizados como inóculo para la producción de hidrógeno fermentativo (Li y Fang, 2007).

El proceso de producción de hidrógeno por medio de unidades mixtas son más prácticos que los que utilizan cultivos puros, porque los primeros son más sencillos de manejar y más fáciles de controlar y pueden tener una fuente más amplia de materias primas (Li y Fang, 2007).

Sin embargo, en un proceso fermentativo de producción de hidrógeno se mezclan el uso de cultivos mixtos y puros, el problema que surge es que cuando se mezclan aparecen condiciones difíciles principalmente influyen golpes de calor, ácido, base, aireación, liofilización/congelación/descongelación, cloroformo, sodio 2-bromoethanesulfonate o 2-bromoethanesulfonic ácido y iodopropane (Wang y Wan, 2008), mostradas en la Tabla 2.10. Además, la mayoría de las comparaciones se realizaron utilizando glucosa como sustrato, pero se recomienda utilizar desechos orgánicos.

2.4.2 Sustrato

Una gran cantidad de sustratos se han utilizado para la reproducción de hidrógeno fermentativo, una gran cantidad de estudios que utilizan sustratos y sus concentraciones los cuales muestran niveles mucho muy altos los cuales podrían disminuir la producción de hidrógeno (Lo y col., 2008; Van y col., 2001). Además, existe cierto desacuerdo sobre la concentración óptima de un determinado sustrato fermentativo para la producción de hidrógeno.

Además algunos sustratos no son ideales para la producción de hidrógeno, debido a su compleja estructura, sin embargo, después de haber sido pretratados por algunos métodos como se muestra en la Tabla 2.11, estos sustratos pueden ser utilizados fácilmente por bacterias productoras de hidrógeno.

Tabla 2.10 Comparación de diversos métodos de tratamiento previo para el enriquecimiento de bacterias productoras de hidrógeno

Inóculo	Pretratamiento Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	Maximo rendimiento de hidrógeno	Pre-tratamiento optimo	Referencia
Lodo digerido	Ácido, base, choque térmico, aereacion y cloroformo	Glucosa	Batch	1.8 mol/mol glucosa	Choque termico	Wang y Wal, 2008
Estiercol de ganado	Congelación y descongelación, ácido, golpe de calor y sodio 2-bromoetano sulfonato	Glucosa	Batch	1.0 mol/mol glucosa	Acido	Cheong y Hansen , 2006
Granulos metanogenicos	Acido, choque termico y cloroformo	Glucosa	Batch	1.2 mol/mol glucosa	Cloroformo	Hu y Chen, 2007
Aguas residuales	Acido, base, choque termico, aereacion y cloroformo, 2-bromoetano sulfonato y iodopropano	Sucrosa	Batch	6.12 mol/mol sucrosa	Base	Zhu y Beland, 2006
Lodo anaerobio	Sodio, 2-Bromo etanosulfonato, acido, choque termico	Residuos de lactosa	Batch	0.0317 mmol/gDQO	Sodio, 2-Bromo Etano sulfonato	Mohan y col., 2008

2.4.3 Tipo de reactor

Como se muestra la mayoría de los estudios sobre la producción de hidrógeno se realizaron en modo por lotes, debido a su sencillo funcionamiento y control. Las Tablas 2.10, 2.11 y 2.12 resumen una gran cantidad de estudios que utilizan reactores para la producción de hidrógeno.

Tabla 2.11 Inóculos con método de pretratamiento

Inóculo	Tipo de reactor	Métodos de pretratamiento sustrato	Método óptimo de tratamiento previo	Índice optimo (valor)	Referencia
Clostridium bifermentans	Batch	Congelación y descongelación, ultrasonificación, acidificación, esterilización y inhibidor de metanogenos	Congelación y descongelación	Máximo rendimiento de hidrógeno (2.1 mmol / g DQO)	Wang y col., 2003
Clostridium bifermentans	Batch	Congelación y descongelación, sonificación, acidificación y esterilización	Congelación y descongelación	Máximo rendimiento de hidrógeno (4.1 g / kg SD)	Ting y col., 2004
Pseudomonas sp. GZ1	Batch	Esterilización, microondas y ultrasonificación	Esterilización	Máximo rendimiento de hidrógeno (15.02 mL / g DQO)	Guo y col., 2008

Como se muestra en la Tabla 2.12, el reactor de tanque agitado continuo (CSTR) se utiliza ampliamente para la producción de hidrógeno (Zhang y col., 2007; Arooj y col., 2008). Zhang y col., (2007) consideró que la formación de lodo granular facilita la concentración de biomasa de hasta 32,2 g SSV/L y el aumento de la producción de hidrógeno. Se ha demostrado que en determinados experimentos, el aumento de la TRH podría aumentar la capacidad de producción de hidrógeno y bacterias durante la producción de hidrógeno, pero el TRH en niveles mucho más altos podría disminuir la producción tanto de hidrógeno como de bacterias (Chen y col., 2008).

Además, existe cierto desacuerdo sobre el TRH óptimo para la producción de hidrógeno en reactores, incluso para el mismo tipo de reactor. Por ejemplo, la TRH óptimo para un CSTR reportados por Zhang y col. (2007) fue de 0,5 h, mientras que la TRH óptimo para un CSTR informado por Arooj y col. (2008) fue de 12 h. La posibilidad

razón de esta discrepancia es la diferencia entre estos estudios en los términos de inóculo, sustrato y TRH. Como se muestra la glucosa y sacarosa fueron el sustrato más utilizado para la producción de hidrógeno.

Tabla 2.12 Reactores más utilizados para la producción de hidrógeno por medio de la fermentación

Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	TRH (h)	Índice óptimo (valor)	Referencia
Lodos Aguas residuales	Glucosa	CSTR	0.5	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,81 mol / mol de glucosa)	Zhang y col., 2007
Lodo anaerobio	Glucosa	CSTR	4	Máxima tasa de producción de hidrógeno (115,68 mmol / d)	Gavala y col., 2006
Lodos Aguas residuales	Sucrosa	CSTR	4	Máximo rendimiento de hidrógeno (4,70 mol / mol de sucrosa)	Chen y col., 2008
Lodos Aguas residuales	Sucrosa	CSTR	8	Máximo rendimiento de hidrógeno (4,52 mol / mol de sucrosa)	Chen y Lin, 2003
Lodos Aguas residuales	Fructuosa	CSTR	8	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,68 mol / mol de hexosa)	Lee y col., 2007
Lodo anaerobio	Almidón	CSTR	12	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,5 mol / mol de hexosa)	Lin y col., 2008
Lodo anaerobio digerido	Glucosa	CSTR	10	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,95 mol / mol de glucosa)	Zhang y col., 2006

Continuación Tabla 2.12...

Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	TRH (h)	Índice óptimo (valor)	Referencia
Lodo anaerobio	Glucosa	CSTR	10	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,63 mol / mol de glucosa)	Wu y col., 2008a
Lodos Aguas residuales	Xilosa	CSTR	12	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,63 mol / mol de Xilosa)	Wu y col., 2008b
Lodos Aguas residuales	Glucosa	CSTR	12	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,36 mol / mol de hexosa)	Lee y col., 2007
Lodos Aguas residuales	Sucrosa	CSTR	12	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,60 mol / mol de hexosa)	Lee y col., 2007
Lodos Aguas residuales	Almidón	CSTR	12	Máximo rendimiento de hidrógeno (0,92 mol / mol de glucosa)	Arooj y col., 2008
Lodos Aguas residuales	Sucrosa	UASB	8	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,5 mol / mol de sucrosa)	Chang y Lin, 2004
Lodo anaerobio	Glucosa	UASB	12	Máxima tasa de producción de hidrógeno (96.0 mmol / d)	Gavala y col., 2006
Lodos de depuradora	Sucrosa	UASB	8	Máximo rendimiento de hidrógeno (3,6 mol / mol de sucrosa)	Chang y Lin, 2006
Lodo anaerobio digerido	Glucosa	reactor de lecho fluidizado anaerobio	0.25	Máximo rendimiento de hidrógeno (1.7 mol / mol de glucosa)	Zhang y col., 2008

Continuación Tabla 2.12...

Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	TRH (h)	Índice óptimo (valor)	Referencia
Lodo anaerobio digerido	Glucosa	reactores de lecho fluidizado anaerobio de gránulos	0.25	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,6 mol / mol de glucosa)	Zhang y col., 2008
Lodo aguas residuales	Sucrosa	Bioreactor de lodos granulares inducidos cama	0.5	Máximo rendimiento de hidrógeno (3,3 mol / mol de sucrosa)	Lee y col., 2004
Lodo aguas residuales	Xilosa	Reactor de lecho de lodos con carbón activado	4	Máximo rendimiento de hidrógeno (0,7 mol / mol de Xilosa)	Wu y col., 2008b
Lodo aguas residuales	Sucrosa	Bioreactor de camas empacadas	4	Máximo rendimiento de hidrógeno (3,9 mol / mol de sucrosa)	Lee y col., 2006
Lodo aguas residuales	Glucosa	Bioreactor de membrana	4	Máximo rendimiento de hidrógeno (1,72 mol / mol de hexosa)	Lee y col., 2007
Lodo aguas residuales	Xilosa	Reactor anaerobio de células inmovilizadas	6	Máximo rendimiento de hidrógeno (0,8 mol / mol de Xilosa)	Wu y col., 2008b

2.4.4 Nitrógeno y fosfato

Dado que el nitrógeno es un componente muy importante de proteínas, ácidos nucleicos y enzimas que son de gran importancia para el crecimiento de bacterias productoras de hidrógeno, es uno de los nutrientes esenciales necesarios para el crecimiento de bacterias productoras de hidrógeno. Por lo tanto, un nivel adecuado de

nitrógeno además es beneficioso para el crecimiento de bacterias productoras de hidrógeno (Bisaillon y col., 2006). La Tabla 2.13 resume varios estudios de investigación de los efectos de la concentración de nitrógeno en la producción de hidrógeno fermentativa. Como se muestra la glucosa es el sustrato más utilizado durante la investigación del efecto de la concentración de nitrógeno en la producción de hidrógeno, todos los estudios de producción de hidrógeno se realizaron en modo por lotes, y la realización de dichos estudios en el modo continuo.

El fosfato también es necesario para la producción de hidrógeno debido a su valor nutritivo, así como su capacidad amortiguadora. Se ha demostrado que en una determinada serie, el aumento de fosfato de concentración podría aumentar la capacidad de producción de hidrógeno, pero las concentraciones de fosfato en muchos niveles más altos podrían disminuir con el aumento de éste (Bisaillon y col., 2006; Lay y col 2005). Se ha demostrado que una adecuada relación C/N y C/P son fundamentales para la producción de hidrógeno. La Tabla 2.13 resume varios estudios investigando el efecto de la relación C/N y C/P en la producción de hidrógeno fermentativo.

2.4.5 Iones metálicos

Aunque en una concentración más alta, iones metálicos pueden inhibir la actividad de las bacterias productoras de hidrógeno, un nivel de trazas de iones metálicos se requiere para la producción de hidrógeno fermentativo (Li y Fang 2007). La Tabla 2.14 resume varios estudios investigando el efecto de la concentración de iones metálicos en la producción de hidrógeno.

Tabla 2.13 Efecto de C/N y C/P en la producción de hidrógeno

Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	C/N Optimo	C/P Optimo	Índice optimo (valor)	Referencia
Lodos activados	Sucrosa	Batch	47	NR	Máximo rendimiento de hidrógeno (4.8 mol / mol sucrosa)	Lin y Lay, 2004
Lodo anaerobio	Trigo	Batch	200	1000	Máximo rendimiento de hidrógeno (281mL / g almidón)	Argun y col., 2008
Lodo anaerobio	Desechos de aceite	Batch	74	559	Máximo rendimiento de hidrógeno (6.33 L / L sustrato)	O-Thong y col., 2008

2.4.6 Temperatura

La temperatura es uno de los factores más importantes que influyen en las actividades de bacterias productoras de hidrógeno y la producción de hidrógeno fermentativo. Se ha demostrado que en una determinada serie, el aumento de temperatura podría aumentar la capacidad de las bacterias productoras de hidrógeno para producir hidrógeno fermentado, pero la temperatura en niveles mucho más altos podría disminuir los niveles (Wang y Mu 2005). En la Tabla 2.15 se resumen varias investigaciones sobre el efecto de la temperatura en la producción de hidrógeno fermentativo. Aunque la temperatura óptima para bacterias fermentadoras cambia, de igual forma la producción de hidrógeno no es siempre la misma.

Tabla 2.14 Efecto de la concentración de iones metálicos en la producción de hidrógeno por medio de la fermentación

Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	Metal ion	Concentración óptima (mg/L)	Índice óptimo (valor)	Referencia
Cereales	Almidón	Batch	Fe ²⁺	10	Máximo rendimiento de hidrógeno (140 mL/g almidón)	Liu y Shen, 2004
Lodo anaerobio	Almidón	Batch	Fe ²⁺	55.3	Máximo rendimiento de hidrógeno (296.2 mL/g almidón)	Yang y Shen, 2006
Composta de césped	Desperdicios de comida	Batch	Fe ²⁺	132	Máximo rendimiento de hidrógeno (77 mL /g STV)	Lay y col., 2005
Lodo anaerobio	Aceite de palma	Batch	Fe ²⁺	257	Máximo rendimiento de hidrógeno (6.33 L /L sustrato)	O-Thong y col., 2008
Lodo digerido	Glucosa	Batch	Fe ²⁺	350	Máximo rendimiento de hidrógeno (311.2 mL/g glucosa)	Wang y Wan, 2008a
Lodo anaerobio	Sucrosa	Batch	Fe ²⁺	352.8	Máximo rendimiento de hidrógeno (131.9mL/g sucrosa)	Lee y col., 2001
Cereales	Sucrosa	Batch	Fe ²⁺	589.5	Máximo rendimiento de hidrógeno (2.73 mol /mol sucrosa)	Zhang y col., 2005
Lodo anaerobio	Glucosa	Batch	Cu ²⁺	400	Máximo rendimiento de hidrógeno (1.74 mol /mol glucosa)	Zheng y Yu, 2004
Lodo anaerobio	Glucosa	Batch	Zn ²⁺	250	Máximo rendimiento de hidrógeno (1.73 mol /mol glucosa)	Zheng y Yu, 2004
Bacteria productor de hidrógeno B-49	Glucosa	Batch	Mg ²⁺	23.6	Máximo rendimiento de hidrógeno (2360.5 mL/L)	Wang y col., 2007
Lodo digerido	Glucosa	Batch	Ni ²⁺	0.1	Máximo rendimiento de hidrógeno (296.1 mL/g glucosa)	Wang y Wan, 2008b
Lodo digerido	Sucrosa	Continuo	Ca ²⁺	150	Máximo rendimiento de hidrógeno (3.6 mol /mol sucrosa)	Chang y Lin, 2006
lodo aguas residuales	Sucrosa	Continuo	Ca ²⁺	27.2	Máximo rendimiento de hidrógeno (2.19 mol /mol sucrosa)	Lee y col., 2004

Tabla 2.15 Efecto de la temperatura en la producción de hidrógeno

Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	Temperatura Optima	Índice optimo (valor)	Referencia
<i>Ethanoligenens harbinense</i> YUAN-3	Glucosa	Batch	37 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (1.34 mol /mol glucosa)	Xing y col., 2008
Lodo anaerobio	Glucosa	Batch	40 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (2.75 mol /mol glucosa)	Wang y Wan, 2008c
Lodo anaerobio	Glucosa	Batch	41 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (1.67 mol /mol glucosa)	Mu y col., 2006a
Lodo anaerobio	Sucrosa	Batch	35.1 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (3.7 mol /mol sucrosa)	Wang y col., 2005
Lodo anaerobio	Sucrosa	Batch	35.5 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (252 mL/g sucrosa)	Mu y col., 2006b
Lodo anaerobio digerido	Papilla de arroz	Batch	37 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (346 mL/g carbohidratos)	Fang y col., 2006
Lodo aguas residuales	Sucrosa	Continuo	40 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (3.88 mol /mol sucrosa)	Lee y col., 2006
<i>Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum</i> PSU-2	Sucrosa	Batch	60 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (2.53 mol /mol hexosa)	O-Thong y col., 2008
Lodo aguas residuales	Almidón	Batch	55 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (1.44 mmol /g almidón)	Lee y col., 2008

Continuación Tabla 2.15....

Inóculo	Sustrato	Tipo de reactor	Temperatura Optima	Índice optimo (valor)	Referencia
Lodo aguas residuales	Xilosa	Continuo	50 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (1.4 mol /mol xilosa)	Lin y col., 2008
Estiércol de vaca	Estiércol de vaca	Batch	60 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (743 mL/kg estiércol de vaca)	Yokoyama y col., 2007a
Estiércol liquido de vaca	Estiércol liquido de vaca	Batch	60 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (392 mL/L estiércol liquido)	Yokoyama y col., 2007b
Lodos anaerobio digeridos	Desperdicios orgánicos	Semi-continuo	55 °C	Máximo rendimiento de hidrógeno (360 mL/g SV)	Valdez y col., 2005

2.4.7 pH

El pH es otro factor importante que influye en las actividades de bacterias productoras de hidrógeno, y en la fermentación para la producción de hidrógeno, ya que puede afectar a la actividad bacteriana, así como la vía del metabolismo. Se ha demostrado que en una determinada serie, el aumento de pH podría aumentar la capacidad de las bacterias productoras de hidrógeno para producir hidrógeno fermentativo durante la producción de hidrógeno, pero el pH en niveles mucho más altos podría disminuir con el aumento de estos niveles. Dado que la mayoría de los estudios se realizaron en modo batch sin control de pH, sólo el efecto de pH inicial sobre la producción de hidrógeno fermentativo se investigó en estos estudios.

La Tabla 2.16 se resume varios estudios sobre el efecto del pH inicial de la producción de hidrógeno fermentativo en modo batch.

Tabla 2.16 Efecto del pH inicial en la producción de hidrógeno en reactores batch

Inóculo	Sustrato	pH inicial óptimo	Índice óptimo (valor)	Referencia
Composta	Sucrosa	4.5	Máximo rendimiento de hidrógeno (2.14 mL/g DQO)	Khanal y col.,2004
Lodo anaerobio	Almidón	5	Máximo rendimiento de hidrógeno (1.1 mol /mol hexosa)	Lin y col., 2008
Clostridium butyricum CGS5	Sucrosa	5.5	Máximo rendimiento de hidrógeno (2.78 mol /mol sucrosa)	Chen y col., 2005
Lodos activados	Desperdicio de comida	6	Máximo rendimiento de hidrógeno (4.71 mmol /g DQO)	Wu y Lin, 2004
Lodo anaerobio	Almidón	6	Máximo rendimiento de hidrógeno (92mL/g almidón)	Zhang y col.,2003
thermosaccharolyticum PSU-2	Sucrosa	6.2	Máximo rendimiento de hidrógeno (2.53 mol /mol hexosa)	O-Thong y col., 2008
Lodos aguas residuales	Xilosa	6.5	Máximo rendimiento de hidrógeno (2.25 mol /mol xilosa)	Lin y Chen, 2006
Lodos aguas residuales	Xilosa	6.5	Máximo rendimiento de hidrógeno (1.3 mol /mol xilosa)	Lin y col., 2008
Composta estiércol de vaca	Residuos de maíz	7	Máximo rendimiento de hidrógeno (149 .69 mL/STV)	Zhang y col.,2007
Lodos estiércol de vaca	celulosa	7.5	Máximorendimiento de hidrógeno (2.8 mol /mol celulosa)	Lin y Hung, 2008

Continuación Tabla 2.16...

Inóculo	Sustrato	pH inicial optimo	Índice optimo (valor)	Referencia
Lodos aguas residuales	Sucrosa	7.5	Máximo rendimiento de hidrógeno (2.46 mol /mol sucrosa)	Wang y col., 2006
Lodo granular anaerobio	Glucosa	7.5	Máximo rendimiento de hidrógeno (1.46 mol /mol glucosa)	Davila y col., 2008
Cereales	Almidón	8	Máximo rendimiento de hidrógeno (120 mL/g almidón)	Liu y Shen, 2004
Lodo anaerobio digerido	Sucrosa	9	Máximo rendimiento de hidrógeno (126.9 mL/g sucrosa)	Lee y col., 2002

2.4.8 Arranque

En el presente apartado, se expondrán las estrategias seguidas para el arranque de un reactor anaerobio para la producción de hidrógeno, propuesta por diferentes autores y la realizada en este trabajo. El arranque de un reactor puede requerir de un tiempo considerable, por ser una etapa delicada. Si no se cuenta con un perfil de arranque adecuado existe la posibilidad de que el sistema entre en la fase metanogénica, la cual puede llevar a la pérdida de nuestros lodos ya adaptados con el inóculo.

El tiempo de arranque y su éxito depende de la concentración y composición de la carga orgánica, el volumen, actividad y la adaptación del inóculo, además de parámetros ambientales (pH, temperatura, nutrientes y elementos traza), parámetros de

operación (carga orgánica, TRH y mezclado) y, por último la configuración del reactor (geometría y tamaño ya explicados en la sección 2.4.4). Todos estos parámetros están interrelacionados. Sin embargo, éste periodo puede reducirse significativamente si estas variables son debidamente controladas.

En la Figura 2.29 se muestra el porcentaje de remoción de materia orgánica afectado por el tiempo de residencia en un experimento de Haijun y col. (2006), en un reactor UASB para la producción de H_2 . Como se puede observar, la remoción de DQO cambia, muy poco (por encima del 60%) con un tiempo de residencia incrementándose de 12 a 48 horas.

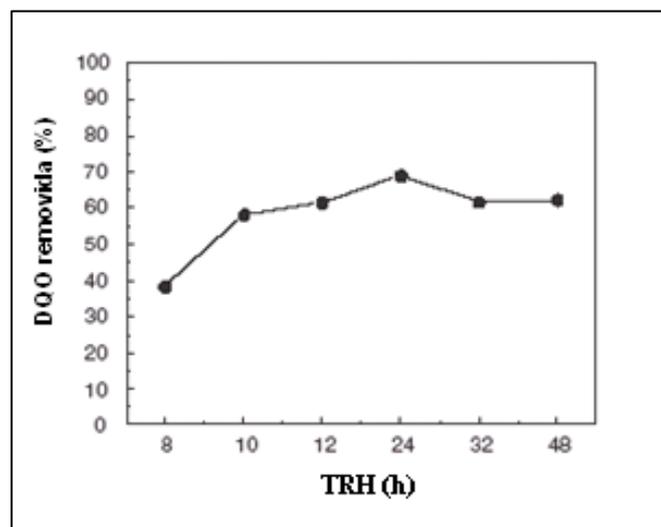


Figura 2.29 DQO removida en un experimento afectando el TRH (Haijun y col., 2006)

En la Figura 2.30 se muestra como se afecta la degradación de la glucosa con respecto al tiempo de residencia, en un reactor UASB. Dicha degradación se incrementa de las 8 a las 12 hrs. y muestra como empieza el decaimiento a partir de la 12^a hora. De igual forma como en esta hora obtenemos un máximo de degradación del 96.6% sin bajar del 90% en las 48 horas que duró éste experimento (Haijun y col., 2006).

Un ejemplo de cómo afecta el pH, se muestra en la Figura 2.31 en dicho experimento se ve como baja el pH en el efluente, con respecto a la carga orgánica, para un reactor UASB (Haijun y col., 2006).

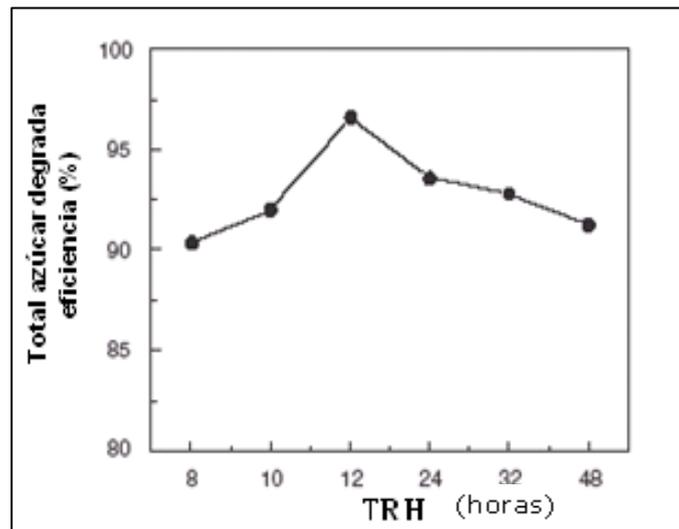


Figura 2.30 Conversión de materia orgánica con respecto al TRH aplicado (Haijun y col., 2006)

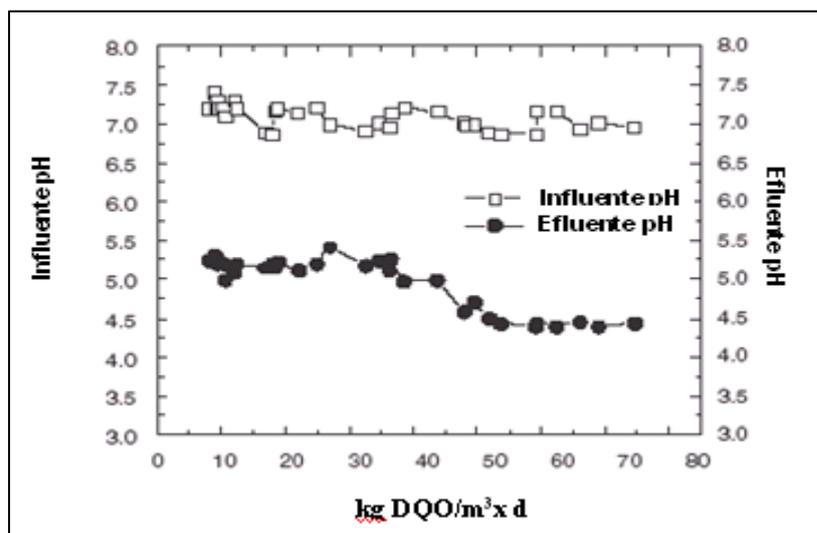


Figura 2.31 Efecto del pH con respecto a la carga orgánica (Haijun y col., 2006)

En la Figura 2.32 se puede observar la similitud entre las líneas de producción y rendimiento; primero se incrementa el volumen de tasa masica dado en kg DQO/ m³dia, variando de 10.0 a 38.4 kg DQO/m³xdia y un decremento a partir de éste valor y siendo éste el valor óptimo para la producción y rendimiento de 34.4 m³dia y 0.84 mol H₂ mol hexosa consumido respectivamente (Haijun y col., 2006).

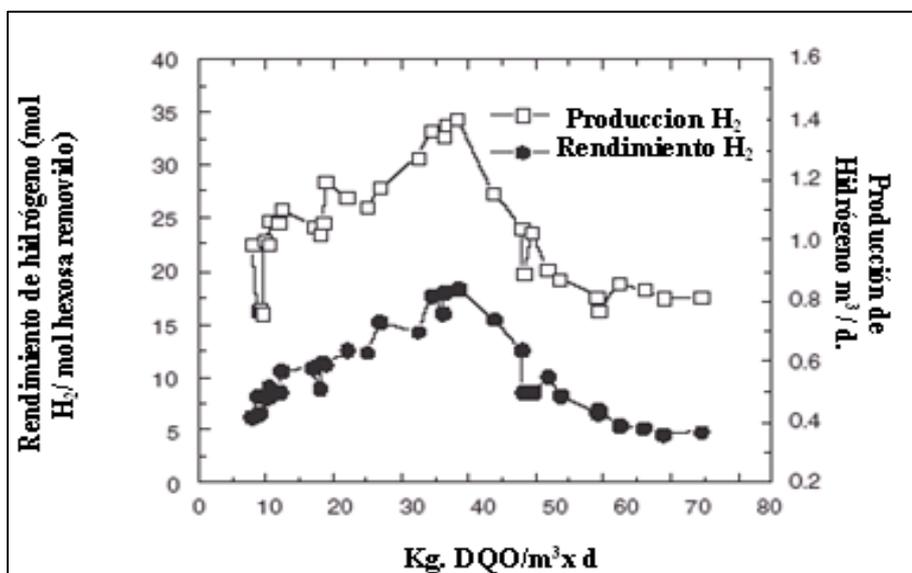


Figura 2.32 Producción y rendimiento de hidrógeno (Haijun y col., 2006)

Como seguimiento a los parámetros más importantes a seguir para la fermentación oscura se presenta la Tabla 2.17 la cual resume los factores más importantes ya mencionados con anterioridad (sistema, inóculo, sustrato, producción de hidrógeno, temperatura, carga, pH, porcentaje de hidrógeno, tiempo de residencia, así como la referencia.

Tabla 2.17 Parámetros de arranque en fermentadores productores de hidrógeno (Dávila y col., 2008)

Sistema	Inóculo	Sustrato	H ₂ producción	Condiciones					Referencia
				TRH	carga	pH	Temp.	% H ₂	
I N T E R M I T E N T E	<i>Clostridium</i>	Sucrosa	2.78 molH ₂ /mol sucrosa	NR	NR	5.5	37	64	Chen y col., 2005
	<i>Clostridium saccharoperbutylaceticum</i>	Suero y queso crudo	2.7 molH ₂ /mol lactosa	NR	NR	6	30	NR	Ferchichi y col., 2005
	<i>Escherichia coli strains</i>	Glucosa	2 mol H ₂ /mol glucosa	NR	NR	7	37	-	Bisaillon y col., 2006
	<i>Escherichia coli strains</i>	Ácido fórmico	1 mol H ₂ /mol formate	NR	NR	6.5	37	NR	Yoshida y col., 2005
	<i>Bacteria mesofilica HN001</i>	Almidón	2 mol H ₂ /mol glucosa	NR	NR	6	37	NR	Yasuda y Tanisho, 2006
	Lodos aerobios y anaerobios	Glucosa	1.4 mol H ₂ /mol glucosa	NR	NR	6	37	NR	Kawagoshi y col., 2005
	<i>Clostridium</i>	Sucrosa	2.78 molH ₂ /mol sucrosa	NR	NR	5.5	37	64	Park y col., 2005
	<i>Clostridium saccharoperbutylaceticum</i>	Suero y queso crudo	2.7 molH ₂ /mol lactosa	NR	NR	6	30	NR	Ferchichi y col., 2005
	Lodos aerobios (Condiciones de calor)	Glucosa	2.82 molH ₂ /mol glucosa	NR	NR	6.2	25	62	Oh et al. 2004
	Cultivo Mixto	Residuos orgánicos	NR	NR	NR	6.5	37	NR	Wang y col., 2006
<i>C. Thermolactium</i>	Lactosa	2.1-3 H ₂ /mmol lactosa	17	NR	7	58	55	Collet y col., 2004	

Tabla 2.17 continuación...

Sistema	Inóculo	Sustrato	H ₂ producción	Condiciones					Referencia
				TRH	carga	pH	Temp.	%H ₂	
I N	<i>Enterobacteria y cinobacteria</i>	Glucosa	41.23mL H ₂ /g DQOrem.	NR	NR	6	37	NR	Kotay y Das, 2006
	Lodos aerobios (condiciones calor)	Glucosa	2 mol H ₂ /mol glucosa	NR	NR	6	30	87.4	Park y col., 2005
T	Excremento	Materia orgánica rica en carbohidratos	100 mL H ₂ /g DQO removida	NR	NR	6.1	23	60	Van y col., 2005
E R	Lodo anaerobio (tratamiento con ácido en un CSTR)	Sucrosa	1.74 mol H ₂ /mol sucrosa	NR	NR	6.0	37	40	Wu y col., 2005
M	Lodo anaerobio condiciones de calor	Glucosa	1.75 mol H ₂ /mol glucosa	NR	NR	5.7	37	40	Zheng y Yu, 2005
I T	Lodo anaerobio (Tratamiento con ácido)	Glucosa	0.8-1.0 mol H ₂ /mol hexosa	NR	NR	5.7	34.5	59- 66	Cheong y Hansen, 2006
E	Microflora y composta con excremento de vaca	Bagazo trigo	1.75 mol H ₂ /gr l-h	NR	NR	7	36	52	Fan y col., 2006
N	Lodo anaerobio (pretratamiento con calor)	Sucrosa	1.9 mol H ₂ /mol sucrosa	NR	NR	5.5	35	NR	Mu y col., 2006a
T	Lodo anaerobio (pretratamiento con calor)	Sucrosa	3.4 mol H ₂ /mol sucrosa	NR	NR	5.5	34.8	64	Mu y col., 2006b
E	Lodo anaerobio (pretratamiento con calor)	Glucosa	1 mol H ₂ /mol glucosa	NR	NR	6.2	30	66	Salerno y col., 2006

Tabla 2.17 continuación...

Sistema	Inóculo	Sustrato	H ₂ producción	Condiciones					Referencia
				TRH	carga	pH	Temp	% H ₂	
I N T E R M I T E N T E	Lodo anaerobio (pretratamiento con calor)	Glucosa, sucrosa, fécula de papa	0.968 mol H ₂ /mol glucosa, 1.8 mol H ₂ /mol sucrosa, 0.59 mol H ₂ /papa	NR	NR	6	26	62	Logan y col., 2002
	Cultivo mixto	OFMSW-Sustrato Semisólido	NR	504	11g SV	6.4	55	58	Valdéz y col., 2005
	Lodo anaerobio	POME	NR	24	NR	5.5	60	66	Atif y col., 2005
C S T R	Cultivo mixto	Sucrosa	1.75 mol H ₂ /mol glucosa	76	NR	5.4	55	NR	Calli y col., 2006
	Cultivo mixto	Sucrosa	3.5 mol H ₂ /mol glucosa	12	NR	6.8	35	46	Lin y col., 2006
	Cultivo mixto inmovilizado en silicón gel	Sucrosa	3.86 mol H ₂ /mol sucrosa	0.5	NR	6.5	40	44	Wu y col., 2006
	Cultivo mixto	Xilosa	1.1 mol H ₂ /mol xilosa	12	NR	7.1	35	32	Lin y Cheng, 2006
	Cultivo mixto	Pollo y maíz	NR	96	NR	5.3 5.6	35	NR	Cheng y col., 2006
	Cultivo mixto	Glucosa	1.93 mol H ₂ /mol glucosa	4.5	80g DQO/l-d	5.5	37	67	Zhang y col., 2004
	Fangos	Glucosa	1.9 mol H ₂ /mol g glucosa	10	NR	5.5	35	67	Salermo y col., 2006

Tabla 2.17 continuación...

Sistema	Inóculo	Sustrato	H ₂ producción	Condiciones					Referencia
				TRH	carga	pH	Temp.	% H ₂	
C S T R	Cultivo mixto	Sucrosa	3.6 mol H ₂ /mol sucrosa	12	NR	5.5	35	50	Lin y Cheng, 2006
	Lodos aguas residuales	Sucrosa	3.43 mol H ₂ /mol sucrosa	12	NR	6.8	35	50.9	Lin y Lay, 2005
	Sobrenadante Lodos	Melastas	NR	11	27.98	4.5	35	45	Ren y col., 2006
U A S B	Cultivo mixto	Glucosa	2.47 mol H ₂ /mol glucosa	26.7	NR	4.8	5.5	NR	Kotsopoulos y col., 2006
	Cultivo mixto	Sucrosa y aguas residuales	1.61 mol H ₂ /mol glucosa	12	NR	7	39	NR	Mu y Yu, 2006
	Cultivo mixto	Ácido cítrico y aguas residuales	0.84 mol H ₂ /mol glucosa	12	38.4 kg	7	35	NR	Yang y col., 2006
	Cultivo mixto	Sucrosa	1.5 mol H ₂ /mol sucrosa	8.175	6.7	6.7	35	42.4	Chang y Lin, 2004
	Cultivo mixto	Glucosa	1.7 mol H ₂ /mol glucosa	2	NR	6.4	55	36.8	Gavala y col., 2006
CSTR Y UASB	Cultivo mixto	Almidón y Xilosa	NR	33	NR	7	35	68	Camilli y Pedroni, 2005
CSTR UASB UFBR	Cultivo mixto	Glucosa	1.6 mol H ₂ /mol glucosa	12	NR	5.5	60	48	Oh y col., 2004
TBR	<i>Clostridium acetobutylicu m</i>	Glucosa	0.9 mol H ₂ /mol glucosa	0	8.3g	4.9	3.4	74	Zhang y col., 2006

Tabla 2.17 continuación...

Sistema	Inóculo	Sustrato	H ₂ producción	Condiciones					Referencia
				TRH	carga	pH	Temp.	% H ₂	
TBR	Cultivo mixto	Glucosa	2.48 mol H ₂ /mol glucosa	0.5	96 kg/m ³	7.7	30	NR	Leite y col., 2006
CI GSB	Cultivo mixto	Sucrosa	3.88 mol H ₂ /mol	0.5	NR	6.7	40	42	Lee y col., 2006
PBR	Estiércol de vaca	POME	NR	3-7	NR	5	NR	53 56	Vijayaraghavan y Ahmad, 2006
UACF	Estiércol de vaca	Fruta Pelada	NR	288	NR	5	NR	56	Vijayaraghavan y col., 2006
MBR	Cultivo mixto	Glucosa	1.1 mol H ₂ /mol glucosa	0.8	NR	5.5	37	70	Kim y col., 2006
FBR DTFBR	Cultivo mixto	Sucrosa	2.10 mol H ₂ /mol sucrosa 1.22 mol H ₂ /mol sucrosa	2	NR	6.9	40	40	Wu y col., 2006

Capítulo 3

METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

3.1 Diseño experimental del reactor

Se operó un reactor anaerobio a nivel laboratorio para el tratamiento de desechos orgánicos (frutas verduras) de Ciudad Universitaria, UNAM. La metodología en la parte de arranque y operación de la fermentación obscura se basó en diferentes experiencias en investigaciones realizadas en otras anteriores y del capítulo 2.4. La metodología se muestra en la Figura 3.1 el cual es el diagrama base para el diseño experimental del reactor de fermentación.

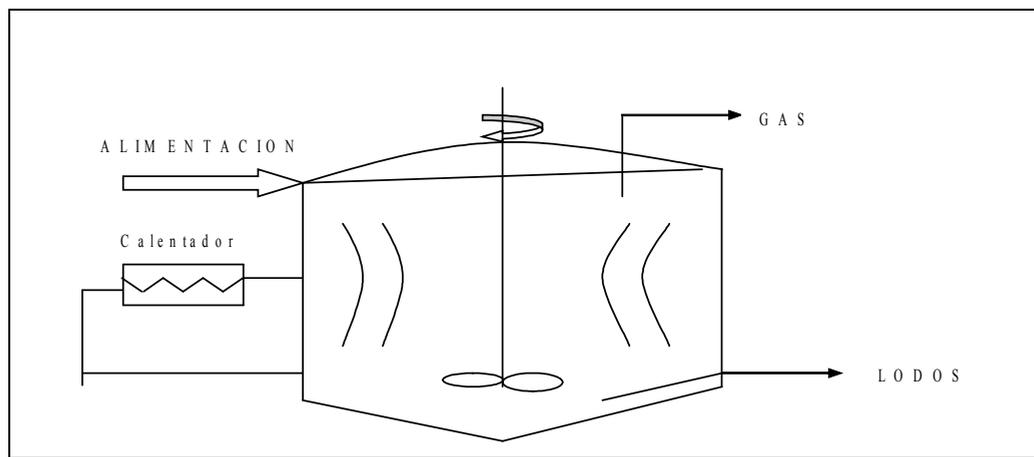


Figura 3.1. Diagrama base para el diseño del reactor fermentador

El reactor que se utilizó es un reactor CSTR el cual se alimentó con un inóculo de excremento de vaca para lograr la adaptación de las bacterias. El reactor anaerobio tiene un volumen de 7.9L, fue construido con un tubo de acrílico de 12 cm de diámetro interno, 2 mm de espesor, 97 cm de altura, el cual está encaquetado con otro tubo de acrílico de 20cm de diámetro (Figura 3.2). Por el espacio libre entre los dos tubos se introdujo agua caliente para mantener la

temperatura dentro del reactor entre 35 y 40°C. La Tabla 3.1 muestra un resumen de las especificaciones del reactor fermentador.



Figura 3.2 Reactor fermentador de 5L

Tabla 3.1. Especificaciones del reactor fermentador

Parámetro	Dimensión
Volumen de trabajo (m ³)	7.900
Diámetro interno (cm)	10
Espesor de la pared (mm)	2
Altura (cm)	97
Altura chaqueta (cm)	97
Diámetro interno de la chaqueta (cm)	20
Espesor de la pared (mm)	2

Para tener un mayor control de parámetros se hicieron experimentos con kitazatos, probando a diferentes pH, agitación y cargas orgánicas. Los kitazatos tienen un volumen de 500 mL con una parrilla en la base para mantener a la temperatura óptima (entre 35 y 40°C) y en perfecta agitación, con una salida en la parte superior para la recolección del gas, como se muestra en la Figura 3.3. Los cuales trabajan bajo el mismo principio que el reactor.



Figura 3.3 Arreglo de las pruebas a menor escala

3.2 Caracterización de la materia orgánica

Como resultado del gran interés a la materia orgánica se le realizó un análisis de caracterización fisicoquímica para éste experimento. La caracterización de la materia orgánica se hizo de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001 Análisis de agua - determinación

de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba además de obtener datos tales como Sólidos Totales, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Totales Fijos, Sólidos Suspendidos Fijos, Sólidos Disueltos Totales, Sólidos Totales Volátiles; Sólidos Suspendidos Volátiles, Sólidos Disueltos Volátiles; Sólidos Disueltos Fijos obtenidos de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Se basó también en pruebas del APHA, 1992.

3.3 Inoculación

Es necesario que el volumen del inóculo en el reactor y los kitazatos sea un 30% en relación a las dimensiones del reactor, con suficiente actividad acidogénica, conteniendo los diferentes géneros de bacterias acidogénicas y adaptado a las propiedades específicas de la materia orgánica (frutas y verduras).

En el caso particular del reactor fermentador se preparó el inóculo según patente 20050064567 de Lay y col. (2005) en la cual, se describe como el inóculo se debe calentar por tres horas a una temperatura de entre 80° y 90°C. Posteriormente se le colocó agua y se dejó reposar. Se decantó, retirándose el sobrenadante al cual se incorporó junto con la carga orgánica al reactor a 25 rpm a una temperatura de 37 °C, en una proporción 1:12.5, inóculo y desechos.

Para las pruebas en kitazatos se basó en el experimento de referencia de Dávila y col. (2007) en el cual se describe como para un reactor UASB se prepara el inóculo. En la presente investigación se le colocó agua suficiente al inóculo y se hirvió durante 30 minutos para inhibir

la actividad metanogénica. De la misma forma se esperó a que se sedimentara y se separara el sobrenadante y se introdujo junto con la carga orgánica a los kitazatos a 100 y 120 rpm., una temperatura de 37 °C y un pH controlado.

En la Tabla 3.2 se muestra un resumen de los parámetros medidos durante el experimento, las unidades, así como también el promedio de éstos, tanto para el reactor como para cada uno de los kitazatos para su consideración y análisis.

Tabla 3.2 Caracterización de los desechos de frutas y verduras utilizado como sustrato para la fermentación

Parámetro	Unidades	Promedio
pH	pH	5-7
DQO	mg/l	35077
Sólidos Totales (ST)	mg/l	0.0850
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	0.0527
Sólidos Totales Fijos (STF)	mg/l	0.0481
Sólidos Suspendidos Fijos (SSF)	mg/l	0.0050
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/l	0.0324
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg/l	0.0700
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	mg/l	0.0481
Sólidos Disueltos Volátiles (SDV)	mg/l	0.0220
Sólidos Disueltos Fijos (SDF)	mg/l	0.0106

3.4 Parámetros de Arranque

En la Tabla 3.3 se muestran los parámetros manejados en la experimentación.

Tabla 3.3 Parámetros de arranque

pH	TRH	rpm	Días de operación
4-5	8	60	8
5-6	18	0	28
5-6	1	100	43
5-6	38	100	81
6-7	15	100	98
6-7	20	100	114

Los parámetros seleccionados para evaluar la operación del reactor se eligieron teniendo en cuenta su importancia en el control de este tipo de procesos y su utilidad al momento de analizar los sistemas. A continuación se presenta en la Tabla 3.4 y 3.5 la frecuencia de los análisis efectuados en el reactor durante el arranque y operación, en la fase líquida y gaseosa. Para todos ellos se emplearon las metodologías aprobadas por APHA (1992).

3.4.1 Fase líquida-sólida

En la Tabla 3.4 se muestra la frecuencia de análisis de los parámetros durante el experimento para la fase líquida para su consideración.

3.4.2 Fase gas

De igual forma se presenta la frecuencia de análisis de parámetros durante el experimento para la fase gas para su consideración en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4 Análisis en la fase líquida en el reactor anaerobio

Parámetro	Abreviación	Frecuencia (Veces por semana)
Temperatura	T	6
Potencial de hidrógeno	pH	3
Demanda química de oxígeno	DQO	3
Sólidos totales	ST	3
Sólidos suspendidos totales	SST	3
Sólidos totales fijos	STF	3
Sólidos suspendidos fijos	SSF	3
Sólidos disueltos totales	SDT	3
Sólidos totales volátiles	STV	3
Sólidos suspendidos volátiles	SSV	3
Sólidos disueltos volátiles	SDV	3
Sólidos disueltos fijos	SDF	3

Tabla 3.5 Análisis en la fase gas en el reactor anaerobio

Parámetro	Frecuencia (veces por semana)
Producción de biogás	5
Hidrógeno, CO ₂ y CH ₄ en el biogás	2

El gas producido fue cuantificado mediante un cromatógrafo de gases marca Agilent Technologies 6890 Network GC system según las instrucciones del fabricante. Este cromatógrafo trabaja con un detector de conductividad térmica, una columna empacada Hyser D +100-120 malla y un gas acarreador, nitrógeno. Las condiciones de operación son presentadas en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Condiciones de operación del cromatógrafo

Temperatura del horno	60°C
Temp. del inyector	250°C
Presión de Operación	8.8 Psi
Temperatura del detector	250°C
Flujo de la columna	12 mL/min
Flujo de operación	12.9 mL/min
Flujo de gas auxiliar	8 mL/min
Flujo referencia	30 mL/min
Tipo de detector	TCD

El gas de calibración fue un tanque de H₂ marca Micromat 14 con una pureza del 99.999% y la aguja de inyección del cromatógrafo fue de 0.018"x0.008"x0.008"x0.75" marca VICI Precision inc. de 1 mL.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1 Operación

Se realizaron 4 experimentos con cambios en pH, TRH y rpm con el mezclado los cuales se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resumen de condiciones durante el experimento

Experimento	Día		Tipo de reactor	pH y forma de control	TRH días	rpm	Observaciones	Volumen mL
	Del	Al						
1	0 al 8		Reactor 7.9 lts.	4 - 5 sin control	8	30	Se suministro sustrato inicialmente 2300 mL y 5600 mL de inóculo obtenido del excremento de vaca, no hubo producción de biogás.	0
	9 - 28				20	300	Mezclado no adecuado. Agitación con taladro pero sufrió una fractura	2250
2	29 - 43		Reactor 7.9 lts.	5- 6 Sin control	13	100	Reinicio reactor, se agrego 2300 mL de sustrato, 5600 de inóculo y se le coloco un nuevo motor	0
	44			5-6 con cal	1	100	Se agregaron 1580 mL más de sustrato	480

Tabla 4.1 continuación...

Experimento	Día		Tipo de reactor	pH y forma de control	TRH días	rpm	Observaciones	Volumen mL
	Del	Al						
2	45		Reactor 7.9 lts.	5-6 con cal	1	100	Se agregaron 2300 mL más de sustrato	480
	49			5-6 con cal	1	100	Se agregaron 2300 mL más de sustrato	480
	62			5-6 con cal	6	100	Se agregaron 2300 mL más de sustrato	480
	70 - 71			5-6 con cal	5	100	Se agregó 5530 mL de sustrato	480
	73			5-6 con cal	2	100	Se agregó 5530 mL de sustrato	390
	79			5-6 con cal	6	100	Se agregó 5530 mL de sustrato	390
	80 - 81			5-6 con cal	1	100	Se agregó 5530 mL de sustrato	380

Tabla 4.2 continuación...

Experimento	Día		Tipo de reactor	pH y forma de control	TRH días	rpm	Observaciones	Volumen mL
	Del	Al						
3	83		Kitazato1 0.5 lts	5-6 con cal	0	100	Reinoculación, se agregaron 135 mL de sustrato y 315 mL de inóculo de excremento de vaca.	460
	84 - 87			5-6 con cal	1	100	Se agregaron 315 mL de sustrato	480
	88 - 89			5-6 con cal	1	100	Se alimentó 225 mL más de sustrato	480
	90			5-6 sin control	1	100	Se alimentó 225 mL mas de sustrato	200
	91			4-5 sin control	1	100	Se alimentó 225 mL mas de sustrato	100
	93 - 96			4-5 sin control	3	100	Se detuvo el experimento debido a que la muestra se solidificó, debido al exceso de cal	400

Tabla 4.1 continuación...

Experimento	Día		Tipo de reactor	pH y forma de control	TRH días	rpm	Observaciones	Volumen mL
	Del	Al						
4	99		Kitazato 2 0.5 lts	6-7 sosa	0	100	Se realizó un nuevo kitazato con 135 mL de comida y 315 mL del inóculo. El inóculo fue adquirido de un reactor anaerobio de una Cervecería en Toluca	0
	102			6-7 sosa	2	100	Se agregó 135 mL sustrato	480
	103			6-7 sosa	1	100	No se agregó sustrato	480
	104			6-7 sosa	1	100	Se agregó 135 mL sustrato	480
	106			6-7 sosa	1	100	Se agregó 135 mL sustrato	480
	108			6-7 sosa	2	100	Se agregó 135 mL sustrato	480
	111			6-7 sosa	2	100	No se agregó sustrato	480

Tabla 4.1 continuación...

Experimento	Día		Tipo de reactor	pH y forma de control	TRH días	rpm	Observaciones	Volumen mL biogás
	Del	Al						
4		112	Kitazato 2 0.5 lts.	6-7 sosa	1	100	Se agregó 135 mL sustrato	480
		113		8-9 sosa	1	100	Error al agregar sosa y se agregó 135 mL sustrato	0
		114		8-9 sin control	1	100	Seguimos fuera del rango de pH	0
		116		6-7 sosa	2	100	No se agregó sustrato	480
		117		6-7 sosa	1	100	Se agregó 135 mL sustrato	480
		118		6-7 sosa	1	100	No se agregó sustrato	480
		119		6-7 sosa	1	100	Se agregó 2370 mL sustrato	480
		120		5 sin control	1	100	Se agregó 2370 mL sustrato	480

Los datos referentes a las Figuras del capítulo 4 se encuentran en un anexo al final de éste trabajo para su consulta.

4.2 Cambio pH

En el día 44 se agregó 1580 mL más de comida (20% en volumen), llevando a pH entre 5 y 6. Se llevó a pH entre 6 y 7 con sosa 2% molar a partir del día 100 y hasta el día 112, el día 113 y 114 se tuvo un error llevando hasta 8.5 el pH y a partir del día 115 se volvió a pH entre 6 y 7 hasta el final del experimento como se muestra en la Figura 4.1 aquí se podría concluir que debe de controlarse el pH diariamente ya que éste tiende a bajar rápidamente evitando así la proliferación de las bacterias generadoras del biogás.

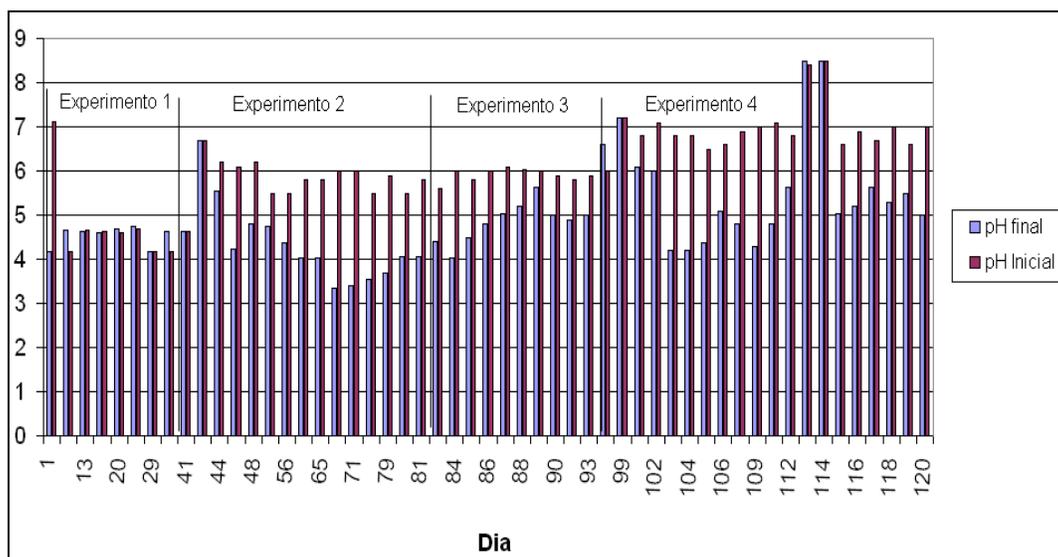


Figura 4.1 Cambio pH inicial y final en los 4 experimentos

Para la Figura 4.2 se muestra la variación del pH inicial y final y los mLH₂/gDQOremovida, se puede observar que el pH óptimo es entre 6 y 7 ya que en éste se obtiene una mayor eficiencia en la cantidad de mLH₂/gDQOremovida.

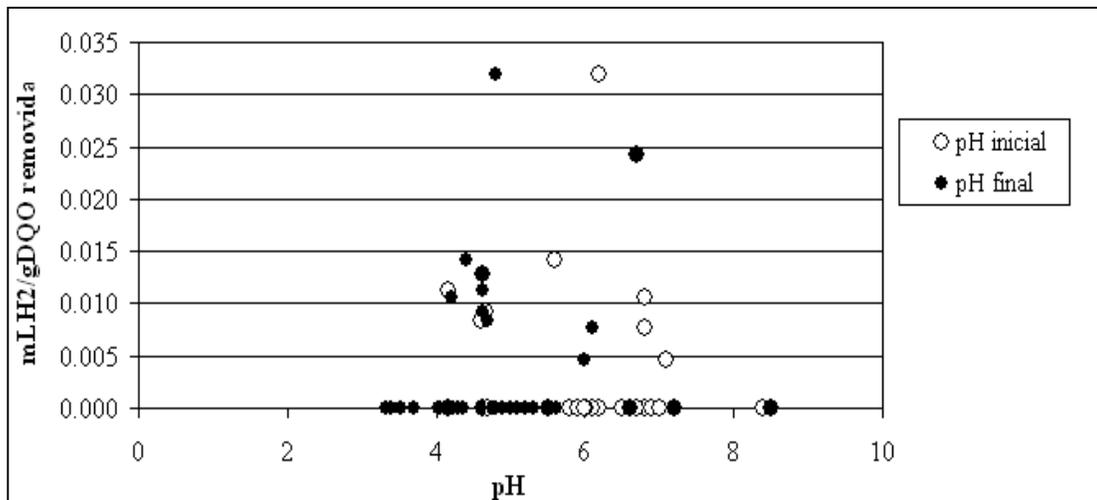


Figura 4.2 pH respecto a mLH_2/gDQO removida

La Figura 4.3 se muestra la combinación entre mLH_2/gDQO removida, el TRH, el pH inicial y el pH final en los días de operación. Se puede observar como en cada día baja el pH afectando así la producción de hidrógeno.

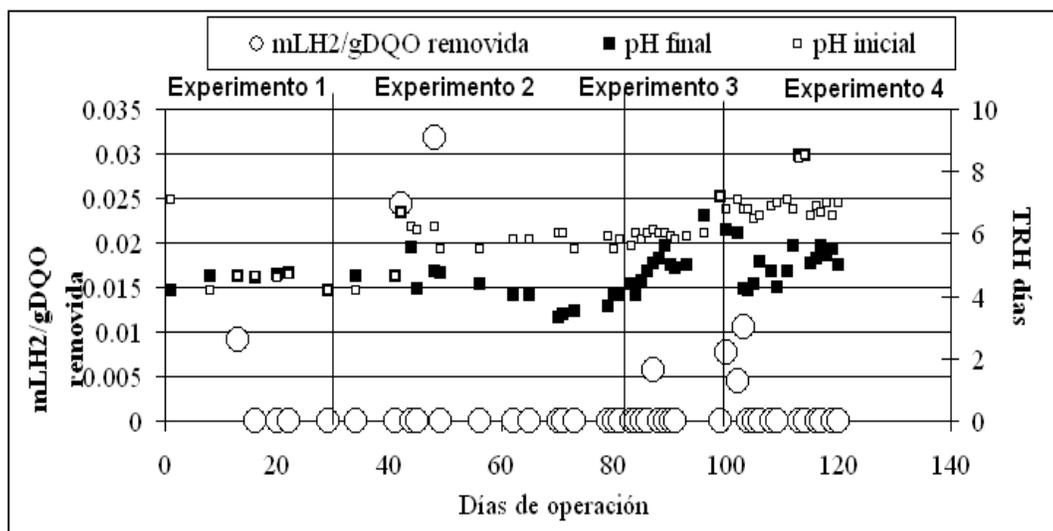


Figura 4.3 Combinación mLH_2/gDQO removida, TRH, pH y días de operación

La Figura 4.4 se muestra la variación del pH inicial y final, mL H₂/día por día de operación, durante todo el experimento y como se puede observar la producción de hidrógeno se ve afectada de manera directa por el pH.

4.3 Cambio TRH

En la Figura 4.5 se muestra la combinación entre la producción de hidrógeno, el TRH y cada uno de los días de operación. Se puede concluir que a mayor TRH se observa una mayor producción de hidrógeno.

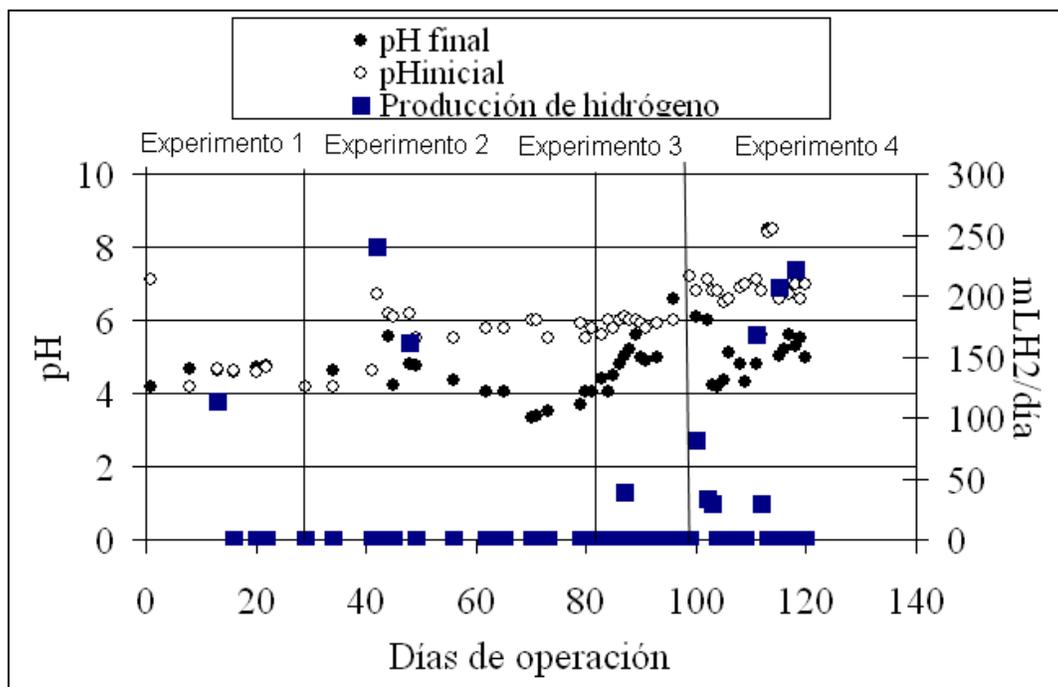


Figura 4.4 Variación de % remoción de DQO, mL H₂/día por día de operación

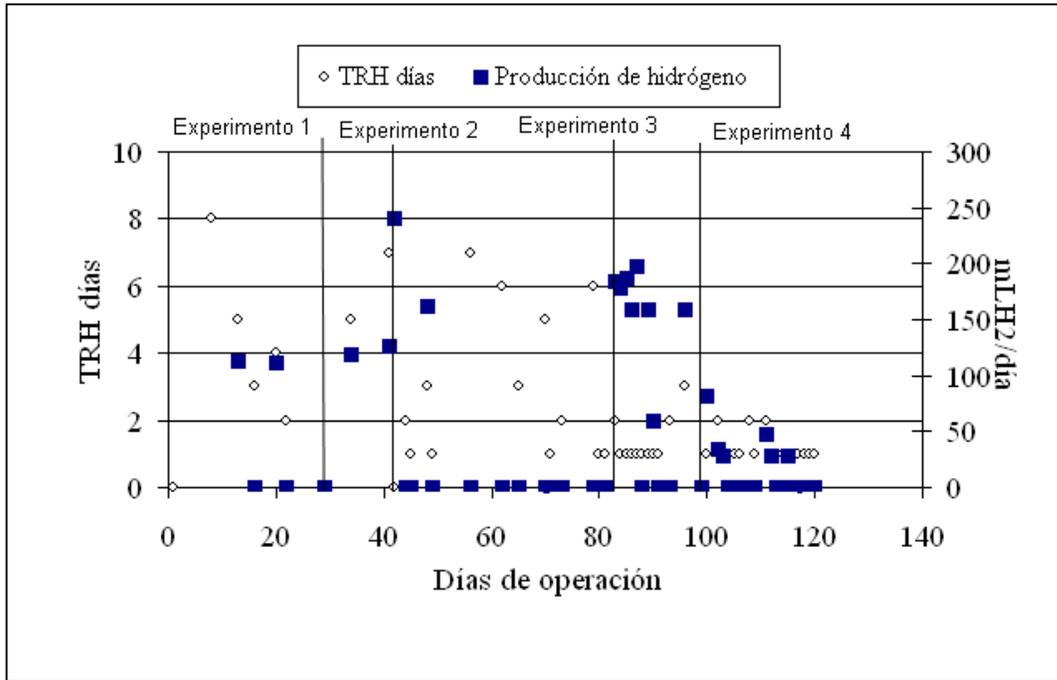


Figura 4.5 Efecto del TRH en la producción de hidrógeno

Para la Figura 4.6 se muestra la combinación entre el porcentaje de remoción de DQO, los días de operación y el TRH. Se observa la dependencia del TRH con la remoción de DQO. La mayoría se encuentra por encima del 60 %.

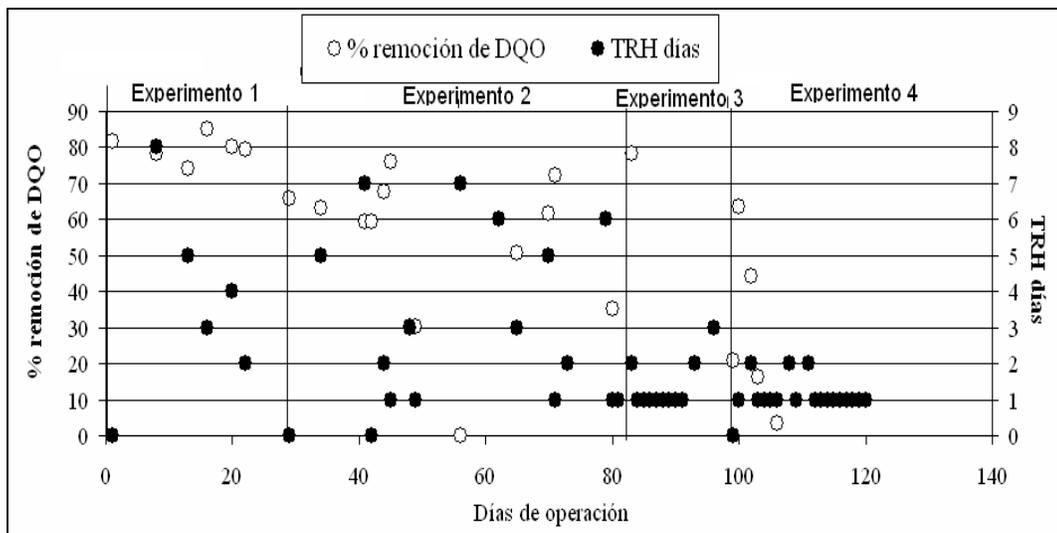


Figura 4.6 Efecto del % remoción de DQO y el TRH

Para la Figura 4.7 se muestra el efecto entre el porcentaje de remoción de ST y el TRH, como se puede observar se remueve cierto porcentaje de los ST en cada día de operación, para un solo TRH en cada uno de los kitazatos y después de la reinoculación; podríamos concluir que no se ven afectados en gran parte la remoción de ST ya que al tener por ejemplo, pasando de 4 a 8 días de TRH es decir el doble se duplicará de igual forma el porcentaje de remoción de ST pasando 40 a 80 por ciento.

En la Figura 4.8 se muestra la variación de los resultados en $H_2/gDQO$ removida y para cada TRH. Claramente se observa que a mayor tiempo de residencia mayor producción de hidrógeno.

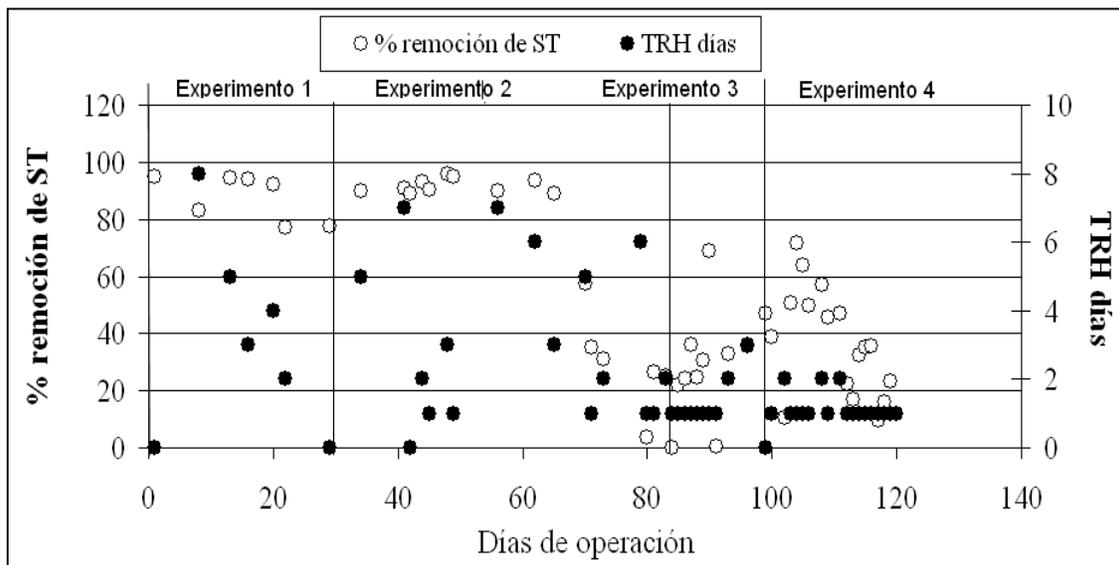


Figura 4.7 Efecto del % remoción de ST y el TRH

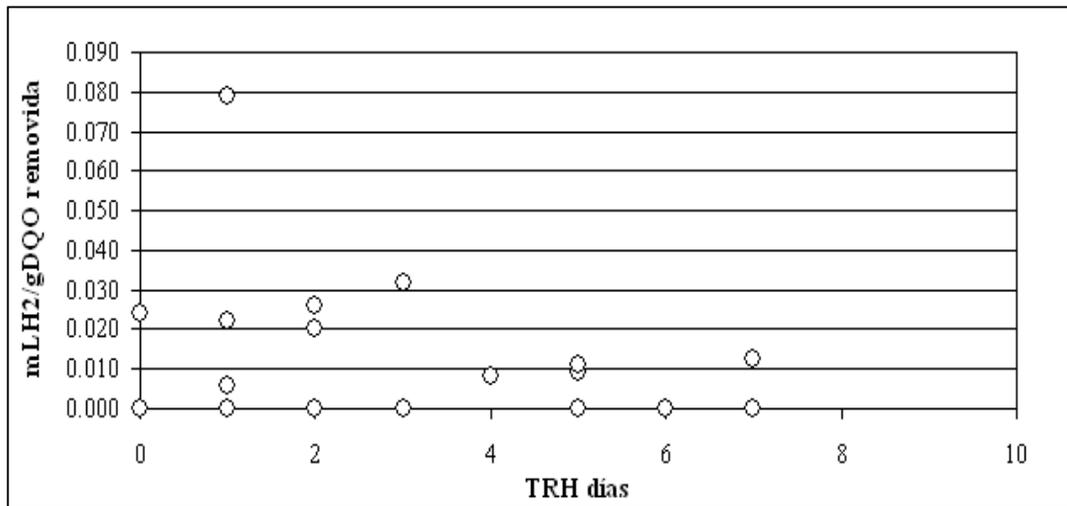


Figura 4.8 Efecto del TRH y la producción en mLH2/gDQO removida

Para la Figura 4.9 se muestra la combinación entre el porcentaje de remoción SSV, el TRH y los días de operación durante el experimento, se puede observar la tendencia de los SSV por el aumento o disminución en la alimentación, sin afectar el TRH.

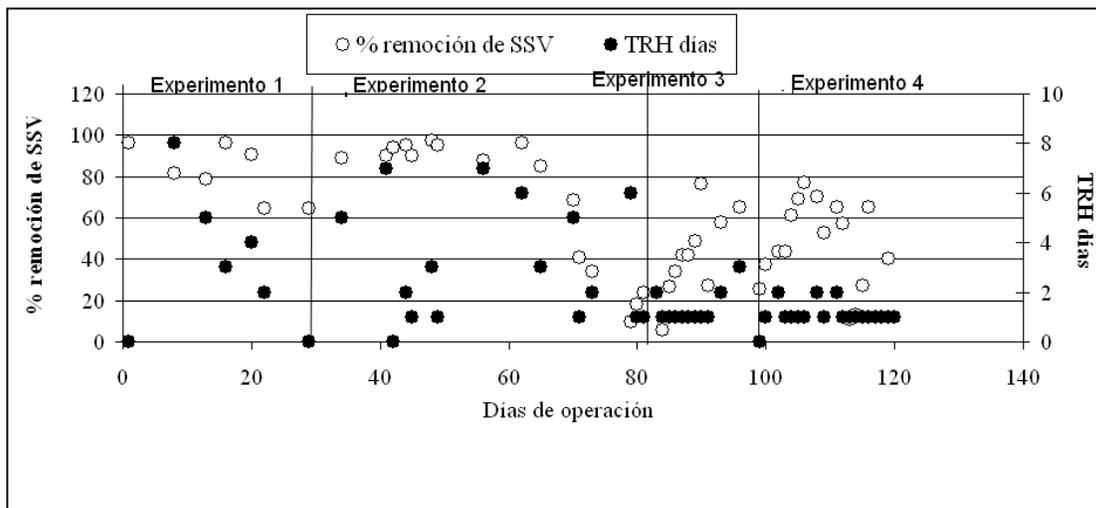


Figura 4.9 Efecto del % remoción SSV y TRH

4.4 Efecto rpm

La Figuras 4.10 muestra la relación que guardan las rpm, el porcentaje de remoción de DQO y la producción de $\text{mH}_2/\text{día}$. Los resultados indican que no se obtuvieron valores mayores a 80% de remoción de DQO, aún variando las rpm. Aunque se realizaron mayor número de muestras a 100 rpm. Lo cual indica que la variable de operación de rpm en el mezclado no tuvo influencia en los resultados. Se recomienda en investigaciones posteriores el análisis más a fondo sobre el efecto de las rpm en el mezclado. Para la actual investigación, el resultado de la producción de hidrógeno fue más dependiente de la temperatura y del pH.

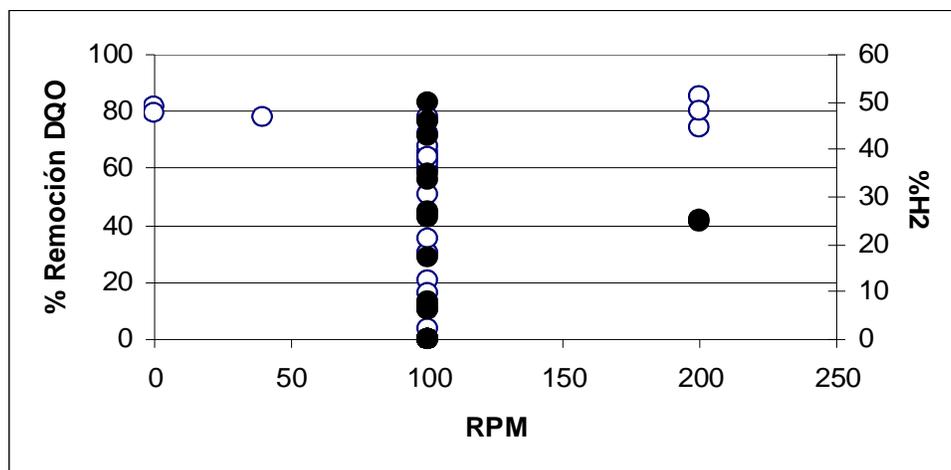


Figura 4.10 Efecto de las rpm, % remoción DQO y % H₂

4.5 Eficiencia

En la Figura 4.11 se muestra como la remoción de ST se transforma en la producción de biogás por gramo de DQO removida, en los 4 experimentos encontrando como óptimo el experimento 1 y 2.

Para la Figura 4.12 se puede ver la caracterización por medio de los ST, SST y SSV en los 4 experimentos. Al aumentar la concentración

de sustrato en el experimento 3 aumentaron notablemente los ST, SST y SSV y al bajar la concentración disminuyeron éstos, prácticamente sucediendo lo mismo para el experimento 3. Se puede concluir que al aumentar el sustrato aumentarían los ST, SST y SSV y su porcentaje de remoción disminuye como se observa en la Figura 4.11.

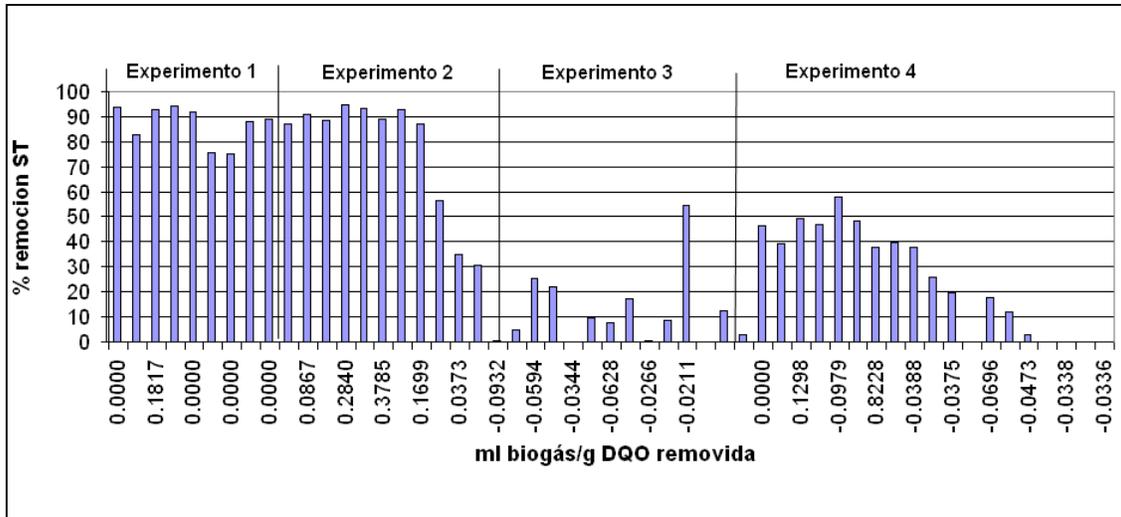


Figura 4.11 mLbiogás/gDQOremovida con respecto a la remoción de ST

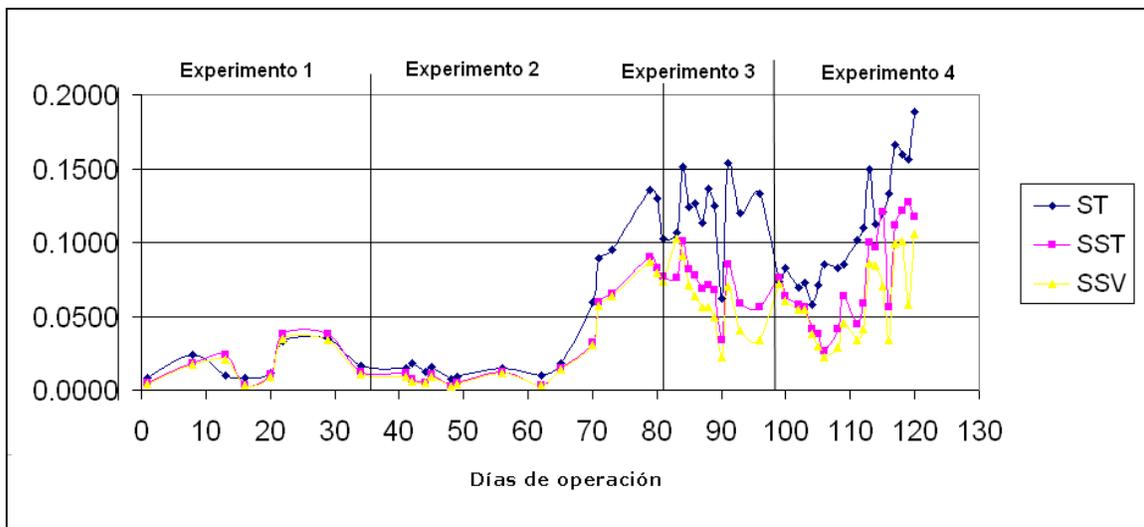


Figura 4.12 Sólidos medidos en los 4 experimentos

En la Figura 4.13 se muestra como varia el porcentaje de remoción durante todo el proceso, en cada una de los experimentos del proceso, puede notarse como conclusión que al aumentar demasiado la concentración del sustrato la bacteria ya no degrada en su mayoría los ST ya que hay una saturación de esté.

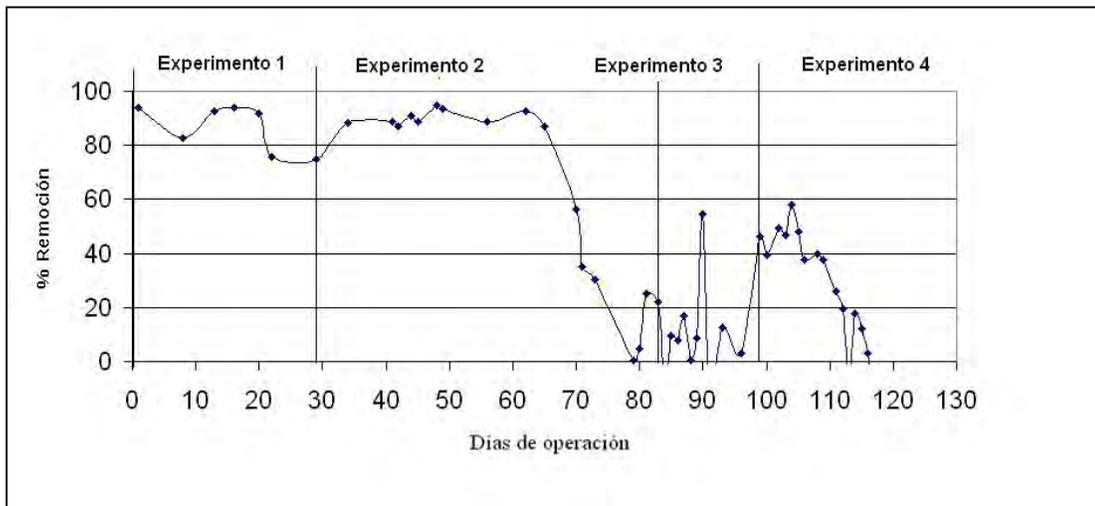


Figura 4.13 % Remoción de ST en los 4 experimentos

Para la Figura 4.14 se muestra el porcentaje de remoción de DQO por día durante todo nuestro proceso y en cada uno de las etapas en que se llevó a cabo, tiene cierta tendencia característica debido al aumento en la alimentación de lo cual podemos concluir que el aumento de sustrato da un menor porcentaje de remoción y por lo tanto una menor adaptación de la bacteria ya que disminuye el porcentaje de remoción por día.

En la Figura 4.15 se muestra el efecto de la remoción de los SSV, con respecto a la producción de hidrógeno en los 4 experimentos. Se puede observar cierta tendencia a aumentar en la remoción de SSV, esto al aumentar la cantidad de sustrato en el día 70 y en el

Experimento 4 en el cual también se aumento la cantidad de sustrato y de igual forma un aumento en la producción de hidrógeno, pero solo hasta donde inicia el experimento 3 con el segundo inóculo, donde disminuye la producción y por lo tanto no es recomendable.

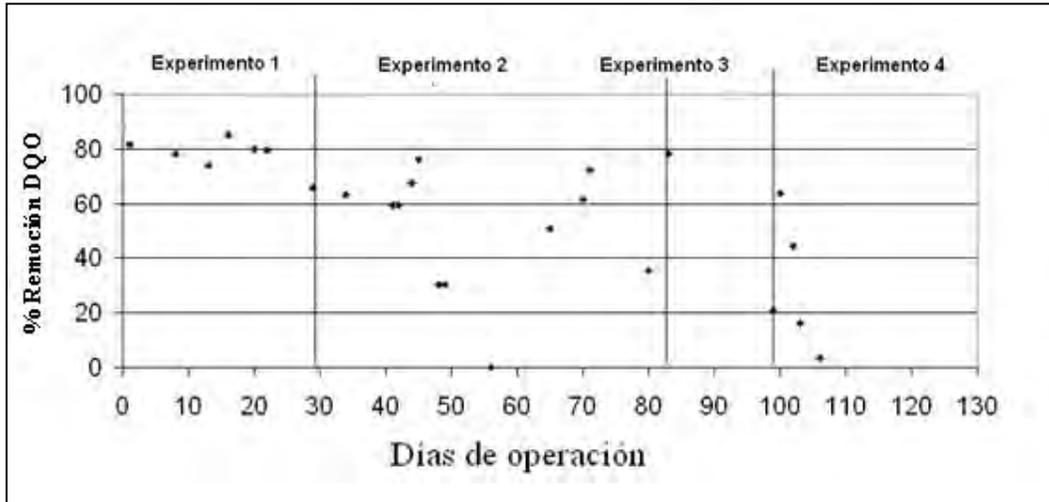


Figura 4.14 Porcentaje de remoción de DQO

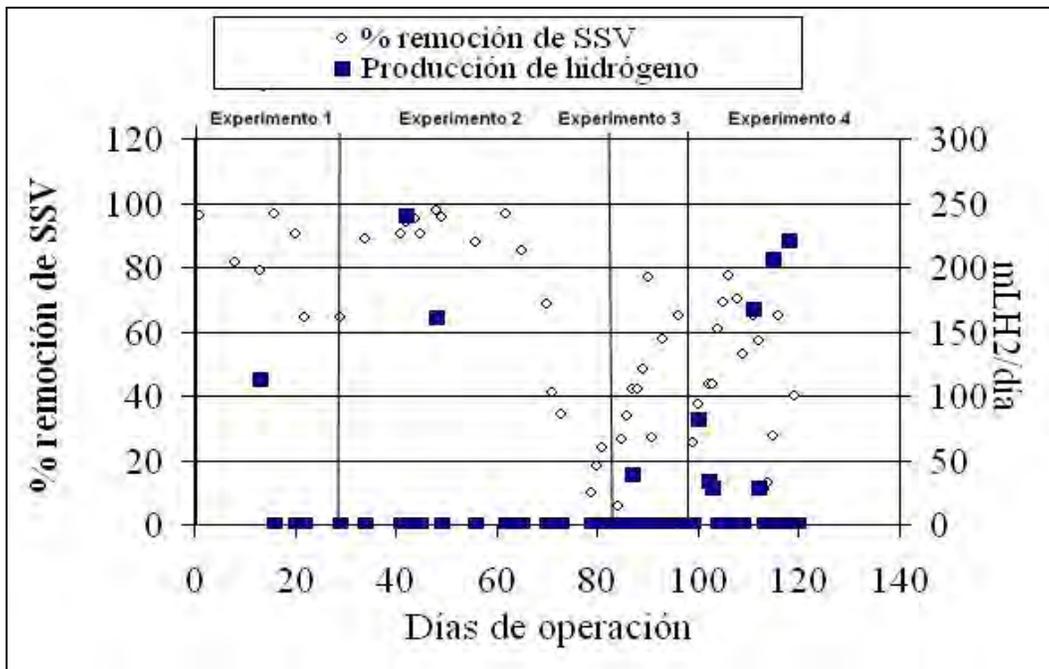


Figura 4.15 Combinación % remoción SSV, producción de hidrógeno y días de operación

La Figura 4.16 muestra la variación mLH₂/gDQO removida en todo los 4 experimentos. Se puede concluir que no es favorable el cambio de inóculo ya que la mayoría de los puntos están dentro del inóculo del excremento de vaca demostrando así que es mayor la degradación.

En la Figura 4.17 se muestra la producción de hidrógeno, metano y CO₂, en la cual se puede notar en el experimento 2 y 4 se produjo la mayor concentración de H₂ en el biogás.

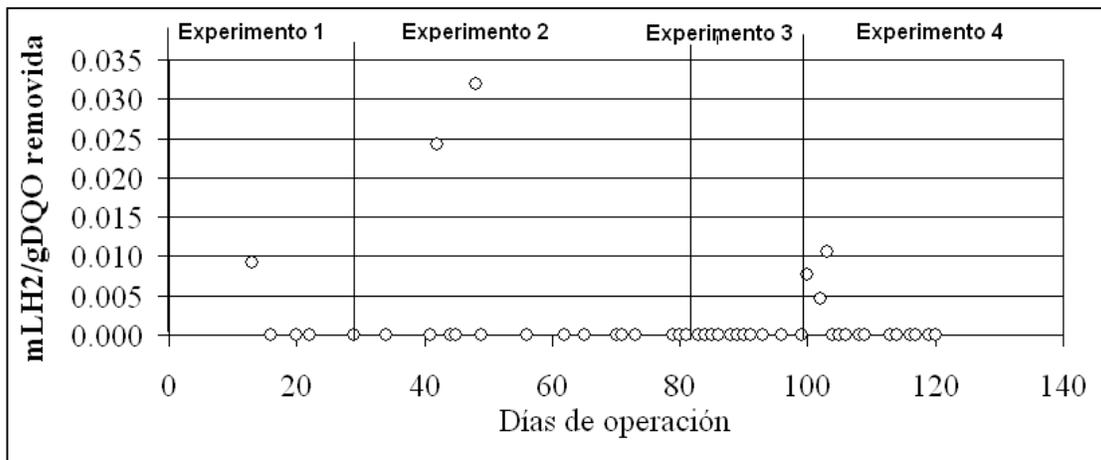


Figura 4.16 Variación mLH₂/g DQO removida en los 4 experimentos

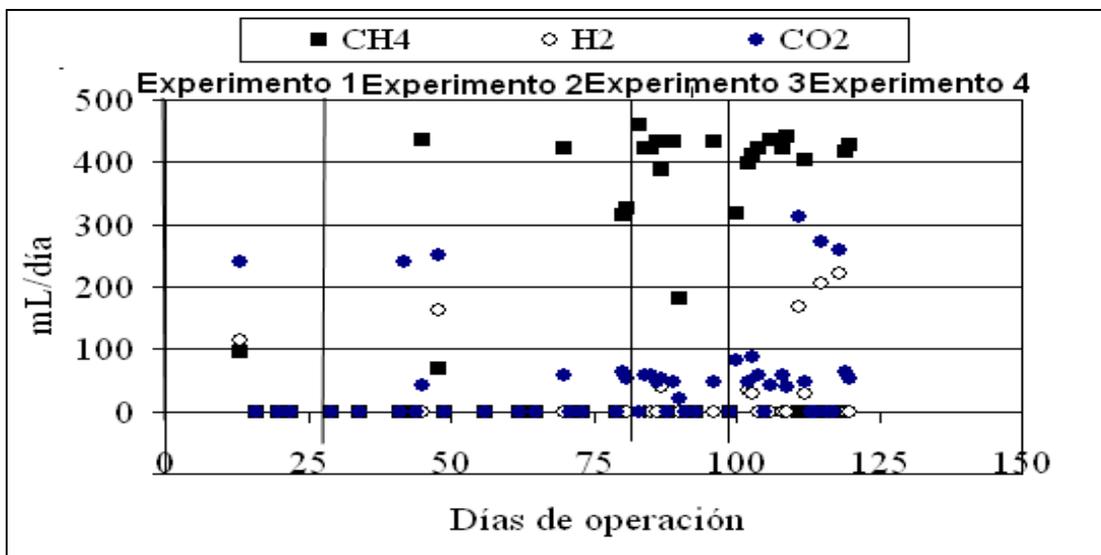


Figura 4.17 Producción de gases CH₄, CO₂ e H₂

Capítulo 5

CONCLUSIONES

La producción de hidrógeno como recurso renovable es de fácil obtención por medio de la degradación anaerobia mediante recursos naturales prácticamente de desecho, como queda demostrado, los desechos son generados dentro de ciudad universitaria; dicha producción se puede obtener por encima del 40% en el biogás, pero teniendo un mayor control sobre el biodigestor e inhibiendo la fase metanogénica mediante el calentamiento de el inóculo por tres horas como se realizó en el experimento, pero solo el inóculo obtenido del excremento de vaca ya que el cambio de inóculo no resulta favorable.

Como finalización de éstos experimentos se puede concluir que es muy importante el tratar de tener un buen control de los parámetros tales como la temperatura, el pH, inóculo, sustrato, fósforo, nitrógeno, iones metálicos y la carga volumétrica másica ya que éstos derivaran en un buen ambiente, lo cual tendrá como consecuencia el desarrollo y reproducción de la bacteria degradadora, de igual forma a la biomasa como parte muy importante en la generación de energía y todo a base de los desechos orgánicos.

En base a los experimentos y la bibliografía consultada se recomienda que los parámetros base sean una temperatura entre los 35 y 40° C, un pH entre 6 y 7, inhibir la bacteria metanogénica y la no utilización del inóculo anaerobio de la planta de la cervecería de Toluca, Estado de México, México, ya que la técnica de inhibición no funciona para éste.

De igual forma se llega a la conclusión que el hidrógeno es un vector muy importante en la búsqueda de nuevas energías renovables pero no el único, éste solo es una pequeña parte del cambio global para el cambio a energías limpias no contaminantes pero dicho cambio por el momento no es posible debido al cambio en la infraestructura para la utilización de éste como combustible o fuente de energía.

REFERENCIAS

- Angenent, L., Kari m, K., Al -Dahhan, M., Wrenn, B . y Domiguez-Espinosa, R. 2004. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends Biotechnol.* 22(9):477-85.
- APHA, 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 16a Ed. American Public Health Association. Washington, DC, EEUUA.
- Argun, H., Kargi, F., Kapdan, I. y Oztekin, R. 2008. Biohydrogen production by dark fermentation of wheat powder solution: effects of C/N and C/P ratio on hydrogen yield and formation rate. *Int. J. Hydrogen Energy.* 33:1813-9.
- Arooj, M., Han, S., Kim, S., Kim, D. y Shin, H. 2008. Continuous biohydrogen production in a CSTR using starch as a substrate. *Int. J. Hydrogen Energy.* 33:3289-94.
- Atif, A., Fakhru'l, A., Ngan, M., Morimoto, M., Iyuke, S., Veziroglu, N. 2005. Fed batch production of hydrogen from palm oil mill effluent using anaerobic microflora. *Int. J. Hydrogen Energy.* 30(13-14):1393-1397.
- Bain, A, y Van, V. 1999. The Hindenburg tragedy revisited: the fatal flaw exposed. *International Journal of Hydrogen Energy.* 24(5):399-403.
- Bhattacharya, C. y Salam, A. 2002. Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries. *Biomass and Bioenergy.* 22(4):305-317.

Bisaillon, A., Turcot, J. y Hallenbeck, P. 2006. The effect of nutrient limitation on hydrogen production by batch cultures of *Escherichia coli*. *Int. J. Hydrogen Energy*. 31(11):1504–1508.

Biswas, W. y Lucas, N. 1997. Economic viability of biogas technology in a Bangladesh village. *Energy*. 22(8):763-770.

Calli, B., Boënne, W., Vanbroekhoven, K. 2006. Bio-hydrogen potential of easily biodegradable substrate through dark fermentation. En: Proceedings of the 16th world hydrogen energy conference. Lyon, Francia, pp 215–216.

Camilli, M. y Pedroni, P. 2005. Comparison of the performance of three different reactors for biohydrogen production via dark anaerobic fermentations. En: Proceedings of the international hydrogen energy congress and exhibition. BHP 250, CD-ROM. Estambul, Turquía.

Castro, A. 2005. Ciudad Universitaria y la Energía. Programa transdisciplinario en investigación y desarrollo para facultades y escuelas de la UNAM. Macroproyecto Ciudad Universitaria y la Energía. México D.F. México.

Chang, F. y Lin, C. 2004. Biohydrogen production using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. *Int. J. Hydrogen Energy*. 29(1):33–39

Chang, J., Lee, K., y Lin, J. 2002. Biohydrogen production with fixed-bed bioreactors. *Int. J. Hydrogen Energy*. 27, 1167–1174.

Chang, F. y Lin, C. 2006. Calcium effect on fermentative hydrogen production in an anaerobic up-flow sludge blanket system. *Water Sci. Technol*. 54:105–12.

Chen, C., Chen, H., Wu, J. y Lin, C. 2008. Fermentative hydrogen production at high sulfate concentration. *Int. J. Hydrogen Energy*. 33:1573–8.

Chen, R. 1997. Livestock-biogas-fertilizer systems in South China. *Ecological Engineering*. 8(1):19-29.

Chen, W., Tseng, Z., Lee, K. y Chang, J. 2005. Fermentative hydrogen production with *Clostridium butyricum* CGS5 isolated from anaerobic sewage sludge. *Int. J. Hydrogen Energy*. 30(10):1063–1070.

Chen, S., Sheu, D., Chen, W., Lo, Y., Huang, T. y Lin, C. 2007. Dark hydrogen fermentation from hydrolyzed starch treated with recombinant amylase originating from *Caldimonas taiwanensis* On1. *Biotechnol. Prog.* 23:1312–20.

Chen, C. y Lin, C. 2003. Using sucrose as a substrate in an anaerobic hydrogen-producing reactor. *Adv Environ Res.* 7:695–9.

Cheng, S., Li S., Kuo, S., Lin, J., Lee, Z. y Wang, Y. 2006. A feasibility study of biohydrogenation from kitchen waste fermentation. En: Proceedings of the 16th world hydrogen energy conference. Lyon, Francia, p 56.

Cheong, D. y Hansen C. 2006 Acidogenesis characteristics of natural, mixed anaerobes converting carbohydrate-rich synthetic wastewater to hydrogen. *Process Biochem.* 41(8):1736–1745

Chin, H., Chen, Z. y Chou, C. 2003. Fedbatch operation using *Clostridium acetobutylicum* suspension culture as biocatalyst for enhancing hydrogen production. *Biotechnol. Prog.* 19:383–8.

Claassen, P., Van Lier, J., Lopez Contreras, A., Niel, L., Sijtsma, A., Stams, S., de Vries, S. y Weusthuis, R. 1999. Utilisation of biomass

for the supply of energy carriers. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* (52):741-755.

CMTIMA, 2005. Centro Tecnológico de Investigación en Motores y Acústica de Automóviles. <http://www.h2.developpement.fr>.

Collet, C., Adler, N., Schwitz guebél, J. y Peringer, P. 2004. Hydrogen production by *Clostridium thermolacticum* during continuous fermentation of lactose. *Int. J. Hydrogen Energy* 29(14):1479-1485

CONAE, 2008. Biomasa. Publicación de la Comisión Nacional de la Energía. México, D.F. México.
http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_622_energia_de_la_biomasa

Cruz, D., Chamizo, J. y Garriz, A. 2002. Estructura Atómica: Un enfoque Químico. Publicación de la Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Ed. Pearson educación. México, D.F. México.

Daton, Z. 1989. Analysis of domestic biogas storage installations in China. *Biomass*. 20(1-2):61-67.

Dávila, G., Alatríste, F., Arriaga, S., León, A., Rosales, L. y Razo, E. 2007. Fermentative Biohydrogen Production: Trends and Perspectives. *Environ. Sci. Technol.* 7:27-45.

Dávila, G., Alatríste, F., De León, A. y Razo, E. 2008. Fermentative hydrogen production in batch experiments using lactose, cheese whey and glucose: Influence of initial substrate concentration and pH. *Int. J. Hydrogen Energy*. 33, 4989-4997.

De Zeeuw, 1988. Granular sludge in UASB reactors. En Granular anaerobic sludge: Microbiology and technology. Lettiga., G., Zehnder,

A.J.B. ,Grotenhuis, J.T.C., y Hulshoff-Pol, L.W. (eds). Proceedings of the Gasmat-Workshop, Luthern, Pudol, Wageningen, The Netherlands p.p. 132-145.

Drake, H. y Kusel K. 2005 Acetogenic clostridia. In: Durre P, editor. Handbook on clostridia. Boca Raton, Taylor and Francis. p. 719-45.

Eckenfelder, W., Patoczka, J. y Dulliam, G. 1988 Anaerobic versus aerobic treatment in the U.S.A. En *Anaerobic digestion*, Hall E.R. y Hobson P.N. (eds), Pergamon Press, Oxford, págs 105-114.

El Universal, 2007a. Presenta Mazda auto con motor eléctrico alimentado por hidrógeno. Agencia AP. Martes 2 de octubre del 2007. Mexico, D.F. Mexico.

<http://www.eluniversal.com.mx/articulos/43035.html>

El Universal, 2007b. Probará GM tecnologías de hidrógeno en vehículos. Agencia EFE. Lunes 3 de septiembre. Mexico, D.F. México.

<http://www.eluniversal.com.mx/articulos/42451.html>

El Universal, 2008a. Presenta GM prototipo Cadillac Provoq. Agencia EFE. Martes 8 de enero. México, D.F. México.

<http://www.eluniversal.com.mx/articulos/44758.html>

El Universal, 2008b. Prueban vehículos de hidrógeno. Agencias. Jueves 28 de agosto. México, D.F. México.

<http://www.el-universal.com.mx/articulos/48880.html>

Evvyernie, D., Morimoto, K., Karita, S., Kimura, T., Saca, K. y Ohmiya, K. 2001. Conversion of chitinous wastes to hydrogen gas by *Clostridium paraputrificum* M-21. *J. Biosci. Bioeng.* 91:339-43.

Fabiano, B. y Perego, P. 2002. Thermodynamic study and optimization of hydrogen production by *Enterobacter aerogenes*. ***Int. J. Hydrogen Energy***. 27:149–56.

Fan, Y, Zhang Y., Zhang, S., Hou, H. y Ren, B. 2006. Efficient conversion of wheat straw wastes into biohydrogen gas by cow dung compost. ***Bioresource Technol.*** 97(3):500–505.

Fang, H. y Liu, H. 2002. Effect of pH on hydrogen production from glucose by a mixed culture. ***Bioresource Technol.*** 82(1):87–93.

Fang, H., Zhang, T. y Liu, H. 2002a. Characterisation of a hydrogen-producing granular sludge. ***Biotechnol. Bioeng.*** 78:44–52.

Fang, H., Zhang, T. y Liu, H. 2002b. Microbial diversity of a mesophilic hydrogen-producing sludge. ***Appl. Microbiol. Biotechnol.*** 58:112–8.

Fernández, A., Sánchez, A. y Font, X. 2005. Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin. ***Biochemical Engineering Journal***. 26(1):22-28.

Ferchichi, M., Craib, E., Gil, G., Hintz, W. y Almadidy, A. 2005. Influence of initial pH on hydrogen production from cheese whey. ***J. Biotechnol.*** 120(4):402–409

FMI, 2005. Informe anual del Directorio Ejecutivo correspondiente al ejercicio cerrado el 30 de abril de 2005. Washington, D.C. E.E.U.A.

Folkecenter, 2003. Folkecenter for Renewable Energy Dinamarca. <http://www.folkecenter.dk>.

Freda, R., Hawkes, I. y Godfrey, K. 2006. Continuous Dark Fermentative Hydrogen Production By Mesophilic Microorganisms: Principles and Progress. *Int. J. Hydrogen Energy*. 32:172-184.

García, J. 2006. Informe anual Greenpeace 2006. Madrid, España.

García, R. 2007. Investigación y Desarrollo. La Jornada. p.p. 18.

Gary, H. 1994. Petroleum Refining. Technology and Economics. Editores Marcel Dekker. Tercera edición. Nueva York, EEUA.

Gatto, A. 2004. Risorse energetiche alternative: La forza del vento Scuole Medie Superiori, Progetti Interdisciplinari,. Allievi del corso di Meccanica, coordinati dal Professore. Valsesia, Piemonte, Italia.

Gavala, H., Skiadas, L. y Ahring, B. 2006. Biological hydrogen production in suspended and attached growth anaerobic reactor systems. *Int. J. Hydrogen Energy*. 31(9):1164-1175.

Ghaffar, M. 1995. The energy supply situation in the rural sector of Pakistan and the potential of renewable energy technologies. *Renewable Energy*. 6(8):941-976.

GMC, 2004. General Motors Company. www.gmc.com

Gujer, W. y Zehnder, J. 1983. Conversion processes in anaerobic digestion. *Water Sci. Technol.* 15: 127-167.

Guo, L., Li, X., Bo, X., Yang, Q., Zeng, G. y Liao, D. 2008. Impacts of sterilization, microwave and ultrasonication pretreatment on hydrogen producing using waste sludge. *Bioresour. Technol.* 99:3651-8.

Haijun, Y., Peng, S., Tingmao, L., Ji anquan, S., Dufu, W., Zhinian, X. y Xian, Y. 2006. Continuous bio-hydrogen production from citric acid wastewater via facultative anaerobic bacteria. *Int. J. Hydrogen Energy*. 31:1306-1313

Hamelinck, C., Faaij, A., Den-Uil, H. y Boerrigter, H. 2003. Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation, and development potential. *Energy*. 29 1743-1771.

Han, S., Kim, S., Kim, H. y Shin, H. 2005. Pilot-scale two-stage process: A combination of acidogenic hydrogenesis and methanogenesis. *Water Sci. Technol.* 52(1-2):131-8.

Hang, S., Jong, H., y Sang, H. 2004. Hydrogen production from food waste in anaerobic mesophilic and thermophilic acidogenesis. *Int. J. Hydrogen Energy*. 29:1355-1363.

Hariklia, N., Gaval a, I., Ski adas, B., y Ahring, K. 2005. Biological hydrogen production in suspended and attached growth anaerobic reactor systems. *Int. J. Hydrogen Energy*. 31:1164-1175.

Hwang, M., Jang, N., Hyun, S. y Kim, I. 2004. Anaerobic bio-hydrogen production from ethanol fermentation: the role of pH. *J. Biotechnol* .111:297-309

Hawkes, F., Dinsdale, R., Hawkes, D. y Hussy, I. 2002. Sustainable fermentative hydrogen production: Challenges for process optimization. *Int J. Hydrogen Energy*. 27:1339-47.

Hu, B. y Chen, S. 2007. Pretreatment of methanogenic granules for immobilized hydrogen fermentation. *Int J Hydrogen Energy*. 32:3266-73.

Huang, J., y Crookes, R. 1998. Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine. *Fuel*. 77(15):1793-1801.

Hussy, I., Hawkes, F., Dinsdale, R. y Hawkes, D. 2003. Continuous fermentative hydrogen production from a wheat starch co-product by mixed microflora. *Biotechnol. Bioeng.* 84:619-26

Ishikawa, M., Yamamura, S., Takamura, Y., Sode, K., Tamiya, E. y Tomiyama, M. 2006. Development of a compact high-density microbial hydrogen reactor for portable bio-fuel cell system. *Int. J. Hydrogen Energy*. 31:1484-9.

ITER, 2000. Energías Renovables. Instituto Tecnológico de Energías Renovables. Santa Cruz de Tenerife, España.

Iyer, P., Bruns, M., Zhang, H., Van, G. y Logan, B. 2004. H₂-producing bacterial communities from a heat-treated soil inoculum. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 66:166-17323

JCN, 2006. Mazda RX-8 Hydrogen RE. Japan's Corporate News Network. Hiroshima, Japon. <http://www.japancorp.net/>

Jianlong, W. y Wei. W. 2008. Factors influencing fermentative hydrogen production: A review. *Int J Hydrogen Energy*, 799-811

Jewell, W., Swizenbaum, M., y Morris J., 1981. Municipal wastewater treatment with the anaerobic attached microbial film expanded bed process. *JWPCF*, 53: 482-490.

Jiménez, A. y Martínez, G. 1995. Instalación y arranque de un reactor anaerobio en un tren anaerobio-aerobio de una planta piloto de tratamiento de vinazas. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química Facultad de Química C. U., UNAM. México, D.F. México.

Jo, J., Lee, D., Park, D., Choe, W. y Park, J. 2008. Optimization of key process variables for enhanced hydrogen production by *Enterobacter aerogenes* using statistical methods. ***Bioresour. Technol*** 99:2061–6.

Joshi, B., Bhattiand, T. y Bansal, N. 1992. Decentralized energy planning model for a typical village in India. ***Energy***. 17(9):869-876.

Kanai, T., Imanaka, H., Nakajima, A., Uwamori, K., Omori, Y. y Fukui, T. 2005. Continuous hydrogen production by the hyperthermophilic archaeon, *Thermococcus kodakaraensis* KOD1. ***J. Biotechnol.*** 116:271–82.

Khanal, S., Chen, W., Li, L. y Sung, S. 2004. Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products. ***Int. J. Hydrogen Energy***. 29:1123–31.

Karpenstein, M. 2001. Sustainable cultivation concepts for domestic energy production from biomass. ***Critical Reviews in Plant Sciences***. 20(1):1-14.

Kawagoshi, Y., Hino, N., Fujimoto, A., Nakao, M., Fujita, Y., Sugimura, S. y Furukawa, K. 2005. Effect of inoculum conditioning on hydrogen fermentation and pH effect on bacterial community relevant to hydrogen production. ***J. Biosci. Bioeng.*** 100(5):524–530.

Kim, D., Han, S., Kim, S. y Shin, H. 2006. Effect of gas sparging on continuous fermentative hydrogen production. ***Int J Hydrogen Energy***, in press, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.02.012.

Kim, M., Oh, Y., Yun, Y., y Lee, D. 2006 Fermentative hydrogen production from anaerobic bacteria using a membrane bioreactor. En: Proceedings of the 16th world hydrogen energy conference. Lyon, Francia, p 50.

Kim, S., Han, S, y Shin, H. 2006. Effect of substrate concentration on hydrogen production and 16S rDNA-based analysis of the microbial community in a continuous fermenter. *Process Biochem.* 41(1): 199–207.

Kosaric, N. y Velikonja, J, 1995. Liquid and gaseous fuels from biotechnology: challenge and opportunities. *FEMS Microbiology Reviews.* 16:111-142.

Kotay, S. y Das, D. 2006. Feasibility of biohydrogen production from sewage sludge using defined microbial consortium. En: Proceedings of the 16th world hydrogen energy conference. Lyon, Francia.

Kotsopoulos, T., Zeng, R. y Angelidaki, I. 2006. Biohydrogen production in granular up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors with mixed cultures under hyper-thermophilic temperature (70°C). *Biotechnol. Bioeng.* 94(2):296–302.

Kumar, N. y Das, D. 2000. Enhancement of hydrogen production by *Enterobacter cloacae* IIT-BT 08. *Process Biochem.* 35:589–93.

Kumar, N. y Das, D. 2001. Continuous hydrogen production by immobilized *Enterobacter cloacae* IIT-BT 08 using lignocellulosic materials as solid matrices. *Enzyme Microb. Technol.* 29:280–7.

Lay, J., Chang, J. y Fan, K. 2005. Anaerobic Hydrogen-Producing Process. United States Patent Application 20050064567 A1 March 24, 2005.

Lay, J., Tsa,i C., Huang, C., Chang, J., Chou, C. y Fa n, K. 2005 Influences of pH and hydraulic retention time on anaerobes converting beer processing wastes into hydrogen. *Water Sci. Technol.* 52(1-2):123-9.

Lee, K., Hsu, Y., Lo, Y., Li n, P., Lin, C. y Chang, J. 2008. Expl oring optimal environmental factors for fe rmentative hydrogen production from starch using mixed anaerobic microflora . *Int. J. Hydrogen Energy.* 33:1565-72.

Lee, K., Lin, P. y Chang, J. 2006. Temperature effects on biohydrogen production in a granular sludge be d induced by activated carbon carriers. *Int. J. Hydrogen Energy* 31(4):465-472.

Lee, K., Lin, P., Fangchiang, K. y Chang, J. 2007. Continuous hydrogen production by anaerobi c mixed microflora using a hollow-fiber microfiltration membrane bioreactor. *Int. J. Hydrogen Energy.* 32:950-7.

Lee, K., Wu, J., L o, Y., Lo, Y.C., Lin P. y Chang, J. 20 04. Anaerobic hydrogen production with an effici ent carrier-induced granular sludge bed bioreactor. *Biotechnol Bioeng.* 87:648-57.

Lee, Y., Miyahara, T. y Noike, T. 2001. Effect of iron concentration on hydrogen fermentation. *Bioresour Technol.* 80:227-31.

Lee, Y., Miyahara, T., Noike, T. 2002. Effect of pH on microbial hydrogen fermentation. *J. Chem. Technol Biotechnol.* 77:694-8.

Leite, J., Fernandes, B., Pozzi, E., Chinalia, F., Maintinguer, S., Varesche, M., Foresti, E., Pasotto, M. y Zaiat, M. 2006. Application of an anaerobic packed-bed bioreactor for the production of hydrogen and organic acids. En: Proceedings of the 16th world hydrogen energy conference. Lyon, Francia, p 47.

Leschine, S. 2005. Degradation of polymers: cellulose, xylan, pectin, starch. In: Durre P, editor. Handbook on clostridia. Boca Raton, FL : Taylor and Francis. p. 101–32.

Levin, D., Islam, R., Cicek, N. y Sparling, R. 2006. Hydrogen production by *Clostridium thermocellum* 27405 from cellulosic biomass substrates. *Process Biochem.* 31:1496–503.

Li, C. y Fang, H. 2007. Inhibition of heavy metals on fermentative hydrogen production by granular sludge. *Chemosphere.* 67:668–73.

Lin, C., Chang, C. y Hung, C. 2008. Fermentative hydrogen production from starch using natural mixed cultures. *Int. J. Hydrogen Energy.* 33:2445–53.

Lin, C., Lee, C., Tseng, I. y Shiao, I. 2006. Biohydrogen production from sucrose using base-enriched anaerobic mixed microflora. *Process Biochem.* 41(4):915–919.

Lin, C. y Cheng, C. 2006. Fermentative hydrogen production from xylose using anaerobic mixed microflora. *Int. J. Hydrogen Energy.* 31(7):832–840.

Lin, C. y Hung, W. 2008 Enhancement of fermentative hydrogen/ethanol production from cellulose using mixed anaerobic cultures. *Int. J. Hydrogen Energy*. 33:3660–7.

Lin, C. y Lay, C. 2004. A nutrient formulation for fermentative hydrogen production using anaerobic sewage sludge microflora. *Int. J. Hydrogen Energy* 30(3):285–292.

Liu, H, y Fang, H. 2002. Hydrogen production from wastewater by acidogenic granular sludge. *Water Sci. Technol.* 47:153–8.

Liu, G., Shen, J. 2004. Effects of culture and medium conditions on hydrogen production from starch using anaerobic bacteria. *J. Biosci. Bioeng.* 98:251–6.

Lo, Y., Chen, W., Hung, C, Chen, S. y Chang, J. 2008. Dark H₂ fermentation from sucrose and xylose using H₂-producing indigenous bacteria: feasibility and kinetic studies. *Water Res.* 42:827–42.

Logan, B., Oh, S., Kim, I. y Van, G. 2002. Biological hydrogen production measured in batch anaerobic respirometers. *Environ. Sci. Technol.* 36(11):2530–2535.

Lungdahl, L., Hugenholtz, J. y Wiegand, J. 1989. Acetogenic and acid-producing clostridia. In: Clarke DJ, editor. Clostridia. 1st ed., New York: Plenum Press. p. 145–91.

Malina, F. y Pohland, G. 1992. Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes. Ed. Technomic, WQML, vol.7, EEUUA.

Marchaim, U. 1992. Biogas Processes for Sustainable Development. Bull. FAO. Roma, 95. 165-193.

Mendoza, B. 2008. Toyota Highlander con motor a hidrógeno. El Universal. Domingo 15 junio. México, D.F., México.

Metcalf y Eddy, 1991. Wastewater Engineering: Treatment disposal reuse. Editorial McGraw-Hill. California. EEUUA.

Modesta, J., Gutierrez, N., Estrella, C., Estes, M. 1997. Electrochemical measurement of trace concentrations of biological hydrogen produced by Enterobacteriaceae. *Res. Microbiol.* 148:87–93.

Mohan, S., Babu, V. y Sarma, P. 2008. Effect of various pretreatment methods on anaerobic mixed microflora to enhance biohydrogen production utilizing dairy wastewater as substrate. *Bioresour Technol.* 99:59–67.

Morrison, K. 2004. Emissions Trading is on fire. Financial Times. Publicación del 30 marzo. EEUUA.

Mu, Y., Wang, G. y Yu, H. 2006a. Kinetic modeling of batch hydrogen production process by mixed anaerobic cultures. *Bioresour. Technol.* 97(11):1302–1307.

Mu, Y., Wang, G. y Yu, H. 2006b. Response surface methodological analysis on biohydrogen production by enriched anaerobic cultures. *Enzyme Microb. Technol.* 38(7):905–913.

Mu, Y. y Yu, H. 2006. Biological hydrogen production in a UASB reactor with granules. I: physicochemical characteristics of hydrogen-producing granules. *Biotechnol. Bioeng.* 94(5):980–987.

Naim, A. y Al, M. 2001. Palestine: RE action plan moving Hawaii from traditional energy resources. *Refocus*. 2(2):20-23.

Nakashimada, Y., Rachman, M., Kakizono, T. y Nishio, N. 2002. Hydrogen production of *Enterobacter aerogenes* altered by extracellular and intracellular redox states. *Int. J. Hydrogen Energy*. 27:1399-405.

NASA, 2006. Hydrogen in the Universe. National Aeronautics and Space Administration. Cabo Cañaveral, Florida, EEUA.

NHPA, 2005. Asociación Nacional de Energía de Hidrógeno de Rusia. <http://www.hydrogen.ru/print.php?sid=91%20>

Noyola, A. 1986. La digestión anaeróbica aplicada al tratamiento de aguas residuales a nivel individual y semicolectivo. Presentado en el V Congreso Nacional de la Sociedad de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A. C. Puebla, Puebla, México.

Ntaikou, I., Gavala, H., Kornaros, M. y Lyberatos, G. 2008. Hydrogen production from sugars and sweet sorghum biomass using *Ruminococcus albus*. *Int. J. Hydrogen Energy*. 33:1153-63.

O-Thong, S., Prasertsan, P., Intrasungkha, N., Dhamwichukorn, S. y Birkeland, N. 2008. Optimization of simultaneous thermophilic fermentative hydrogen production and COD reduction from palm oil mill effluent by *Thermoanaerobacterium*-rich sludge. *Int. J. Hydrogen Energy*. 33:1221-31.

Ogino, H., Miura, T., Ishimi, K., Seki, M. y Yoshida, H. 2005. Hydrogen production from glucose by anaerobes. *Biotechnol. Prog.* 21:1786-8.

Oh, Y., Kim, S., Kim, M. y Park, S. 2004. Thermophilic biohydrogen production from glucose with trickling biofilter . *Biotechnol. Bioeng.* 88(6):690–698.

Oh, Y., Kim, H., Park, S., Kim, M., Ryu, D. 2008. Metabolic-flux analysis of hydrogen production pathway in *Citrobacter amalonaticus* Y19. *Int. J. Hydrogen Energy.* 33:1471–82

Oxtoby, D., Gillis, H. y Nachtrieb, N. 2002 . Principles of Modern Chemistry 5th ed. Thomson Brooks/Cole. EEUUA.

Pan, C., Fan, Y., Xing, Y ., Hou, H. y Zhang, M. 2008. Statistical optimization of process parameters on biohydrogen production from glucose by *Clostridium* sp. Fanp2. *Bioresour. Technol.* 99:3146–54.

Pankhurst, E. 1983. The prospects for biogas- A European point of view. *Biomass.* 3(1):1-42.

Park, W., Hyun, S., Oh, S., Logan, B. y Kim, I. 2005. Removal of headspace CO₂ increases biological hydrogen production. *Environ. Sci. Technol.* 39(12):4416–4420.

Pellerin, A., Walter, P., Heisler, M. y Farmer, G. 1988. Operation and performance of biogas-fueled cogeneration systems. *Energy in Agriculture.* 6(4):295-310.

Podesta, J., Gutierrez-Navarro, A ., Estrella, C. y Estesó, A. 1997. Electrochemical measurement of trace concentrations of biological hydrogen produced by Enterobacteriaceae. *Res Microbiol.* 148: 87–93.

Prasertsan, S. y Sajjakulnukit, B. 2006. Biomass and biogas energy in Thailand: Potential , opportunity and barriers. *Renewable Energy*. 31 599-610.

Prats, I. 1996. Manual de gestión de purines y de su selva reutilización agrícola. España: Generalitat de Catalunya. p.p.40-41

Rang, D. 2004. El recupero de gas para actividades surgidas a partir de la extracción de petróleo ; Proyectos de conversión de combustibles fósiles (carbón a gas natural) en Chile; proyectos de eficiencia energética durante la fabricación de hierro (India), o en la producción de Clinker (Costa Rica). Oficina Argentina para el Mecanismo de Desarrollo Limpio-JICA. Costa Rica.

Reith, J. Wijffels, R. y Barten, H. 2003. Bio-methane y bio-hydrogen. Status and perspectives of biological methane and hydrogen production. Editado por Stocking, B. O'Regan. Países Bajos.

Ren, N., Li, J., Li, B., Wang, Y. y Liu, S. 2006 Biohydrogen production from molasses by anaerobic fermentation with a pilot-scale bioreactor system. *Int. J. Hydrogen Energy*. 31(15):2147-2157.

Ren, N, Li, Y., Wang, A., Li, J., Ding, J. y Zadsar, M. 2006. Hydrogen production by fermentation: review of a new approach to environmentally safe energy production. *Aquat Ecosystem Health Manage*. 9(1):39-42.

Robles, F. y Gourdon, R. 1999. Effect of mailing on the behavior of domestic wastes: laboratory study on the role of pH in biodegradation. *Bioresource Technology*. 69(1):15-22.

Rodríguez, J., Kleerebegem, R., Le ma, J. y Van-Loosdrecht. M. 2006. Modelling product formation in anaerobic mixed culture fermentations. *Biotechnol. Bioeng.* 93(3):592–606.

Rojas, M. 2006. Estudio de factibilidad del uso de hidrógeno como combustible en máquinas de combustión interna para generación de electricidad. Tesis de Maestría del Centro de Investigaciones en Energía. UNAM. México, D.F., México.

Rose, J. y Cooper, J. 2007. Technical Data on Fuels. Scottish Academic Press. Endinburgo, Alemania.

Salerno, M., Park, W., Zuo, Y. y Logan, B. 2006. Inhibition of biohydrogen production by ammonia. *Water Res.* 40(6):1167–1172.

Saval, S. y Noyola, A. 1992. Aportaciones de la biotecnología al tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Biotecnología.* 2:155-172.

Scriban, R. 1982. Bioclimatologie. Technique & Documentation. París Francia.

SENER, 2007. Secretaria de Energía. México, D.F. México. <http://www.sener.gob.mx>

Sharma, A., Unni, B. y Singh, D. 1999. A novel fed-batch digestion system for biomethanation of plant biomass. *Journal of Bioscience and Bioengineering.* 87(5):678-682.

Speece, R. 1983. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environ. Sci. Technol.* 17(9):416-427.

Stronach, M., Rudd, T. y Lester, N. 1986. Anaerobic digestion process in industrial wastewater treatment. Editor Springer Verlag. República Federal Alemana. Pág.72.

Svensson, B. y Karlsson, A. 2005. Dark fermentation for hydrogen production from organic wastes. In: Lens P, Westermann P, Harberbauer M, Moreno A, editors. Biofuels for fuel cells: renewable energy from biomass fermentation. London, UK Publishing. p. 209–20

Swizenbaum, M. y Jewell, W. 1980. Anaerobic attached film expanded-bed reactor treatment. JWPCF, 52:1953-1965.

Taguchi, F., Yamada, K., Hasegawa, K., Taki-Saito, T. y Hara, K. 1996. Continuous hydrogen production by *Clostridium* sp. Strain no. 2 from cellulose hydrolysate in an aqueous two-phase system. *J. Ferment. Bioeng.* 82:80–3.

Tanisho, S. y Ishiwata, Y. 1995. Continuous hydrogen production from molasses by fermentation using urethane foam as a support of flocks. *Int. J. Hydrogen Energy.* 20:541–5.

Ting, C., Lin, K., Lee, D. y Tay, J. 2004. Production of hydrogen and methane from wastewater sludge using anaerobic fermentation. *Water Sci. Technol.* 50:223–8.

Troshina, O., Serebryakova, L., Shermetyeva, M. y Lindblad, P. 2002. Production of H₂ by the unicellular cyanobacterium. *Int. J. Hydrogen Energy.* 27:1283–9.

Turcot, J., Bisailon, A. y Hallenbeck, P. 2008. Hydrogen production by continuous cultures of *Escherichia coli* under different nutrient regimes. *Int. J. Hydrogen Energy.* 33:1465–70.

Ueno, Y., Haruta, S., Ishii, M. y Igarashi, Y. 2001. Characterization of a microorganism isolated from the effluent of hydrogen fermentation by microflora. *J. Biosci Bioeng.* 92:397–400.

UNAM, 2008. Presenta la UNAM auto a Hidrógeno. Boletín-DGCS-532. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. México D.F. México.

Valdéz, I., Ríos, E., Esparza, F., Cecchi, F., Poggi, H. 2005. Semi-continuous solid substrate anaerobic reactors for H₂ production from organic waste: mesophilic versus thermophilic regime. *Int. J. Hydrogen Energy.* 30(13–14):1383–1391.

Van Ginkel S, Sung S y Lay J. 2001. Biohydrogen production as a function of pH and substrate concentration. *Environ Sci. Technol.* 35:4726–30.

Van, L. y Lentz, C. 1979. Comparison between up and downflow anaerobic fixed film reactors of varying surface-to-volume ratios for the treatment of bean blanching waste. En: Proc. 35th Purdue Indust. Waste Conf. Pp 319-325.

Van, S., Sang, O. y Logan, B. 2005. Biohydrogen gas production from food processing and domestic wastewaters. *International Journal of Hydrogen Energy.* Artículo en prensa.

Van Niel, E., Budde, M., de Haas, G., van, F., Claassen, P. y Stams, A. 2002. Distinctive properties of high hydrogen producing extreme thermophiles, *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* and *Thermotoga elfii*. *Int. J. Hydrogen Energy.* 27:1391–8.

Vieira, A. 1985. Natural gas and other alternative fuels for transportation purposes. *Energy*. 10(2):187-215.

Vijayaraghavan, K. y Ahmad, D. 2006. Biohydrogen generation from palm oil mill effluent using anaerobic contact filter. *Int. J. Hydrogen Energy*. 31(10):1284–1291.

Vijayaraghavan, K., Ahmad, D., y Bin, K. 2006. Biohydrogen generation from jackfruit peel using anaerobic contact filter. *Int. J. Hydrogen Energy*. 31(5):569–579.

Wang, C., Chang, C., Chu, C., Lee, D., Chang, B. y Liao, C. 2003. Producing hydrogen from wastewater sludge by *Clostridium bifermentans*. *J. Biotechnol.* 102:83–92.

Wang, G., Mu, Y. y Yu, H. 2005. Response surface analysis to evaluate the influence of pH, temperature and substrate concentration on the acidogenesis of sucrose-rich wastewater. *Biochem Eng. J.* 23:175–84.

Wang J, Wan W. 2008. The effect of substrate concentration on biohydrogen production by using kinetic models. *Sci China Ser B-Chem*;51:1110–7.

Wang, L., Zhou, Q. y Li, F. 2006. Avoiding propionic acid accumulation in the anaerobic process for biohydrogen production. *Biomass Bioenergy*. 30(2):177–182

Wang, X., Ren, N., Xiang, W. y Guo, W. 2007. Influence of gaseous end-products inhibition and nutrient limitations on the growth and hydrogen production by hydrogen-producing fermentative bacterial B49. *Int J Hydrogen Energy*. 32:748–54

Wu, J. y Lin, C. 2004. Biohydrogen production by mesophilic fermentation of food wastewater. *Water Sci. Technol.* 49:223–8.

Wu, S., Hung, C., Lin, C., Chen, H., Lee, A. y Chang, J. 2006. Fermentative hydrogen production and bacterial community structure in high-rate anaerobic bioreactors containing silicone-immobilized and self-flocculated sludge. *Biotechnol. Bioeng.* 93(5):934–946.

Wu, S., Hung, C., Lin, C., Lin, P., Lee, K. y Lin C. 2008a. HR T-dependent hydrogen production and bacterial community structure of mixed anaerobic microflora in suspended, granular and immobilized sludge systems using glucose as the carbon substrate. *Int. J. Hydrogen Energy.* 33:1542–9.

Wu, S., Lin, C., Chang, J. y Chang, J. 2005. Biohydrogen production with anaerobic sludge immobilized by ethylene-vinyl acetate copolymer. *Int. J. Hydrogen Energy.* 30(13–14):1375–1381.

Wu, S., Lin, C., Lee, K., Hung, C., Chang, J. y Lin, P. 2008b. Dark fermentative hydrogen production from xylose in different bioreactors using sewage sludge microflora. *Energy Fuels.* 22:113–9.

Wu, S., Lin, C., Shen, Y., Chang, J. y Lin C. 2006b. Exploring biohydrogen-producing performance in the upflow fluidized bed bioreactors using different types of immobilized cells. In: Proceedings of the 16th world hydrogen energy conference. Lyon, Francia, p 50.

Xing, D., Ren, N., Gong, M., Li, J. y Li, Q. 2005. Monitoring of microbial community structure and succession in the biohydrogen production reactor by denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE). *Sci. China Ser C.* 48(2):155–62.

Xing, D., Ren, N., Wang, A., Li, Q., Feng, Y. y Ma, F. 2008. Continuous hydrogen production of auto-aggregative *Ethanoligenens harbinense* YUAN-3 under non-sterile condition. ***Int. J. Hydrogen Energy***. 33:1489–95.

Yang, H., Shao, P., Lu, T., Shen, J., Wang, D., Xu, Z. y Yuan, X. 2006. Continuous bio-hydrogen production from citric acid wastewater via facultative anaerobic bacteria. ***Int. J. Hydrogen Energy***. 31(10):1306–1313.

Yang, H. y Shen, J. 2006. Effect of ferrous iron concentration on anaerobic bio-hydrogen production from soluble starch. ***Int. J. Hydrogen Energy***. 31:2137–46.

Yang, M., Han, Y. y Gang, W. 2007. A kinetic approach to anaerobic hydrogen-producing process. ***Water Research***. 41: 1152 – 1160.

Yasuda, K. y Tanisho, S. 2006. Fermentative hydrogen production from artificial food wastes. En: Proceedings of the 16th world hydrogen energy conference. Lyon, Francia.

Yasunori, K. y Naoe, H. 2005. Effect of inoculum conditioning on hydrogen fermentation and pH: Effect on bacterial community relevant to hydrogen production. ***Journal of Bioscience and Bioengineering***. 524-530.2005.

Yokoi, H., Ohkawara, T., Hirose, J., Hayashi, S. y Takasaki, Y. 1995. Characteristics of hydrogen production by aciduric *Enterobacter aerogenes* strain HO-39. ***J. Ferment Bioeng.*** 80:571–4.

Yokoyama, H., Waki, M., O gino, A., Ohmori, H. y Tanaka, Y. 2007a. Hydrogen fermentation proper ties of undi luted cow dung. *J. Biosci. Bioeng.* 104:82–5.

Yokoyama, H., Waki, M., Moriya, N., Yasuda, T., Tanaka, Y. y Haga K. 2007b. Effect of fermentation temp erature on hydrogen production from cow waste slurry by using anaerobic microflora within the slurry. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 74:474–83.

Yong, F., Nan, Q., Ying, C. y Zheng, G. 2007. Ecological mechanism of fe rmentative hydrogen production by bacteria. *International Journal of Hydrogen Energy.* 32: 755-760.

Yoshida, A., Nis himura, T., Kawagu chi, H., I nui, M. y Yukawa, H. 2005. En hanced hydrogen production from formic aci d by formate hydrogen lyase-overexpressing *Escherichia coli* strains. *Appl. Environ. Microbiol.* 71(11):6762–6768.

Young, J. y McCarty, P. 1969. Th e anaerobic filter for wast e treatment. *JWPCF.* 41:160-173.

Yu, H. y Mu, Y. 2006. Bi ological hydrogen production in a UASB reactor w ith granules II: re actor performance in 3-year operati on. *Biotechnol. Bioeng.* 94(5):988–95.

Zhang, H., Bruns, M. y Logan, B. 2006. Biological hydrogen production by *Clostridium acetobut ylicum* in an unsat ured flow reactor. *Water Res.* 40(4):728–734.

Zhang, J., Li, X., O h, S., Logan, B. 2004. Physical and hydrodynamic properties of flocc s produced during biological hydrogen production. *Biotechnol. Bioeng.* 88(7):854–860.

Zhang, T., Liu, H. y Fang, H. 2003. Biohydrogen production from starch in wastewater under thermophilic condition. *J. Environ Manage.* 69:149–56.

Zhang, Z., Show, K., Tay, J., Liang, D. y Lee, D. 2008. Biohydrogen production with a anaerobic fluidized bed reactors-A comparison of biofilm-based and granule-based systems. *Int. J. Hydrogen Energy.* 33:1559–64.

Zhang, Z., Show, K., Tay, J., Liang, D., Lee, D. y Jiang, W. 2007. Rapid formation of hydrogen-producing granules in an anaerobic continuous stirred tank reactor induced by acid incubation. *Biotechnol. Bioeng.* 96:1040–50.

Zhang, Y., Liu, G. y Shen, J. 2005. Hydrogen production in batch culture of mixed bacteria with sucrose under different iron concentrations. *Int. J. Hydrogen Energy.* 30:855–60.

Zheng, X. y Yu, H. 2004 Biological hydrogen production by enriched anaerobic cultures in the presence of copper and zinc. *J. Environ Sci. Health.* A39:89–101.

Zheng, X. y Yu, H. 2005. Inhibitory effects of butyrate on biological hydrogen production with mixed anaerobic cultures. *J. Environ Manage.* 74(1):65–70.

Zhu, H, Beland, M. 2006. Evaluation of alternative methods of preparing hydrogen producing seeds from digested wastewater sludge. *Int. J. Hydrogen Energy.* 31:1980–8.

Anexo A.1

Tabla A.1 Producción de biogás

EXPERIMENTO	FECHA	PRODUCCIÓN mL/día
UNO	19-Feb	0
	27-Feb	0
	03-Mar	450
	06-Mar	0
	10-Mar	450
	12-Mar	0
	19-Mar	0
	24-Mar	460
	31-Mar	470
	01-Abr	480
	DOS	03-abr
04-abr		480
07-abr		480
08-abr		480
15-abr		480
21-abr		480
24-abr		480
29-abr		480
30-abr		450
02-may		390
TRES	12-may	460
	13-may	480
	14-may	480
	15-may	480
	16-may	480
	17-may	480
	19-may	480
	20-may	200
	22-may	100
	24-may	480
	27-may	480
CUATRO	30-may	480
	31-may	480
	02-jun	480
	03-jun	480
	04-jun	480
	05-jun	480
	06-jun	480
	08-jun	480
	09-jun	480

Tabla A.1 continuación...

EXPERIMENTO	FECHA	PRODUCCIÓN mL/día
CUATRO	11-Jun	480
	12-Jun	480
	13-Jun	480
	14-Jun	480
	15-Jun	480
	16-Jun	480
	17-Jun	480
	18-Jun	480
	19-Jun	480
	20-Jun	480

Tabla A.2 Análisis sólidos totales

EXPERIMENTO	FECHA	ENTRADA S.T.T. mg/ L	SALIDA S.T.T. mg/L	REMOCIÓN %
UNO	19-Feb 0.13	68	0.0082	94
	27-Feb 0.13	68	0.0238	83
	03-Mar 0.13	68	0.0101	93
	06-Mar 0.13	68	0.0081	94
	10-Mar 0.13	68	0.0114	92
	12-Mar 0.13	68	0.0334	76
	19-Mar 0.13	68	0.0343	75
	24-Mar 0.13	68	0.0163	88
	31-Mar 0.13	68	0.0153	89
	01-Abr 0.13	68	0.0178	87
DOS	03-Abr 0.13	68	0.0126	91
	04-Abr 0.13	68	0.0156	89
	07-Abr 0.13	68	0.007	95
	08-Abr 0.13	68	0.0091	93
	15-Abr 0.13	68	0.0152	89
	21-Abr 0.13	68	0.0099	93
	24-Abr 0.13	68	0.0179	87
	29-Abr 0.13	68	0.0597	56
	30-Abr 0.13	68	0.089	35
	02-May 0.136	8	0.0951	30
	08-May 0.136	8	0.1359	1
	09-May 0.136	8	0.1301	5
TRES	10-May 0.136	8	0.1024	25
	12-May 0.136	8	0.1064	22
	13-May 0.136	8	0.1517	-11
	14-May 0.136	8	0.124	9
	15-May 0.136	8	0.1263	8

Tabla A.2 continuación...

EXPERIMENTO	FECHA	ENTRADA S.T.T. mg/ L	SALIDA S.T.T. mg/L	REMOCIÓN %
TRES	16-May	0.136 8	0.1134	17
	17-May	0.136 8	0.1361	0
	19-May	0.136 8	0.1249	9
	20-May	0.136 8	0.0619	55
	22-May	0.136 8	0.1541	-13
	24-May	0.136 8	0.1196	13
	27-May	0.136 8	0.1328	3
CUATRO	30-may	0.136 8	0.0735	46
	31-may	0.136 8	0.0828	39
	02-jun	0.13 68	0.0692	49
	03-jun	0.13 68	0.0727	47
	04-jun	0.13 68	0.0577	58
	05-jun	0.13 68	0.071	48
	06-jun	0.13 68	0.085	38
	08-jun	0.13 68	0.0824	40
	09-jun	0.13 68	0.085	38
	11-jun	0.13 68	0.1013	26
	12-jun	0.13 68	0.1103	19
	13-jun	0.13 68	0.1497	-9
	14-jun	0.13 68	0.1123	18
	15-jun	0.13 68	0.1204	12
	16-jun	0.13 68	0.1328	3
	17-jun	0.13 68	0.1661	-21
	18-jun	0.13 68	0.1599	-17
19-jun	0.13 68	0.1566	-14	
20-jun	0.13 68	0.1883	-38	

Tabla A.3 Análisis sólidos suspendidos totales

EXPERIMENTO	FECHA	ENTRADA S.S.T. mg/ L	SALIDA S.S.T. mg/L	REMOCIÓN %
UNO	19-Feb	0.09 97	0.0051	95
	27-Feb	0.09 97	0.0184	81
	03-Mar	0.09 97	0.0242	76
	06-Mar	0.09 97	0.0036	96
	10-Mar	0.09 97	0.0105	89
	12-Mar	0.09 97	0.0382	62
	19-Mar	0.09 97	0.0378	62
	24-Mar	0.09 97	0.0127	87
	31-Mar	0.09 97	0.0113	89
	01-Abr	0.09 97	0.0073	93

Tabla A.3 continuación...

EXPERIMENTO	FECHA	ENTRADA	SALIDA	REMOCIÓN	
		S.ST. mg/ L	S.S.T. mg/L	%	
DOS	03-Abr	0.09	97	0.0053	95
	04-Abr	0.09	97	0.011	89
	07-Abr	0.09	97	0.0026	97
	08-Abr	0.09	97	0.0047	95
	15-Abr	0.09	97	0.0124	88
	21-Abr	0.09	97	0.0035	96
	24-Abr	0.09	97	0.015	85
	29-Abr	0.09	97	0.0321	68
	30-Abr	0.09	97	0.0593	41
	02-May	0.09	97	0.0655	34
	08-May	0.09	97	0.0898	10
	09-May	0.09	97	0.0827	17
	10-May	0.09	97	0.0771	23
	TRES	12-may	0.09	97	0.0761
13-may		0.09	97	0.1011	-1
14-may		0.09	97	0.0815	18
15-may		0.09	97	0.0775	22
16-may		0.09	97	0.069	31
17-may		0.09	97	0.0708	29
19-may		0.09	97	0.0675	32
20-ma y		0.0997		0.0339	66
22-ma y		0.0997		0.085	15
24-ma y		0.0997		0.0587	41
27-ma y		0.0997		0.056	44
CUATRO	30-may	0.09	97	0.0759	24
	31-may	0.09	97	0.0639	36
	02-jun	0.09	97	0.0581	42
	03-jun	0.09	97	0.0566	43
	04-jun	0.09	97	0.041	59
	05-jun	0.09	97	0.0378	62
	06-jun	0.09	97	0.0268	73
	08-jun	0.09	97	0.0416	58
	09-jun	0.09	97	0.0637	36
	11-jun	0.09	97	0.0443	56
	12-jun	0.09	97	0.0589	41
	13-jun	0.09	97	0.0999	0
	14-jun	0.09	97	0.0964	3
	15-jun	0.09	97	0.1204	-21
	16-jun	0.09	97	0.056	44
17-jun	0.09	97	0.1116	-12	
18-jun	0.09	97	0.1211	-21	
19-jun	0.09	97	0.1274	-28	

Tabla A.4 Análisis de sólidos suspendidos volátiles

EXPERIMENTO	FECHA	ENTRADA	SALIDA	REMOCIÓN	
		S.S.V. mg/ L	S.S.V. mg/L	%	
uno	19-feb	0.0	965	0.0038	96
	27-feb	0.0	965	0.0176	82
	03-mar	0.0	965	0.0205	79
	06-mar	0.0	965	0.0034	96
	10-mar	0.0	965	0.009	91
	12-mar	0.0	965	0.0343	64
	19-mar	0.0	965	0.0342	65
	24-mar	0.0	965	0.0108	89
	31-mar	0.0	965	0.0095	90
	01-abr	0.0	965	0.0058	94
DOS	03-abr	0.0	965	0.0046	95
	04-abr	0.0	965	0.0094	90
	07-abr	0.0	965	0.0024	98
	08-abr	0.0	965	0.0045	95
	15-abr	0.0	965	0.012	88
	21-abr	0.0	965	0.0035	96
	24-abr	0.0	965	0.0144	85
	29-abr	0.0	965	0.0305	68
	30-abr	0.0	965	0.0572	41
	02-may	0.0	965	0.0636	34
	08-may	0.0	965	0.087	10
	09-may	0.0	965	0.079	18
	10-may	0.0	965	0.0737	24
TRES	12-may	0.0	965	0.1028	-6
	13-may	0.0	965	0.091	6
	14-may	0.0	965	0.071	27
	15-may	0.0	965	0.064	34
	16-may	0.0	965	0.056	42
	17-may	0.0	965	0.0561	42
	19-may	0.0	965	0.0498	48
	20-may	0.0	965	0.0225	77
	22-may	0.0	965	0.0706	27
	24-may	0.0	965	0.0408	58
27-may	0.0	965	0.0337	65	

Tabla A.5 Análisis demanda química de oxígeno

EXPERIMENTO	FECHA	ENTRADA		SALIDA		REMOCIÓN %
		DQO. mg/L	DQO. mg/L	DQO. mg/L	DQO. mg/L	
UNO	19-Feb 33	416	6156			82
	27-Feb 33	416	7320			78
	03-Mar 33	416	8650			74
	06-Mar 33	416	4993			85
	10-Mar 33	416	6655			80
	12-Mar 33	416	6821			80
	19-Mar 33	416	11475			66
	24-Mar 33	416	12306			63
	31-Mar 33	416	13636			59
	01-Abr 33	416	13636			59
DOS	03-Abr 33	416	10810			68
	04-Abr 33	416	7985			76
	07-Abr 33	416	23277			30
	08-Abr 33	416	23277			30
	15-Abr 33	416	33355			0
	21-Abr 33	416	43056			-29
	24-Abr 33	416	16462			51
	29-Abr 33	416	12802			62
	30-Abr 33	416	9315			72
	02-May 33	416	33914			-1
	08-May 33	416	83613			-150
	09-May 33	416	21614			35
	10-May 33	416	46214			-38
TRES	12-May 33	416	7320			78
	13-May 33	416	61340			-84
	14-May 33	416	55356			-66
	15-May 33	416	48708			-46
	16-May 33	416	46879			-40
	17-May 33	416	69485			-108
	19-May 33	416	62171			-86
	20-May 33	416	52364			-57
	22-May 33	416	45383			-36
	24-May 33	416	-			-
27-May 33	416	-			-	
CUATRO	30-May 33	416	26435			21
	31-May 33	416	12140			64
	02-Jun 33	416	18623			44
	03-Jun 33	416	27931			16
	04-Jun 33	416	43222			-29
	05-Jun 33	416	62171			-86
	06-Jun 33	416	32249			3

Tabla A.5 continuación...

EXPERIMENTO	FECHA	ENTRADA		SALIDA	
		DQO. mg/L	DQO. mg/L	DQO. mg/L	REMOCIÓN %
CUATRO	08-Jun 33	416	59844		-79
	09-Jun 33	416	58182		-74
	11-Jun 33	416	57683		-73
	12-Jun 33	416	59013		-77
	13-Jun 33	416	58681		-76
	14-Jun 33	416	47212		-41
	15-Jun 33	416	51699		-55
	16-Jun 33	416	53694		-61
	17-Jun 33	416	53528		-60
	18-Jun 33	416	61839		-85
	19-Jun 33	416	62343		-87
	20-Jun 33	416	61999		-86

Tabla A.6 Análisis pH

EXPERIMENTO	FECHA	pH	
		Final.	Inicial.
UNO	19-Feb	4.16	7.11
	27-Feb	4.66	4.16
	03-Mar	4.62	4.66
	06-Mar	4.6	4.62
	10-Mar	4.7	4.6
	12-Mar	4.75	4.7
	19-Mar	4.16	4.16
	24-Mar	4.62	4.16
	31-Mar	4.62	4.62
	01-Abr	6.7	6.7
DOS	03-Abr	5.55	6.2
	04-Abr	4.24	6.1
	07-Abr	4.8	6.2
	08-Abr	4.75	5.5
	15-Abr	4.37	5.5
	21-Abr	4.03	5.8
	24-Abr	4.03	5.8
	29-Abr	3.33	6
	30-Abr	3.4	6
	02-May	3.53	5.5
	08-May	3.69	5.9
	09-May	4.05	5.5
10-May	4.05	5.8	
TRES	12-May	4.41	5.6
	13-May	4.03	6

Tabla A.6 continuación...

EXPERIMENTO	FECHA	ENTRADA DQO. mg/L	SALIDA DQO. mg/L	REMOCIÓN %
TRES	14-May	4.5	5.8	
	15-May	4.8	6	
	16-May	5.04	6.1	
	17-May	5.2	6.02	
	19-May	5.62	6.01	
	20-May	5	5.9	
	22-May	4.9	5.8	
	24-May	5	5.9	
	27-May	6.6	6	
	30-May	7.2	7.2	
	31-May	6.1	6.8	
	02-Jun	6	7.1	
	03-Jun	4.21	6.8	
	04-Jun	4.19	6.8	
05-Jun	4.37	6.5		
CUATRO	06-Jun	5.09	6.6	
	08-Jun	4.8	6.9	
	09-Jun	4.3	7	
	11-Jun	4.8	7.1	
	12-Jun	5.62	6.8	
	13-Jun	8.5	8.4	
	14-Jun	8.5	8.5	
	15-Jun	5.04	6.6	
	16-Jun	5.2	6.9	
	17-Jun	5.62	6.7	
	18-Jun	5.3	7	
	19-Jun	5.5	6.6	
	20-Jun	5	7	