



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LOS
RESIDUOS DE C.U. COMO BIOCOMBUSTIBLE DEL
ECOVIA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

PRESENTA:

SERGIO JUÁREZ HERNÁNDEZ

DIRECTORA DE TESIS: Dra. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, 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

<i>Presidente</i>	<i>Ing. Augusto Sánchez Cifuentes</i>
<i>Vocal</i>	<i>Dra. Alejandra Castro González</i>
<i>Secretario</i>	<i>Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo</i>
<i>1º. Suplente</i>	<i>Dr. Pablo Álvarez Watkins</i>
<i>2º. Suplente</i>	<i>M. I. Carlos Villanueva Moreno</i>

Sitio donde se desarrollo el tema

*Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
Ciudad Universitaria, México D.F.*

Directora de Tesis

Dra. Alejandra Castro González

*Departamento de Sistemas Energéticos
División de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México*

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Alejandra Castro González

*Al Mtr. Gerardo Arzate Pérez, al Dr. Roberto Martínez Gamba, así como a todas las personas
que colaboraron en esta investigación*

A la Universidad Nacional Autónoma de México

A toda mi Familia

A mi amigo el "General Lee"



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

CONTENIDO

	Pág.
Agradecimientos.....	II
Índice de Tablas.....	VII
Índice de Figuras.....	IX
Resumen.....	XII
Capítulo I.- Introducción y objetivos	
	1
Capítulo II.- El vehículo ECOVIA y su demanda de hidrógeno	
2.1- Macroproyecto La Ciudad Universitaria y la Energía.....	5
2.2- Proyecto ECOVIA Vehículo Ecológico Multifuncional.....	6
2.2.1-Breve descripción técnica del vehículo ECOVIA.....	7
2.2.2- Consumo de hidrógeno del ECOVIA.....	7
2.2.3- Costo comercial del hidrógeno y su impacto en el consumo del ECOVIA.....	9
2.3- Consumo de hidrógeno en Facultades e Institutos de la UNAM.....	11
2.4- Conclusiones.....	12
Capítulo III.- Utilización del hidrógeno en medios de transporte	
3.1- Motor de combustión interna alimentado con hidrógeno	
3.1.1- Antecedentes.....	13
3.1.2- Propiedades de combustibilidad del hidrógeno.....	13
3.1.3- El hidrógeno en motores de combustión interna.....	15
3.1.3.1- Funcionamiento del MCIH.....	15
3.1.3.2- Sistemas de inyección de combustible.....	16
3.1.3.3- Potencia generada.....	18
3.1.3.4- Emisiones.....	18
3.1.3.5- Mezclas con hidrógeno.....	19
3.1.4- Principales ventajas y desafíos de los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno.....	19
3.2- Celdas de combustible	
3.2.1- Funcionamiento de las celdas de combustible.....	20
3.2.2- Clasificación de las celdas de combustible.....	21
3.2.3- Principales ventajas y desafíos de las celdas de combustible alimentadas con hidrógeno.....	21
3.3- Conclusiones.....	29
Capítulo IV.- Almacenamiento y abastecimiento de hidrógeno	
4.1- Almacenamiento de hidrógeno	
4.1.1- Almacenamiento de hidrógeno en forma de gas comprimido.....	30
4.1.2- Costos del almacenamiento de hidrógeno en forma de gas comprimido.....	31
4.1.3- Almacenamiento de hidrógeno en forma líquida.....	32
4.1.4- Costos del almacenamiento de hidrógeno en forma líquida.....	34
4.1.5- Almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos.....	35
4.1.5.1- Tipos de hidruros metálicos.....	36
4.1.5.2- Costos del almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos.....	37
4.1.6- Almacenamiento de hidrógeno en materiales de carbono.....	37
4.1.7- Almacenamiento en microesferas de sílice y en hidruros orgánicos.....	39
4.2- Estaciones de abastecimiento de hidrógeno.....	39
4.2.1- Estaciones de abastecimiento de hidrógeno en forma de gas comprimido.....	40

	Pág.
4.2.1.1- Sistema mono-pila.....	41
4.2.1.2- Sistema multi-pila o cascada.....	41
4.2.1.3- Sistema multi-pila con compresor.....	42
4.2.1.4- Sistema de compresor criogénico.....	42
4.2.2- Estaciones de abastecimiento de hidrógeno en estado líquido.....	43
4.2.3- Aspectos de seguridad en las estaciones de abastecimiento de hidrógeno.....	45
4.3- Conclusiones.....	46
Capítulo V.- Métodos de producción de hidrógeno	
5.1- Producción de hidrógeno.....	47
5.2- Principales métodos de producción de hidrógeno.....	48
5.2.1- Métodos de producción de hidrógeno basados en el procesamiento de combustibles.....	48
5.2.2- Métodos de producción de hidrógeno basados en procesos no reformadores.....	52
5.2.2.1- Producción de hidrógeno a partir de biomasa.....	52
5.2.2.2- Producción de hidrógeno a partir de agua.....	52
5.3- Separación y purificación de hidrógeno.....	58
5.4- Costos de producción de hidrógeno.....	59
5.5- Panorama global de la producción y utilización del hidrógeno en la actualidad.....	62
5.6- Producción y utilización del hidrógeno en México.....	62
5.7- Conclusiones.....	64
Capítulo VI.- Producción de hidrógeno a partir de residuos orgánicos	
6.1- Procesos biológicos para la producción de hidrógeno.....	65
6.2- Materia prima para los procesos biológicos	
6.2.1- Residuos agrícolas y de la industria alimenticia que contienen almidón y celulosa.....	65
6.2.2- Aguas industriales residuales ricas en hidratos de carbono.....	66
6.2.3- Fangos de desechos de las plantas de tratamiento de aguas residuales.....	67
6.3- Producción de hidrógeno a través del bio-proceso de fermentación oscura	
6.3.1- Fermentación oscura.....	67
6.3.2- Tipos de sustratos	
6.3.2.1- Azúcares simples.....	68
6.3.2.2- Almidón presente en desechos.....	69
6.3.2.3- Residuos que contienen celulosa.....	70
6.3.2.4- Desechos y aguas residuales domésticas y de la industria alimenticia.....	70
6.3.2.5- Fangos de las plantas de tratamiento de aguas residuales.....	73
6.3.2.6- Residuos ganaderos.....	74
6.3.3- Co-fermentación de residuos orgánicos.....	76
6.4- Producción de hidrógeno a través del proceso secuencial de fermentación oscura - foto-fermentación.....	77
6.5- Principales retos en la producción de hidrógeno mediante técnicas de fermentación.....	78
6.6- Conclusiones.....	79
Capítulo VII.- Generación de residuos orgánicos en Ciudad Universitaria	
7.1- Procedencia de los residuos orgánicos.....	80
7.2- Características de la muestra de estudio.....	80
7.3- Mecanismos para recavar información.....	81

7.4- Resultados obtenidos	
7.4.1- Primera sección de la muestra: Comedores y barras de alimentos.....	82
7.4.2- Segunda sección de la muestra: Granja porcina de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM.....	88
7.4.3- Tercera sección de la muestra: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNAM.....	90
7.5- Situación actual del manejo de residuos sólidos en Ciudad Universitaria.....	90
7.6- Potencial de los residuos orgánicos generados en Ciudad Universitaria para la producción de hidrógeno	
7.6.1- Potencial de los residuos orgánicos de comedores y barras de alimentos.....	93
7.6.1.1- Primer conjunto de parámetros.....	94
7.6.1.2- Segundo conjunto de parámetros.....	94
7.6.1.3- Tercer conjunto de parámetros.....	95
7.6.2- Potencial de los residuos orgánicos de la granja porcina de la FMVZ-UNAM.....	97
7.6.3- Potencial de los lodos o biosólidos de la PTAR-UNAM.....	97
7.6.4- Velocidad de la síntesis de hidrógeno en la fermentación oscura.....	98
7.7- Conclusiones.....	99

Capítulo VIII.- Aspectos técnicos y económicos de la producción de hidrógeno a partir de los residuos orgánicos de C.U.

8.1- Aspectos de carácter técnico	
8.1.1- Diagrama de flujo del proceso.....	100
8.1.1.1- Materia prima.....	100
8.1.1.2- Recolección y transporte de la materia prima.....	102
8.1.1.3- Recepción y trituración de la materia prima.....	102
8.1.1.4- Depósito de almacenamiento temporal.....	102
8.1.1.5- Reactor anaerobio.....	103
8.1.1.6- Sistema de separación y purificación de hidrógeno.....	105
8.1.1.7- Almacenamiento del hidrógeno.....	105
8.1.1.8- Estación de abastecimiento de hidrógeno.....	107
8.1.1.9- Desechos digeridos.....	107
8.1.2- Capacidad de producción.....	108
8.1.3- Localización.....	108
8.1.4- Beneficio ambiental.....	109
8.2- Aspectos de carácter económico	
8.2.1- Inversión inicial estimada.....	111
8.2.2- Costo de producción.....	111
8.2.3- Evaluación financiera del proyecto	
8.2.3.1- Valor Actual Neto.....	113
8.2.3.2- Tasa Interna de Retorno.....	114
8.2.3.3- Relación Beneficio-Costo.....	115
8.2.4- Análisis de sensibilidad.....	115
8.3- Conclusiones.....	117

Capítulo IX.- Conclusiones generales

118

Referencias

121

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1- Propiedades físicas del hidrógeno.....	8
Tabla 2.2- Estimación del consumo de hidrógeno del ECOVIA a distintos regímenes de trabajo.....	9
Tabla 2.3- Costo del hidrógeno grado 5 en PRAXAIR.....	10
Tabla 2.4- Estimación del costo de la puesta en marcha del ECOVIA a distintos regímenes de trabajo.....	10
Tabla 2.5- Consumo de hidrógeno en la UNAM.....	11
Tabla 3.1- Sistemas de inyección de combustible en un MCIH.....	17
Tabla 3.2- Tipos más comunes de celdas de combustible.....	22
Tabla 3.3- Diferentes propuestas de vehículos con tecnologías de propulsión a base de hidrógeno.....	24
Tabla 4.1- Costos del almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos.....	37
Tabla 4.2- Costos unitarios y vida útil de los formatos de almacenamiento de H ₂	39
Tabla 5.1- Métodos de producción de hidrógeno que emplean tecnologías de procesamiento de combustibles.....	49
Tabla 5.2- Métodos de producción de hidrógeno que emplean procesos no reformadores. Producción a partir de biomasa.....	53
Tabla 5.3- Métodos de producción de hidrógeno que emplean procesos no reformadores. Producción a partir de agua.....	56
Tabla 5.4- Costos de producción de hidrógeno de algunos de los métodos más representativos.....	61
Tabla 5.5- Producción estándar promedio y características del hidrógeno.....	63
Tabla 6.1- Producción y tasas de producción de bio-hidrógeno a base de carbohidratos puros a través de fermentaciones oscuras intermitentes.....	71
Tabla 6.2- Producción y tasas de producción de bio-hidrógeno a base de carbohidratos puros a través de fermentaciones oscuras continuas.....	72
Tabla 6.3- Producción y tasas de producción de bio-hidrógeno a base de diversos desperdicios materiales a través de fermentación oscura.....	73

Tabla 6.4- Características físicas de los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.....	74
Tabla 6.5- Producción de hidrógeno a través de residuos ganaderos, aguas residuales sintéticas y suero de queso.....	75
Tabla 6.6- Caracterización relativa para la co-fermentación de residuos orgánicos.....	76
Tabla 6.7- Producción y tasas de producción de bio-hidrogeno a través de fermentación oscura – foto-fermentación en secuencia y combinadas.....	77
Tabla 7.1- Número de clientes en los comedores y las barras de alimentos.....	82
Tabla 7.2- Días de servicio en los comedores y las barras de alimentos.....	83
Tabla 7.3- Pago de cuota especial por el servicio de recolección de basura.....	83
Tabla 7.4- Separación de residuos en los comedores y las barras de alimentos.....	84
Tabla 7.5- Estimación de los residuos sólidos orgánicos de los comedores.....	88
Tabla 7.6- Estimación de los residuos orgánicos generados por kilogramo de las frutas y hortalizas incluidas en el cuestionario tipo encuesta.....	88
Tabla 7.7- Estimación de los residuos sólidos orgánicos de las barras de alimentos...	89
Tabla 7.8- Estimación de la producción diaria de excretas de acuerdo a la edad del cerdo.....	90
Tabla 7.9- Estimación de la producción diaria de biosólidos en la PTAR-UNAM.....	90
Tabla 7.10- Parámetros para el cálculo de la producción de hidrógeno a partir de los residuos orgánicos de los comedores y barras de alimentos.....	93
Tabla 7.11- Estimación del contenido de hexosa (glucosa) en los residuos de frutas y hortalizas.....	96
Tabla 8.1- Comparación entre distintas tecnologías de separación y purificación de hidrógeno.....	106
Tabla 8.2- Criterios para la selección del formato de almacenamiento de hidrógeno...	106
Tabla 8.3- Estimación de la capacidad de producción de hidrógeno.....	108
Tabla 8.4- Estimación de la inversión inicial para el proyecto.....	111
Tabla 8.5- Estimación de los costos anuales de la producción de bio-hidrógeno.....	112
Tabla 8.6- Análisis de sensibilidad.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1- ECOVIA Vehículo Ecológico Multifuncional.....	6
Figura 2.2- Celda de combustible del vehículo ECOVIA.....	7
Figura 3.1- Hydrogen 7 concebido por BMW, motor bivalente capaz de funcionar con hidrógeno y gasolina.....	15
Figura 3.2- Motor de combustión interna alimentado con hidrógeno.....	16
Figura 3.3- Válvula de liberación de presión.....	17
Figura 3.4- Autobús propulsado con la mezcla comercial Hythane.....	19
Figura 3.5- BMW Hydrogen 7.....	19
Figura 3.6- Esquema básico de un vehículo equipado con celdas de combustible.....	23
Figura 4.1- Detalle de un tanque de almacenamiento de hidrógeno líquido.....	33
Figura 4.2- Sistema escalable de almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos con capacidad de 10 kg.....	35
Figura 4.3 – Almacenamiento de hidrógeno en nanotubos de carbono.....	38
Figura 4.4– Estación de abastecimiento de hidrógeno en Alemania.....	39
Figura 4.5- Estación de abastecimiento de hidrógeno comprimido de la Corporación japonesa Osaka Gas y módulo compacto de producción de hidrógeno por reformación HYSERVE.....	40
Figura 4.6- Estación de abastecimiento de hidrógeno comprimido en el Estado de California, Estados Unidos.....	41
Figura 4.7- Rango de operación de los tanques de hidrógeno comprimido de 70 MPa.....	42
Figura 4.8- Sistemas de suministro utilizados en las estaciones de abastecimiento de hidrógeno en forma de gas comprimido.....	43
Figura 4.9- Secuencia típica del proceso de recarga con hidrógeno comprimido.....	44
Figura 4.10- Estación de abastecimiento de hidrógeno líquido en el aeropuerto de Munich....	44
Figura 4.11- Cuarto de los cilindros de almacenamiento de hidrógeno con una ventilación adecuada.....	45
Figura 5.1- Esquemas de producción centralizada y descentralizada de hidrógeno.....	47
Figura 5.2- Diversas configuraciones de los sistemas de separación y purificación de H ₂	58

<i>Figura 5.3- Producción de hidrógeno a nivel mundial.....</i>	62
<i>Figura 5.4 – Consumo de hidrógeno a nivel mundial.....</i>	62
<i>Figura 5.5- Plantas instaladas de producción de hidrógeno en México.....</i>	63
<i>Figura 6.1- Diagrama de la producción de bio-hidrógeno utilizando almidón y celulosa tomados de los desechos de la agricultura y de las aguas residuales de la industria alimenticia.....</i>	66
<i>Figura 7.1- Cifra promedio de clientes en comedores y barras de alimentos.....</i>	83
<i>Figura 7.2- Pago de cuota especial por el servicio de recolección de basura.....</i>	83
<i>Figura 7.3- Separación de residuos en los comedores y las barras de alimentos.....</i>	84
<i>Figura 7.4- Separación de los residuos sólidos en algunos comedores.....</i>	84
<i>Figura 7.5- La señalización de los contenedores parece no solucionar el problema de la separación de residuos.....</i>	85
<i>Figura 7.6- Clientes y personal de los establecimientos contribuyen a la inapropiada separación de los residuos.....</i>	85
<i>Figura 7.7- Conocimiento de los beneficios derivados de la separación de los residuos.....</i>	85
<i>Figura 7.8- Eficiencia del actual sistema de separación de residuos.....</i>	86
<i>Figura 7.9- Sugerencias para el mejoramiento del sistema de separación de residuos.....</i>	86
<i>Figura 7.10- Posturas en torno a la utilización de combustibles producidos a partir de residuos.....</i>	87
<i>Figura 7.11- Disposición de los residuos forestales.....</i>	91
<i>Figura 7.12- Caos en el manejo de residuos sólidos.....</i>	91
<i>Figura 7.13- Saturación de los contenedores por residuos sólidos inorgánicos.....</i>	92
<i>Figura 7.14- Presencia de los denominados pepenadores o recuperadores.....</i>	93
<i>Figura 8.1- Diagrama de flujo del proceso de producción de hidrógeno mediante la técnica de fermentación oscura de residuos orgánicos.....</i>	101
<i>Figura 8.2- Opciones para la ubicación de la planta de producción de hidrógeno.....</i>	109
<i>Figura 8.3- Ciclo del carbono.....</i>	110
<i>Figura 8.4- Resultados gráficos del análisis de sensibilidad.....</i>	117
<i>Figura 9.1- Distribución del hidrógeno producido entre vehículos ECOVIA.....</i>	119

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

RESUMEN

El proyecto ECOVIA Vehículo Ecológico Multifuncional se desprendió de una de las seis líneas de investigación del Macroproyecto La Ciudad Universitaria y la Energía cuyo objetivo central es transformar a la Ciudad Universitaria (C.U.) en un modelo de uso eficiente de la energía.

El ECOVIA será un automóvil compacto híbrido, el primero a nivel nacional, que funcionará con baterías y celdas de combustible alimentadas con hidrógeno (H_2), un combustible no contaminante. El consumo de hidrógeno de la celda de combustible que se encargará de generar la energía eléctrica que alimentará al motor del ECOVIA es de 120 slpm (siglas en inglés de litros estándar por minuto), que equivalen a 10.6587 gramos de hidrógeno por minuto. Esto significa que mantener funcionando al vehículo ECOVIA ocho horas diarias durante un año (considerando 217 días efectivos, es decir, 1,736 horas en total), requeriría de poco más de una tonelada de hidrógeno (1.1102 Ton de H_2).

Satisfacer la demanda anual de hidrógeno del ECOVIA por vías comerciales supondría un desembolso superior a los 10.4 millones de pesos, cantidad que representa más de dos veces el financiamiento total destinado al proyecto ECOVIA. Por ello, es indispensable hallar una fuente alternativa, económica y tecnológicamente viable, para el abastecimiento del combustible.

Una opción son los denominados procesos biológicos para la producción de hidrógeno, donde el método conocido como fermentación oscura abre la posibilidad de aprovechar y explotar distintos residuos orgánicos como materia prima para la generación de este combustible. En este sentido, se evaluó el potencial de diversos residuos orgánicos generados en C.U. para determinar si se lograría cubrir la futura demanda de hidrógeno del automóvil ECOVIA.

Mediante una investigación de campo, se obtuvo un estimado de la producción diaria de residuos orgánicos en C.U., considerando los residuos de los establecimientos que expenden alimentos (16 comedores y 6 barras de alimentos), los de una granja porcina de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, y los fangos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. El valor estimado fue de 46.18 Ton de residuos orgánicos por día.

Consultando diferentes artículos en publicaciones especializadas de carácter internacional, se establecieron las tasas de conversión de hidrógeno para este tipo de insumos. De esta manera, la producción diaria estimada de hidrógeno utilizando las 46.18 Ton de residuos orgánicos resultó ser de 14.2678 kg de hidrógeno sin purificar, o bien de 9.98746 kg de hidrógeno con el 99.999% de pureza, tal como lo exige la celda de combustible del ECOVIA.

Finalmente, se esbozaron los lineamientos generales de un proyecto que concibe la instalación de una planta para la producción de bio-hidrógeno a través de la técnica de fermentación oscura de los residuos orgánicos generados en C.U. La propuesta, factible en términos técnicos y, de acuerdo con distintos métodos de evaluación financiera, económicos, se estimó que requeriría cerca de 5.6 millones de pesos a manera de inversión inicial, pronosticando que se recuperarían en el transcurso del primer año de la puesta en marcha formal de la planta de producción de bio-hidrógeno.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Para muchos la Revolución Industrial marcó el inicio de la severa crisis ambiental que en la actualidad se padece, pues introdujo en la industria el modelo de producción en serie que permitió el abaratamiento de los costos, alentando el surgimiento de una sociedad consumista cuya voracidad ha perjudicado sensiblemente y en todos los aspectos al entorno natural.

La notoria concentración del sector productivo en los asentamientos urbanos ha intensificado los flujos migratorios hacia estas regiones, ocasionado un vertiginoso crecimiento en su número de habitantes cuya calidad de vida se ve seriamente deteriorada, entre muchos otros factores, por la contaminación del suelo, agua y aire que originan los desechos materiales producidos en cada una de las actividades cotidianas, y cuyo costo económico y social es muy alto.

Día a día, las fuentes de contaminación y la cantidad de desechos materiales se incrementan de forma alarmante en particular dentro de ciudades, debido a que la oferta de bienes y servicios es más amplia sumado a que el poder adquisitivo o de consumo de sus habitantes es relativamente alto, convirtiéndolo en un gran productor de desechos. Las miles de toneladas de desperdicios generados son transportadas a sitios destinados a la captación de estos materiales, sitios que devoran y contaminan áreas cada vez más extensas de suelos que podrían ser mejor aprovechadas.

La contaminación del agua por desechos domésticos, agrícolas, ganaderos, pesqueros e industriales también se ha agudizado con el crecimiento demográfico, transformando millones de metros cúbicos de agua potable en aguas residuales.

Las aguas residuales arrastran infinidad de contaminantes, desde insecticidas, detergentes, jabones, grasas, heces fecales y materia orgánica; las pocas plantas de tratamiento de aguas residuales permiten remover un porcentaje importante de estas sustancias acumulándolas en una especie de lodo o fango. La materia fecal de distintas especies de ganado constituye una magnífica opción como abono natural para las tierras si se utiliza oportunamente, sin embargo, con frecuencia es desechada y arrojada a los cuerpos de agua.

Además del enorme problema que representan los desechos materiales, también es preocupante la calidad del aire en los centros urbanos. Miles de toneladas de partículas emanadas a consecuencia, principalmente, de la actividad industrial y de la combustión en los vehículos automotores, desencadenan graves consecuencias para todo el ecosistema.

La contaminación del aire incide fundamentalmente en tres aspectos, el primero relacionado con la lluvia ácida que lesiona flora, fauna y construcciones; el segundo consiste en el debilitamiento de la capa de ozono que se traduce en el arribo directo de la radiación ultravioleta; y por último, en el incremento de la concentración de dióxido

de carbono y otros gases que provocan el aumento de la temperatura atmosférica a consecuencia del denominado efecto invernadero.

El efecto invernadero se manifiesta con la retención del calor, tanto del que proviene del sol como del que se refracta del suelo, derivada de la presencia de cantidades inusuales de ciertos gases, como dióxido de carbono, que actúan como un condensador de calor e impiden que la energía calorífica se disipe hacia capas más elevadas de la atmósfera.

Las emisiones de gases contaminantes son el principal inconveniente asociado a la quema de combustibles de origen fósil (gasolina, diesel, combustóleo, gas, etcétera), que son empleados de forma intensiva en varios sectores, como el industrial, el de servicios y el de transportes. Es precisamente este último el que aporta más de la mitad de los desechos contaminantes de la combustión de hidrocarburos que recibe la atmósfera, dado que sin cesar aumenta la distancia y frecuencia de los traslados de personas y bienes.

Partículas de carbono, óxidos de nitrógeno, azufre, plomo y dióxido y monóxido de carbono son algunas de las sustancias que emanan de millones de vehículos automotores que emplean combustibles obtenidos del petróleo, y que al reaccionar con los gases de la atmósfera por acción de la luz solar, producen compuestos que son aún más nocivos para todas las formas de vida.

En este contexto, es indudable la necesidad de adoptar medidas tendientes a mitigar el problema de la contaminación atmosférica, un asunto complejo donde convergen diversos factores, como la cantidad, calidad y tipo de los combustibles, estado y funcionamiento de los equipos de combustión y el control de sus emisiones. Con respecto al tipo de combustibles, la demanda ha sido cubierta casi en su totalidad por fuentes no renovables, en especial los efímeros recursos de origen fósil, con todos los devastadores efectos que propicia su consumo desmedido.

La comunidad internacional encara la impostergable tarea de encontrar combustibles alternativos, con el perfil para remplazar a los energéticos fósiles, que sea posible obtenerlos a partir de fuentes renovables, apoyándose en una metodología sustentable y que contribuyan a disminuir las emisiones contaminantes, en particular los gases de efecto invernadero.

Desde hace aproximadamente 40 años, grupos ambientalistas y distintas organizaciones industriales han emprendido campañas encaminadas a fomentar el uso de hidrógeno a manera de combustible alternativo, ya que podría ser un importante aliado en la batalla contra el cambio climático.

El hidrógeno, además de que puede ser producido mediante un amplio repertorio de fuentes y recursos renovables de forma sustentable y con mínimas afectaciones ambientales, tiene el potencial para convertirse en un combustible de cero emisiones contaminantes gracias a unos dispositivos generadores de energía eléctrica llamados celdas de combustible o celdas electrógenas.

Interesados en su contenido energético casi 300% superior al de los combustibles fósiles ordinarios, numerosos programas y proyectos locales e internacionales están orientados a evaluar y promover al hidrógeno como un sustituto amigable con el ecosistema de los combustibles tradicionales, particularmente en los medios de transporte.

Uno de estos proyectos es el Vehículo Ecológico Multifuncional ECOVIA de la Universidad Nacional Autónoma de México, un automóvil compacto híbrido que funcionará con celdas de combustible alimentadas con hidrógeno y una batería que podrá conectarse a una toma de corriente para recargarse.

No obstante, la eficiencia y precio de las tecnologías asociadas a su aprovechamiento, así como lo relativamente costoso de los métodos para producirlo y problemas relacionados con su almacenamiento a gran escala, en contraste con los combustibles convencionales, son algunos de los factores que han obstaculizado la utilización masiva del hidrógeno como un combustible.

A la fecha, el hidrógeno también podría ser catalogado como un combustible de origen fósil, dado que los métodos usuales para producirlo, reformación y gasificación, utilizan hidrocarburos fósiles como principales insumos, desde gas natural hasta carbón que, además de ser recursos no renovables, tienen las repercusiones ambientales antes señaladas.

La electrólisis del agua pudiera ser una de las tecnología más limpias para producir hidrógeno, sin embargo tiene que efectuarse en condiciones donde la electricidad sea muy económica, debido a que el consumo de energía eléctrica representa por lo menos el 80% del costo total de la producción de hidrógeno; sumado a la condición de que el agua a utilizar tiene que desmineralizarse para evitar tanto la formación de depósitos en los electrodos y la corrosión. Asimismo debe tomarse en cuenta la naturaleza de la fuente de donde proviene la energía eléctrica, si obtiene a partir de recursos altamente contaminantes, las secuelas negativas persisten.

La producción biológica de hidrógeno es una opción viable a los métodos comunes para obtener hidrógeno. Acorde con las políticas de desarrollo sustentable, la producción de bio-hidrógeno a partir de fuentes renovables es factible por medio de microorganismos que actúan sobre materia no tóxica y de alto contenido de carbohidratos, desintegrándola y sintetizando hidrógeno durante las reacciones químicas de conversión. Es aquí donde los desechos sólidos y aguas residuales adquieren otra dimensión, al ser vistos como materia prima útil para la generación de hidrógeno por la ruta biológica.

Uno de los métodos biológicos para producir hidrógeno es la fermentación oscura. En términos generales, es un proceso que sucede bajo condiciones anaerobias controladas donde microorganismos degradan la materia orgánica, particularmente aquella con alto contenido de carbohidratos, generando una mezcla de gases conformada principalmente por hidrógeno y dióxido de carbono. Residuos materiales de distintas

clases a menudo poseen una concentración óptima de carbohidratos y otras sustancias que son del agrado de los microorganismos productores de hidrógeno.

Los residuos orgánicos municipales, ganaderos y los fangos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, son solo algunos de los materiales de desecho susceptibles de ser empleados como insumos para la producción de hidrógeno a través de la técnica de fermentación oscura, emergiendo como recursos para la generación de energía a bajo costo con el substancial beneficio agregado del tratamiento y reutilización de los desechos materiales que son ya parte inseparable del paisaje urbano.

Ciudad Universitaria, al ser considerada por demógrafos como una ciudad de tamaño medio, y donde convergen a diario más de 250 mil personas, es un polo urbano en el que la problemática de los residuos materiales, orgánicos e inorgánicos, comienza a ser preocupante. Por tal motivo, el implementar medidas para el tratamiento integral y aprovechamiento energético de los desechos, como los bio-procesos para producir hidrógeno a partir de residuos, representa una opción para satisfacer de forma sustentable la demanda de energía y contribuir significativamente a la reducción y manejo apropiado de los volúmenes crecientes de residuos materiales.

El Objetivo General del presente trabajo consiste en *estimar, mediante una investigación de campo, la cantidad de residuos orgánicos que se generan diariamente en Ciudad Universitaria, y determinar su potencial energético desde el punto de vista de la producción de hidrógeno a través del método biológico conocido como fermentación oscura, con el propósito de definir si es factible cubrir por esta vía la futura demanda de este combustible por parte del Vehículo Ecológico Multifuncional ECOVIA.*

Los Objetivos Específicos son:

- *Estimar la futura demanda de hidrógeno del proyecto ECOVIA, y el costo que representaría satisfacerla por los canales comerciales.*
- *Conocer las principales tecnologías que son empleadas en los medios de transporte impulsados por hidrógeno y la situación de éstos en el mercado nacional e internacional.*
- *Investigar entorno a los formatos existentes para el almacenamiento de hidrógeno y a las metodologías propuestas para su abastecimiento a los medios de transporte.*
- *Realizar un análisis de las técnicas actualmente disponibles para producir hidrógeno, conocer sus ventajas y desventajas fundamentales.*
- *Indagar en relación a los procesos biológicos para producir hidrógeno a partir de residuos orgánicos, particularmente el método conocido como fermentación oscura.*
- *Determinar cuales de los residuos orgánicos susceptibles de ser empleados como materia prima para la producción de hidrógeno mediante fermentación oscura están disponibles en Ciudad Universitaria.*
- *Contar con un estimado de la cantidad que se genera diariamente de dichos residuos, y de la producción de hidrógeno que se alcanzaría al aprovecharlos como insumos para el citado método.*
- *Especificar los aspectos técnicos esenciales para la producción de hidrógeno por medio de la fermentación oscura de residuos orgánicos; estimar la inversión inicial necesaria y examinar su viabilidad financiera.*

2.1- Macroproyecto La Ciudad Universitaria y la Energía

Encabezado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Macroproyecto La Ciudad Universitaria y la Energía es un multifacético plan de acciones encaminadas a desarrollar infraestructura para el ahorro de energía y dispositivos que utilicen fuentes alternas, es decir, el objetivo central es transformar a la Ciudad Universitaria (C.U.) en un modelo de uso eficiente de la energía y ser un ejemplo a otras ciudades del país (López, 2008).

A través de 23 proyectos agrupados en seis líneas de trabajo transdisciplinario, distintos grupos de investigación han concebido y desarrollado instalaciones para ahorrar energía, así como equipos que utilizan fuentes de energía renovable como la solar, la biomasa y la eólica; mismos que permitirán aprovechar, al máximo posible, la energía que más se consume en C.U., la energía eléctrica. El empleo de fuentes alternas de energía, además de reducir los gastos por consumo de energía eléctrica, tiene un impacto ambiental bastante favorable.

Los seis ejes principales de investigación del Macroproyecto son (López, 2008):

- **Utilización y ahorro de energía.**

Desde hace tiempo se han realizado estudios de la eficiencia energética en C.U., gracias a los cuales ha sido posible conocer y proyectar su comportamiento energético.

- **Energía solar.**

Utilizar esta energía en aplicaciones concretas, como el calentamiento de agua de albercas y la generación fotovoltaica de electricidad.

- **Energía de biomasa.**

Intenta explotar el potencial de la biomasa para generar energía eléctrica, biogás y también hidrógeno.

- **Diagnóstico y ahorro de energía.**

Realizar un análisis del consumo actual y de los patrones de utilización de la energía, para sugerir medidas que permitan su uso eficiente.

- **Cultura energética.**

Orientada a la identificación de hábitos y carencias de información relacionados con el uso de la energía.

- **Energía del hidrógeno.**

Su objetivo es aprovechar esta sustancia como vector energético y realizar investigación básica.

En el rubro de Energía del hidrógeno está incluido un proyecto denominado ECOVIA Vehículo Ecológico Multifuncional, cuya meta consiste en crear el primer auto híbrido mexicano que funcione con energía eléctrica (baterías) y celdas de combustible alimentadas con hidrógeno (H₂), que es un combustible no contaminante.

2.2- Proyecto ECOVIA Vehículo Ecológico Multifuncional

El proyecto ECOVIA Vehículo Ecológico Multifuncional tiene la finalidad de concebir un automóvil ecológico para C.U. (Figura 2.1), que apoye en labores de auxilio vial, servicio médico, vigilancia, traslado de personas y reparto de correo y paquetería ligera; cada una de estas tareas las podrá realizar en función de los accesorios que porte.



*Figura 2.1- ECOVIA Vehículo Ecológico Multifuncional
(IP, 2008)*

Los objetivos particulares del proyecto ECOVIA son los siguientes:

- Diseñar un vehículo sustentable en función de las necesidades de los usuarios y congruente con el contexto universitario.
- Desarrollar un vehículo que sea viable técnica, económica, normativa, humana y ambientalmente dentro de la UNAM.
- Construir un vehículo cuyo funcionamiento esté basado en el hidrógeno y las celdas de combustible, y también evaluar su funcionamiento mediante pruebas dentro de C.U.

- Crear un manual que contenga un modelo a seguir en cuanto a la viabilidad, aprovechamiento de energía, nuevas formas de vida y vehículos de cero emisiones de contaminantes.

2.2.1-Breve descripción técnica del vehículo ECOVIA

El vehículo ECOVIA estará equipado con celdas de combustible tipo PEM (siglas en inglés de Proton Exchange Membrane, membrana de intercambio protónico), que utilizan el hidrógeno para generar la energía eléctrica que demanda el motor.

Adicionalmente, el ECOVIA contará con una batería que almacenará la energía eléctrica producida en las celdas de combustible cuando el automóvil no se encuentre en movimiento, y además podrá conectarse a una toma de corriente para recargarse cuando se agote el hidrógeno.

Dos tanques de alta presión se encargarán de almacenar 1.0 kg de hidrogeno, 0.5 kg cada tanque, en forma de gas comprimido a 6,000 psi (41.37 MPa). La celda de combustible del ECOVIA funciona correctamente con hidrógeno grado 5 de pureza mayor o igual al 99.999%.

En un principio, el ECOVIA se desplazaría por medio de un motor eléctrico que consumiría el hidrógeno contenido en ambos tanques, 1.0 kg de hidrógeno, en un recorrido de 1.5 horas a una velocidad de 40 km/h. Sin embargo, recientemente el Mtr. Gerardo Arzate Pérez, coordinador y jefe de diseño del proyecto, informó que han cambiado de motor y que no disponen de sus curvas de operación, por lo que no se sabe aún cual será el nuevo rendimiento.

Por otro lado, sí se conoce el consumo de hidrógeno de la celda de combustible que tendrá el ECOVIA (Figura 2.2), que en condiciones óptimas de operación constante (120 kPa) es de 120 slpm, slpm son las iniciales en inglés de litros estándares por minuto.



*Figura 2.2- Celda de combustible del vehículo ECOVIA
(IP, 2008)*

2.2.2- Consumo de hidrógeno del ECOVIA

Tomando como referencia el consumo de la celda de combustible que impulsará al ECOVIA, es posible deducir la demanda de hidrógeno de este vehículo en función del tiempo que requiera estar en marcha.

Antes de iniciar los cálculos conviene enlistar algunas de las propiedades más comunes del hidrógeno (Tabla 2.1), que serán de utilidad en etapas posteriores.

Tabla 2.1- Propiedades físicas del hidrógeno
(adaptada de Kirk-Othmer, 2002.)

Propiedad física	Valor
Punto de ebullición a 1 atm	-253 °C
Punto de fusión	-259 °C
Densidad en estado gaseoso a 0 °C y 1 atm	0.08987 kg/m ³
Densidad en estado gaseoso a 21.1 °C y 1 atm	0.0834401 kg/m ³
Densidad en estado líquido a -253 °C	708.0 kg/m ³
Densidad en estado sólido a -259 °C	858.0 kg/m ³

La ecuación de estado de un gas ideal es una expresión que relaciona el número de moles (n) de una masa gaseosa dada con su presión (p), volumen (V) y temperatura absoluta (T):

$$pV = nRT \quad \dots(2.1)$$

El término R es una constante que tiene el mismo valor para todos los gases, razón por la que se le llama Constante Universal de los Gases, y su magnitud numérica es:

$$R = 8.31434 \frac{Pa \cdot m^3}{mol \cdot K} = 0.08205 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \quad \dots(2.2)$$

Pese a que alude a un gas *ideal*, la expresión 2.1 se puede aplicar con muy buena aproximación a cualquier gas *real*, por ejemplo el hidrógeno. De ahí que mediante esta fórmula se puede determinar el número de moles (n) del hidrógeno bajo las condiciones estándar (V= 120 L, p= 0.9869 atm y T= 273 K) que se especifican en el consumo de la celda de combustible del vehículo ECOVIA (120 slpm), es decir:

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{0.9869atm \cdot 120L}{0.08205 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \cdot 273K} = 5.28704 molH_2 \quad \dots(2.3)$$

El concepto mol indica la cantidad de materia que contiene 6.02214×10^{23} partículas, número de Avogadro, y su masa en gramos corresponde al peso atómico o peso formular de la sustancia en una (unidad de masa atómica). Por lo tanto, una mol de hidrógeno diatómico (H₂) es igual a:

$$1molH_2 = 2 \cdot 1.00797g = 2.016 \frac{g}{mol} \quad \dots(2.4)$$

Finalmente, el consumo de hidrógeno de 120 slpm de la celda de combustible del automóvil ECOVIA es equivalente a:

$$\text{Consumo}_{\text{ECOVIA}} = 5.28704 \frac{\text{molH}_2}{\text{min}} \cdot 2.016 \frac{\text{g}}{\text{molH}_2} = 10.6587 \frac{\text{gH}_2}{\text{min}} \quad \dots(2.5)$$

Partiendo del dato anterior resulta fácil deducir la cantidad de hidrógeno necesaria para mantener en funcionamiento al vehículo ECOVIA a diferentes periodos de tiempo, justo como se aprecia en la Tabla 2.2. Cabe aclarar que los 217 días que representan un año, se calcularon con base en el Calendario Escolar del Plan Anual de la UNAM, descontando sábados, domingos, vacaciones administrativas, días feriados y de asueto académico.

Tabla 2.2- Estimación del consumo de hidrógeno del ECOVIA a distintos regímenes de trabajo

Periodo de funcionamiento continuo	Cantidad de hidrógeno kg
1 minuto	0.010658
30 minutos	0.31976
1 hora (60 minutos)	0.63952
2 horas	1.27904
3 horas	1.91856
4 horas	2.55808
5 horas	3.19761
6 horas	3.87313
7 horas	4.47665
8 horas	5.11617
9 horas	5.75569
10 horas	6.39522
11 horas	7.03474
12 horas	7.67426
24 horas	15.3485
1 semana (8 horas por día/5 días)	25.5808
1 mes (8 horas por día/20 días)	102.3235
1 año (8 horas por día/217 días)	1,110.2101

2.2.3- Costo comercial del hidrógeno y su impacto en el consumo del ECOVIA

En México existen algunas compañías privadas que distribuyen de forma comercial una amplia variedad de sustancias químicas para diferentes propósitos. PRAXAIR es el nombre de una de ellas, y que dentro de su repertorio de productos y servicios ofrece la venta de hidrógeno diatómico como un gas especial.

Consultada a finales del año 2008, la cotización de PRAXAIR del hidrógeno grado 5 al 99.999% de pureza requerido para poner en marcha al ECOVIA, aparece desglosada en la Tabla 2.3.

Dado que el costo por 6 m³ (≈0.5 kg) de hidrógeno grado 5 al 99.999% de pureza con PRAXAIR es de \$4,688.435 pesos, excluyendo los cargos adicionales estipulados por la misma compañía, entonces el costo de los 10.6587 gramos de hidrógeno por minuto que representa el consumo del vehículo ECOVIA sería de:

$$Consumo_{Costo-PRAXAIR} = \frac{\$4,688.435}{500gH_2} \cdot 10.6587 \frac{gH_2}{min} = \frac{\$99.9452}{min} \quad \dots(2.6)$$

Tabla 2.3- Costo del hidrógeno grado 5 en PRAXAIR (cifras del 2008)

Producto	Costo (moneda nacional)
6 m ³ (0.5 kg) de H ₂ grado 5.0 alta pureza	\$4,076.90 + IVA (\$4,688.435)
Cargos adicionales	
Servicio de entrega	\$499.10 + IVA (por evento)
Renta mensual del cilindro	\$137.30 + IVA (por cada cilindro)
Mantenimiento anual del cilindro	\$249.50 + IVA (una vez por año por cada cilindro)
Depósito en garantía por cada cilindro (se recupera al devolver el cilindro)	\$3,400.0

Si esta cifra se traslada a la Tabla 2.2 se obtiene el gasto, sin contemplar un muy probable efecto inflacionario en los precios, que implicaría el funcionamiento del automóvil ECOVIA, tal como se observa en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4- Estimación del costo de la puesta en marcha del ECOVIA a distintos regímenes de trabajo

Periodo de funcionamiento continuo	Cantidad de hidrógeno kg	Costo (moneda nacional)
1 minuto	0.010658	\$99.9452
30 minutos	0.31976	\$2,998.36
1 hora	0.63952	\$5,996.71
2 horas	1.27904	\$11,993.42
3 horas	1.91856	\$17,990.14
4 horas	2.55808	\$23,986.85
5 horas	3.19761	\$29,983.57
6 horas	3.87313	\$35,980.28
7 horas	4.47665	\$41,977.00
8 horas	5.11617	\$47,973.71
9 horas	5.75569	\$53,970.43
10 horas	6.39522	\$59,967.14
11 horas	7.03474	\$65,963.86
12 horas	7.67426	\$71,960.57
24 horas	15.3485	\$143,921.15
1 semana (8 horas por día/5 días)	25.5808	\$239,868.58
1 mes (8 horas por día/20 días)	102.3235	\$959,474.34
1 año (8 horas por día/217 días)	1,110.2101	\$10'410,296.64

De acuerdo con las cifras obtenidas, el hidrógeno necesario durante un año (8 horas de funcionamiento continuo por día a lo largo de 217 días efectivos) se traduce en poco más de 10.4 millones de pesos, es decir, arriba de 2.5 veces el financiamiento total del proyecto ECOVIA Vehículo Ecológico Multifuncional, que suma 4 millones de pesos (Guzmán, 2008).

Una visión a futuro plantea la posibilidad de sustituir la flotilla de vehículos convencionales de vigilancia de la UNAM, alrededor de 150, por automóviles ECOVIA. Si bien es cierto lo que afirma el Mtr. Arzate en el sentido de que de esta forma podría evitarse la compra de unidades a las empresas transnacionales (Guzmán, 2008), también es cierto que si no se encuentra una ruta económicamente viable para satisfacer los requerimientos de hidrógeno del ECOVIA, el proyecto no tendrá ni la subsistencia ni el alcance esperados.

2.3- Consumo de hidrógeno en Facultades e Institutos de la UNAM

En sus labores docentes y de investigación, ciertas Facultades e Institutos de la UNAM utilizan volúmenes importantes de hidrógeno con distinto grado de pureza, mismo que adquieren a través de PRAXAIR y de otros proveedores comerciales. En la Tabla 2.5 se detalla el consumo de hidrógeno en diversas entidades de la UNAM registrado a lo largo del año 2008.

Tabla 2.5- Consumo de hidrógeno en la UNAM (cifras del 2008)

Facultad o Instituto	Hidrógeno cromatográfico m ³	Hidrógeno 4.5 m ³	Hidrógeno 4.5 cero m ³	Hidrógeno 5.0 ultra alta pureza m ³
Facultad de Química	24	61		23
Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia				5
Facultad de Medicina				7
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología			5	
Instituto de Geología				5
Instituto de Ingeniería	6			
Instituto de Química				6
Otros				34
Total	30	61	5	80

Estimado del consumo anual de hidrógeno = 176 m³ (≈14.69 kg)

El consumo anual de hidrógeno en la UNAM es muy significativo (176 m³ de H₂), en particular el de grado 5.0 de alta pureza, idéntico al que empleará la celda de combustible del automóvil ECOVIA, dado que representa casi el 50% del total.

Aún cuando es evidente que los precios del hidrógeno varían dependiendo de su nivel de pureza, y se trate de aprovechar al máximo, el gasto derivado de su compra es una cantidad importante que repercute en los presupuestos de las instituciones, pese a que en muchas ocasiones lo emplean en volúmenes inferiores a los que en realidad precisan. Por tal motivo, sería oportuno que la propia UNAM buscara otras opciones que le permitan cubrir su demanda interna de hidrógeno con mayor solvencia.

2.4- Conclusiones

La Universidad Nacional Autónoma de México, a la par de otras instituciones nacionales e internacionales, está desarrollando propuestas que fomenten el uso eficiente de la energía así como el empleo de fuentes alternas, dando forma al macroproyecto denominado La Ciudad Universitaria y la Energía. Una de las líneas de investigación del macroproyecto es la Energía del hidrógeno, y su objetivo consiste en aprovechar esta sustancia como vector energético mediante varios proyectos, entre los que se encuentra uno llamado ECOVIA Vehículo Ecológico Multifuncional.

La meta que persigue el proyecto ECOVIA es la creación de un automóvil híbrido que funcione apoyado en baterías y celdas de combustible alimentadas con hidrógeno. Para tal efecto, el ECOVIA estará equipado con dos tanques para el almacenamiento de hidrógeno comprimido, cada uno con una capacidad de 0.5 kg de hidrógeno a una presión de 6,000 psi. A fin de que la celda de combustible trabaje apropiadamente, el hidrógeno debe ser de pureza mayor o igual al 99.999%.

Debido a que aún no se ha seleccionado el motor que impulsará al ECOVIA, se desconoce el cual será su rendimiento por unidad de combustible; sin embargo, tomando como punto de partida el consumo de la celda de combustible es posible hacer un cálculo de la futura demanda de hidrógeno del vehículo.

El consumo de la celda de combustible que se instalará en el ECOVIA es de 120 slpm de H₂, que se traducen en 10.6587 gH₂/min. Por lo tanto, para 1 hora de funcionamiento continuo del automóvil se requerirían 0.63952 kg de H₂; para 8 horas, 5.11617 kg de H₂; y para un año (217 días) considerando 8 horas por día, se necesitarían 1,110.2101 kg de H₂, es decir, más de una tonelada de hidrógeno.

En el mercado, el costo de 0.5 kg de hidrógeno grado 5 de alta pureza es de \$4,688.435 pesos, sin tomar en cuenta una larga lista de cargos adicionales que establece cada compañía. Esto significa que cubrir la demanda anual de hidrógeno del ECOVIA a través de proveedores comerciales representaría un gasto de alrededor de 10.4 millones de pesos, suponiendo que no se den incrementos en los precios.

Uno de los objetivos particulares del proyecto ECOVIA supone el desarrollo de un vehículo que sea viable técnica, normativa, humana, ambiental y económicamente dentro de la UNAM, y es en el aspecto económico donde el abastecimiento del hidrógeno impactaría de manera directa. Si para otorgar un financiamiento de 4 millones de pesos al proyecto ECOVIA la UNAM debió realizar un esfuerzo mayúsculo, el destinar más de 10 millones de pesos por año para la adquisición del hidrógeno sería imposible en las circunstancias financieras actuales. Por otra parte, distintas Facultades e Institutos de la UNAM emplean de forma regular cantidades sustanciales de hidrógeno, tan sólo en el año 2008 se registró la compra de al menos 176 m³ de H₂, principalmente de grado 5 de alta pureza. El gasto derivado de este consumo merma los ajustados presupuestos de las dependencias que requieren el hidrógeno.

Esta problemática, en conjunto, plantea la necesidad de idear y explorar nuevas estrategias que permitan obtener el hidrógeno de una manera sustentable y, sobre todo, asequible en términos económicos.

3.1- Motor de combustión interna alimentado con hidrógeno***3.1.1- Antecedentes***

El primer intento por concebir un motor que usara hidrógeno data del año 1820, plasmado en un artículo titulado "Sobre la aplicación de gas hidrógeno para producir potencia mecánica en maquinaria", obra de un Reverendo inglés de nombre W. Cecil (Lanz y col., 2001). Inspirado en el así conocido principio de vacío, que atribuye la generación de energía mecánica a una diferencia barométrica, W. Cecil sugirió la utilización de una mezcla de aire e hidrógeno cuya combustión al interior del mecanismo ocasionaba un vacío que, interactuando simultáneamente con la presión atmosférica, provocaba el movimiento de un arreglo de pistones.

Por razones prácticas y técnicas, los motores regidos por el principio de vacío fueron abandonados paulatinamente. Con el paso del tiempo desfilaron un gran número de innovaciones en diseño y selección de materiales con la mira puesta en mejorar el funcionamiento y darle un sentido de utilidad al motor de combustión interna alimentado con hidrógeno (MCIH).

Inicialmente los motores con suministro de hidrógeno se integraron al campo de la aeronáutica espacial en donde, aún hoy en día, son los encargados de proveer la gigantesca fuerza o impulso necesario para el despegue de los artefactos que viajan a otros rincones del Universo; lo anterior evidencia la impresionante potencia que se puede alcanzar con esta clase de maquinaria, consecuencia indiscutible de la excepcionales propiedades del hidrógeno como combustible.

3.1.2- Propiedades de combustibilidad del hidrógeno

Acompañado de oxígeno, el hidrógeno libera bruscamente energía en un MCIH, teniendo esencialmente agua como residuo del proceso. Existen diferencias y semejanzas entre el hidrógeno y el resto de los combustibles tradicionales como el gas natural o la gasolina; el hidrógeno es inflamable en un extenso intervalo de concentraciones y temperaturas, su contenido de energía por unidad de masa supera con creces al de cualquier otro combustible.

Un kilogramo de hidrógeno almacena una energía equivalente a 140.4 MJ en tanto que una porción igual de gasolina posee apenas 48.6 MJ; por unidad de volumen la situación cambia, 8 MJ por litro de hidrógeno en estado líquido contra 32 MJ en un volumen idéntico de gasolina (Pant y Gupta, 2009a), de ahí que, sobre todo en medios de transporte, el almacenamiento del hidrógeno es una tarea complicada.

Las propiedades o características más relevantes del hidrógeno en el papel de combustible son las siguientes:

- **Amplio margen de inflamabilidad**

La inflamabilidad en parte depende del nivel de concentración; el hidrógeno en forma concentrada y aun diluida es altamente inflamable, por encima de otros combustibles, favoreciendo su compatibilidad con los motores de combustión interna (MCI).

- **Baja energía para ignición**

Aproximadamente, una décima parte de la energía necesaria para encender a la gasolina, 0.24 mJ, basta para propiciar la ignición del hidrógeno, 0.02 mJ (Pant y Gupta, 2009a). En el contexto de los MCI, la baja energía para ignición del hidrógeno garantiza, por un lado, el encendido al instante del motor pero también, a causa de la temperatura de diversos componentes o sustancias dentro del motor, la aparición del fenómeno de ignición prematura.

- **Corta distancia de extinción**

Al tener una distancia de extinción menor a la de la gasolina, las llamas del hidrógeno en combustión se hallan más próximas entre sí, apagar una flama del hidrógeno puede resultar más difícil en comparación con una del hidrocarburo mencionado.

- **Elevada temperatura de auto-ignición**

La temperatura de auto-ignición se define como la temperatura mínima indispensable para que, sin la intervención de un medio de ignición externo, un combustible se auto-encienda; en el caso del hidrógeno esta temperatura es de 585 °C, una cifra relativamente elevada que permite un margen de maniobra en parámetros como la razón de compresión de un MCI, dado que al reducir el volumen se incrementa la temperatura; con objeto de evitar la ignición prematura, la temperatura final debe ser inferior a la temperatura de auto-ignición.

- **Alta velocidad de las flamas**

La rapidez con que se desplaza una flama del hidrógeno, hasta 3.46 m/s, llega a ser casi diez veces superior a la registrada por una flama de la gasolina, 0.42 m/s; ello contribuye a mejorar, desde la perspectiva termodinámica, el desempeño de un MCI (Pant y Gupta, 2009a).

- **Fácil dispersión**

El hidrógeno se dispersa en el aire con mayor agilidad que, por ejemplo, la gasolina, esto facilita el conseguir mezclas homogéneas aire/combustible además de ser un punto a su favor en materia de seguridad, sin embargo, su pronta diseminación ocasiona problemas en retención y almacenaje.

- **Baja densidad**

Factor que implica que sea casi imprescindible disponer de un volumen considerable a fin de almacenar una cantidad sustancial de hidrógeno, requerimiento que choca con los cánones tradicionales del diseño automovilístico.

- **Razón aire/combustible**

La proporción aire/combustible química o estequiométricamente correcta para la combustión total del hidrógeno en aire es 34:1 en masa, esto significa que se precisan,

como ejemplo, 34 gramos de aire por cada gramo de hidrógeno, condición que repercute directamente en la repartición natural que sucede al interior de la cámara de combustión. Un combustible que es gas a temperatura y presión ambientales, hidrógeno, se expande un volumen mayor dentro de la cámara que un combustible líquido, como gasolina, lo que obliga a que un menor porcentaje de la cámara pueda ser llenado con aire, panorama que dista del químicamente conveniente.

3.1.3- El hidrógeno en motores de combustión interna

Ciertas propiedades del hidrógeno, como su amplio rango de inflamabilidad y su mínima energía para ignición, lo convierten en un prospecto idóneo para ser usado directamente en MCI de encendido por chispa, que difieren un poco de aquellos que consumen gasolina (Das, 1990; White y col., 2006). Lo anterior hace posible que algunos motores empleen indistintamente hidrógeno o gasolina, como sucede con el motor de combustión interna Hydrogen 7 (Figura 3.1) desarrollado por la firma alemana BMW.



Figura 3.1- Hydrogen 7 concebido por BMW, motor bivalente capaz de funcionar con hidrógeno y gasolina (Clean Energy BMW Group, 2007)

Por el contrario, los motores diesel o de ignición por compresión, al carecer de un sistema de encendido aunado a la elevada temperatura de auto-ignición del hidrógeno, no son los indicados para trabajar directamente con este combustible (Pant y Gupta, 2009a).

3.1.3.1- Funcionamiento del MCIH

Este género de motores (Figura 3.2) aprovechan la fuerza de expansión resultado de quemar hidrógeno gaseoso dentro de las cámaras de combustión de los cilindros, la fuerza provoca el movimiento de unos émbolos, desplazamientos que se traducen, utilizando una biela de por medio, en la rotación de un cigüeñal mecánicamente acoplado a las ruedas del vehículo; la secuencia descrita es prácticamente idéntica a la de un MCI ordinario.

Otra posibilidad es un formato tipo híbrido donde el MCIH proporciona la energía mecánica que es conducida a un generador eléctrico que, por lo regular asistido por un conjunto de baterías o ultracapacitores, suministra la potencia para dar movilidad al automóvil.

Frecuentemente originada por los puntos o lugares muy calientes de la cámara de combustión, la ignición prematura o pre-ignición es la complicación habitual asociada

a los MCIH (Mohammadia y col., 2007), se presenta cuando la mezcla carburante contenida en la cámara de combustión se enciende antes de que lo efectúe la bujía de encendido, derivando en un funcionamiento brusco e ineficiente del motor. Elaborar un rediseño, experimentar con nuevos materiales, perfeccionar el sistema de inyección de combustible así como identificar las fuentes de ignición prematura son los caminos sugeridos para minimizar o erradicar por completo este problema (Das, 1991; White y col., 2006; Mohammadia y col., 2007).



Figura 3.2- Motor de combustión interna alimentado con hidrógeno
(Lanz y col., 2001)

3.1.3.2- Sistemas de inyección de combustible

Se reconocen tres tipos de sistemas de abastecimiento de combustible:

- **Sistema de inyección central**

También conocido como carburador, es el procedimiento más sencillo para suministrar el hidrógeno al MCIH. De entre sus ventajas destaca que no exige un flujo de hidrógeno a tan alta presión como ocurre con otros métodos, sumado a que desde hace tiempo es utilizado en los MCI a gasolina permitiendo que la transición al hidrógeno sea menos laboriosa. No obstante, con este sistema se es más vulnerable a una pre-ignición ocasionando una combustión irregular del carburante (Akansu y col., 2004; Toshio e Hiroyuki, 2007).

- **Sistema de inyección por puerto**

El hidrógeno es suministrado con una presión mayor que en la inyección central directamente en cada puerto de entrada instantes después de haber comenzado el ciclo de admisión. Primero ingresa el aire por separado con la misión de diluir los gases residuales, refrescando el interior de la cámara y con esto reducir la probabilidad y efectos de un encendido prematuro de la mezcla.

- **Sistema de inyección directa**

Tecnológicamente más sofisticada, la técnica de inyección directa actúa durante el ciclo de compresión; mientras la válvula de admisión está cerrada se introduce el combustible eliminando la posibilidad de pre-ignición en el ciclo de admisión, aunque puede suceder en cualquier otro momento. Requiere que el combustible ingrese a mucho mayor presión que en la inyección por puerto, además de que el aire y el hidrógeno se tiene que mezclar en un tiempo brevísimo lo que no garantiza que la mezcla obtenida sea totalmente homogénea, conduciendo a un eventual incremento de las emisiones de óxidos de nitrógeno (Pant y Gupta, 2009a). La potencia generada por un MCIH con este sistema de inyección es aproximadamente 42% superior a la de un

MCIH con inyección central y rebasa en alrededor de 20% a la de un MCI alimentado con gasolina (AL-Garni, 1995; Peschika, 1998; Eichseder y col., 2003; Schafer y col., 2006; White y col., 2006; Galloni y Minutillo, 2007).

En la Tabla 3.1 se ofrece una síntesis de la información concerniente a cada sistema de inyección de combustible.

Tabla 3.1- Sistemas de inyección de combustible en un MCIH
(adaptada de Pant y Gupta, 2009a)

Sistema	Descripción	Ventajas	Desventajas
Inyección central	También conocido como carburador, es el procedimiento más sencillo para suministrar el hidrógeno al MCIH	-Presión de inyección de hidrógeno no muy alta -Es empleado en los MCI a gasolina, simplificando la conversión al hidrógeno	-Bastante vulnerable a una pre-ignición -Combustión irregular del carburante
Inyección por puerto	El hidrógeno es suministrado directamente en cada puerto de entrada instantes después de haber comenzado el ciclo de admisión; el aire y el combustible ingresan por separado	-Reduce la probabilidad y magnitud de los efectos de una pre-ignición	-Mayor presión de inyección de hidrógeno
Inyección directa	Actúa durante el ciclo de compresión, mientras la válvula de admisión está cerrada se introduce el combustible; el aire y el hidrógeno deben mezclarse en un lapso muy breve de tiempo	-Evita la pre-ignición durante el ciclo de admisión -Aumenta sensiblemente la potencia generada por el motor	-Presión de inyección de hidrógeno muy elevada, en comparación con los otros sistemas -La mezcla aire-hidrógeno puede no ser homogénea, desembocando en un aumento de emisiones contaminantes

Otros elementos cruciales para el buen desempeño de un MCIH están vinculados con el mecanismo de encendido y la ventilación. Pese a que el sistema de ignición de los MCI a gasolina funciona para el hidrógeno, se recomienda reemplazar las bujías tradicionales por unas sin puntas de platino y con una velocidad de transferencia de calor superior.

La ventilación es esencial en un MCIH, sobre todo en la cubierta o cárter del cigüeñal donde una porción de hidrógeno que se filtre internamente hasta este sitio puede encenderse con facilidad, dada la baja energía para ignición de este combustible, ocasionando una marcha ruidosa, un súbito ascenso de la presión o fuego al interior del motor. Un tránsito adecuado de aire y una válvula de liberación de presión (Figura 3.3) son de gran ayuda en los MCIH.



Figura 3.3- Válvula de liberación de presión
(adaptada de Lanz y col., 2001)

3.1.3.3- Potencia generada

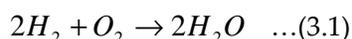
La razón aire/combustible así como el método de inyección de combustible son los actores principales en el cálculo de la potencia teórica máxima de un MCIH. La forma en que operan los sistemas de inyección central y por puerto, mezclando el aire y el hidrógeno previamente a su entrada a la cámara de combustión ocasionando que el volumen de aire no sea el deseado, restringen la magnitud de la potencia máxima de tal manera que equivale al 85% de la desarrollada por un MCI a gasolina; a diferencia de que empleando la inyección directa, el aire y el hidrógeno se mezclan al cerrar la válvula de admisión asegurando que la cámara de combustión se encuentra enteramente llena de aire, la potencia teórica máxima aventajar en casi 15% a la de un MCI a gasolina (Pant y Gupta, 2009a).

En un intento por reducir al mínimo las emisiones contaminantes de óxidos de nitrógeno, generados por el uso de aire, la elevada temperatura derivada de la combustión del hidrógeno y por las condiciones estequiométricamente exactas aire/combustible, se suele introducir una mayor cantidad de aire, afectando sensiblemente la potencia del MCIH; utilizar el doble del aire necesario conlleva una reducción de la potencia hasta un valor 50% inferior a la registrada por un MCI a gasolina de dimensiones semejantes.

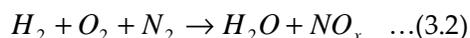
En términos generales, un automóvil acondicionado para consumir hidrógeno posee una eficiencia global cercana al 45%, dejando muy por debajo el 25% de eficiencia mostrada por un vehículo promedio impulsado por gasolina (Pant y Gupta, 2009a).

3.1.3.4- Emisiones

La combustión de hidrógeno exclusivamente con oxígeno sólo produce agua como último residuo:



En cambio, la combustión de hidrógeno con aire (79% nitrógeno, N_2 , y 21% oxígeno, O_2) en un entorno a muy alta temperatura como lo es el interior de la cámara de combustión de un MCIH, propician la unión entre los átomos de nitrógeno y oxígeno dando como productos, además de agua, sustancias denominadas óxidos de nitrógeno (NO_x):



En el supuesto de que una fracción de aceite penetre a la cámara de combustión se emanarían también pequeñas cantidades de mono y dióxido de carbono. El diseño, los materiales y la composición de los reactivos dictan en gran medida la tasa contaminante de un MCIH, pasando desde aquel que merodea las cero emisiones tóxicas hasta otro con una producción sustancial de óxidos de nitrógeno y carbono.

3.1.3.5- Mezclas con hidrógeno

En estado gaseoso, el hidrógeno y el metano (CH_4) pueden mezclarse e incluso compartir el mismo tanque de almacenamiento; en forma líquida, el hidrógeno se deposita individualmente y cambia a fase gaseosa para combinarse con el otro combustible justo antes de que sean inyectados. En el mercado circula una mezcla gaseosa llamada Hythane (Figura 3.4) compuesta 20% por hidrógeno y 80% por gas natural, proporciones que no exigen modificaciones en el motor de gas natural y con las que se consigue disminuir en más de 20% las emisiones de hidrocarburos, mono y dióxido de carbono, aunque pueden hacerse más abundantes las de óxidos de nitrógeno (Mohammadia y col., 2007; Pant y Gupta, 2009a).



Figura 3.4- Autobús propulsado con la mezcla comercial Hythane
(Lanz y col., 2001)

Las cualidades del hidrógeno convierten a las mencionadas mixturas en sustancias fáciles de encender, menos contaminantes, más eficientes y con un mejor rendimiento (Das, 1990 y 1991; White y col., 2006).

3.1.4- Principales ventajas y desafíos de los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno

Numerosos vehículos provistos de un MCIH han sido ensamblados con fines demostrativos y sólo unos cuantos componen la oferta comercial actual (Das, 1990; Verhelst y Sierens, 2001; Schafer y col., 2006; White y col., 2006), los patrones de construcción varían según el modelo y el fabricante, algunos son de formas muy básicas y funcionamiento simple mientras que otros son estética y operativamente más complejos. Dadas las cualidades del hidrógeno como combustible, los MCIH ofrecen un desempeño global superior al mostrado por los MCI alimentados con gasolina, que se refleja en una mayor potencia mecánica desarrollada; asimismo, pueden ser diseñados de tal forma que empleen gasolina e hidrógeno o mezclas de éste con otros combustibles, además de lograr que emitan la menor cantidad de contaminantes.

A partir de que el hidrógeno irrumpió en la escena automovilística, bastantes consorcios automotrices han mostrado un interés por las tecnologías para el aprovechamiento de este combustible. El intento más reciente de la firma BMW es el modelo BMW Hydrogen 7 (Figura 3.5), vehículo que dispone de un motor de combustión interna bivalente (hidrógeno/gasolina).



Figura 3.5- BMW Hydrogen 7
(IP, 2008)

Un entorno idóneo para la utilización en masa de este tipo de medios de transporte debe contar con una vasta red de estaciones o sistemas de abastecimiento de hidrógeno, así como con el capital tecnológico y humano indispensables en la reparación y mantenimiento de la maquinaria.

Dentro de las modificaciones previstas en el rediseño de un MCI con el propósito de que trabaje con hidrógeno se pone énfasis en el sistema de inyección del combustible a las cámaras de combustión; con la inyección directa se obtiene un repunte en eficiencia y potencia gracias a que desaparecen muchos de los fenómenos relacionados con una combustión irregular (Das, 1990 y 1991; Midilli y col., 2005; White y col., 2006).

3.2- Celdas de combustible

Una de las facetas del hidrógeno que ha despertado mayor interés es su utilización como combustible de dispositivos generadores de energía eléctrica denominados celdas de combustible. No obstante que el conocimiento del principio de funcionamiento de estos aparatos se remonta al año de 1839, gracias a un personaje de nombre William Grove, británico aficionado a la física; debió transcurrir cerca de siglo y medio para que se presentara la oportunidad de darles un uso práctico, siendo las naves espaciales de aquella época las primeras en familiarizarse con estos equipos.

3.2.1- Funcionamiento de las celdas de combustible

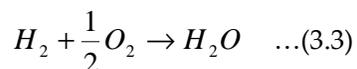
En una celda de combustible suceden reacciones electroquímicas (cambios químicos propiciados por el flujo de cargas eléctricas), de reducción del oxígeno (un átomo, ión o molécula se reduce cuando gana electrones, ya sea por medios químicos o eléctricos) y de oxidación de un combustible, como hidrógeno (se dice que un átomo, ión o molécula se oxida cuando pierde electrones; el proceso puede ser de índole química o eléctrica); fenómenos que se complementan para convertir la energía química en energía eléctrica y térmica (Daintith, 1985).

La tecnología de las celdas de combustible parte de las celdas electroquímicas, conformadas por un par de electrodos, ánodo y cátodo, divididos por una sustancia conocida como electrolito, sustancia conductora de electricidad debido a su alto contenido de iones positivos y negativos.

El proceso se inicia con la entrada del combustible, hidrógeno, a través del electrodo negativo (ánodo) donde es ionizado por efecto de un catalizador (acelerador o retardador de reacciones químicas) de platino, de esta manera el combustible se oxida perdiendo un electrón por átomo; los iones del combustible transitan por el cuerpo conductor del electrolito atraídos por el electrodo positivo (cátodo), a la espera de recombinarse en forma de moléculas de agua con el oxígeno ahí presente.

Los electrones surgidos de la oxidación del combustible son conducidos a lo largo de un circuito eléctrico externo desatando la aparición de una diferencia de potencial o tensión, misma que se traduce en una corriente eléctrica al colocar una carga de por medio. Durante el desarrollo del proceso se generan, además de agua y electricidad,

emisiones de energía térmica dada la naturaleza exotérmica de las reacciones. La reacción electroquímica entre el hidrógeno (ánodo) y el oxígeno (cátodo) posee un potencial electroquímico teórico de 1.23 V ($0.40 V_{\text{hidrógeno}} + 0.83 V_{\text{oxígeno}}$), y se expresa de la siguiente manera:



La magnitud de la diferencia de potencial registrada entre los electrodos, además de otros factores como la eficiencia, determina la energía susceptible de ser aprovechada. Con objeto de acrecentar la cantidad de energía útil, es posible armar diversas configuraciones, por ejemplo arreglos en serie de celdas individuales conectadas a través de placas bipolares, o modificar elementos internos de la celda, como el área de sus electrodos (Pant y Gupta, 2009a).

3.2.2- Clasificación de las celdas de combustible

En lo que respecta a los tipos de celdas de combustible, éstas suelen organizarse en dos categorías primarias, las denominadas celdas de baja temperatura y las celdas de alta temperatura (Galarza, 2008). Las celdas que pertenecen al primer grupo han evolucionado técnica y comercialmente con mayor rapidez; las celdas de electrolito polimérico, las de ácido fosfórico así como las alcalinas son ejemplos típicos de esta clase de dispositivos.

Del lado de las de alta temperatura se encuentran celdas que son altamente eficientes, generan potencia media y alta, además de que son capaces de extraer el hidrógeno a partir de otros combustibles, como puede ser el gas natural (metano); las celdas de óxido sólido y las de carbonatos fundidos son dos representantes de este género de celdas, mismo que ha padecido de un lento impulso comercial.

De momento se cuenta con seis tipos de celdas de combustible, los nombres y principales atributos técnicos de éstas se aprecian en la Tabla 3.2. Abasteciendo de energía eléctrica, las celdas de combustible poseen un extenso listado de posibles aplicaciones, tanto en equipos portátiles, vehículos, suministro de electricidad a residencias, oficinas, escuelas, clínicas, comercios, industrias, etcétera.

3.2.3- Principales ventajas y desafíos de las celdas de combustible alimentadas con hidrógeno

Las celdas de combustible son pieza clave para el ansiado éxito del hidrógeno como futuro monarca de los energéticos a nivel mundial. Dentro de las virtudes de estos artefactos sobresale su alta eficiencia, en contraste con las máquinas de combustión interna; su diseño simple, su construcción es sumamente sencilla; la reducción de emisiones tóxicas, dado que su único residuo es agua pueden ser catalogadas como cero emisiones; y su silencioso funcionamiento, al carecer de partes mecánicas móviles.

Tanto en aplicaciones móviles y estacionarias, las debilidades persistentes de las celdas de combustible están ligadas a su costo y durabilidad, añadiendo, en el caso de su

adaptación en medios de transporte, la capacidad de almacenamiento de hidrógeno (Chalk y Miller, 2006).

Tabla 3.2- Tipos más comunes de celdas de combustible
(adaptada de Kirk-Othmer, 2002; Wee, 2007; Galarza, 2008; Pant y Gupta, 2009a)

Tipo	Electrolito	Características fundamentales	Eficiencia y potencia eléctrica	Aplicaciones actuales	Aplicaciones futuras
Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC, por sus iniciales en idioma inglés)	Ácido fosfórico líquido	El ánodo y el cátodo están formados por una estructura de carbono y carburo de silicio impregnada con un catalizador de platino. Es la celda de combustible más desarrollada a nivel comercial; sus temperaturas de funcionamiento se ubican en el rango de los 200 °C	Generan electricidad a más del 35-40% de eficiencia Potencia eléctrica promedio >50 kW	Se encuentra en uso en clínicas, hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y terminales aeroportuarias	Vehículos grandes como autobuses y locomotoras, plantas generadoras de energía eléctrica
Celda de combustible de polímero sólido o membrana de intercambio protónico (PEMFC, por sus iniciales en idioma inglés)	Membrana de intercambio iónico	Temperaturas de funcionamiento relativamente bajas (80 °C), densidad de potencia alta, rápido encendido y la habilidad de satisfacer sin problemas cambios bruscos en la demanda de potencia, son algunas características que favorecen su empleo en medios de transporte. La membrana, además de actuar como electrolito, sólo permite el tránsito de los iones de hidrógeno; usualmente el catalizador es a base de platino	Rango de 40-60% de eficiencia Potencia eléctrica promedio >250 kW	Adecuadas en aplicaciones donde se requiere proveer una demanda inicial rápida, como en el caso los de automóviles	Vehículos ligeros, aplicaciones de tamaño reducido, sustitución de las baterías recargables en equipos portátiles
Celda de combustible de carbonato fundido (MCFC, por sus iniciales en idioma inglés)	Carbonato fundido	Prometen altas eficiencias de conversión combustible/electricidad y la opción de consumir combustibles derivados del carbón, metano o gas natural; las temperaturas de funcionamiento de estas celdas oscilan entre los 650 °C	Rango de 45-60% de eficiencia; 80% al utilizar el calor desprendido Potencia eléctrica promedio >1MW	--	Plantas generadoras de energía eléctrica
Celda de combustible de óxido sólido (SOFC, por sus iniciales en idioma inglés)	Cerámico sólido	Por lo general emplea un material duro cerámico, por ejemplo óxido de zirconio estabilizado, que reemplaza al electrolito líquido, las temperaturas de funcionamiento son de entre 800 y 1000 °C	Eficiencia del 50-65% Potencia eléctrica promedio >200 kW	Dos unidades de 25 kW se encuentran conectadas en la red eléctrica de Japón	Vehículos, proyectos de alta demanda de potencia, estaciones de generación de energía eléctrica
Celda de combustible alcalina (AFC, por sus iniciales en idioma inglés)	Hidróxido de potasio	Utilizan un electrolito elaborado a base de hidróxido de potasio; diversas compañías e instituciones están explorando alternativas para reducir costos y dotar de mayor flexibilidad en sus aplicaciones	Eficiencia alrededor del 45-60% Potencia eléctrica promedio >20 kW	Empleadas en misiones espaciales	Submarinos, naves espaciales
Celda de combustible de metanol directo (DMFC, por sus iniciales en idioma inglés)	Membrana de polímero	El catalizador presente en el ánodo de ésta celda extrae el hidrógeno directamente del metanol suministrado, prescindiendo de un reformador de combustible	Eficiencia del 40% Potencia eléctrica promedio <10 kW	--	Dispositivos portátiles

El elevado precio de los materiales usados en la confección de ciertos componentes de las celdas de combustible, como los electrocatalizadores, elaborados a base de metales muy selectos, y las membranas, es uno de los lastres que merma la competitividad económica de estos equipos frente a otras tecnologías.

Asimismo, las celdas de combustible tendrán que fortalecerse en las áreas de confiabilidad, versatilidad y vida útil. En aplicaciones móviles, el desempeño de las celdas de combustible disminuye sensiblemente después de 1,000 horas de operación continua (Chalk y Miller, 2006). En el futuro se pretende que las celdas de combustible instaladas en vehículos alcancen una durabilidad mayor a las 5,000 horas, mientras que para aplicaciones estacionarias el objetivo está entre 30,000 y 40,000 horas de funcionamiento continuo (Sørensen, 2005).

En contraste, la promesa de cuando menos doblar la eficiencia energética hasta ahora alcanzada por la vía de la combustión, motores de combustión interna y otros, aunada a los muy sonados reconfortantes beneficios ambientales intrínsecos de las celdas de combustible; son sólo algunas de los argumentos que respaldan la apuesta por esta alternativa en generación de energía.

Los esfuerzos por hacer madurar la tecnología de celdas de combustible se multiplican alrededor del planeta; institutos, organizaciones, universidades, consorcios automotrices, ingenian estrategias que les permitan lograr el objetivo en el corto plazo. Se especula que la plena inserción de automóviles con celdas de combustible alimentadas con hidrógeno (Figura 3.6) tomará de 10 a 15 años (Chalk y Miller, 2006).



Figura 3.6- Esquema básico de un vehículo equipado con celdas de combustible (IP, 2008)

El NECAR 4 y el NEBUS, manufacturados por la compañía Daimler-Chrysler, son dos referentes en el ámbito de los vehículos acondicionados con celdas de combustible abastecidas con hidrógeno. Descendiente de un modelo convencional de la misma corporación, el NECAR 4, automóvil para cinco pasajeros, empleaba una celda de combustible con la que desarrollaba una rapidez máxima de 145 kilómetros por hora, y el tanque de hidrógeno contaba con un volumen de almacenamiento equivalente a 450 kilómetros. En el terreno de los vehículos pesados también se ha experimentado con celdas de combustible. Autobuses equipados con estos dispositivos participan en las redes de transporte público de pasajeros de Chicago, EE.UU.A., y Vancouver, Canadá; escenarios urbanos que permiten evaluar íntegramente su rendimiento.

Detalles técnicos de vehículos con tecnologías de propulsión a base de hidrógeno, celdas de combustible y motor de combustión interna, se exponen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3- Diferentes propuestas de vehículos con tecnologías de propulsión a base de hidrógeno (adaptada de IP, 2008)

Modelo	Compañía	Tecnología	Principales características	Imagen
HydroGen4	General Motors	Celdas de combustible	Bajo la premisa de comercializarlo a gran escala, este vehículo cuenta con un contenedor que resguarda 4.2 kg de hidrógeno comprimido a 700 Bar; acondicionado con un arreglo de 440 celdas que le brindan un rendimiento aceptable. Cerca de cien unidades están repartidas en distintas ciudades alrededor del mundo; en Berlín, por ejemplo, hay una flota de diez HydroGen4 a disposición de los funcionarios de esa localidad	
Concep car Honda FC deportivo	Honda	Celdas de combustible	Automóvil deportivo con una amplia cabina de tres plazas impulsado por celdas de combustible, fabricado con bio-materiales, muy liviano y de un bajo centro de gravedad; sus constructores aseguran que es cero emisiones, únicamente despidе agua. Encima de su eje trasero están instalados un par de tanques de almacenamiento compartiendo espacio con el grupo de celdas de combustible y una batería	
Hymotion Tiguan	Volkswagen	Motor de combustión interna alimentado con hidrógeno	Incorpora un motor con una potencia máxima de 134 caballos de fuerza, aceleración de 0 a 100 km/h en tan sólo 14 segundos y desarrolla una velocidad máxima que ronda los 150 km/h. Lleva consigo un juego de tanques para depositar hasta 3.2 kg de hidrógeno comprimido localizados en la sección inferior del vehículo	

Continuación de la Tabla 3.3- Diferentes propuestas de vehículos con tecnologías de propulsión a base de hidrógeno

Modelo	Compañía	Tecnología	Principales características	Imagen
X-Trail FCV	Nissan	Celdas de combustible	Prototipo del fabricante japonés de autos, equipado con celdas de combustible que en suma aportan una potencia de 90 kW permitiéndole alcanzar una rapidez límite de 150 km/hidrógeno, transita aproximadamente 500 km sin repostar combustible. Evaluado en el circuito automovilístico de Nürburgring, Alemania donde, a decir de los expertos, se mostró un tanto lento especialmente en los tramos ascendentes	 A silver Nissan X-Trail SUV with 'FCV' branding on the side, shown from a front-quarter view.
Genepax	Genepax	Celdas de combustible	Lo sorprendente de este vehículo es que emplea agua a manera de combustible. Valiéndose de sistema de membranas que le permiten disociar químicamente la molécula del agua, no necesariamente destilada, para obtener así el hidrógeno que es entregado a las celdas de combustible, encargadas de generar la energía eléctrica que demanda el motor, calificado como uno de los más eficientes en relación a sus similares. La firma japonesa Genepax afirma que un litro de agua basta para ponerlo en marcha alrededor de 60 minutos logrando una velocidad de 80 km/h	 A small, blue, two-seater car with 'H2O POWER' and 'WATER ENERGY SYSTEM' branding, shown from a front-quarter view.
BMW Hydrogen 7	BMW	Motor de combustión interna alimentado con hidrógeno	Variante de la versión híbrida gasolina/hidrógeno del consorcio alemán. Se trata de un potente automóvil que emplea exclusivamente hidrógeno, dotado de un motor de combustión interna de 6 litros V12 y un medio de almacenamiento criogénico con capacidad de 8 kilogramos del combustible en fase líquida, dándole una autonomía de recorrido próxima a los 225 km. No se clasifica como un vehículo cero emisiones debido a que se desprenden cantidades mínimas de dióxido de nitrógeno en el momento en que el motor de combustión alcanza temperaturas muy elevadas	 A silver BMW sedan shown in a cutaway view, revealing the internal engine and fuel storage components, with 'BMW Hydrogen 7' branding.

Continuación de la Tabla 3.3- Diferentes propuestas de vehículos con tecnologías de propulsión a base de hidrógeno

Modelo	Compañía	Tecnología	Principales características	Imagen
ecoVoyager	Daimler-Chrysler	Celdas de combustible/ baterías ión-litio	Vehículo deportivo híbrido impulsado por un motor eléctrico que extrae la energía de un paquete de baterías de ión-litio o bien de celdas de combustible que reciben hidrógeno; le toma 8 segundos acelerar de 0 a 100 km/hidrógeno, utilizando las baterías logra 65 km de autonomía en tanto que con el hidrógeno supera los 400 km de travesía, las dos modalidades están libres de emisiones contaminantes	
Cadillac Provoq	General Motors	Celdas de combustible/ baterías ión-litio/ paneles solares	Dispone de una serie de tanques en los que es posible depositar hasta 6 kilogramos de hidrógeno suficientes para recorrer cerca de 480 km; tanto las baterías de ión-litio como las celdas de combustible están conectadas un motor eléctrico denominado e-flex, instalado también en otros modelos cero emisiones de la marca estadounidense. Adicionalmente, en el techo del automóvil se colocaron paneles solares que abastecen de energía a los accesorios ubicados al interior de la cabina	
Toyota FCHV	Toyota	Celdas de combustible	Ostenta la marca de mayor distancia recorrida con un solo tanque de hidrógeno, rebasó los 560 km que separan a las ciudades de Osaka y Tokio. Prototipo de camioneta semejante a las tradicionales del tipo SUV; provista de celdas de combustible altamente eficientes que le brindan una asombrosa autonomía según datos de los miembros del consorcio japonés	

Continuación de la Tabla 3.3- Diferentes propuestas de vehículos con tecnologías de propulsión a base de hidrógeno

Modelo	Compañía	Tecnología	Principales características	Imagen
Ford Focus FCV	Ford Motors Company	Celdas de combustible	Automóvil de cifras modestas, posee un motor de potencia media que alcanza una velocidad tope de 128 km/h y tarda alrededor de un cuarto de minuto en acelerar de 0 a 100 km/h. La sección trasera, específicamente en la cajuela, se eligió para instalar un voluminoso tanque de almacenamiento de hidrógeno que abarca casi por completo el espacio disponible	
Peugeot 207 Epure	Peugeot	Celdas de combustible	Descendiente del modelo convencional del Peugeot 207 CC; equipado con celdas de combustible que toman el hidrógeno de un quinteto de cilindros de almacenaje situados en la parte posterior del vehículo, cada tanque es capaz de guardar hasta 3 litros, (15 litros de hidrógeno en total); y autonomía de 350 km. El motor le permite acelerar de 0 a 100 km/h en 15 seg. y desarrollar una velocidad máxima de 130 km/h. Se le añadió una batería de ión-litio con el propósito de capturar la energía emanada durante el frenado; el peso neto del auto es de tonelada y media	
Ford Edge	Ford Motors Company	Celdas de combustible/ baterías ión-litio	Prototipo de la firma estadounidense; sus baterías de ión-litio proveen la energía necesaria para trayectos cortos, 40 km como límite, en tanto que las celdas de combustible son las indicadas para rutas prologadas; las baterías tienen la cualidad de que pueden ser recargadas en un contacto de la red eléctrica. En conjunto, la autonomía de recorrido y la velocidad máxima del vehículo son de aproximadamente 362 km y 136 km/h, respectivamente	

Continuación de la Tabla 3.3- Diferentes propuestas de vehículos con tecnologías de propulsión a base de hidrógeno

Modelo	Compañía	Tecnología	Principales características	Imagen
Hummer H ₂ H	General Motors	Motor de combustión interna alimentado con hidrógeno	Con su cerca de 3 toneladas de peso y un débil rendimiento por litro de combustible, el vehículo Hummer en su formato tradicional destaca por su excesivo consumo de gasolina. El prototipo H ₂ H de la General Motors utiliza un motor Vortec 6000 V8 de combustión interna que funciona con hidrógeno gaseoso; se descarta casi por completo su fabricación en serie, será un instrumento al servicio de la investigación en temas como suministro y almacenamiento de hidrógeno en medios de transporte	
BMW Hydrogen 7	BMW	Motor de combustión interna alimentado con hidrógeno/ gasolina	Concebido a partir de la denominada Serie 7 de la casa BMW; montado sobre un revolucionario motor de combustión interna que trabaja tanto con hidrógeno como con gasolina, razón por la que merece el distintivo de híbrido; en un lapso de 9.5 segundos el automóvil acelera de 0 a 100 km/h, la velocidad está restringida electrónicamente a una cifra máxima de 230 km/h. Un par de tanques almacenan los combustibles por separado, el de hidrógeno con capacidad de 8 kg equivalentes a 200 km de travesía y el de gasolina con un volumen de 74 litros aporta 500 km de alcance; disponible en el mercado	
ECOZIA	Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM	Celdas de combustible/ baterías ión-litio	Prototipo biplaza compacto diseñado completamente en la Universidad Nacional Autónoma de México. Es el primer vehículo híbrido/hidrógeno de fabricación mexicana; inspirado en el Puma, el automóvil es capaz de funcionar con hidrógeno o electricidad, cargándose directamente a la red eléctrica. Logra 300 km de autonomía con dos tanques de hidrógeno comprimido; en modo eléctrico puede recorrer 70 km con una carga completa; pensado para la vigilancia, reparto y ayuda médica dentro de la UNAM	

3.3- Conclusiones

En general, los medios de transporte impulsados por hidrógeno emplean, de momento, dos tecnologías principales, las celdas de combustibles y, en menor medida, los motores de combustión.

Las celdas de combustible o células electrógenas son dispositivos generadores de energía eléctrica cuyo principio de funcionamiento se conoce desde hace más de 150 años, y fueron utilizadas por vez primera en naves espaciales. A la fecha se han desarrollado seis tipos de celdas de combustible con características y aplicaciones muy variadas, desde aquellas que son idóneas para artefactos portátiles, vehículos, hasta las que suministran electricidad a viviendas completas. Las debilidades más notorias de las celdas de combustible radican en el costo y durabilidad de los materiales necesarios para su fabricación, restándoles competitividad, de momento, frente a las tecnologías convencionales, en particular en el sector automotriz.

Por medio de la ionización del hidrógeno al hacer contacto con el electrodo negativo de la celda, se liberan electrones que son conducidos a través de un circuito eléctrico, apareciendo una diferencia de potencial que se manifiesta en forma de corriente eléctrica al conectar una carga. Mientras tanto, los iones de hidrógeno son atraídos por el electrodo positivo de la celda en donde se recombinarán con oxígeno para formar moléculas de agua, que, junto con dosis de energía calorífica, son las únicas emisiones de estos aparatos.

En relación al motor de combustión interna alimentado con hidrógeno (MCIH), éste encuentra sus orígenes en el año de 1820 con la aplicación del denominado principio de vacío. Al igual que las celdas de combustible, los MCIH fueron y son empleados exitosamente en los cohetes de las aeronaves espaciales dada la asombrosa potencia que pueden alcanzar, producto de las propiedades de combustibilidad del hidrógeno.

De las cualidades del hidrógeno como combustible destacan su amplio margen de inflamabilidad, baja energía para ignición, elevada temperatura de auto-ignición, alta velocidad de las flamas y fácil dispersión, que en conjunto favorecen su utilización en motores de combustión interna, en ocasiones muy similares a los que consumen gasolina al grado de que pueden usar indistintamente estos dos combustibles. Si bien el funcionamiento y estructura de un MCIH son bastante semejantes a los de un motor de combustión interna ordinario, es necesario modificar el sistema de inyección de combustible y el mecanismo de ignición así como mejorar la ventilación en todo el motor para lograr el óptimo desempeño.

A pesar de que el MCIH muestra una eficiencia neta cercana al 45%, superior al 25% de un motor de combustión interna a gasolina, eventualmente pueden expeler sustancias tóxicas como óxidos de carbono (combustión marginal de aceite) y nitrógeno (combustión con aire); en contraste con las celdas de combustible, que no tienen emisiones contaminantes aunado a una eficiencia de alrededor del 60% y un funcionamiento silencioso.

Institutos, organizaciones, universidades y algunas de las compañías automotrices más relevantes en todo el mundo están sumamente interesados en las tecnologías de propulsión a base de hidrógeno para medios de transporte, creando y evaluando infinidad de prototipos con el objetivo de consolidar y comercializar a la brevedad estas innovaciones.

4.1- Almacenamiento de hidrógeno

La producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno son ingredientes decisivos para la maduración del esquema socioeconómico centrado en este combustible, debido a que son la vía de acceso a su utilización masiva.

En lo concerniente al almacenamiento, la baja densidad del hidrógeno, el elemento conocido más ligero del Universo, es el principal obstáculo; como referencia, la energía proveniente de un tanque lleno de gasolina corresponde a un tanque 3,000 veces mayor en volumen con hidrogeno gaseoso a presión ambiente.

Las técnicas de almacenamiento de hidrógeno disponibles a la fecha se mencionan a continuación (Pant y Gupta, 2009a):

- Almacenamiento de hidrógeno en forma de gas comprimido
- Almacenamiento de hidrógeno en forma líquida
- Almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos
- Almacenamiento de hidrógeno en materiales de carbono
- Almacenamiento de hidrógeno en micro-esferas de sílice
- Almacenamiento de hidrógeno en hidruros orgánicos

De cada opción derivan costos, resultado de la transformación del hidrógeno desde su producción hasta su almacenamiento, así como de las condiciones particulares que supone su conservación en cada tipo de contenedor.

4.1.1- Almacenamiento de hidrógeno en forma de gas comprimido

Es una de las opciones de almacenamiento de hidrógeno más populares tanto en las industrias como en los automóviles. La mayoría de los prototipos de vehículos impulsados por hidrógeno emplean este formato de gas comprimido, contando para ello con tanques fabricados con fibra de carbono reforzada con polímero, capaces de resguardar hidrógeno a presiones de entre 350 y 700 bar.

Un kilogramo de hidrógeno ocupa un volumen de 11 m³ a temperatura y presión ambiente (1.013 bar y 298.16 K), de ahí que es necesario comprimirlo sustancialmente a fin de almacenarlo en un espacio razonable y práctico. Para soportar los niveles de compresión sugeridos se requieren materiales resistentes a las altas presiones como lo es el acero, aunque la difusividad del hidrógeno a través de éste lo pone en desventaja.

Los tanques que almacenan hidrógeno gaseoso a presiones desde 5,000 hasta 10,000 psi combinan materiales ligeros y resistentes dispuestos en forma de capas bien definidas, por ejemplo, el forro interno es un polímero de alta densidad que impide la difusión o fuga del hidrógeno, enseguida se coloca una capa compuesta de fibra de carbono-epóxido y al exterior se encuentra una coraza que ofrece resistencia a la abrasión o

desgaste y a los impactos. Contenedores como los descritos pueden ser también instalados en medios de transporte movidos por hidrógeno.

Resultado de su baja densidad volumétrica y aún cuando se comprime a niveles considerables, el volumen que ocupa el hidrógeno gaseoso es un serio inconveniente en el terreno práctico, tan sólo 5 kg de hidrógeno comprimido a 5,000 psi abarcan un volumen de 212 L (Pant y Gupta, 2009a).

Si bien es cierto que sus requerimientos de volumen son relativamente grandes, distintas experiencias prácticas apuntan al almacenamiento comprimido como la elección más eficiente con base en el consumo neto de energía, es decir, la energía que implica lograr el grado de compresión deseado, la relacionada con la eficiencia del compresor y la de cada una de las tareas involucradas en el proceso (Sarkar y Banerjee, 2004).

Además de los contenedores o tanques tradicionales, se contempla la posibilidad de almacenar grandes cantidades de hidrógeno en cavernas, cavidades de gas natural abandonadas, acuíferos y en muchas otras formaciones geológicas subterráneas que cumplan con los requisitos indispensables (Sørensen, 2005).

4.1.2- Costos del almacenamiento de hidrógeno en forma de gas comprimido

La adquisición del compresor y el consumo de energía en el transcurso del proceso probablemente representan la porción más significativa de los costos ligados a la compresión de hidrógeno.

Otros elementos que también impactan en las cifras económicas son el flujo de agua de enfriamiento, en función, al igual que la demanda de energía, del nivel de compresión buscado, y la eficiencia propia de los equipos que participan en el sistema.

Amos (1998) proporciona una serie de formulas versátiles que parten de datos base o de referencia y permiten calcular el costo capital relacionado con las distintas formas de almacenamiento de hidrógeno, por ejemplo, el costo capital de la compresión del hidrógeno se determina con la siguiente expresión:

$$C_{Cap} = CC \times TC \left(\frac{PC}{TC} \right)^{CompExp} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{PCExp} \quad \dots(4.1)$$

Donde:

- C_{Cap} : Costo capital de la compresión (\$)
- CC: Costo del compresor base (\$/kW) (**1,288.20 US\$/kW**)
- TC: Tamaño del compresor base (kW) (**4,000 kW**)
- PC: Potencia del compresor (kW)
- CompExp: Exponente de ajuste del compresor (**0.8**)
- P: Presión de operación (MPa)

- P_o : Presión de operación base (MPa) (**20 MPa**)
- PCE_{exp} : Exponente de presión del compresor (**0.18**)

En el caso del almacenamiento en cavernas o cavidades naturales, éstas representan una opción natural con un costo relativamente bajo, el cual varía de 3 a 20 US\$/kgH₂ (Sørensen, 2005) fundamentalmente debido al costo del compresor, la demanda de energía y por supuesto el costo de la caverna.

La fórmula que Amos (1998) sugiere para cuantificar el costo capital del almacenamiento subterráneo en cavidades naturales es la siguiente:

$$CV_{Cap} = CS \left(CC \frac{PA}{P_o} \right) \quad \dots(4.2)$$

Donde:

- CV_{Cap} : Costo capital del almacenamiento en cavernas (\$)
- CS : Costo de la caverna subterránea (\$/kg)
- CC : Capacidad de la caverna (kg)
- PA : Presión de almacenamiento base (MPa)
- P_o : Presión de operación (MPa)

El hidrógeno también se puede depositar en contenedores o tanques cilíndricos instalados sobre la superficie. Elaborado de un acero reforzado y mediante un proceso que no requiere soldaduras, el tanque de almacenamiento de hidrógeno tiene un costo capital que se obtiene, según Amos (1998), de esta manera:

$$T_{Cap} = (CT \times AT) \left(\frac{CA \frac{PT_o}{P_o}}{AT} \right)^{0.75} \left(\frac{P_o}{PT_o} \right)^{0.44} \quad \dots(4.3)$$

Donde:

- T_{Cap} : Costo capital del tanque (\$)
- CT : Costo del tanque base (\$/kW) (**1,704.29 US\$/kg**)
- AT : Aforo del tanque base (kg) (**226.76 kg**)
- CA : Capacidad de almacenamiento (kg)
- PT_o : Presión del tanque base (MPa) (**20 MPa**)
- P_o : Presión de operación (MPa)

4.1.3- Almacenamiento de hidrógeno en forma líquida

La desventaja en relación al volumen del almacenamiento de hidrógeno en forma de gas comprimido pierde protagonismo al cambiar al estado líquido. Al licuar el hidrógeno éste puede depositarse en un espacio más reducido, aunque requiere

conservarse a temperaturas conocidas como criogénicas, mínimo $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (20 K), con objeto de evitar su cambio a fase gaseosa, que incrementa la posibilidad de fuga.

El periodo durante el cual el hidrógeno líquido contenido en el recipiente experimenta un ascenso en su temperatura tal que incita su transformación al estado gaseoso se conoce como periodo de letargo, y puede significar la pérdida gradual y definitiva del hidrógeno en un lapso de tiempo breve.

Los denominados crio-tanques son los confinamientos adecuados para esta variante de almacenamiento, deben contar con un excelente aislamiento térmico mantenga la temperatura específica, previniendo de esta forma la vaporización del hidrógeno líquido, asimismo su estructura necesita ser lo suficientemente rígida para tolerar un llenado a cierta presión (Figura 4.1).



*Figura 4.1- Detalle de un tanque de almacenamiento de hidrógeno líquido
(HCN, 2009)*

Los tanques con aislamiento de presión, a pesar de ser más pesados que los usados para hidrógeno comprimido, parecen remediar el problema de la evaporización del hidrógeno líquido (Aceves y col., 2000 y 2006). Se trata de tanques que soportan temperaturas de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (20 K) y también presiones de por ejemplo 240 atm , con presiones más elevadas prevalece aún más el estado líquido, y tienen la cualidad de poder contener tanto hidrógeno líquido como hidrógeno comprimido condición denominada almacenamiento criocomprimido, característica de enorme valor práctico.

Junto con el problema de la vaporización, el costo de los contenedores y la cantidad de energía necesaria para la licuefacción también son temas cruciales vinculados con el almacenamiento de hidrógeno en estado líquido.

Teóricamente, el monto total de energía que exige el proceso de licuefacción es de alrededor de 3.4 MJ/kg , no obstante la cifra real puede incrementarse hasta casi los 50.4 MJ/kg , a raíz de las pérdidas de energía inherentes a cada etapa, considerando una eficiencia de refrigeración de 7.2% (Wetzel, 1998).

4.1.4- Costos del almacenamiento de hidrógeno en forma líquida

Los costos del almacenamiento del hidrógeno en forma líquida derivan concretamente de la licuefacción, los tanques de almacenaje así como del funcionamiento y mantenimiento de todos los componentes del sistema.

Evidentemente el consumo de energía repercute en el aspecto económico, y lo hace de forma significativa dado que la licuefacción se distingue por sus elevados requerimientos de energía, que se estiman en 9.92 kWh/kg H₂ (Amos, 1998). También contribuyen al balance de costos el ritmo de producción, la tasa de vaporización de hidrógeno, el tiempo de almacenaje y el agua de enfriamiento, por citar algunos.

El costo capital del licuefactor se calcula, de acuerdo con Amos (1998), a través de la expresión matemática dada por:

$$L_{Cap} = CL \times TL \left(\frac{TP_{Vap}}{TL} \right)^{0.65} \quad \dots(4.4)$$

Donde:

- L_{Cap}: Costo capital del licuefactor (\$)
- CL: Costo del licuefactor base (\$/[kg/h]) (56,809.62 US\$/ (kg/h))
- TL: Tamaño del licuefactor base (kg/h) (454 kg/h)
- TP_{Vap}: Tasa de producción considerando las pérdidas por vaporización (kg/h)

La tasa de producción TP_{Vap} se obtiene mediante la fórmula que igualmente propone Amos (1998):

$$TP_{Vap} = T \left[1 + \left(1 - e^{-Vap \times TA} \right) \right] \quad \dots(4.5)$$

Donde

- T: Tasa de producción (kg/h)
- Vap: Tasa de vaporización (%/día) (0.1 %/día)
- TA: Tiempo de almacenamiento (día)

Preferentemente el hidrógeno líquido se resguarda en recipientes aislados a vacío llamados *dewar*, sistemas de almacenamiento muy peculiares fabricados utilizando acero inoxidable y aluminio.

Amos (1998) define el costo capital del *dewar* a través de la siguiente ecuación:

$$D_{Cap} = CD \times TD \left(\frac{CA}{TD} \right)^{0.7} \quad \dots(4.6)$$

Donde:

- D_{Cap} : Costo capital del tanque *dewar* (\$)
- TD: Tamaño del tanque *dewar* base (kg) (221 kg)
- CA: Capacidad de almacenamiento (kg)
- CD: Costo del tanque *dewar* base (\$/kg) (568.10 US\$/kg)

4.1.5- Almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos

Representando el almacenamiento de hidrógeno en forma sólida, los hidruros metálicos son combinaciones específicas de metales capaces de absorber hidrógeno y a la postre liberarlo, es decir, actúan como una esponja que absorbe hidrógeno (Figura 4.2). El monto total de hidrógeno retenido se expresa como un porcentaje en términos del peso del material que lo absorbe, en el caso de los hidruros metálicos por general se sitúa entre 1-4% en peso, aunque se tienen documentadas cifras de alrededor de 5-7% en peso (Schlapbach y Zuttel, 2001).



Figura 4.2 – Sistema escalable de almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos con capacidad de 10 kg (JM, 2009)

Con respecto al volumen el almacenamiento en hidruros metálicos es relativamente competitivo, 0.13-0.15 kg H₂/L (Pant y Gupta, 2009b). En relación al peso la situación cambia drásticamente, ésta clase de materiales, en comparación con otros medios de almacenamiento, son bastante pesados. Otro factor relevante consiste en que simultáneamente con la absorción del hidrógeno se da también la de cualquiera de las impurezas que pudieran acompañarlo, a menudo éstas se depositan en las cavidades del hidruro ocasionando un deterioro en su habilidad para retener hidrógeno y, por consiguiente, en su durabilidad.

Para que un hidruro metálico absorba (hidrogenación) correctamente el hidrógeno se requiere enfriamiento, dado que al hacerlo esta clase de hidruros despiden calor (proceso exotérmico), el cual pudiera entorpecer el proceso de absorción; mientras que para expelerlo (deshidrogenación) se les debe suministrar calor (proceso endotérmico). El tiempo que toma completar tanto la hidrogenación como la deshidrogenación es otro de los criterios en que se basa la selección de hidruros metálicos.

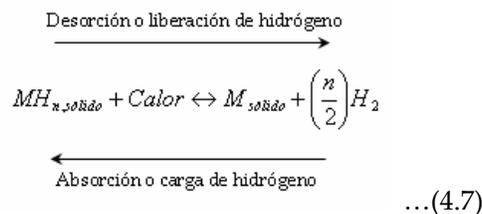
Se tienen identificados más de 50 elementos metálicos de la tabla periódica aptos para la absorción de hidrógeno (Pant y Gupta, 2009b) lo cual conduce a un gran número de opciones posibles. No obstante, sólo algunos de ellos lo hacen a presiones y

temperaturas moderadas, y aún son menos aquellos con parámetros de carga y descarga satisfactorios. Los hidruros metálicos que necesitan presiones y temperaturas muy elevadas para absorber/desorber el hidrógeno, traen consigo mayor demanda de energía y equipo.

4.1.5.1- Tipos de hidruros metálicos

Los hidruros metálicos se obtienen al combinar ciertas aleaciones con hidrógeno, uniéndose por medio de enlaces iónicos, covalentes o metálicos. De acuerdo con la fuerza propia de cada enlace, los hidruros metálicos se agrupan en dos categorías generales, los hidruros metálicos reversibles y los hidruros metálicos irreversibles.

Un hidruro metálico de tipo reversible puede absorber hidrógeno y también liberarlo debido a que manifiestan una reacción de equilibrio reversible de la forma:



Pertenecen al conjunto de los irreversibles aquellos hidruros que producen el hidrógeno a través de una reacción química, para detonar la reacción se emplea regularmente agua o alcohol. Por ejemplo, el borohidruro de sodio (NaBH₄) genera hidrógeno por la vía siguiente:



En promedio, los hidruros metálicos actualmente en uso ofrecen un almacenamiento de hidrógeno de apenas 1.8% en peso que se traduce en 60 kg/m³, por debajo de los 70 kg/m³ para hidrógeno líquido y de los 100 kg/m³ para combustibles líquidos obtenidos de hidrocarburos (Schlapbach y Zuttel, 2001; Pant y Gupta, 2009b).

Los mejores porcentajes de absorción se han conseguido con hidruros ligeros y reactivos como el hidruro de sodio (NaH), el hidruro de litio (LiH) y el hidruro de magnesio (MgH₂), sin embargo son sustancias que persistentemente oponen mayor resistencia a la liberación de hidrógeno (Sakintuna y col., 2007), debiendo suministrar más energía para lograrlo.

Particularmente llama la atención el magnesio que presume un almacenamiento de hidrógeno de hasta un 7.6% en peso, aunque exhibe un ritmo de absorción/desorción demasiado lento. Un segundo compuesto de nombre alanato de sodio se vislumbra como una atrayente alternativa de almacenamiento gracias a su retención de hidrógeno del 5.5% en peso (Pant y Gupta, 2009b).

El perfeccionamiento del almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos está orientado hacia cinco rubros generales:

- **Costo;** disponer de materiales y componentes de bajo costo.
- **Seguridad;** ciertos hidruros metálicos son peligrosamente reactivos, además por acción del aire o de la humedad se corre el riesgo de ignición.
- **Peso y volumen;** se necesitan materiales y componente mucho más compactos y livianos.
- **Durabilidad;** componentes con vida útil no menor a 1,500 ciclos de carga/descarga y menos vulnerables a los agentes contaminantes.
- **Tiempo de recarga;** la meta es surtir 5 kg de hidrógeno en un tiempo menor 3 minutos.

4.1.5.2- Costos del almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos

Tanto los mecanismos de enfriamiento, calentamiento, el equipo necesario para propiciar la absorción/desorción de hidrógeno como el hidruro mismo intervienen en la determinación del costo del almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos.

Los valores de referencia que reporta Amos (1998) en relación a los costos del almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos aparecen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1- Costos del almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos (adaptada de Amos, 1998)

Concepto	Unidades	Valor base
Costo del hidruro metálico (calculado al 2009)	\$/kg	2,840.50
Requerimientos de energía térmica del hidruro metálico	kWh/kg	6.46
Requerimientos de agua de enfriamiento del hidruro metálico	gal/kg	55

La demanda de energía presente a lo largo de todo el proceso varía en función de los requerimientos de temperatura, en la carga y descarga de hidrógeno, y del ritmo de producción; el costo por este concepto esta regido por las tarifas eléctricas aplicables.

4.1.6- Almacenamiento de hidrógeno en materiales de carbono

Los materiales de a base de carbono pueden participar en el almacenamiento de hidrógeno de distintas maneras, como son:

- **Compuestos covalentes que forma el carbono con el hidrógeno.** Sustancias de las cuales es posible extraer posteriormente el hidrógeno recurriendo a una reacción de reversibilidad.

- **Livianas y tenaces fibras elaboradas a base de carbono.**

Elementos de refuerzo en tanque de almacenamiento presurizado, que les permite sobrellevar presiones bastante elevadas, ya que poseen una resistencia en promedio diez veces superior a la del acero, aunado a una valiosa reducción en peso.

- **Superficies de carbono que absorben hidrógeno.**

El porcentaje de absorción depende de la cantidad de hidrógeno susceptible de ser distribuida en la red estructural interna del material (Okamoto y Miyamoto, 2001; Strobel y col., 2006).

- **Nanomateriales de carbono.**

Gracias a su asombrosa porosidad y baja densidad son una excelente opción para almacenar hidrógeno, pudiendo igualar e incluso superar las cualidades de los almacenamientos comprimido y líquido (Pant y Gupta, 2009c). La capacidad de absorción de hidrógeno en estos medios es directamente proporcional al volumen de sus porosidades. El diámetro adecuado para la absorción es de 0.7 nm puesto que da cabida a dos capas de hidrógeno; dentro de este género de material se localiza el carbón súper-activado.

- **Nanotubos de carbono y nanofibras de grafito.**

Innovadores medios de almacenamiento de hidrógeno (Figura 4.3), respaldados por su ligereza y atractivo porcentaje de absorción de hidrógeno, estos materiales cuentan con el potencial para contener con los hidruros metálicos. De forma semejante, los nanotubos no puros que combinan dos elementos y que son conocidos como nanotubos inorgánicos también disponen de vacantes entre sus capas, las cuales podrían hospedar moléculas de hidrógeno (Chen y Wu, 2004).

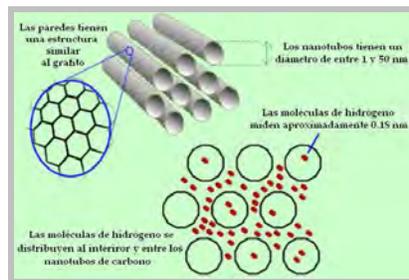


Figura 4.3 – Almacenamiento de hidrógeno en nanotubos de carbono (GI, 2009)

Un rasgo común hallado en los materiales de carbono es que efectúan la absorción/desorción de hidrógeno con extraordinaria rapidez, característica imprescindible para un sistema de almacenamiento eficaz.

Pese a que los datos suenan muy alentadores, de momento los materiales de carbono disponen de un índice de almacenamiento relativamente inferior al proyectado, menor a 3% en peso (Pant y Gupta, 2009c), probablemente a consecuencia de la falta de un cabal entendimiento del mecanismo de absorción de hidrógeno que impera en estos materiales.

4.1.7- Almacenamiento en microesferas de sílice y en hidruros orgánicos

Consiste en someter a temperaturas elevadas, por lo menos 500 °C, microesferas de sílice huecas, esto ocasiona que su pared se vuelva permeable al hidrógeno, es decir, lo absorbe, en tanto que a temperatura ambiente ésta se torna impermeable al hidrógeno, por lo cual lo expelle. Por medio del incremento de la temperatura se puede inyectar hidrógeno presurizado, quedando éste secuestrado al llevar a enfriamiento a la microesfera; para extraer el hidrógeno basta con administrar la dosis apropiada de energía térmica. Este modelo de almacenamiento ha sido examinado minuciosamente por varios investigadores (Rambach y Hendricks, 1996; Rapp y Shelby, 2004; Schmitt y col., 2006). Las microesferas de sílice podrían erigirse como una forma sencilla, segura e inmune a contaminantes de almacenar y además transportar hidrógeno.

Mediante ciclos de hidrogenación y deshidrogenación, animados por un par específico de catalizadores, es factible almacenar hidrógeno en compuestos orgánicos. Es una variante con un enorme potencial que recientemente ha comenzado a explorarse, por lo cual le queda mucho trecho por recorrer.

En la Tabla 4.2 se presentan los valores estimados de los costos unitarios y la vida útil de los esquemas de almacenamiento de hidrógeno más difundidos a nivel mundial.

Tabla 4.2- Costos unitarios y vida útil de los formatos de almacenamiento de H₂

Formato de almacenamiento de hidrógeno	Costo unitario (calculado al 2009)	Vida útil estimada	Referencias
Gas comprimido – cavidades subterráneas	3.22 – 21.46 US\$/kg H ₂	20–50 años	Sørensen, 2005; 2005a
Gas comprimido – contenedores sobre la superficie	1,704.29 US\$/kg H ₂	15–20 años	Amos, 1998; Alliat, 2006
Estado líquido	568.10 US\$/kg H ₂	10 años	Amos, 1998; Weinert y col., 2007
Hidruros metálicos	2,840.50 US\$/kg H ₂	500 ciclos de recarga	Amos, 1998; Pant y Gupta, 2009b

4.2- Estaciones de abastecimiento de hidrógeno

El arribo de los vehículos con tecnologías de propulsión a base de hidrógeno, principalmente celdas de combustible y motores de combustión interna, plantea múltiples interrogantes. Quizá una de las más importantes es: ¿De qué forma los futuros propietarios de estos vehículos podrán adquirir el combustible, es decir, el hidrógeno? La solución más reproducida, y al parecer también la más práctica, son las estaciones de abastecimiento de hidrógeno también conocidas como “hidrogeneras” (Figura 4.4), término que inmediatamente remite al concepto de gasolinera permitiendo deducir por asociación las características generales del modelo de suministro de hidrógeno que promueven.



Figura 4.4– Estación de abastecimiento de hidrógeno en Alemania (HCN, 2009)

Con objeto de que gocen de aceptación, se pretende que la dinámica de funcionamiento de las estaciones de abastecimiento de hidrógeno sea muy similar a la de una gasolinera común, sobre todo en aspectos de seguridad, comodidad, acogimiento del usuario y tiempo de recarga, en este último la meta es de 3 minutos o menos (Schneider, 2005).

De acuerdo con datos del 2006, a nivel mundial se tenían contabilizadas cerca de 140 estaciones de abastecimiento de hidrógeno en funcionamiento (Geiger, 2006), cifra que ha ido creciendo, o decreciendo, de forma conservadora con el paso del tiempo. Las estaciones se concentran fundamentalmente en regiones de Europa, Estados Unidos y Japón (LBS, 2006).

Del total de las 140 hidrogeneras, más del 70% surtían exclusivamente el hidrógeno como gas comprimido, dado que la tendencia en el desarrollo de vehículos de celdas de combustible daba preferencia a este formato de almacenamiento de hidrógeno. Algunas estaciones cuentan con su propia unidad de generación de hidrógeno *in situ* (Figura 4.5), produciéndolo por medio de técnicas como la electrolisis del agua o la reformación de vapor (Kirsch, 2005).



Figura 4.5- Estación de abastecimiento de hidrógeno comprimido de la Corporación japonesa Osaka Gas (izquierda) y módulo compacto de producción de hidrógeno por reformación HYSERVE (derecha) (Tanaka y col., 2007)

Debe hacerse notar que la instalación de las estaciones de abastecimiento de hidrógeno de momento se desprende esencialmente de proyectos o programas piloto de universidades, institutos, empresas u otros organismos, meramente con propósitos de investigación, y en algunos casos intentan gestar los primeros mercados a nivel local para este combustible, los cuales extenderían de forma paulatina su área de influencia si se les da continuidad.

4.2.1- Estaciones de abastecimiento de hidrógeno en forma de gas comprimido

Gracias a que los tanques presurizados han mostrado un evolución favorable en términos de peso y costo de producción, en los vehículos equipados con celdas de combustible ha predominado el almacenamiento de hidrógeno como gas comprimido a presiones de 35 ó 70 MPa (Abele, 2002), valores que garantizan una densidad volumétrica de almacenamiento adecuada (Frankzky, 2002; Meusinger, 2003). En este contexto, las estaciones de abastecimiento de hidrógeno en forma de gas comprimido

son imprescindibles dentro de la infraestructura que reclama este combustible alternativo.

El poblado de Stavanger en Noruega cuenta, desde agosto del 2006, con una estación de abastecimiento de hidrógeno comprimido a 350 y 700 bar, asimismo expende Hythane, mezcla de hidrógeno y gas natural (Thesen y Langhelle, 2008). Las ciudades alemanas de Berlín y Munich poseen estaciones de abastecimiento, en el caso de la capital germana desde el año 2002, y ofrecen hidrógeno comprimido y también en estado líquido (Pehr y col., 2001; Frankzky, 2002).

Ejemplos más recientes son las estaciones instaladas en el Estado de California, Estados Unidos, la cual expende hidrógeno comprimido a 350 y 700 bar (Figura 4.6), y en Reino Unido.



Figura 4.6- Estación de abastecimiento de hidrógeno comprimido en el Estado de California, Estados Unidos (HCN, 2009)

Desde el punto de vista técnico, la prioridad en esta clase de estaciones de abastecimiento recae en suministrar el gas con la presión requerida según lo especifique el tanque de almacenamiento del vehículo. Para tal efecto, en las estaciones se puede optar entre cuatro métodos o sistemas (Maus y col., 2008):

- Sistema mono-pila (en idioma inglés *single-stack storage*)
- Sistema multi-pila o cascada (en idioma inglés *multiple-stack system*)
- Sistema multi-pila con compresor
- Sistema de compresor criogénico

4.2.1.1- Sistema mono-pila

Tecnológicamente el más sencillo, utiliza un contenedor o pila de almacenamiento suficientemente grande, por lo menos 10 veces mayor en volumen al tanque del vehículo, donde esta confinado el gas a una presión cuando menos 1.2 veces superior a la presión de llenado. El tanque del automóvil se llena violentamente (recarga rápida) a su máxima capacidad por la diferencia de presión.

4.2.1.2- Sistema multi-pila o cascada

Se obtiene al conectar en serie varios tanques o pilas de almacenamiento que se dividen en secciones de baja, media y alta presión; éstas se abren secuencialmente,

incrementando la presión de manera escalonada para llenar el tanque del automóvil. El proceso es mucho más suave y controlable en comparación con el método mono-pila, sin embargo, en la sección de alta presión aún es necesaria una presión como mínimo 20% mayor a la de llenado del tanque del vehículo.

4.2.1.3- Sistema multi-pila con compresor

Con ayuda de un compresor es posible reducir hasta un 50% los niveles de presión en cada uno de los sectores (baja, media y alta presión) del sistema. En el momento en que la diferencia inicial de presión desaparece y cesa el flujo de hidrógeno al tanque del vehículo, el compresor actúa de forma que el proceso de llenado conforme al valor de presión nominal del tanque.

Debido a la compresión el gas sufre un aumento de temperatura que se propaga al tanque del automóvil, y eventualmente ocasionar que se rebase el límite máximo de temperatura del rango de funcionalidad del tanque, el valor estandarizado es de 85 °C (Figura 4.7). El fenómeno descrito puede agudizarse a causa de las condiciones ambientales, concretamente de la temperatura. En este tipo de sistemas es absolutamente necesario enfriar el gas antes de que ingrese al tanque del vehículo.

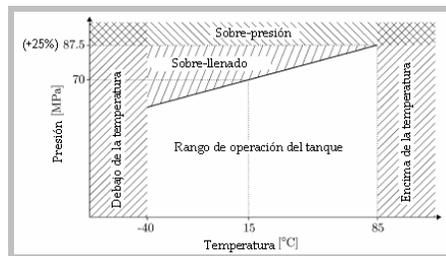


Figura 4.7- Rango de operación de los tanques de hidrógeno comprimido de 70 MPa (Maus y col., 2008)

4.2.1.4- Sistema de compresor criogénico

El compresor criogénico se encarga de almacenar bajo presión el hidrógeno en la estación de abastecimiento pero en estado líquido, posteriormente un vaporizador efectúa el cambio a fase gaseosa.

A pesar de que en forma líquida se reduce el consumo de energía atribuible a la compresión, la energía que implica la licuefacción del hidrógeno (≈ 10 kWh/kg H₂) en la práctica es excesivamente elevada (Zhou, 2005; Reijerkerk, 2006; Maus y col., 2008).

La Figura 4.8 muestra los diagramas elementales de los cuatro sistemas de abastecimiento de hidrógeno comprimido arriba mencionados.

El calentamiento del gas y, por consiguiente, del tanque del vehículo son factores que influyen decisivamente en el proceso de reabastecimiento, y son afectados por parámetros como la temperatura inicial del tanque, que normalmente difiere de la temperatura ambiente, sus propiedades de conductividad térmica y su relación

volumen a superficie (Liss, 2004). En el futuro se prevé el empleo de un sistema de comunicación entre el vehículo y la estación de abastecimiento que le transfiera a esta última toda la información relevante que conduzca a un llenado más efectivo (Schneider, 2005; Standard SAE TIR J2799, 2007).

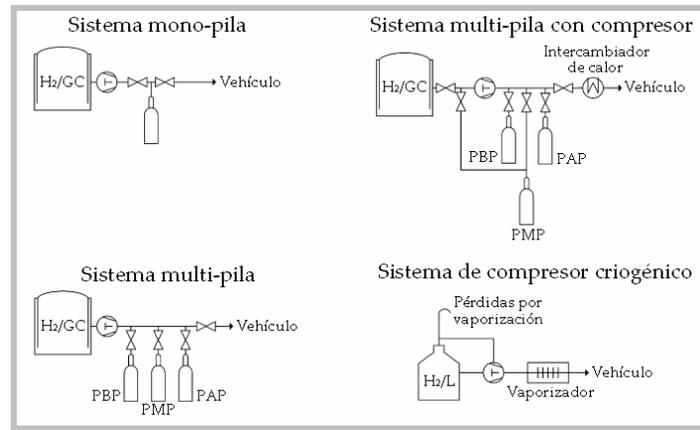


Figura 4.8- Sistemas de suministro utilizados en las estaciones de abastecimiento de hidrógeno en forma de gas comprimido (H₂/GC: hidrógeno en forma de gas comprimido, PBP: pila de baja presión, PMP: pila de media presión, PAP: pila de alta presión, H₂/L: hidrógeno en estado líquido) (adaptada de Maus y col., 2008)

Usualmente, cada una de las estaciones de abastecimiento de hidrógeno comprimido están diseñadas para proveer el combustible a tanques de almacenamiento con una geometría específica; situación que desemboca en un serio problema de incompatibilidad si se considera la diversidad modelos de contenedores que portan los vehículos. Lo anterior obliga a la adopción de estándares o normas como medios para dar universalidad a este combustible alternativo.

El esquema básico de funcionamiento de la mayoría de las estaciones de abastecimiento de hidrógeno comprimido se presenta en la Figura 4.9. La desventaja de esta metodología reside en que es demasiado simple lo que comúnmente origina imprecisiones en torno al nivel y tiempo de recarga (Kirsch, 2005).

Últimamente han surgido otros métodos que sugieren un proceso de reabastecimiento más detallado. Maus y col. (2008), por ejemplo, reportan un método basado en el aumento progresivo de la presión a través del tiempo con el cual, según los autores, se puede registrar una variación de tan sólo 24% en los niveles de recarga obtenidos, susceptible de reducirse a casi cero al disponer de una interfaz de comunicación que indique anticipadamente a la estación de abastecimiento la temperatura y presión del gas dentro del tanque del automóvil.

4.2.2- Estaciones de abastecimiento de hidrógeno en estado líquido

No obstante que un gran porcentaje de los vehículos alimentados con hidrógeno utilizan el almacenamiento en forma de gas comprimido, el hidrógeno en fase líquida,

a una temperatura de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, brinda una densidad de energía superior que se traduce en un alargamiento de la autonomía del vehículo (Rüdiger, 1992).

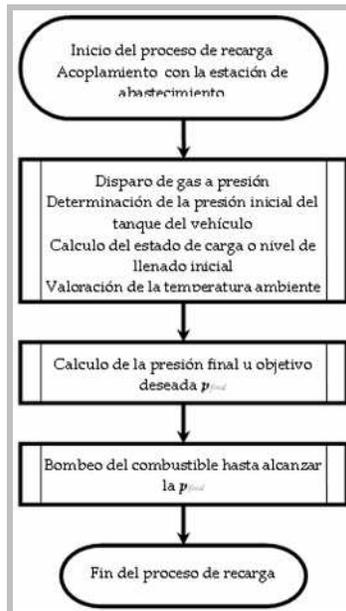


Figura 4.9- Secuencia típica del proceso de recarga con hidrógeno comprimido (adaptada de Maus y col., 2008)

En Alemania, el aeropuerto de Munich posee dos estaciones de abastecimiento de hidrógeno. Mediante el Proyecto *Hydrogen* de la terminal aérea se logró el establecimiento de una estación que suministra hidrógeno comprimido, generado a través de un electrolizador, así como de otra que fue en su momento la primera estación pública de abastecimiento de hidrógeno líquido (Figura 4.10) para vehículos de pasajeros, (Pehr y col., 2001), inicialmente el hidrógeno líquido era traído desde una planta externa y se depositaba en el contenedor de la estación con aforo para 12,000 L.



Figura 4.10- Estación de abastecimiento de hidrógeno líquido en el aeropuerto de Munich (Pehr y col., 2001)

Un aspecto novedoso de esta estación fue la incorporación de un robot que realiza íntegramente el proceso de recarga de combustible, desde abrir la portezuela del depósito de hidrógeno del vehículo hasta insertar la boquilla de la manguera o conducto por el que se bombea el fluido.

Los componentes de las estaciones de abastecimiento de hidrógeno líquido deben ser elaborados tomando en cuenta las particularidades que demanda la manipulación del hidrógeno en este estado físico, en especial la tolerancia de los materiales a las temperaturas de congelación o criogénicas; materiales que a menudo son muy escasos y, por consiguiente, costosos.

Sin duda un rubro importante es el de la seguridad, donde el hidrógeno en estado líquido manifiesta una ligera ventaja sobre el estado gaseoso; y consiste concretamente en que el hidrógeno líquido se puede almacenar a presiones más bajas lo que tiene un impacto positivo en el control y prevención de fugas (Kreiser, 1994).

4.2.3- Aspectos de seguridad en las estaciones de abastecimiento de hidrógeno

La subsistencia de los vehículos propulsados por hidrógeno depende en gran parte de la disponibilidad de estaciones de abastecimiento, mismas que necesariamente deben funcionar de manera segura.

Fugas accidentales y el consecuente peligro de explosión, son dos de los riesgos primarios que enfrentan las estaciones de abastecimiento de hidrógeno. Las fugas pueden ser instantáneas (ruptura en el compresor, por ejemplo) o continuas (por fractura en las tuberías), ambas, en el caso de encontrar una fuente de ignición, pueden originar una flama fugaz pero extensa. Una explosión es más probable que ocurra si el hidrógeno disipado se acumula en un espacio cerrado, por ello en espacios abiertos es casi nulo el riesgo de una explosión.

Tanaka y col. (2007) efectuaron un conjunto de experimentos de dispersión y explosión utilizando una estación de abastecimiento de hidrógeno comprimido de tamaño real, concluyendo que el factor de peso en dichos ensayos fue la concentración del hidrógeno que propicia la fuga.

Asimismo analizaron el comportamiento de las fugas en los tanques o cilindros de almacenaje; y señalan que el diámetro de la fuga, el volumen de hidrógeno disipado y la ventilación en el área donde están colocados los tanques son los elementos que afectan directamente la concentración del hidrógeno (Figura 4.11).



Figura 4.11- Cuarto de los cilindros de almacenamiento de hidrógeno con una ventilación adecuada (Tanaka y col., 2007)

La detección oportuna de las fugas así como su aislamiento en el menor tiempo posible y una ventilación favorable, son algunas medidas que pueden evitar que la concentración de hidrógeno producto de una fuga se torne peligrosa (Tanaka y col., 2007).

4.3- Conclusiones

El almacenamiento de hidrógeno es uno de los elementos indispensables para su utilización a gran escala y, paralelamente, representa un asunto bastante complejo dado que se trata de la sustancia más ligera conocida en el Universo.

De momento, existen seis métodos de almacenamiento de hidrógeno, siendo las modalidades de gas comprimido, líquido e hidruros metálicos las que han tenido mayor desenvolvimiento técnico y comercial; las tres opciones restantes, almacenamiento en materiales de carbono, micro-esferas de sílice y los hidruros orgánicos, se encuentran todavía en etapas experimentales.

El almacenamiento de hidrógeno en forma de gas comprimido es el formato más extendido en todo el mundo. Consiste en someter al hidrógeno a elevadas presiones con objeto de depositarlo en contenedores de tamaño razonable elaborados con materiales especiales de máxima resistencia. Sin embargo, aún aplicando altas presiones se requieren volúmenes relativamente grandes para almacenar cantidades sustanciales de hidrógeno, por ello se tiene previsto emplear diversas formaciones geológicas subterráneas a manera de gigantescos contenedores.

El hidrógeno almacenado en estado líquido ocupa menor espacio en comparación con el formato gaseoso, aunque debe mantenerse invariablemente a una temperatura de cuando menos $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ a fin de evitar su cambio a fase gaseosa con la que se tienen mayores probabilidades de fuga. El principal inconveniente de esta técnica de almacenamiento yace en la licuefacción del hidrógeno, puesto que se trata de un proceso que se destaca por un excesivo consumo de energía, que se refleja obviamente en el rubro económico.

Los hidruros metálicos son aleaciones con la singular habilidad de absorber y expeler hidrógeno bajo determinadas condiciones. Más de media centena de elementos metálicos pueden combinarse entre sí para obtener esta clase de hidruros, sin embargo son muy pocos los que reúnen las características apropiadas para su aprovechamiento como medios efectivos para almacenar hidrógeno. Si bien los hidruros metálicos constituyen una alternativa atractiva en términos de volumen, tienen la desventaja de ser sumamente pesados lo que a menudo acorta su espectro de posibles aplicaciones.

Para el posicionamiento del hidrógeno como energético no sólo se necesita contar con la infraestructura apropiada para su almacenamiento, sino también las vías para su distribución. En este contexto, las estaciones de suministro de hidrógeno o *hidrogeneras* son esenciales para avanzar en la integración de los vehículos equipados con celdas de celdas de combustible o motores de combustión interna alimentados con hidrógeno.

Es importante señalar que entorno a los vehículos impulsados por hidrógeno y a las estaciones de abastecimiento emerge una curiosa paradoja. Por un lado, las *hidrogeneras* en cualquiera de sus modalidades no se diseminarán a menos que exista una demanda real de hidrógeno; y, por otra parte, los vehículos alimentados con hidrógeno no se consolidarán a no ser que se garantice el abasto del combustible.

5.1- Producción de hidrógeno

Formado por un protón en su núcleo y un electrón orbitando alrededor, el átomo de hidrógeno es el más simple de los elementos registrados en la tabla periódica; los astros y muchos otros cuerpos están constituidos en gran parte por él, convirtiéndolo en el elemento más abundante del Universo.

Pese a ello, el hidrógeno como tal no se encuentra libre en el planeta Tierra, gracias a su diminuta masa le es posible escapar con facilidad a la acción de la gravedad terrestre, además, químicamente el átomo de hidrógeno es muy reactivo tendiendo a formar infinidad de compuestos con átomos de oxígeno y carbono, como por ejemplo el agua, los hidrocarburos y la materia orgánica. El hidrógeno obtenido bajo condiciones ambientales aparece en estado gaseoso formando moléculas diatómicas (dos átomos enlazados); es una sustancia inflamable, incolora e inodora.

La síntesis de hidrógeno a partir de compuestos naturales implica necesariamente un consumo de energía, de ahí que el hidrógeno deba ser visto como un portador de energía, es decir, un medio para transmitir y almacenar energía derivada de una fuente primaria; al igual que sucede con la electricidad. Acorde con los cánones de cuidado ambiental, uno de los aspectos más importantes en la producción de hidrógeno es el consumo total de energía y las emisiones, particularmente las de dióxido de carbono (CO_2), inherentes al proceso o método de generación, tratando de que en ambos rubros las cantidades netas sean las mínimas posibles.

En la producción de hidrógeno se manejan dos esquemas, el descentralizado y el centralizado (Figura 5.1). La producción descentralizada es un esquema que plantea la generación de hidrógeno a pequeña y mediana escala mediante una planta instalada junto a la estación de abastecimiento de hidrógeno o inclusive en los mismos hogares de las personas. Sin embargo, el costo de la producción descentralizada suele ser muy alto en comparación con la producción a gran escala o centralizada, en la cual una planta de mayor capacidad de producción se encarga de proveer el hidrógeno que después es llevado por ductos y/o camiones hasta el usuario final; el principal inconveniente de la producción centralizada son los elevados costos del transporte de hidrógeno. En la etapa de transición la producción descentralizada es la más aclamada.

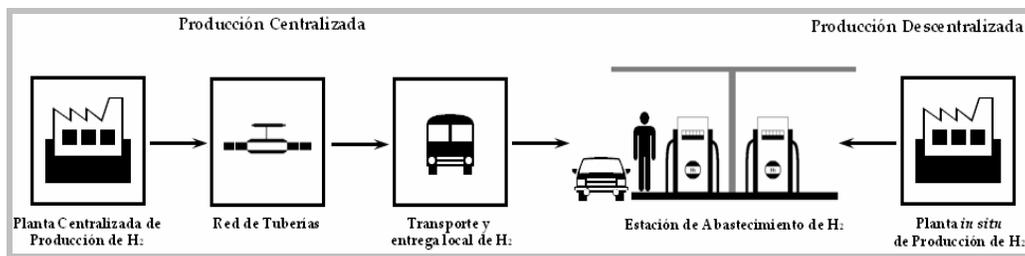


Figura 5.1- Esquemas de producción centralizada y descentralizada de hidrógeno
(adaptada de Drennen y Rosthal, 2007)

5.2- Principales métodos de producción de hidrógeno

La oferta actual de técnicas o métodos para generar hidrógeno está compuesta por una extensa gama de variantes, ya sea que empleen recursos no renovables, derivados del petróleo, por ejemplo; o bien, energía y/o materia prima extraída de fuentes renovables, biomasa y energía solar, por mencionar algunas (Holladay y col., 2008); asimismo, no se descarta la posibilidad de que se incremente el número de procesos disponibles conforme se profundice aun más en el estudio de esta molécula.

El amplio abanico de materias primas y de métodos de producción permite que casi cualquier región del mundo esté en condiciones de generar hidrógeno, y así satisfacer por lo menos su demanda interna de energía.

Es factible organizar la diversidad de métodos de producción de hidrógeno de acuerdo a diversos criterios (Ortega y François, 2007) como la naturaleza de la materia prima que utilizan, las reacciones químicas que los definen, la fuente de energía de la cual se alimentan, las emisiones de gases carbónicos que generan, su compatibilidad con las circunstancias actuales del medio ambiente, etcétera; estratificando hacia características más específicas dentro de una misma categoría.

Por comodidad se han agrupado las tecnologías de producción de hidrógeno, tanto las que se encuentran en etapas tempranas de desarrollo como aquellas que están bien posicionadas a nivel comercial, atendiendo a dos factores fundamentales, el tipo de materia prima y las reacciones químicas que se llevan a cabo. De ahí resultan dos conjuntos básicos (Holladay y col., 2008):

- El primero engloba a todos aquellos métodos de producción basados en el procesamiento de combustibles (reacciones de reformación)
- El segundo al que pertenecen las tecnologías no reformadoras de producción de hidrógeno

5.2.1- Métodos de producción de hidrógeno basados en el procesamiento de combustibles

Este tipo de procesos extraen el hidrógeno contenido en compuestos como la gasolina, el amoníaco, el metanol, el metano, y en general casi de cualquier combustible. El procesamiento del gas natural, constituido en su mayoría por metano, es la técnica de producción de hidrógeno más popular, en términos de comercialización.

Además del hidrógeno, el azufre forma parte de la composición química de gran parte de los combustibles utilizados en esta clase de procesos, lo cual implica problema mayúsculo debido a que el azufre interfiere con el desempeño de los catalizadores que suelen agregarse a la reacción; la solución consiste en un procedimiento conocido como desulfurización que permite remover, por distintas vías, el azufre existente en estos compuestos. En la Tabla 5.1 se muestra un desglose de las variantes más comunes de los métodos de producción de hidrógeno por la vía del procesamiento de combustibles.

Tabla 5.1- Métodos de producción de hidrógeno que emplean tecnologías de procesamiento de combustibles

Método	Variantes	Descripción	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Grado de desarrollo	Referencias
Reformación de hidrocarburos Emplean hidrocarburos como materia prima; uno de los productos en los procesos de reformación es una mezcla gaseosa integrada básicamente por hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono. Para elevar la cantidad de hidrógeno producido, el monóxido de carbono de la mezcla gaseosa se hace reaccionar con agua, obteniéndose más hidrógeno	Reformación de vapor	Reacción endotérmica (necesita o absorbe energía térmica para desarrollarse) de conversión de metano y vapor de agua. Las condiciones térmicas para este proceso son de 700 a 800°C, acompañadas de una presión de 3 a 25 bar. Domina la producción de hidrógeno a nivel industrial	-Temperaturas de operación menores en comparación con otras técnicas de reformación -Cuenta con una relación H ₂ /CO muy favorable (3:1) -No requiere suministro de oxígeno	-Desprende cantidades considerables de emisiones contaminantes	70 – 85%	Plenamente comercializado	Twigg, 1989; Song, 2002; Farrauto y col., 2003; Rostrup-Nielsen, 2003; King y col., 2005; McHugh, 2005; Ortega y François, 2007
	Oxidación parcial	Reacción exotérmica (desprende energía térmica), somete a los hidrocarburos a un entorno oxidante, lo que se consigue al ponerlos en contacto con oxígeno, de esta manera los hidrocarburos son parcialmente oxidados, produciendo hidrógeno y monóxido de carbono. Encabeza la lista de metodologías para alimentar celdas de combustible y otras aplicaciones comerciales; sin embargo, sus elevadas temperaturas de operación han obstaculizado su aprovechamiento en dispositivos compactos y portátiles	-No requiere catalizadores -Mínimas fugas de metano -Es más tolerante a la presencia de azufre	-Se desarrolla a temperaturas muy altas -Se detecta la formación de hollín -Relación H ₂ /CO baja (1:1 ó 2:1)	60 – 75%	Plenamente comercializado	Hohn y Schmidt, 2001; Timm y Onsan, 2001; Pino y col., 2002; Krummenacher y col., 2003; Holladay y col., 2004; McHugh, 2005; Ortega y François, 2007
	Reformación auto-térmica	Concebida como una combinación de la reformación de vapor y la oxidación parcial para suministrar la energía calorífica, lo cual simplifica el sistema, al tiempo que incrementa la producción de hidrógeno por medio de la reformación de vapor, por ello se cataloga como un proceso térmicamente neutro	-Temperaturas menores y mayor producción en relación con la oxidación parcial -No requiere suministro externo de energía térmica -Mínimas fugas de metano	-Requiere de una sofisticada red para surtir oxígeno puro a la reacción -No ha logrado comercializarse satisfactoriamente	60 – 75%	Comercializable en el corto plazo	Wilhelm y col., 2001; Holladay y col., 2003; McHugh, 2005; Yamada, 2006; Navarro y col., 2007; Ortega y François, 2007

Continuación de la Tabla 5.1- Métodos de producción de hidrógeno que emplean tecnologías de procesamiento de combustibles

Método	Variantes	Descripción	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Grado de desarrollo	Referencias
<p>Pirolisis</p> <p>Método de producción de hidrógeno en el cual se descompone un hidrocarburo al exponerlo a temperaturas muy elevadas, sin utilizar agua u oxígeno de por medio. Admite cualquier clase de materia orgánica; bajo condiciones adecuadas, puede estar exento de emisiones de monóxido y dióxido de carbono, dado que suprime la incorporación de agua o aire. Probablemente adquiera mayor protagonismo conforme transcurra el tiempo</p>	Ninguna conocida	---	<ul style="list-style-type: none"> -Trabaja con una amplia gama de combustibles (materia prima) -Es una tecnología relativamente compacta y sencilla -En teoría, no produce compuestos de carbono -Tiene el potencial para lograr una tasa casi nula de emisiones de monóxido y dióxido de carbono 	<ul style="list-style-type: none"> -De no contar con un diseño apropiado, está latente la posibilidad de generar grandes cantidades de contaminantes -En caso de que no se elimine por completo el agua y/o aire de la materia prima, se producirían volúmenes importantes de monóxido y dióxido de carbono 	---	---	<p>Wu y Yoshikawa, 2002; Muradov, 2003; Demirbas y Arin, 2004; Demirbas, 2005; Salakhov y col., 2005; Li y col., 2006</p>
<p>Reformación de plasma</p> <p>Se interpreta, químicamente, de forma semejante a la reformación convencional, diferenciándose en que la energía y los radicales libres involucrados en la reacción de reformación son tomados de una sustancia conocida como plasma, generada a partir de electricidad o calor. El plasma se define como una mezcla de iones y electrones; se ha postulado como el cuarto estado de la materia. Por medio de este método se ha logrado facilitar la descomposición de hidrocarburos en la reformación de combustibles</p>	Reformación térmica de plasma	<p>Genera el plasma utilizando una descarga de alta tensión; los electrones y otras partículas incrementan substancialmente su temperatura, etapa que consume un monto considerable de energía. Empleando metano como hidrocarburo, el sistema requiere cerca de 16 MJ de energía para generar un kilogramo de hidrógeno</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Tiene costos razonables comparándolo con los métodos convencionales -Componentes de tamaño y peso reducidos -Trabaja con hidrocarburos pesados, de composición más compleja -Puede adecuarse para funcionar a temperaturas menores de las necesarias en la reformación tradicional -Baja sensibilidad al azufre 	<ul style="list-style-type: none"> -Demanda excesiva de energía eléctrica -Erosión acelerada de los electrodos a causa de la temperatura y la presión -Es percibida como una etapa previa en la reformación de hidrocarburos y no como un método formal para producir hidrógeno 	9 – 85%	Comercializable en el largo plazo	<p>Mutaf-Yardimci y col., 1998; Hammer y col., 2004; Matsui y col., 2005; Yan y col., 2006</p>
	Reformación no térmica de plasma	<p>Aumenta sensiblemente la temperatura de los electrones, el resto de las partículas tienen cambios moderados en su temperatura, de esta forma se reduce el consumo de energía. Se divide en cuatro sub-grupos, diferenciándose por la manera en que la corriente y la potencia de descarga son regidas por la alimentación, flujo de gas y el diseño.</p>					

Continuación de la Tabla 5.1- Métodos de producción de hidrógeno que emplean tecnologías de procesamiento de combustibles

Método	Variantes	Descripción	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Grado de desarrollo	Referencias
<p>Reformación de fase acuosa Es una metodología en fase experimental mediante la cual es factible procesar hidrocarburos oxigenados o carbohidratos para generar hidrógeno. Exige presiones de alrededor de 25 a 30 MPa con temperaturas desde los 220 hasta los 270°C. Las reacciones de reformación que suceden a lo largo de este proceso son mucho mas complejas que las suscitadas en la reformación de vapor</p>	Ninguna conocida	---	<ul style="list-style-type: none"> -El sistema se simplifica dado que no requiere ni de agua ni de materia prima en estado gaseoso -Acepta compuestos que no pueden gasificarse, como la glucosa -Ocurre a temperaturas considerablemente bajas -Producción razonable de hidrógeno con diminuta emisión de monóxido de carbono -Convierte la biomasa en hidrogeno, situación en donde registra una eficiencia máxima 	<ul style="list-style-type: none"> -Los reactores apropiados para este proceso son de grandes dimensiones -Todavía no ha madurado totalmente, se encuentra aún en investigación 	35 – 55%	Comercializable en el mediano plazo	Taylor y col., 2003; Huber y Dumesic, 2006; Penninger, 2006; Valenzuela y col., 2006; Yan y col., 2006; Ortega y François, 2007; Rozmiarek, 2008
<p>Reformación de amoníaco Inicialmente contemplado como una alternativa en el suministro a celdas de combustible en dispositivos portátiles. El hidrógeno se obtiene al romper la molécula del amoníaco, para lo cual se necesita transferir calor al proceso, debido a que es una reacción endotérmica que sucede a aproximadamente 800 – 900°C y una presión relativamente baja. Las temperaturas se consiguen al quemar parte del hidrógeno producido o por medio de un segundo combustible</p>	Ninguna conocida	---	<ul style="list-style-type: none"> -Las fugas de amoníaco son fáciles de advertir, a consecuencia de su fuerte olor, con ello se reducen los riesgos por manipularlo -Es un combustible económico -Cuenta con una formidable red de distribución 	<ul style="list-style-type: none"> -En concentraciones elevadas, deteriora rápidamente los materiales de algunos componentes -Eventuales acumulaciones de amoníaco pueden trastornar el curso normal del proceso 	---	Comercializable en el corto plazo	Arana y col., 2003; Wojcik y col., 2003; Holladay y col., 2004; Chachuat y col., 2005

5.2.2- Métodos de producción de hidrógeno basados en procesos no reformadores

La producción de hidrógeno no es exclusiva de los métodos de reformación ni tampoco de los compuestos de origen fósil. El aprovechamiento de activos de otra naturaleza como pueden ser, por ejemplo, la biomasa (materia orgánica) y el agua, en conjunto con una metodología apropiada para sustraer al máximo posible el contenido de hidrógeno presente en este tipo de materiales, dan forma a una alternativa interesante en la que se depositan grandes expectativas asociadas a temas como la sustentabilidad e impacto ambiental en el marco de la producción a gran escala de hidrógeno.

5.2.2.1- Producción de hidrógeno a partir de biomasa

El concepto biomasa hace referencia, de manera general, a una aglomeración integrada en su totalidad por materia orgánica, proveniente de organismos vivos como son los vegetales y animales, a través de la cual es factible obtener diversos energéticos útiles en un sin número de actividades humanas, otorgándole la categoría de recurso renovable para generar energía.

Hay razones suficientes para aseverar que la biomasa, dentro de las fuentes renovables de energía, emerge como una seria candidata para tomar el relevo en la actividad energética, frente al ineludible panorama de la extinción de las reservas petroleras y, por ende, de todos sus productos derivados (Chum y Overend, 2001).

La biomasa abarca desde desperdicios de animales, residuos orgánicos urbanos, forestales, desechos agrícolas, de la industria maderera, papelera, alimenticia, así como otros tantos materiales biodegradables.

Al emplear la biomasa como materia prima en ciertos procesos de transformación se propicia la creación de nuevos compuestos, uno de éstos es el hidrógeno. Por medio de métodos como la gasificación, pirólisis, conversión a combustibles líquidos por extracción supercrítica, licuefacción, hidrólisis, etc., se puede obtener hidrógeno; los cuales, en ciertas ocasiones, requieren además de una reacción o de un entorno específico, demanda típica de la llamada producción biológica de hidrógeno o bio-hidrógeno.

En la Tabla 5.2 se aprecian las vertientes tecnológicas predominantes vinculadas con la producción de hidrogeno a partir de biomasa.

5.2.2.2- Producción de hidrógeno a partir de agua

Las técnicas de obtención de hidrógeno a través de la disociación de la molécula del agua se remontan al año de 1890, fecha en la que inclusive lograron posicionarse a nivel comercial (Norbeck y col., 1996).

La información a detalle de los métodos usuales de generación de hidrógeno por esta vía se presenta en la Tabla 5.3.

Tabla 5.2- Métodos de producción de hidrógeno que emplean procesos no reformadores. Producción a partir de biomasa

Método	Variantes	Descripción	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Grado de desarrollo	Referencias
<p>Gasificación de biomasa La gasificación, alimentada con biomasa y carbón es una técnica que está presente en diversos procesos industriales. Como sucede en la pirólisis, se induce una oxidación parcial en la materia prima obteniéndose una mezcla gaseosa, conocida como gas productor, compuesta de hidrógeno, metano, monóxido y dióxido de carbono además de nitrógeno. Sin embargo, también aparece alquitrán, el cual es extraído usando un reactor secundario. Un rendimiento mayor se consigue al abastecer de oxígeno puro al sistema, aunque con frecuencia se suministra simplemente aire</p>	Ninguna conocida	---	<p>-Se encuentra bien posicionado en el ámbito comercial</p> <p>-Forma parte de varios procesos industriales, lo cual ha facilitado su inclusión al mercado</p>	<p>-Nivel de temperatura</p> <p>-En el gas producido se detecta una enorme cantidad de alquitrán, sustancia contaminante</p> <p>-Perfeccionar el rendimiento, significa contar con una unidad de separación de oxígeno, que añade mayor costo y complejidad</p> <p>-El hidrógeno y el resto de los gases, se producen de forma muy diluida, a raíz de la utilización de aire en la reacción</p> <p>-Reactores gigantesco, consumen cantidades exorbitantes de biomasa</p>	35 – 50%	Plenamente comercializado	National Academy of Science, 2004; Sørensen, 2005; Demirbas, 2006
<p>Bio-Hidrógeno Concebido como parte de las acciones encaminadas a establecer un mecanismo de desarrollo sustentable, atendiendo simultáneamente la problemática del manejo de residuos. Ofrece un menú variado de métodos que van desde el aprovechamiento de la degradación de materia orgánica mediante microorganismos (fermentación) hasta aquellos que promueven la ruptura de moléculas de agua a través de reacciones electroquímicas bajo distintas circunstancias (fotólisis)</p>	Fotólisis directa	Ciertos organismos fotosintéticos, como algas y bacterias, canalizan el exceso de energía solar a la que están expuestos de tal forma que producen hidrógeno a partir de agua. Tiene su origen en la capacidad de los seres fotosintéticos de generar iones de hidrógeno y oxígeno al disociar la molécula del agua, utilizando de por medio la energía proporcionada por la radiación solar; posteriormente los iones de hidrógeno son atraídos por electrones fruto de la sobre-captación de energía; convirtiéndolos, finalmente, en moléculas de hidrógeno gaseoso	<p>-El empleo de agua como materia prima puede verse una ventaja dado que, aún en esta época, es un recurso de bajo costo y existente en casi cualquier lugar</p> <p>-Es una tecnología que puede convivir en armonía con el medio ambiente</p>	<p>-Necesita áreas extensas para captar la cantidad apropiada de radiación solar</p> <p>-Los microorganismos producen tanto hidrógeno como oxígeno, este último, al ser detectado por los propios organismos, inhibe la generación de hidrógeno</p> <p>-Posee, al momento, una de las eficiencias más bajas</p> <p>-La producción apenas se mantiene durante unos cuantos segundos</p>	0.5 – 1%	Comercializable en el largo plazo	Sørensen, 2005; Kapdan y Kargi, 2006; Kovacs y col., 2006; Turner y col., 2008

Continuación de la Tabla 5.2- Métodos de producción de hidrógeno que emplean procesos no reformadores. Producción a partir de biomasa

Método	Variantes	Descripción	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Grado de desarrollo	Referencias
Bio-Hidrógeno	Fermentación oscura	Consiste en alimentar colonias de bacterias anaeróbicas, también pueden ser algas, con un sustrato de alto contenido en carbohidratos; todo esto sucede en ausencia de luz, es decir, en la oscuridad. La biomasa preferida para este proceso es aquella que es biodegradable, muy abundante, de bajo costo y de elevada concentración de carbohidratos. Los sustratos por excelencia son los azúcares en estado puro (glucosa y lactosa) aunque son relativamente caros y escasos. El producto final es una mezcla de gases (biogás), donde figura el hidrógeno. En la práctica, alcanza una tasa de producción de 2.4 a 3.2 moles de hidrógeno por mol de glucosa; el valor teórico asciende a 4 moles	<ul style="list-style-type: none"> -Actualmente funciona con una amplia gama de residuos, desde desechos agrícolas (celulosa y almidón), desechos de la industria de los alimentos (carbohidratos) y lodos acumulados en las plantas de tratamiento de aguas residuales -Llevando a cabo ajustes, es factible incrementar la producción la hidrógeno hasta 12 moles de hidrógeno por mol de glucosa -Podría ser una solución viable al problema de los residuos urbanos 	<ul style="list-style-type: none"> -A lo largo de la fermentación se producen ácidos orgánicos, como el acético y el butírico, que ocasionan un descenso en la generación de hidrógeno -La presencia de ácidos orgánicos obliga a un tratamiento especial de los desechos digeridos, en particular de los remanentes de agua 	En teoría, 60 - 80%	Comercializable en el mediano - largo plazo	Levin y col., 2004; Kapdan y Kargi, 2006; Kovacs y col., 2006; Levin y col., 2007
	Foto-fermentación	También nombrada producción bacteriana fotosintética, capitaliza la función de enzimas específicas que se encuentran en cierta variedad de bacterias púrpuras que les permiten generar hidrógeno. Los pigmentos fotosintéticos (clorofila, por ejemplo) se encargan de absorber la radiación solar consumida durante el proceso de desintegración de la molécula de agua en protones, electrones además de oxígeno; quienes son recombinados con sustancias secundarias por efecto de las enzimas, concluyendo con la producción de hidrógeno y otros compuestos	<ul style="list-style-type: none"> -El proceso es indiferente a la presencia de oxígeno -Las bacterias se adaptan satisfactoriamente a distintas condiciones (procesos intermitentes, continuos, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> -Las enzimas que están involucradas trabajan con lentitud -Es un proceso que, relativamente, implica un gasto considerable de energía -La eficiencia promedio de los organismos fotosintéticos es inferior a la registrada por colectores solares -La eficiencia vigente de este método con dificultad alcanza el valor de 1.9% 	0.1 – 1.9%	Comercializable en el largo plazo	Levin y col., 2004; Sørensen, 2005; Kapdan y Kargi, 2006; Kovacs y col., 2006

Continuación de la Tabla 5.2- Métodos de producción de hidrógeno que emplean procesos no reformadores. Producción a partir de biomasa

Método	Variantes	Descripción	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Grado de desarrollo	Referencias
Bio-Hidrógeno	Celda de electrólisis microbiana	Conocida también como reactor bio-electroquímico asistido microbially, transforma directamente la materia orgánica en hidrógeno gracias a un proceso bautizado como electrohidrogenesis. Estas celdas disponen de microorganismos dedicados a degradar la materia orgánica, de donde extraen electrones que posteriormente envían a un electrodo (ánodo). Al llegar al otro electrodo (cátodo), los electrones entran en contacto con protones (iones de hidrógeno) y oxígeno, dando lugar a la formación de hidrogeno diatómico	<ul style="list-style-type: none"> -Estructuralmente, son semejantes a otros tipos de celdas de combustible -Podría tener numerosas aplicaciones gracias a su similitud con las celdas de combustible convencionales -Utiliza compuestos orgánicos como materia prima -Funcionan a cualquier hora, debido a que no necesitan exponerse a la luz solar 	<ul style="list-style-type: none"> -Desde cierto punto de vista, es un sistema muy complejo y con elevados costos de mantenimiento -Aún quedan por responder muchas interrogantes sobre esta tecnología 	Un máximo de 78%	Comercializable en el largo plazo	Cheng y Logan, 2007; Ditzig y col., 2007; Call y Logan, 2008
	Procesos multi-etapa	Pensados como una estrategia para incrementar la producción de hidrógeno; en un principio acoplaron la fermentación oscura con la foto-fermentación, evolucionando hasta la configuraciones de tres e incluso cuatro etapas. Mediante la fermentación oscura, la biomasa se convierte en hidrógeno, su efluente residuo contiene ácidos orgánicos, que se aprovechan en la segunda etapa, la foto-fermentación. La tercera fase es la fotólisis directa; quien funge como un filtro que recibe radiación visible, dejando pasar las longitudes de onda infrarrojas, útiles para la foto-fermentación. En caso de tener un sobrante de ácidos orgánicos, éstos se conducen hacia una celda de electrólisis microbiana, incrementando la cantidad de hidrógeno producido	<ul style="list-style-type: none"> -Es comparable a un modelo de reciclaje, donde se tiene el objetivo de encontrarle un uso a cualquier material que sea considerado "residuo" -La producción acumulada de hidrógeno es muy significativa 	<ul style="list-style-type: none"> -La integración de varios métodos representa un desafío en aspectos como el diseño de los reactores y del sistema, el control de los procesos, su funcionamiento continuo y mantenimiento -Pese a todo, la producción de hidrógeno es relativamente lenta 	Varía	----	Kapdan y Kargi, 2006; U.S. Department of Energy Hydrogen, 2007

Tabla 5.3- Métodos de producción de hidrógeno que emplean procesos no reformadores. Producción a partir de agua

Método	Variantes	Descripción	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Grado de desarrollo	Referencias
<p>Electrólisis</p> <p>El camino más sencillo para romper la molécula del agua consiste en hacer circular una corriente eléctrica a lo largo de un par de electrodos; es la transformación de energía eléctrica en energía química. Los dispositivos ideados para realizar este proceso se denominan electrolizadores, que destacan por el grado de pureza del hidrógeno que generan. Por el momento, la producción de hidrógeno a gran escala mediante la electrólisis es más costosa en comparación con los métodos de procesamiento de combustibles; aunque, un aumento en los precios de los combustibles daría mayor competitividad en el ámbito económico a esta opción tecnológica, suponiendo que además consiga la energía eléctrica necesaria a partir de fuentes renovables, a la par de los efectos positivos en el medio ambiente derivados del empleo de este tipo de energías</p>	Electrolizador alcalino	Formado por un juego de electrodos, un separador microporoso y un electro-lito alcalino en fase acuosa. El cátodo está hecho a base de níquel con un recubrimiento catalítico, mientras que el ánodo es de cobre o níquel provisto de una capa de óxido metálico. El agua ingresa por el cátodo, ahí mismo es desdoblada en hidrógeno y OH ⁻ ; el hidrógeno producido se mezcla con la solución alcalina. Al exterior del electrolizador se coloca un separador agua-gas de donde se confisca el gas de interés	<ul style="list-style-type: none"> -Han tenido un vertiginoso desarrollo comercial y técnico -Tienen un costo capital considerablemente bajo -Son los electrolizadores más habituales 	<ul style="list-style-type: none"> -Son electrolizadores de eficiencia baja -Consumen una cantidad elevada de energía eléctrica 	50 – 60%	Plenamente comercializados	National Academy of Science, 2004; Sørensen, 2005; Turner y col., 2008
	Electrolizador de membrana de intercambio protónico	Construidos con base en la tecnología de las celdas de combustible del mismo nombre. El agua entra a través del ánodo del electrolizador, lugar donde se separa en protones y oxígeno; los protones transitan por la membrana en dirección al cátodo donde son recombinados hasta formar hidrógeno. La membrana, además de desempeñarse como un medio de separación de los electrodos, sirve de mecanismo de separación de gases	<ul style="list-style-type: none"> -Eficiencia mayor en comparación con el electrolizador alcalino -No enfrenta problema de corrosión -No requiere de un módulo adicional para separación de gases 	<ul style="list-style-type: none"> -Es un electrolizador más costoso que el de tipo alcalino 	55 – 70%	Comercializable en el corto plazo	National Academy of Science, 2004; Sørensen, 2005; Pettersson y col., 2006; Turner y col., 2008
	Celdas de electrólisis de óxido sólido	Son celdas de combustible funcionando en sentido inverso; en las cuales, energía eléctrica y energía térmica trabajan en equipo para fracturar la molécula del agua, lo que reduce el gasto en electricidad. Su funcionamiento es parecido al electrolizador alcalino, los iones de oxígeno circulan en el medio electrolítico, el hidrógeno se oculta el vapor sin reaccionar	<ul style="list-style-type: none"> -Eléctricamente, son los más eficientes -Los electrolitos sólidos tienen un menor índice de corrosión -Las elevadas temperaturas favorecen la eficiencia de estos equipos 	<ul style="list-style-type: none"> -Han experimentado un lento desarrollo -Para soportar altas temperaturas se requieren materiales especiales, a menudo más costosos -La fuente externa de energía térmica; usualmente disminuye la eficiencia global 	40 – 60%	Comercializable en el mediano plazo	Norbeck y col., 1996; Hino y col., 2004; National Academy of Science, 2004

Continuación de la Tabla 5.3- Métodos de producción de hidrógeno que emplean procesos no reformadores. Producción a partir de agua

Método	Variantes	Descripción	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	Grado de desarrollo	Referencias
<p>Rompimiento termoquímico del agua</p> <p>A veces llamado termólisis, proceso que disocia en hidrógeno y oxígeno la molécula del agua utilizando exclusivamente energía térmica, esto precisa una temperatura de por lo menos 2,500 °C. Se tienen contabilizadas alrededor de 300 técnicas asociadas a este método, que trabajan a temperaturas inferiores, pero sometidas a elevadas presiones</p>	300 variantes registradas	---	<p>-Posee una cantidad asombrosa de variantes</p> <p>-Es factible simplificar el proceso, reduciendo el número de reacciones involucradas</p>	<p>-Los materiales que toleren altas temperaturas son escasos y costosos</p> <p>-Tiene pocos argumentos en cuanto a costos y eficiencia frente a otros métodos de producción</p> <p>-Los materiales que requiere tienen una composición altamente tóxica</p>	Cercana al 50%	Comercializable en el largo plazo	Norbeck y col., 1996; Funk, 2001; National Academy of Science, 2004; Steinfeld, 2005; U.S. Department of Energy Hydrogen, 2007
<p>Fotoelectrólisis</p> <p>Fractura directamente la molécula del agua a través de la energía solar, para lo cual utiliza semiconductores idénticos a los usados en paneles fotovoltaicos. El electrodo llamado foto-cátodo es un material tipo p (positivo, exceso de huecos), en tanto que el foto-ánodo es de tipo n (negativo, exceso de electrones); ambos se sumergen en un electrolito líquido, sustituyendo la generación de una corriente eléctrica por la disociación de la molécula del agua. Una larga lista de materiales han sido probados como fotoelectrodos en este método, intentando mejorar el rendimiento de esta clase de sistemas</p>	Ninguna conocida	---	<p>-Construido a base de materiales de bajo costo</p> <p>-Pudiera desarrollarse hasta alcanzar eficiencias muy significativas</p>	<p>-Por el momento, presenta una baja tasa de absorción de luz</p> <p>-Es un proceso un tanto inestable</p> <p>-Aspectos como imperfecciones en la estructura de los materiales y la corrosión de los electrodos, repercuten en la producción de hidrógeno</p> <p>-En caso de darse la oxidación en la superficie del semiconductor, se formaría una capa que interrumpiría el tránsito a través de este elemento</p>	12.4%	Comercializable en el largo plazo	Norbeck y col., 1996; Gratzel, 2000; Aroutiounian y col., 2005; Turner y col., 2008

5.3- Separación y purificación de hidrógeno

Son cuatro las tecnologías frecuentemente empleadas para separar el hidrógeno, el dióxido y monóxido de carbono del gas de síntesis que resulta de la mayoría de los métodos de producción:

- Adsorción de todos los gases menos del hidrógeno, lo que da como resultado hidrógeno puro.
- Absorción, física o química, del dióxido de carbono (CO_2).
- Membranas de polímeros, permiten la separación de grandes cantidades de hidrógeno.
- Separación criogénica, a través de la cual es posible segregar diversas sustancias; comúnmente se utiliza para conseguir monóxido de carbono (CO) puro.

La absorción de CO_2 en solventes apropiados fue, antes de 1980, la tecnología dominante en la producción de hidrógeno puro. Posteriormente, surgió la adsorción por oscilación de presión conocida como PSA, por las siglas en inglés de *Pressure Swing Adsorption*, que se ha venido utilizando, sobre todo en la reformación de metano, para la obtención de hidrógeno de alta pureza.

La separación de hidrógeno por medio de membranas es una tecnología de reciente concepción, por lo general son usadas para recuperar o capturar el hidrógeno presente en diversos gases residuales de refinerías y otras industrias químicas. Esta tecnología no produce hidrógeno de alta pureza en una sola etapa, se necesitan varias fases con distintas membranas para eliminar las sustancias mezcladas. Asimismo, las membranas pueden acoplarse con otros sistemas de separación, como por ejemplo el PSA, en una configuración híbrida para la purificación efectiva del hidrógeno (Figura 5.2).

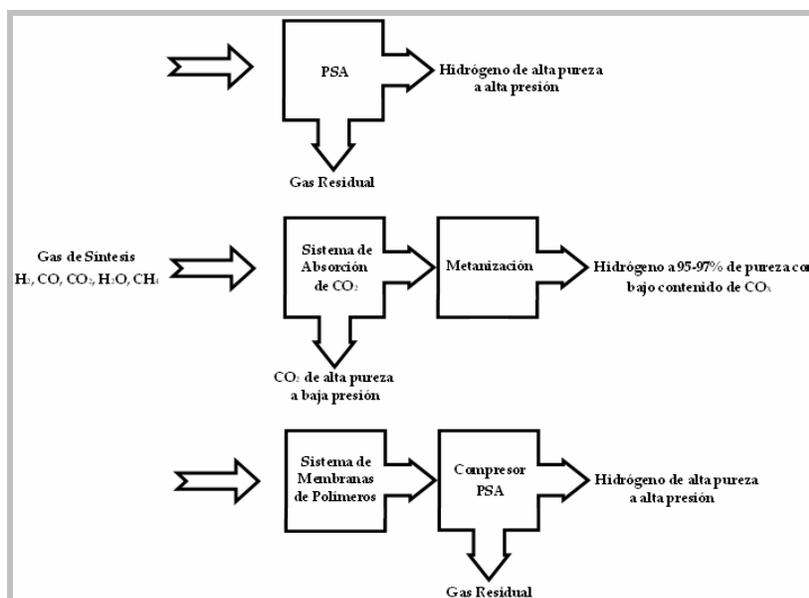


Figura 5.2- Diversas configuraciones de los sistemas de separación y purificación de H_2 (adaptada de Pant y Gupta, 2009a)

Los procesos de separación criogénica se restringen a aplicaciones mucho más especializadas (Gunardson, 1998), fundamentalmente para la obtención de CO puro; aunque también puede asociarse con otras tecnologías en un sistema completo de separación y purificación de hidrógeno.

Al elegir la tecnología de separación de hidrógeno adecuada se debe considerar la materia prima que se utiliza en la producción de hidrógeno así como la composición del gas de síntesis que se genera (Pant y Gupta, 2009a).

En plantas reformadoras que consumen gas natural (metano) u otros hidrocarburos ligeros, donde el gas de síntesis posee una elevada concentración de hidrógeno, el sistema PSA es la tecnología más socorrida dado que a menudo es la mejor opción en términos económicos.

Para insumos con mayor proporción de carbono que de hidrógeno (hidrocarburos pesados y carbón, por ejemplo) se sugieren otros sistemas como la absorción de CO₂ o las membranas de polímeros, individualmente o combinándolos entre ellos. Cuando se hace uso de biomasa como materia prima, la absorción de CO₂ sola o en compañía de un módulo de PSA, puede ser la opción más pertinente (Pant y Gupta, 2009a).

Siguiendo la tendencia de las medidas encauzadas a atenuar y controlar los efectos del cambio climático, la nueva generación de plantas productoras de hidrógeno deberá contar con un sistema de separación y purificación de hidrógeno que además sea capaz de retener y concentrar el CO₂ en forma pura (Drennen y Rosthal, 2007).

Los procesos de separación y purificación impactan de manera significativa en el monto de inversión y en los costos de funcionamiento de las plantas productoras de hidrógeno, es decir, los equipos necesarios son relativamente costosos y su consumo de energía es notorio.

Existen otras tecnologías experimentales que se están evaluando, la mayoría de ellas son a base de membranas fabricadas a partir de diversos compuestos o materiales; sin embargo, requieren desarrollarse y estudiarse aún más si pretenden competir con los sistemas más conocidos.

5.4- Costos de producción de hidrógeno

Establecer los costos de producción de hidrógeno no es un asunto sencillo debido a la multiplicidad de factores que intervienen en su determinación. Consideraciones de carácter internacional, local, económico, político, geográfico, legislativo; la mayoría de éstas en continuo cambio, así como de aquellas inherentes al proceso o método de producción están presentes en el monto total de desembolso económico necesario para generar hidrógeno (Ortega y François, 2007), y no cabe duda que una de las razones con mayor peso específico al momento de tomar decisiones.

Algunos escenarios que describen elocuentemente la volatilidad o variabilidad propia de los costos de producción de hidrógeno están ligados a los precios de la materia

prima y a las tarifas de los servicios demandados. Por ejemplo, los procesos de reformación con frecuencia emplean hidrocarburos como materia prima, los cuales son compuestos derivados del petróleo manufacturados por la industria petroquímica.

Los precios del petróleo han experimentado cambios sustanciales en breves lapsos de tiempo, impactando directamente en cada eslabón de su larga y dominante cadena de influencia. Hasta hace algunos meses se ubicaban en o por encima de la barrera de los cien dólares americanos por barril, cifra que se incrementaba día con día, imponiendo máximos históricos, haciendo pensar que inclusive podría doblar su valor, es decir, llegar a los doscientos dólares americanos por barril. Sin embargo, las circunstancias condujeron a una situación totalmente opuesta; el acelerado desplome de los precios del petróleo significó, en algunos casos, la pérdida de casi la mitad de su valor máximo de fechas anteriores.

Dentro del rubro de los servicios demandados se encuentra, junto con otros tantos, el servicio de suministro de energía eléctrica. Técnicas de generación de hidrógeno como la electrólisis con energía eléctrica convencional, tomada de la red eléctrica, deben un porcentaje significativo de su costo de producción al consumo de energía eléctrica (Moriarty y Honnery, 2007).

Las tarifas del servicio de energía eléctrica difieren tratándose de distintos países e inclusive dentro de una misma nación; a menudo están subordinadas a las fluctuaciones de los precios de los activos, el petróleo por nombrar alguno, otra posibilidad es que el costo real por el suministro de la energía sea parcialmente subsidiado por el gobierno de un país, como ocurre actualmente de México, aminorando el importe a pagar por este concepto.

Existen condiciones que pudieran contribuir a disminuir los costos de producción de hidrógeno, una de éstas tiene su origen en comportamiento económico de las innovaciones tecnológicas. Cuando una novedad tecnológica, que cuente con un potencial de comercialización promisorio, consigue, transcurrido el tiempo necesario, popularizarse en la mayoría de los sectores de una sociedad es a consecuencia de una notoria reducción en su precio de adquisición, es decir, conforme transcurre el tiempo las tecnologías novedosas experimentan un fenómeno de depreciación gradual, conectado a factores como los métodos de producción, materiales utilizados, tamaño, ritmo de producción, oferta, demanda, etcétera. Se puede pronosticar que en el supuesto de que la demanda de hidrógeno se equipare a la demanda actual de hidrocarburos, la tecnología de producción y aprovechamiento de éste tenga una evolución como la arriba descrita.

Por otra parte, la labor de investigación y desarrollo pudiera rendir frutos que se traduzcan en nuevas metodologías de producción de hidrógeno económicamente más atractivas (Marbán y Valdés-Solís, 2007), o bien en un perfeccionamiento de los esquemas actuales de producción de hidrógeno que ataque áreas específicas como disminución de pérdidas de energía –aumentar la eficiencia- y búsqueda de materiales equivalentes de menor precio; opciones que individualmente o en conjunto representan un beneficio económico directo.

En síntesis, los costos de producción de hidrógeno plantean el desembolso económico necesario para generar cierta cantidad de este recurso, y cambian de acuerdo al proceso o método de producción (Tabla 5.4) en el cual convergen aspectos como el costo anual de mantenimiento, consumo de energía, costo de la materia prima, procesos de pre-tratamiento, purificación, recuperación, captación de dióxido de carbono, entre otros.

Tabla 5.4- Costos estimados de producción de hidrógeno de algunos de los métodos más representativos

(adaptada de de Vrije y Claassen, 2005; Sørensen, 2005; Pant y Gupta, 2009a)

Proceso de producción	Costo de producción (calculado al 2009)	Unidades
Reformación de gas natural	€ 0.34	Nm ³ de H ₂
Electrólisis con electricidad convencional	€ 0.25	Nm ³ de H ₂
Electrólisis con electricidad de bajas emisiones de CO ₂	€ 0.29 – 0.39	Nm ³ de H ₂
Bio-proceso de dos etapas (fermentación oscura – foto-fermentación) utilizando biomasa	€ 0.27	Nm ³ de H ₂
Reformación de bio-metano	€ 0.34	Nm ³ de H ₂
Electrólisis con electricidad generada a partir de energía eólica	€ 0.27	Nm ³ de H ₂
Electrólisis con electricidad generada a partir de celdas fotovoltaicas	€ 3.17	Nm ³ de H ₂
Fermentación oscura de biomasa	€ 0.36	Nm ³ de H ₂
	€ 3.96	kg de H ₂
Gasificación de carbón	US\$ 1.10	kg de H ₂
Celda de combustible en funcionamiento inverso	Costo de la celda de combustible Costo del suministro de energía eléctrica	
Gasificación de biomasa y reacción de intercambio	US\$ 10.50 – 16.34	GJ de H ₂
Pirolisis de biomasa	US\$ 4.35	kg de H ₂
Rompimiento térmico de la molécula del agua utilizando energía nuclear	US\$ 1.87	kg de H ₂
Algas fotosintéticas –mutación de <i>Rhodobacter Sphaeroides</i>	¥ 274.30 – 669.97	m ³ de H ₂
	US\$ 219.43 – 536.92	GJ de H ₂

Nm³, metro cúbico normal (temperatura de 0 °C, presión de 1 atm)

Posteriormente, en el momento en que se produzca hidrógeno a volúmenes mayores habrá que contemplar reajustes al balance de gastos e incluir otros egresos provenientes, posiblemente, del servicio de transporte de enormes cantidades de materia prima y de la nómina del personal de la planta de producción de hidrógeno (de Vrije y Claassen, 2005).

5.5- Panorama global de la producción y utilización del hidrógeno en la actualidad

La producción de hidrógeno destaca por su amplio repertorio de materias primas, tanto de recursos renovables como de los no renovables, y su igualmente extenso número de tecnologías de producción, de ellas, la reformación de hidrocarburos y la electrólisis son las más recurridas en la actualidad (Figura 5.3). Se calcula que en el año 2004 en todo el planeta se generaron 50 millones de toneladas de hidrógeno, al tiempo que se pronostica que el ritmo de producción aumente 10% de forma anual.

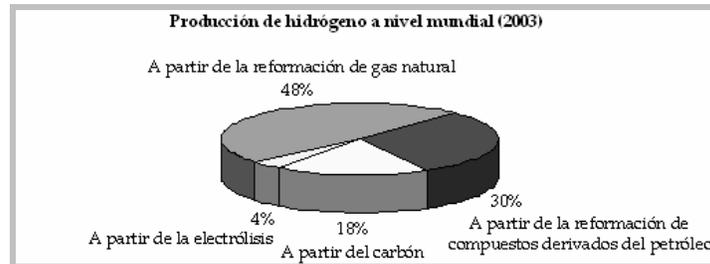


Figura 5.3- Producción de hidrógeno a nivel mundial (adaptada de Pant y Gupta, 2009a)

De momento el hidrógeno no se emplea primordialmente como combustible sino como reactivo químico en diversos procesos industriales, por ejemplo, cerca de 60% se destina a la producción de amoníaco utilizado en fertilizantes, y el porcentaje restante es usado en refinerías y demás industrias afines (Figura 5.4). Distintas proyecciones apuntan a que en el año 2040 la demanda de hidrógeno podría llegar a ser de hasta 150 millones de toneladas (Pant y Gupta, 2009a).



Figura 5.4 – Consumo de hidrógeno a nivel mundial (adaptada de Wee, 2007; Pant y Gupta, 2009a)

5.6- Producción y utilización del hidrógeno en México

El mayor porcentaje de la producción de hidrógeno en México recae en un reducido grupo de procesos industriales (Galarza, 2008):

- Reformación catalítica de hidrocarburos
- Procesos electrolíticos

- Métodos en los que se genera hidrógeno como producto secundario de otros procesos químicos

Como se observa, el repertorio de tecnologías disponibles es muy ajustado y no figuran, entre otras, las denominadas metodologías biológicas de producción de hidrógeno.

De acuerdo con datos proporcionados por la iniciativa privada de México, a nivel nacional se cuenta con un total de 36 plantas establecidas para la producción de hidrógeno, las cuales en conjunto suman una capacidad instalada de 16,797 toneladas anuales (Galarza, 2008). La producción en suelo mexicano predominantemente se sitúa en los Estados de: Veracruz, México, Jalisco, Nuevo León y Coahuila. En la Figura 5.5 se muestra el abanico de las tecnologías preferidas por el sector industrial para generar hidrógeno.

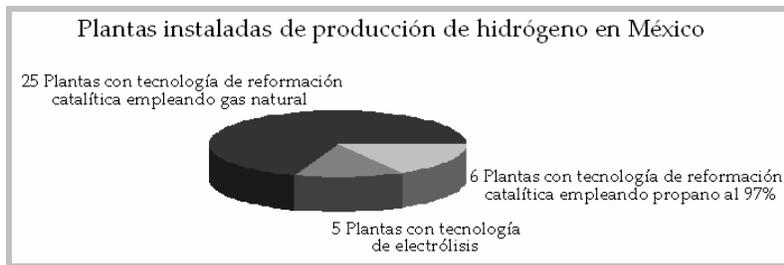


Figura 5.5- Plantas instaladas de producción de hidrógeno en México (adaptada de Galarza, 2008)

El volumen de producción de cada planta está determinado por el rendimiento propio de la tecnología o método en que basan su funcionamiento, mismo que también incide directamente en las características físicas y químicas del producto que se consigue al término del proceso, esta información se encuentra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5.- Producción estándar promedio y características del hidrógeno (adaptada de Galarza, 2008)

Método	Producción estándar promedio por planta	Características del hidrógeno obtenido
Reformación catalítica de gas natural	20,000 SCFH (536 NCMH)	Estado gaseoso, a una presión de 14.7 Kg/cm ² , temperatura de 28 °C, pureza de 99.99% en volumen, mezclado con algunas partículas de CO, CO ₂ y H ₂ O
Reformación catalítica de propano al 97%	15,000 SCFH (400 NCMH)	
Electrólisis	1,866 SCFH (50 NCMH)	Estado gaseoso, a una presión de 2 Kg/cm ² , temperatura de 28 °C, pureza de 99.99% en volumen, mezclado con algunas partículas de O ₂ y H ₂ O

SCFH: siglas en inglés de pies cúbicos estándares por hora
 NCMH: siglas en inglés de metros cúbicos normales por hora

El hidrógeno producido en México se destina habitualmente a actividades desempeñadas por la industria petroquímica, alimenticia, química, siderúrgica, electrónica, entre otras (Galarza, 2008).

5.7- Conclusiones

Indudablemente la producción de hidrógeno es la pieza clave para su utilización masiva como un sustituto de los combustibles de origen fósil. Sin embargo, la dependencia de recursos fósiles no renovables, carbón, gas natural y compuestos derivados del petróleo, es tal que más del 95% de la producción mundial total de hidrógeno emplea estas sustancias como materia prima, con todas las consecuencias ecológicas que acarrearán.

La reformación de gas natural, conformado básicamente por metano, y la oxidación parcial de hidrocarburos son los métodos de generación de hidrógeno basados en el procesamiento de combustibles que predominan a nivel industrial, ya que ofrecen una tasa de conversión y un costo de producción bastante rentables. En contraste, emiten enormes cantidades de gases de efecto invernadero y muchos otros contaminantes, además de que no representan una ruta sustentable para obtener el hidrógeno.

Los métodos de generación de hidrógeno que aprovechan insumos como la biomasa constituyen un mecanismo de producción en mejor sintonía con el medio ambiente, con la cual se lograría romper con la hegemonía de los recursos fósiles, no obstante deben superar a la brevedad las deficiencias técnicas y económicas que han frenado su penetración en el mercado.

La biomasa, materia biodegradable procedente de desperdicios de animales, residuos urbanos, agrícolas y de diversas industrias, sobresale como un recurso renovable con un amplio repertorio de aplicaciones en el terreno de los energéticos, y el hidrógeno no es la excepción. La producción biológica de hidrógeno es la aportación más distintiva de los métodos que emplean biomasa como materia prima. La fermentación oscura, la fotofermentación y los procesos que combinan éstos y otros métodos son las técnicas biológicas con mayor presencia en todo el orbe dada su versatilidad en cuanto a la materia orgánica que pueden transformar y su contribución al tratamiento integral de los residuos, aunado a la expectativa de que sus costos de producción llegarán a ser sumamente competitivos.

Con respecto a las técnicas de obtención de hidrógeno mediante el rompimiento de la molécula del agua, la electrólisis es uno de los métodos más difundidos a escala mundial, abarcando hasta el 4% del total de la producción de hidrógeno. Para que adquiera un carácter sustentable, la electrólisis debe integrar tecnologías que empleen fuentes renovables en la generación de la energía eléctrica para disociar el agua; sin embargo, con las celdas fotovoltaicas, por ejemplo, se tiene un costo de producción bastante elevado.

Por otro lado, el agua no es precisamente un recurso ilimitado, así que su utilización masiva para la producción de hidrógeno por medio de la electrólisis además de que requiere un minucioso tratamiento de desmineralización, podría suscitar inconformidad social ante la anunciada escasez del líquido.

En general, el hidrógeno se produce no para ser usado específicamente como combustible en vehículos, sino más bien para emplearse en diversos procesos industriales como en la obtención de amoníaco para fertilizantes y en refinerías. En México el panorama es el mismo, el hidrógeno, que es producido en su mayoría a través de métodos de reformación de hidrocarburos, se destina a actividades de la industria química y petroquímica, no para su consumo en medios de transporte que a nivel nacional son inexistentes.

6.1- Procesos biológicos para la producción de hidrógeno

La denominada producción biológica es una alternativa viable a los métodos tradicionales para obtener hidrógeno. La generación de bio-hidrógeno es posible por medio de microorganismos que actúan sobre materiales orgánicos de alta biodegradabilidad. Bajo condiciones controladas, el hidrógeno aparece como un producto durante la reacción de conversión o descomposición de los compuestos orgánicos, y es susceptible de ser manipulada para incrementar el rendimiento en la producción de este gas.

Los bio-procesos o procesos biológicos para la producción de hidrógeno más difundidos son la bio-fotólisis del agua por algas, fermentación oscura y foto-fermentación de materia orgánica; el proceso secuencial fermentación oscura-foto-fermentación constituye el acercamiento más vanguardista en la producción de bio-hidrógeno (Kapdan y Kargi, 2006).

6.2- Materia prima para los procesos biológicos

Los criterios primordiales en la selección de los materiales a fin de emplearlos en la producción de bio-hidrógeno giran en torno a la disponibilidad, costo, contenido de carbohidratos y biodegradabilidad (Kapdan y Kargi, 2006). Los azúcares simples como la glucosa, sucrosa y lactosa son de acelerada biodegradabilidad y por mucho los sustratos preferidos para producir hidrógeno; no obstante, las fuentes de carbohidratos puros como materia cruda se distinguen por su elevado costo, razón por la cual no es factible emplearlas como insumos principales.

Ante esta limitante, una gran variedad de residuos orgánicos emergen como una opción para los bio-procesos, sobre todo aquellos que cuentan con un importante contenido de hidratos de carbono. En este sentido, algunos de los residuos que tienen mayor potencial son:

- Los residuos agrícolas y de la industria alimenticia que contienen almidón y celulosa
- Las aguas industriales residuales ricas en hidratos de carbono
- Los fangos o lodos de desechos de las plantas de tratamiento de aguas residuales

6.2.1- Residuos agrícolas y de la industria alimenticia que contienen almidón y celulosa

Muchos de los desechos de la industria alimenticia y la agricultura poseen almidón y/o celulosa los cuales tienen un abundante contenido de carbohidratos, aunque la compleja composición de estos desechos puede afectar negativamente su biodegradabilidad.

Los residuos sólidos que contienen almidón son relativamente fáciles de procesar para producir carbohidratos e hidrógeno. El almidón admite ser hidrolizado para obtener glucosa y maltosa mediante hidrólisis ácida o enzimática, seguida de la transformación de carbohidratos en ácidos orgánicos para culminar en la síntesis de hidrógeno.

Los residuos de la agricultura que presentan celulosa tienen que ser sometidos a un tratamiento previo más profundo. Estos residuos tienen que ser triturados, después deslignificados por medios mecánicos o químicos antes de entrar a la fase de fermentación. La porción de celulosa y hemicelulosa de tales desperdicios se puede hidrolizar hasta formar carbohidratos, y con ellos ácidos orgánicos e hidrógeno.

El diagrama de la Figura 6.1 ilustra la secuencia de la producción de bio-hidrógeno partiendo de residuos de la agricultura que poseen almidón y celulosa, sometidos a dos fases anaerobias, la foto-fermentación y la fermentación oscura.

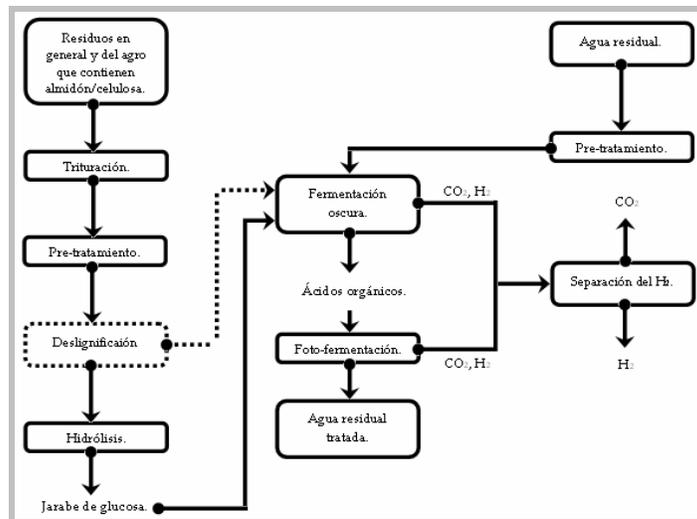


Figura 6.1- Diagrama de la producción de bio-hidrógeno utilizando almidón y celulosa tomados de los desechos de la agricultura y de las aguas residuales de la industria alimenticia (Kapdan y Kargi, 2006)

6.2.2- Aguas industriales residuales ricas en hidratos de carbono

Es común encontrar efluentes industriales no tóxicos que contienen carbohidratos biodegradables, como por ejemplo los de la industria de los lácteos, de la molienda de la oliva, de las levaduras y de las cerveceras, todos ellos son candidatos a materia prima en la producción de bio-hidrógeno (Kapdan y Kargi, 2006). Dichas aguas residuales pudieran demandar un tratamiento inicial para sustraer compuestos contaminantes y lograr el balance nutricional adecuado.

Los carbohidratos contenidos en las aguas residuales de la industria alimenticia pueden ser convertidos en ácidos orgánicos y de ahí en hidrógeno, empleando las tecnologías adecuadas de bio-procesamiento. La formación de bio-hidrógeno a través de aguas residuales de la industria alimenticia puede darse en el transcurso de un par de etapas anaerobias, la foto-fermentación y la fermentación oscura.

6.2.3- Fangos de desechos de las plantas de tratamiento de aguas residuales

El lodo o fango de desechos acumulados en las plantas de tratamientos de aguas residuales tiene una alta concentración de carbohidratos y proteínas que pueden ser empleados para producir hidrógeno y también metano; este último puede ser utilizado posteriormente para generar hidrógeno mediante un proceso de reformación.

La digestión del fango se concibe en dos lapsos; durante el primero, la componente orgánica se transforma en ácidos orgánicos, lo que se conoce como la fase acidogénica; enseguida, una población de bacterias fotoheterótrofas consume los ácidos orgánicos, proceso en el cual se desprende hidrógeno.

6.3- Producción de hidrógeno a través del bio-proceso de fermentación oscura

6.3.1- Fermentación oscura

La palabra fermentación se deriva del vocablo latino *fervere* que significa hervir, y fue el proceso químico orgánico más popular entre las civilizaciones antiguas. Los griegos, y después también los romanos, fermentaban jugo de uva para la elaboración de vino; los habitantes prehispánicos la empleaban para producir pulque, una bebida alcohólica que se servía en todas las celebraciones populares. En la actualidad la fermentación continua siendo utilizada, con algunas variantes técnicas que le han permitido emigrar hacia otros terrenos como el de la generación de diversos combustibles.

La fermentación se refiere a todo proceso en el cual ciertos microorganismos, colonias de bacterias en su mayoría, propician algunos cambios en los substratos (término para designar en general a todo alimento para estos organismos); es importante señalar que este proceso no requiere de oxígeno, o sea es anaerobio o anóxico (Flores, 1980).

La fermentación es provocada por unos compuestos orgánicos denominados enzimas, que son producidas por las mismas células o microorganismos vivos, estas sustancias tienen la habilidad de catalizar (acelerar) reacciones sin ser consumidas en el proceso ni convertirse en una parte de los productos formales. Las instalaciones diseñadas especialmente para optimizar el proceso de fermentación se denominan digestores o reactores anaerobios.

El conjunto inicial de microorganismos específicamente preparados para desencadenar el proceso de fermentación del substrato se le da el nombre de inóculo. Los inóculos se multiplican con rapidez, extendiéndose y actuando sobre la materia prima disponible en un intervalo de tiempo definido (Flores, 1980).

Asimismo, mediante la fermentación, microorganismos anaerobios específicos, como los del género *Bacillus*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Thermoanaerobacterium* y otros, tienen la habilidad de producir hidrógeno durante su fase de crecimiento exponencial a partir de los carbohidratos presentes en ciertos residuos orgánicos (Levin y col., 2004; de Vrije y Claassen, 2005; Kapdan y Kargi, 2006). La actividad de los microorganismos se inicia en el momento en que las condiciones de su entorno sean las adecuadas para su

desarrollo y, por ende, para la producción de hidrógeno, debiendo ser constantemente vigiladas y controladas dado que cualquier disturbio alteraría el curso de acción de estos organismos.

En la naturaleza los microorganismos productores de hidrógeno conviven de forma simbiótica con los microorganismos hidrogenófilos, los cuales consumen el hidrógeno durante su etapa de crecimiento. Por ello, para conseguir un desempeño óptimo en la generación de hidrógeno, lo ideal sería contar con cepas o cultivos puros de microorganismos productores de hidrógeno y garantizar su crecimiento, además de esterilizar completamente la materia prima que será degradada. No obstante, es muy complicado conservar una cepa pura dentro de un reactor, y los tratamientos de esterilización del material implican fuertes costos; por ello los sistemas que requieren esta clase de condiciones son poco atractivos desde el punto de vista económico (Oh y col., 2003).

Noike y col. (2003) desarrollaron una técnica que permite obtener fácilmente bacterias productoras de hidrógeno partiendo de un cultivo mixto de bacterias. Este tipo de cultivos pueden ser empleados como inóculo en un reactor anaerobio; sin embargo, aún es necesario esterilizar el material. Cheong y col. (2006), al ensayar con otros métodos para el tratamiento de bacterias, encontraron que la acidificación química además de aportar un cultivo efectivo de bacterias productoras prescinde de la esterilización del sustrato; características que restan complejidad al sistema.

Es factible emplear distintos tipos de residuos orgánicos como sustratos para alimentar a las colonias de microorganismos responsables de la fermentación, por ejemplo:

- Residuos agrícolas y ganaderos
- Lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales
- Residuos industriales orgánicos
- Aguas residuales municipales e industriales
- Fracción orgánica de los residuos sólidos municipales

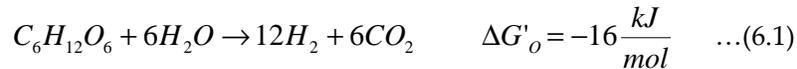
Cuando los compuestos orgánicos son la única fuente de carbono y energía para la actividad metabólica de los microorganismos, el proceso se define como fermentación oscura; en cambio, si se necesita luz para suministrar energía adicional, el proceso es de naturaleza foto-biológica. La fermentación oscura produce una mezcla de gases también llamada biogás, compuesta predominantemente de hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), y en menor proporción metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) y sulfuro de hidrógeno (H_2S).

6.3.2- Tipos de sustratos

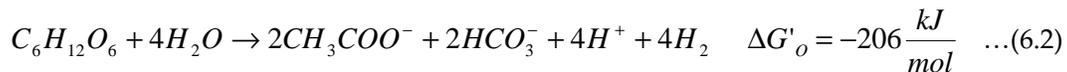
6.3.2.1- Azúcares simples

La glucosa es una fuente de carbono de extraordinaria biodegradabilidad existente en gran parte de los efluentes industriales y de forma cuantiosa en casi la totalidad de los desechos agrícolas.

Teóricamente, la oxidación completa de 1 mol de glucosa pura ($C_6H_{12}O_6$) entrega 12 moles de hidrógeno (H_2) (Eggeman, 2004), con la peculiaridad de que la energía metabólica que proporciona es bastante baja, 16 kJ por mol de glucosa:



El máximo rendimiento real que se tiene registrado es de solo 4 moles de hidrógeno por mol de glucosa pura, considerando que de esta forma se suministra la energía necesaria para sostener el crecimiento de los microorganismos, 206 kJ por mol de glucosa (Solomon y col., 1995; Kengen y col., 1996; de Vrije y Claassen, 2005):



Adicionalmente, otras investigaciones arrojan resultados que fluctúan entre 2.0 a 2.4 moles de hidrógeno por mol de glucosa pura (Ueno y col., 2001; Fang y Liu, 2002). La formación de butirato en mayor medida que de acetato es una probable respuesta para explicar la diferencia con respecto al valor de conversión teórico. Inclusive cuando más del 95% de la glucosa se degrada, la razón de producción puede ser menor a 1.7 mol de H_2 /mol de glucosa (Lin y Chang, 2004). La utilización del sustrato como fuente principal de energía para propiciar el crecimiento de la colonia bacteriana es otra causa por la que podría entenderse la discrepancia entre los valores teóricos y experimentales.

Diversos estudios indican que una producción superior de hidrógeno podría darse a partir de sucrosa, en comparación con otros azúcares simples; en tanto que la conversión por mol de hexosa permanece casi invariable en toda la gama de los disacáridos (Kapdan y Kargi, 2006).

6.3.2.2- Almidón presente en desechos

Los materiales que contienen almidón son numerosos en la naturaleza y portadores de un enorme potencial como fuentes de carbohidratos para la producción de hidrógeno. En apego a los coeficientes estequiométricos de la reacción, un máximo de 553 mL de hidrógeno gaseoso se producen a partir de 1 gramo de almidón, teniendo por producto al acetato (Zhang y col., 2003), aunque el valor puede disminuir a consecuencia de la asignación parcial del sustrato para realizar la síntesis celular de los microorganismos.

La máxima razón de producción específica de hidrógeno es de 237 mL de H_2 /g SSV d (Sólidos Suspendidos Volátiles por día) cuando 24 g/L de almidón del maíz comestible se emplea como sustrato para la *C. pasteurianum* (Liu y Shen, 2004).

Yokoi y col. (2001) utilizaron el almidón residual de la papa dulce seca para generar hidrógeno a través de cultivos mixtos de *C. butyricum* y *E. aerogenes*; la producción de hidrógeno que obtuvieron en régimen intermitente de periodos prolongados fue de 2.4

mol de H_2 /mol de glucosa a partir de aguas residuales con 2.0% de almidón de desecho.

6.3.2.3- *Residuos que contienen celulosa*

La celulosa es un componente elemental de la biomasa vegetal además de encontrarse en altas concentraciones en residuos agrícolas y en las aguas residuales de las industrias papelera y alimenticia. El potencial de producción de hidrógeno de la celulosa está en función de su concentración; un incremento en la concentración de celulosa se traduce en un declive de la producción, alcanzando un valor máximo de 2.18 mol de H_2 /mol de celulosa, partiendo de una concentración de 12.5 g/L de celulosa (Lay, 2001). El rendimiento máximo medido de producción de hidrógeno es de 102 mL/g de celulosa, lo que significa apenas el 18% del valor teórico de producción (Liu y col., 2003).

La producción de hidrógeno a partir de distintos substratos en régimen intermitente y continuo se aprecia en las Tablas 6.1 y 6.2, respectivamente.

6.3.2.4- *Desechos y aguas residuales domésticas y de la industria alimenticia*

Los desechos de la industria alimenticia representan la mayor parte de los residuos sólidos municipales (RSM); los rellenos sanitarios, el composteo y la incineración son las técnicas tradicionales en el manejo de los RSM.

El elevado contenido de carbohidratos en forma de azúcares simples, almidón y celulosa convierten a los residuos sólidos de alimentos en un recurso en apariencia idóneo para la producción biológica de hidrógeno. La problemática con los residuos de alimentos radica en la diversidad de los tipos de carbohidratos y proteínas así como sus concentraciones en la mezcla; cada elemento supone distintas condiciones ambientales y de bio-procesamiento para generar los volúmenes esperados de hidrógeno.

En la Tabla 6.3 se aprecia la producción de hidrógeno utilizando varios tipos de desechos sólidos y aguas residuales como substratos.

La implementación de la producción biológica de hidrógeno utilizando la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (FORSM) fue analizada por Lay y col. (1999) bajo condiciones mesofílicas (30-40 °C) con ayuda de flora bacterial anaerobia mixta. Kim y col. (2004) registraron una conversión de 111.2 mL de H_2 /g SSV h (Sólidos Suspendidos Volátiles por hora) al usar los residuos de alimentos como único substrato; subrayando que la incorporación de fango de alcantarillas o drenaje, como un complemento rebosante de proteínas, a los residuos de alimentos, no aumentó la tasa de producción de hidrógeno.

La fracción orgánica de los residuos sólidos municipales se refiere a la parte fermentable, lo que comúnmente se conoce como restos de comida; por tanto, para obtener el mayor rendimiento de producción resulta primordial implantar una

recolección selectiva en los puntos de origen de estos desechos, de ahí la utilidad de contar con un sistema eficaz e integral de separación de residuos sólidos.

Tabla 6.1- Producción y tasas de producción de bio-hidrógeno a base de carbohidratos puros a través de fermentaciones oscuras intermitentes

Organismo	Fuente de carbono	TEPH	TVPH	Tasa de producción de H ₂	Conversión de H ₂ %	Contenido de H ₂ en la mezcla gaseosa %	Referencia
<i>Klebsiella oxytoca</i> HP1	Glucosa (50 mM)	9.6 mmol/g PS h	87.5 mL/L hidrógeno	1 mol/mol glucosa	16.7	--	Minnan y col., 2005
<i>E. cloacae</i> IIT-BT 08	Glucosa (1%)	--	447 mL/L hidrógeno	2.2 mol/mol glucosa	--	--	Kumar y Das, 2000
<i>E. coli</i>	Glucosa (20g/L)	--	--	4.73×10 ⁻⁸ mol/mol glucosa	--	--	Podestá y col., 1997
<i>H. Alves</i>	Glucosa (10g/L)	--	--	5.87×10 ⁻⁸ mol/mol glucosa	--	--	Podestá y col., 1997
Composta de lodos	Glucosa (10g/L)	--	147 mL/L hidrógeno	2.1 mol/mol glucosa	--	--	Morimoto y col., 2004
Cultivo mixto	Glucosa (1g DQO/L)	--	--	0.9 mol/mol glucosa	23	60	Logan y col., 2002
Cultivo mixto	Sucrosa (6 g/L)	9 mL/g SSV h	--	300 mL/g DQO	--	40	Khanal y col., 20004
<i>Klebsiella oxytoca</i> HP1	Sucrosa (50 mM)	8.0 mmol/g PS h	--	1.5 mol/mol sucrosa	12.3	--	Minnan y col., 2005
<i>C. pasteurium</i> (dominante)	Sucrosa (20 g DQO/L)	4.58 mmol/gSSV h	270 mmol/L d	4.8 mol/mol sucrosa	--	55	Lin y Chang, 2004
<i>E. cloacae</i> IIT-BT 08	Sucrosa (10 g/L)	29.5 mmol/g PS h	660 mL/L hidrógeno	6 mol/mol sucrosa	28	92	Kumar y Das, 2000
Cultivo mixto	Sucrosa (1g DQO/L)	--	--	1.8 mol/mol sucrosa	23	--	Logan y col., 2002
<i>Thermoanaerobacterium</i>	Celulosa (5 g/L)	11.9 mL/g SSV h	--	102 mL/g celulosa	18	--	Liu y col., 2003
<i>Clostridium</i> sp	Celulosa microcristalina (25 g/L)	0.46 mmol/SSV d	--	2.18 mmol/g celulosa	--	60	Lay, 2001
<i>E. aerogenes</i>	Almidón ^a (20 g glucosa/L)	9.68 mmol/g PS h	17.4 mmol/L hidrógeno	1.09 mol/mol glucosa	--	--	Fabiano y Perego, 2002
<i>Thermoanaerobacterium</i>	Almidón (4.6 g/L)	15.2 mL/g SSV h	1.9 mL/ hidrógeno	92 mL/g almidón	17	60	Zhang y col., 2003
<i>C. pasteurium</i>	Almidón (24g/L)	9.9 mL/g SSV h	4.2 mL/h	106 mL/g almidón	19	--	Liu y Shen, 2004
Cultivo mixto	Almidón de papa (1g DQO/L)	--	--	0.59 mL/g almidón	15	--	Logan y col., 2002
Cultivo mixto	Azúcar de jugo de betabel	--	--	1.7 mol H ₂ /mol hexosa	--	--	Hussy y col., 2005

^a Obtenido por hidrólisis; TEPH, Tasa Específica de Producción de Hidrógeno; TVPH, Tasa Volumétrica de Producción de Hidrógeno; PS h, Peso Seco por hora; DQO, Demanda Química de Oxígeno

Muchas de las características de la FORSM están sujetas a múltiples de factores y varían de una localidad a otra, de una temporada a otra e inclusive de un lugar a otro dentro de una misma zona, y más aún si son o no recolectados selectivamente.

Indicadores de trascendencia en el proceso de fermentación como el pH y la humedad cambian de acuerdo con el modo en que son captados los residuos; la humedad, por ejemplo, pasa de 45.2-51.8% en una recolección no selectiva a 72.78-76.56% en una recolección selectiva en origen (Soliva, 2002); un porcentaje elevado de humedad favorece en mayor medida la actividad biológica inicial.

Tabla 6.2- Producción y tasas de producción de bio-hidrógeno a base de carbohidratos puros a través de fermentaciones oscuras continuas

Organismo	Carbono	TEPH	TVPH	Tasa de producción de H ₂	Contenido de H ₂ en el biogás %	Reactor	TRH _i h	Referencia
<i>C. acetobutyricum</i>	Glucosa	6 mmol/CC h L	--	2 mol/mol glucosa	50	Alimentado intermitente	--	Chin y col., 2003
Cultivo mixto	Glucosa (20gDQO/L)	20 mmol/gSSVh	--	1.1 mol/mol glucosa	--	RMC	4	Chen y Lin, 2000
Cultivo mixto	Glucosa (13.7 g/L)	--	376 mmol/L d	1.2 mol/mol glucosa	60	Bio-filtro de goteo	4 – 12	Oh y col., 2004
<i>Clostridia</i> sp	Glucosa (20gDQO/L)	14 mmol/gSSVh	359 mmol/L d	1.7 mol/mol glucosa	42.6	RMC	6	Lin y Chang, 2004
Cultivo mixto	Glucosa (7 g/L)	191 mL/gSSV h	--	2.1 mol/mol glucosa	64	RMC	6	Fang y Liu, 2002
Cultivo mixto	Glucosa (20 g/L)	--	300 mL/L h	--	60	RALLFA	20	Kim y col., 2005
<i>Clostridium</i> sp	Glucosa (10 g/L)	--	640 mL/h	--	60	BRAM ^a	3.3	Oh y col., 2004
<i>E. aerogenes</i> HO39	Glucosa (10 g/L)	--	850 mL/L h	--	--	Película fija	1	Yokoi y col., 1997
Cultivo mixto	Sucrosa (20gDQO/L)	--	105 mol/h	3.47mol/mol sucrosa	--	RMC	8	Chen y col., 2001
Cultivo mixto	Sucrosa	340 mL/gSSV h	5.10 L/L h	2.1 mol/mol sucrosa	35	RALGI ^b	0.5	Lee y col., 2004
Cultivo mixto	Sucrosa (20gDQO/L)	2.2 mmol/gSSVh	270 mmol/L d	1.5 mol/mol sucrosa	42	RALLFA	8	Chang y Lin, 2004
Cultivo mixto	Sucrosa (20gDQO/L)	3.7 mmol/gSSVh	470 mmol/L d	2.6 mol/mol glucosa	35	RSI	4 – 12	Lin y Jo, 2003
<i>Klebsiella oxytoca</i> HP1	Sucrosa (50 mM)	15.2 mmol/g PS h	350 mL/L h	3.6 mol/mol sucrosa	--	RMC	5	Minnan y col., 2005
Cultivo mixto	Sucrosa (20gDQO/L)	35 mmol/gSSVh	20.8 L/L d	1.48mol/mol sucrosa	42	RMC	2	Chen y Lin, 2003
<i>C. butyricum</i> + <i>E. aerogenes</i>	Almidón (2%)	--	800 mL/L h	2.5 mol/mol glucosa	--	RMC	2	Yokoi y col., 1998
<i>C. butyricum</i> + <i>E. aerogenes</i>	Almidón (2%)	--	1,300 mL/L h	2.6 mol/mol glucosa	--	Inmovilizado ^c	0.75	Yokoi y col., 1998
<i>Thermococcus kodakaraensis</i> KOD1	Almidón (5 g/L)	14.0 mmol/g PS h	9.46 mmol/L h	3.33mol/mol almidón	<10	Fermentador elevador de gas	5	Kanai y col., 2005
Cultivo mixto	Almidón de trigo (10 g/L)	--	131 mL/L h	0.83mol/mol almidón d	50.3	RMC	12	Hussy y col., 2005
Cultivo mixto	Almidón (6kg almidón/m ³)	97.5 mL/g SSV h	1,497 L/m ³ d	1.29 L/g almidón DQO	61	RMC	20	Lay, 2001
<i>C. termolacticum</i>	Lactosa (29 mmol/L)	5.74 mmol/g PS h	2.58 mmol/L h	3 mol/mol lactosa	86	RMC	5 – 35	Collet y col., 2004

^a BRAM, Bio-Reactor Anaeróbico de Membrana; ^b RALGI, Reactor Acarreador de Lecho Granular Inducido; ^c Inmovilización en cuentas de vidrio poroso; TEPH, Tasa Específica de Producción de Hidrógeno; TVPH, Tasa Volumétrica de Producción de Hidrógeno; RMC, Reactor de Mezclado Continuo; RALLFA, Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente; RSI, Reactor Secuencial Intermitente; CC, Cultivo Celular

Se ha observado que el potencial de producción de hidrógeno de los residuos sólidos orgánicos (RSO) con alto contenido de carbohidratos es casi 20 veces superior a sus contrapartes en RSO de alto contenido de grasa y RSO de alto contenido de proteínas (Lay, 2001). Shin y col. (2004) reportaron cifras mayores de potencial de producción y de la tasa específica de producción de hidrógeno al someter a los residuos de alimentos a condiciones termofílicas (entre 50 y 70 °C) en contraste con los estándares mesofílicos.

Las aguas residuales de las industrias procesadoras de alimentos son efluentes con abundantes carbohidratos. Ginkel y col. (2005) averiguaron la producción de hidrógeno a partir de esta clase de aguas de desecho, la mayor producción de

hidrógeno se ubicó en 0.21 L de H₂/g DQO correspondiente a los efluentes derivados del procesamiento de la papa.

Tabla 6.3- Producción y tasas de producción de bio-hidrógeno a base de diversos desperdicios materiales a través de fermentación oscura

Organismo	Fuente de carbono	TEPH	TVPH	Coefficiente de conversión producto/substrato	Contenido de H ₂ en el biogás %	Referencia
Cultivo mixto	FORSM	16.8 mL/g SSV h	117 mL/g SVT h	150 mL H ₂ /g FORSM	66	Lay y col., 1999
Inóculo tratado térmicamente a 100 °C	Residuos orgánicos de cocina	--	--	176.2 mL H ₂ /kg ST/h	55-60	Jayalakshmi y col., 2007
<i>Thermoanaerobacterium</i>	Residuos de comida (6 g SV/L)	12 mL/g SSV h	--	1.8 mol H ₂ /mol hexosa	55	Shin y col., 2004
Cultivo mixto mesofílico	Residuos de comida (3 % SV)	0.7 mL/g SSV h	--	0.05 mol H ₂ /mol hexosa	1	Shin y col., 2004
Cultivo mixto	Residuos de comida (3 % SV)	111 mL/g SSV h	--	--	--	Kim y col., 2004
Cultivo mixto	AR de la ind. de la papa (21 g DQO/L)	--	--	2.8 L/L AR	60	Ginkel y col., 2005
Cultivo mixto	Manzana (9 g DQO/L)	--	--	0.9 L/L AR	60	Ginkel y col., 2005
Cultivo mixto	AR doméstica	--	--	0.01 L/L AR	23	Ginkel y col., 2005
<i>E. aerogenes</i>	Melaza (2% sucrosa)	36 mmol/L cultivo h	138 mL/L h	1.5 mol H ₂ /mol sucrosa	60	Tanisho e Ishiwata, 1994
Cultivo mixto	AR de la candiotera de arroz (36 g DQO/L)	389 mL/g SSV h	159 mL/L h	2.14 mol H ₂ /mol hexosa	53-61	Yu y col., 2002
Cultivo mixto	Biosólido	--	--	1.2 mg H ₂ /g DQO	--	Wang y col., 2003
Cultivo mixto	Sustancia filtrada	--	--	15 mg H ₂ /g DQO	--	Wang y col., 2003
<i>C. butyricum</i> + <i>E. aerogenes</i>	Almidón de los desperdicios de la papa dulce (0.5%)	--	--	2.4 mol H ₂ /mol glucosa	--	Yokoi y col., 2001
<i>C. butyricum</i> + <i>E. aerogenes</i>	Almidón de los desperdicios de la papa dulce (2%)	--	--	2.7 mol H ₂ /mol glucosa	--	Yokoi y col., 2002

FORSM, Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Municipales; TEPH, Tasa Específica de Producción de Hidrógeno; TVPH, Tasa Volumétrica de Producción de Hidrógeno; AR, Aguas Residuales; SV, Sólidos Volátiles; SVT, Sólidos Volátiles Totales; ST, Sólidos Totales

La melaza o miel es otro de los substratos con alto contenido de carbohidratos además de ser una excelente fuente de sucrosa; se ha conseguido una producción de 1.5 mol H₂/mol de azúcar expresada en términos de sucrosa (Tanisho e Ishiwata, 1994).

6.3.2.5- Fangos de las plantas de tratamiento de aguas residuales

Los lodos, fangos o bio-sólidos surgidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales poseen polisacáridos y proteínas en cantidades significativas. Los bio-sólidos pueden dividirse en lodos primarios, lodos secundarios y lodos deshidratados,

cada grupo con características distintivas (Tabla 6.4), reflejo de la composición de las aguas residuales y de las condiciones de operación de la planta de tratamiento.

Tasas de producción de hidrógeno de 1.2 mg de H₂/g DQO (Wang y col., 2003) y de 0.6 mol/kg DQO_i (Wang y col., 2004) se obtuvieron al momento de emplear los lodos como sustrato. Sin embargo, los rendimientos superiores de producción de hidrógeno, de 15 mg de H₂/g DQO, aparecen al filtrar o tratar previamente a los lodos (Wang y col., 2003); exponer el lodo a un tratamiento previo eleva la DQO soluble y, por consiguiente, revalúa la producción de hidrógeno.

Tabla 6.4- Características físicas de los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (adaptada de Campos y col., 2005)

Indicador	Lodos primarios	Lodos secundarios	Lodos deshidratados
Materia seca (MS)	2-6%	0.5-2%	15-35%
Sólidos volátiles	60-80% (sobre MS)	50-70% (sobre MS)	30-60% (sobre MS)
Tamaño partícula (90%)	< 200 µm	< 100 µm	< 100 µm

Entre los pre-tratamientos que han sido evaluados consiguiendo resultados satisfactorios se encuentran:

- Pre-tratamiento térmico. A alta temperatura, mayor a 135°C, se incrementa la biodegradabilidad mientras que con temperaturas de 175 a 200°C decrece a causa de la producción de sustancias tóxicas; con temperaturas inferiores, menores a 100°C, también se ha mejorado la biodegradabilidad anaerobia de los fangos, y también del excremento de cerdos (Campos y col., 2005).
- Alta presión
- Maceración mecánica
- Ultrasonidos

El proceso anaerobio con lodos comúnmente se efectúa en condiciones mesofílicas con tiempos de retención de entre 10 y 20 días; aunque el régimen termofílico permite una extinción casi completa de patógenos, tiempos de retención más breves y un mucho menor volumen del reactor (Campos y col., 2005).

6.3.2.6- Residuos ganaderos

Los residuos ganaderos representan otra probable opción como sustrato para la producción de bio-hidrógeno, destacando por su contenido de agua y nutrientes que en principio les da cierta ventaja sobre otros desechos. Sin embargo, a menudo son portadores de sustancias que podrían inhibir o complicar el crecimiento deseado de la población de microorganismos, aunque si éstos logran adaptarse el proceso puede ser redituable.

Otro inconveniente asociado a los residuos ganaderos son las cepas de bacterias que los acompañan de forma natural, debido a que es usual que se trate de microorganismos que consumen el hidrógeno generado por la flora bacteriana acidogénica (Cheong, 2005; Thompson, 2008). Si se utilizan estos residuos sin un tratamiento previo, los

organismos hidrogenófilos continuarán multiplicándose, tomando para sí el hidrógeno que es producido.

Una investigación llevada a cabo por Thompson (2008) evaluó el potencial de producción de hidrógeno utilizando aguas residuales sintéticas, suero de queso y residuos ganaderos (excremento) como sustratos para la fermentación. Pese a la presencia de las bacterias productoras de hidrógeno y aún transcurriendo largos periodos de fermentación, empleando únicamente residuos ganaderos como sustrato, apunta Thompson (2008), no se generó hidrógeno. No obstante, después de agregar glucosa a los residuos ganaderos si se detectó cierta cantidad de hidrógeno en la mezcla de gases producida o biogás.

En pruebas posteriores, Thompson (2008) registró la formación de hidrógeno combinando, en distintas proporciones, los residuos ganaderos con el suero de queso y las aguas residuales sintéticas (Tabla 6.5).

Tabla 6.5- Producción de hidrógeno a través de residuos ganaderos, aguas residuales sintéticas y suero de queso
(adaptada de Thompson, 2008)

Prueba	Composición del sustrato	Hidrógeno producido mmol/L sustrato	Biogás producido (CO ₂ , H ₂ , N ₂) L/L sustrato	Porcentaje de hidrógeno en el biogás %
Residuos ganaderos (RG) y aguas residuales sintéticas (ARS)	0% RG 100% ARS	55.88	3.36±0.27	39.91±2.19
	15% RG 85% ARS	40.00	2.38±0.21	34.49±0.16
	30% RG 70% ARS	30.35	2.31±0.21	31.59±1.11
	45% RG 55% ARS	24.04	2.02±0.08	28.72±1.53
Suero de queso (SQ) y residuos ganaderos (RG)	0% SQ 100% RG	0.41	0.26±0.16	5.31±2.09
	15% SQ 85% RG	25.77	2.18±0.12	28.36±2.24
	30% SQ 70% RG	52.49	3.95±0.61	32.04±1.27
	45% SQ 55% RG	63.16	4.37±0.66	35.88±6.97

Aunque no lo parezca, los residuos ganaderos, en particular aquellos de consistencia líquida como el excremento de cerdos, muestran un contenido de materia orgánica relativamente inferior al observado en otros residuos orgánicos; asimismo, un gran porcentaje de esta materia orgánica es difícil de desintegrar por la vía anaerobia debido a que el tamaño de las partículas es demasiado grande.

Para aliviar la escasa biodegradabilidad de los residuos ganaderos se podría adicionar algún tratamiento previo, como el pre-tratamiento térmico y la maceración mecánica practicados a los fangos de las plantas de tratamiento de aguas residuales. El pre-tratamiento térmico a baja temperatura, 80°C, del excremento de cerdos ha arrojado

resultados interesantes, no obstante depende bastante de las características del residuo disponible (Campos y col., 2005).

6.3.3- Co-fermentación de residuos orgánicos

La co-fermentación o fermentación conjunta sugiere el tratamiento simultáneo de dos o más sustratos de distinta procedencia, es decir, de diferentes clases de residuos orgánicos. El mayor beneficio consiste en aprovechar la sinergia de las mezclas de residuos, compensando las deficiencias de cada uno de los sustratos tomados individualmente. Otras ventajas de la fermentación conjunta son:

- Se incrementa la eficacia del proceso.
- Se aminoran los impactos por variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado.
- Se comparten y utilizan al máximo las instalaciones de tratamiento.
- Disminuyen los costos de inversión y funcionamiento de las instalaciones.

La co-fermentación de residuos orgánicos de distinta procedencia se ha desempeñado de forma exitosa tanto en condiciones termofílicas como mesofílicas. Resultados alentadores se han conseguido a través de diversas mezclas, por ejemplo:

- Lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales con la fracción orgánica de los residuos municipales.
- Fracción orgánica de los residuos municipales con aguas residuales urbanas.
- Lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales con residuos de frutas y hortalizas.
- Excremento de animales con residuos de la industria de los zumos de fruta (Campos, 2001).

Los residuos orgánicos municipales e industriales a pesar de que se degradan con facilidad, generalmente no proporcionan los nutrientes suficientes para el desarrollo óptimo de los microorganismos anaerobios sumado a un excesivo contenido en sólidos que pueden ocasionar problemas mecánicos. Estos inconvenientes podrían superarse con ayuda de los residuos ganaderos, dado pueden constituir una excelente base para la co-fermentación al aportar un elevado contenido de agua así como un amplio menú de nutrientes indispensables para la reproducción de los microorganismos anaerobios.

La Tabla 6.6 expone algunas cualidades de distintos tipos de residuos orgánicos a partir de las cuales es posible conformar una mezcla balanceada, al complementarse las propiedades relativas de éstos.

Tabla 6.6- Caracterización relativa para la co-fermentación de residuos orgánicos (adaptada de Campos y col., 2005)

Tipo de residuo/Propiedades	Concentración de micro y macronutrientes	Relación carbono/nitrógeno	Alcalinidad	Materia orgánica biodegradable
Residuos ganaderos	Alta	Baja	Alta	Baja
FORSM	Baja	Alta	Baja	Alta
Biosólidos	Alta	Alta/Baja	--	Alta/Baja
Residuos de la industria alimenticia	Baja	Alta	Baja	Alta

6.4- Producción de hidrógeno a través del proceso secuencial de fermentación oscura - foto-fermentación

La fermentación oscura y foto-fermentación en secuencia es considerada como la técnica más innovadora en la producción biológica de hidrógeno. Dentro de la Tabla 6.7 se muestran los resultados de algunos de los estudios acerca de metodologías secuenciales y combinadas de fermentación oscura - foto-fermentación para producir hidrógeno.

Tabla 6.7- Producción y tasas de producción de bio-hidrogeno a través de fermentación oscura – foto-fermentación en secuencia y combinadas

Tipo de fermentación	Organismos	Fuente de carbono	Ácido orgánico	Producción total de H ₂ mol/mol glucosa	TEPH	Referencia
Fermentación oscura – foto-fermentación secuenciales	<i>C. butyricum</i> , <i>E. aerogenes</i> , <i>Rhodobacter</i> sp. M-19	Almidón de los desperdicios de la papa dulce	Acético, butírico, láctico	7	--	Yokoi y col., 2001
	<i>C. butyricum</i> , <i>E. aerogenes</i> , <i>Rhodobacter</i> sp. M-19	Almidón de los desperdicios de la manufactura	Acético, butírico, láctico	7.2	--	Khanal y col., 2004
	<i>Lactobacillus amylovorus</i> , <i>R. marinum</i> A-501	Biomasa de algas (<i>D. tertiolecta</i>)	Ácido láctico	--	2.47 mmol/L cultivo h	Kawaguchi y col. 2001
	Cultivo anaeróbico mixto, <i>R. sphaeroides</i> RV	Desperdicios sólidos.	Ácido láctico	--	~110 mL/g PS h	Fascetti y col., 1998
Fermentación oscura – foto-fermentación combinadas	<i>C. butyricum</i> , <i>Rhodobacter</i> sp. M-19	Almidón	--	6.6	--	Yokoi y col., 1998
	<i>Lactobacillus amylovorus</i> , <i>R. marinum</i> A-501	Biomasa de algas (<i>D. tertiolecta</i>)	Ácido láctico	--	1.55 mmol/L cultivo h	Kawaguchi y col., 2001
	<i>V. fluvialis</i> , <i>R. marinum</i> A-501	Biomasa de algas (<i>C. reinhardtii</i>)	Ácido láctico	--	1.18 mmol/L cultivo h	Kawaguchi y col., 2001

TEPH, Tasa Específica de Producción de Hidrógeno

El sistema de producción secuencial presume atractivas ventajas sobre los procesos de una etapa de fermentación, ya sea de fermentación oscura o de foto-fermentación. El efluente que resulta de la fermentación oscura acarrea la cantidad necesaria de ácidos orgánicos para llevar a cabo la foto-fermentación, superando el problema de la baja disponibilidad de ácidos orgánicos.

Rendimientos mayores de producción de hidrógeno pueden ser alcanzados cuando se agrupan o enlazan dos sistemas (Yokoi y col., 1998 y 2002; de Vrije y Claassen, 2005). El aprovechamiento de los ácidos orgánicos por las bacterias encargadas de la foto-fermentación podría incidir en la mejora de la calidad de los efluentes en cuanto a su proporción de materia orgánica.

Por otro lado, el sistema tiene que estar perfectamente monitoreado y controlado con el propósito de aportar tanto la composición media óptima como las condiciones ambientales propicias para cada una de las poblaciones microbianas involucradas en el proceso (Fascetti y col., 1998; Yokoi y col., 1998; 2001 y 2002). Es menester neutralizar y disolver los efluentes producto de la fermentación oscura antes de conducirlos a la

foto-fermentación con la intención de ajustar la concentración de ácidos orgánicos y el pH a los estándares idóneos de desempeño exigidos por las bacterias fotosintéticas (Fascetti y col., 1998; Kawaguchi y col., 2001).

La generación de bio-hidrógeno mediante co-cultivos o cultivos mixtos de bacterias anaerobias y fotosintéticas en una sola etapa también ha sido explorada. Yokoi y col. (1998) lograron una mayor producción de hidrógeno (4.5 mol de H₂/mol de glucosa) al utilizar un co-cultivo de *C. butyricum* y *Rhodobacter sp.*, comparándola con la fermentación oscura de una sola etapa (1.9 mol de H₂/mol de glucosa) y con la fermentación secuencial de dos etapas (3.7 mol de H₂/mol de glucosa) del almidón.

De modo semejante, se consiguieron producciones superiores de hidrógeno a partir de diversos sustratos cuando se usaron co-cultivos de *R. marinum* y *V. fluvialis* en lugar de utilizar individualmente la cepa de *R. marinum* (Ike y col., 1999).

Las variaciones en las tasas de producción/consumo de ácidos orgánicos y la reducción de la penetración de la luz a raíz de la presencia de sólidos suspendidos, son identificadas como los problemas fundamentales asociados a los procesos de fermentación mixta (Kapdan y Kargi, 2006).

6.5- Principales retos en la producción de hidrógeno mediante técnicas de fermentación

La fermentación de materia orgánica con alta concentración de carbohidratos degradada por microorganismos anaerobios en un entorno controlado, es una de las potenciales tecnologías renovables para producir hidrógeno. Sin embargo, de momento su mayor debilidad radica en que las tasas de conversión de hidrógeno, de los métodos demostrados experimentalmente, en general aún son demasiado bajas; y no se tiene claro si estas tecnologías podrán perfeccionarse al grado de volverse competitivas en términos económicos con respecto a otras técnicas de producción de hidrógeno (DOE, 2004).

Los sistemas basados en la fermentación se tornan más atractivos económicamente si se agrupan o fusionan entre ellos (de Vrije y Claassen, 2005), dado que además de generar mayores cantidades de hidrógeno, aprovechan al máximo el sustrato en cada una de sus diferentes etapas, pudiendo trabajar con materiales de distintas composiciones.

Los procesos de dos o más etapas, la inclusión de una segunda colonia de microorganismos específicos o la manipulación genética de éstos, son algunas de las propuestas que se han contemplado a fin de lograr mejores ritmos de producción de hidrógeno y acceder a una gama más amplia sustratos (DOE, 2004).

Los reactores para los procesos biológicos o bio-reactores son otro de los factores que influye en los rendimientos de producción. En especial bajo condiciones excesivamente demandantes como las que implicaría la producción a gran escala, los bio-reactores no tienen un óptimo desempeño en muchos aspectos; ello plantea la obligación de mejorar su diseño, materiales y funcionalidad.

6.6.- Conclusiones

La producción biológica de hidrógeno engloba una serie de métodos que pretenden explotar la habilidad que tienen algunos microorganismos, fundamentalmente bacterias, para sintetizar hidrógeno en un entorno controlado. Para alimentar a los microorganismos se seleccionan de preferencia sustancias, llamadas substratos, con una elevada concentración de carbohidratos y fácilmente biodegradables. En este sentido, los azúcares simples en estado puro son los que ofrecen los mejores rendimientos de producción de hidrógeno; sin embargo, se trata de compuestos muy costosos por lo cual no es dable su utilización intensiva en los bio-procesos.

Diversos residuos orgánicos representan una alternativa para darle viabilidad a los métodos biológicos de producción de hidrógeno. Residuos urbanos, agrícolas, ganaderos, industriales y los fangos de las plantas de tratamiento de aguas residuales son susceptibles de ser empleados, en ocasiones con una preparación inicial específica, como insumos para la obtención de hidrógeno.

La fermentación oscura, una de las técnicas biológicas para generar hidrógeno, además de que admite una amplia variedad de residuos orgánicos a manera de materia prima, manifiesta algunas ventajas frente a otros bio-procesos. Gracias a que la materia orgánica es la única fuente de alimento y energía para los microorganismos productores de hidrógeno, en la fermentación oscura no se necesita suministrar energía adicional, como en el caso de la foto-fermentación que requiere radiaciones luminosas, de ahí que la generación de hidrógeno es de forma continua y estable.

Una de las candidatas más señaladas para la bio-producción de hidrógeno es la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales. Normalmente estos desechos poseen un alto contenido de carbohidratos que se traduce en tasas de conversión de hidrógeno superiores a las de otros residuos, no obstante presentan una composición demasiado compleja y variable motivar fluctuaciones en los volúmenes de generación en periodos prolongados.

Los fangos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, pese a que a menudo reúnen carbohidratos y proteínas en cantidades sustanciales, tienen un coeficiente de conversión de hidrógeno relativamente débil. Para subsanar esta desventaja es necesario someterlos a un proceso previo, siendo el pre-tratamiento térmico el más conveniente puesto que incrementa la biodegradabilidad de los fangos y elimina a los microorganismos consumidores de hidrógeno o hidrogenófilos.

Para propiciar el crecimiento de los microorganismos productores de hidrógeno no basta con proporcionarles un medio rico en carbohidratos, es indispensable incluir una fuente de agua y nutrientes para su subsistencia. Los residuos ganaderos son la opción idónea para cubrir estos requerimientos, ya que se distinguen precisamente por su alto porcentaje de agua y nutrientes, aunque, por otra parte, su tasa de generación de hidrógeno es bastante baja.

Las diferencias en composición y propiedades de ciertos residuos orgánicos pueden capitalizarse mediante un esquema de co-fermentación, a través del cual aumenta la eficacia del proceso y disminuyen los costos de inversión y operación de las instalaciones. Distintos residuos orgánicos pueden combinarse para formar mezclas balanceadas.

Resulta indispensable contar con un acervo de información que reúna el máximo posible de datos que conduzcan a la deducción de forma clara y certera de los resultados que persigue la investigación.

Con ese propósito se utilizaron mecanismos de extracción selectiva de información en términos de la generación y manejo de los residuos sólidos orgánicos que acontece al interior de la zona de estudio, es decir, dentro de Ciudad Universitaria (C.U.).

7.1- Procedencia de los residuos orgánicos

Se contemplaron cuatro fuentes proveedoras de residuos orgánicos, existentes dentro de la zona de estudio, susceptibles de ser empleados para la producción de hidrógeno mediante el bio-proceso de fermentación oscura:

- La fracción orgánica de los residuos sólidos de los comedores o restaurantes.
- La fracción orgánica de los residuos sólidos de las barras de alimentos que preparan y expenden productos elaborados con frutas y hortalizas.
- Las excretas producidas en la granja porcina que pertenece a uno de los Departamentos de Producción Animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM.
- Los fangos o biosólidos que se acumulan en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNAM.

Los residuos orgánicos de los establecimientos (comedores y barras de alimentos) poseen un elevado contenido de carbohidratos y se degradan con rapidez; el excremento porcino constituye una fuente de agua y nutrientes para los microorganismos; mientras que los lodos que se generan en las plantas de tratamiento de aguas residuales aportan cantidades significativas de polisacáridos y proteínas que podrían tener un efecto positivo en el ritmo de producción de hidrógeno.

7.2- Características de la muestra de estudio

La muestra de estudio se integró de tres secciones:

- La primera, compuesta por los comedores y las barras de alimentos.
- La segunda, conformada por la granja porcina de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM.
- Y la tercera, representada por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNAM.

La conformación de la primera sección de la muestra se hizo con base en el registro de autorizaciones para el uso de espacios e inmuebles que realiza la Dirección General del Patrimonio Universitario, mismo que se encuentra disponible en la página electrónica

del Órgano de Transparencia de la UNAM. Posteriormente se identificaron los establecimientos que se encuentran instalados dentro del territorio de la zona de estudio. La composición final del primer grupo de la muestra fue de 22 establecimientos participantes, divididos en:

- 16 comedores o restaurantes.
- 6 barras de alimentos.

7.3- Mecanismos para recavar información

En el caso particular de los residuos orgánicos de los comedores y las barras de alimentos, se optó por la aplicación de un cuestionario tipo encuesta compuesto por nueve interrogaciones, mismas que respondieron los encargos de los establecimientos seleccionados.

Además de cumplir con el cometido principal de proporcionar una estimación de la cantidad de residuos orgánicos producidos en estos sitios, por medio del cuestionario fue posible registrar puntos de vista y actitudes en relación al manejo de los residuos sólidos en Ciudad Universitaria. A continuación se presentan las preguntas del cuestionario tipo encuesta que se aplicó a los encargados de los establecimientos visitados.

Cuestionario tipo encuesta

Pregunta 1.- *Aproximadamente, ¿cuál es el número máximo y mínimo de clientes que atiende en un día?*

Pregunta 2.- *¿Da servicio los días sábado y/o domingo?*

Pregunta 3.- *¿Paga alguna cuota especial por el servicio de recolección de basura?*

Pregunta 4.- *¿Separa los residuos en orgánicos e inorgánicos?*

Pregunta 5.- *¿Considera que la separación de residuos lo beneficie en algo?*

Pregunta 6.- *¿Considera que el actual sistema de separación de residuos es eficiente, poco eficiente o deficiente?*

Pregunta 7.- *¿Tiene alguna idea para mejorar este sistema?*

Pregunta 8.- *Teniendo en cuenta los posibles beneficios ambientales y económicos a largo plazo de los combustibles producidos a partir de residuos, ¿los utilizaría?*

Pregunta 9.- Comedores.- *¿Qué cantidad aproximada de residuos sólidos orgánicos produce diariamente?*

Barras de alimentos.- *Del siguiente listado de frutas y hortalizas, ¿cuáles y en qué cantidad aproximadamente los utiliza?*

Fruto u hortaliza	Cantidad aproximada	Fruto u hortaliza	Cantidad aproximada
Mandarina		Pera	
Mango		Piña	
Manzana		Plátano	
Melón		Sandía	
Naranja		Toronja	
Papa		Zanahoria	
Papaya		Total.-	

Respecto al segundo grupo de la muestra, las excretas de la pequeña granja porcina de la Facultad de Medicina Veterinaria de la UNAM, se entabló comunicación con el Dr. Roberto Martínez Gamba, adscrito al Departamento de Producción Animal especializado en porcinos de dicha entidad, quién dio las facilidades necesarias para obtener los datos indispensables (frecuencia, cantidad y destino usual del excremento que arrojan estos animales) para la valoración de los residuos orgánicos que aporta este sector.

Por último, en relación a los fangos o lodos generados a lo largo de cada una de las etapas del proceso de descontaminación del recurso hídrico que tiene lugar en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNAM, se obtuvo la información conveniente del responsable de este complejo, el Mtr. Hilario García.

7.4- Resultados obtenidos

7.4.1- Primera sección de la muestra: Comedores y barras de alimentos

Los resultados cosechados a través de la aplicación del cuestionario tipo encuesta a la primera sección de la muestra, comedores y barras de alimentos, enseguida se detallan.

Respuestas a la pregunta 1: *Aproximadamente, ¿cuál es el número máximo y mínimo de clientes que atiende en un día?* (Tabla 7.1 y Figura 7.1).

Tabla 7.1- Número de clientes en los comedores y las barras de alimentos

Comedor	Máximo de clientes	Mínimo de clientes	Cifra promedio	Comedor	Máximo de clientes	Mínimo de clientes	Cifra promedio
1	350	150	250	9	200	80	140
2	300	100	200	10	200	30	115
3	500	400	450	11	150	50	100
4	2,500	1,900	2,200	12	200	60	130
5	300	250	275	13	200	100	150
6	1,000	500	750	14	450	200	325
7	40	35	38	15	500	250	375
8	30	10	20	16	400	150	275
Barra de alimentos	Máximo de clientes	Mínimo de clientes	Cifra promedio	Barra de alimentos	Máximo de clientes	Mínimo de clientes	Cifra promedio
1	200	50	125	4	85	40	63
2	80	20	50	5	150	50	100
3	100	50	75	6	100	50	75



Figura 7.1- Cifra promedio de clientes en comedores y barras de alimentos

Respuestas a la pregunta 2: *¿Da servicio los días sábado y/o domingo?* (Tabla 7.2).

Tabla 7.2- Días de servicio en los comedores y las barras de alimentos

Comedor	Sólo sábado	Sábado y domingo	Ni sábado ni domingo	Comedor	Sólo sábado	Sábado y domingo	Ni sábado ni domingo
1	•			9		•	
2	•			10	•		
3	•			11			•
4		•		12			•
5	•			13			•
6		•		14			•
7		•		15			•
8			•	16		•	
Barra de alimentos	Sólo sábado	Sábado y domingo	Ni sábado ni domingo	Barra de alimentos	Sólo sábado	Sábado y domingo	Ni sábado ni domingo
1			•	4			•
2			•	5			•
3			•	6	•		

Las dos preguntas anteriores se incluyeron con el objetivo de extraer información de carácter general de los establecimientos seleccionados.

Respuestas a la pregunta 3: *¿Paga alguna cuota especial por el servicio de recolección de basura?* (Tabla 7.3 y Figura 7.2).

Tabla 7.3- Pago de cuota especial por el servicio de recolección de basura

Comedor	Sí	No	No sabe	Comedor	Sí	No	No sabe
1		•		9		•	
2		•		10		•	
3		•		11	•		
4		•		12		•	
5	•			13		•	
6		•		14	•		
7			•	15		•	
8			•	16		•	
Barra de alimentos	Sí	No	No sabe	Barra de alimentos	Sí	No	No sabe
1		•		4		•	
2	•			5		•	
3			•	6		•	

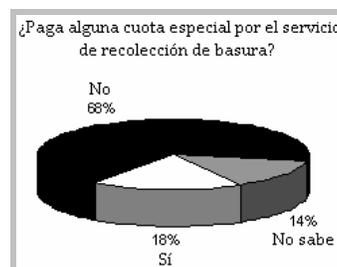


Figura 7.2- Pago de cuota especial por el servicio de recolección de basura

Aproximadamente, 2 de cada 3 encuestados contestó que no paga un monto en particular por concepto de recolección de basura; este dato, en caso de confirmarse, explicaría en parte los evidentes atrasos que se tienen en cuanto al manejo de desechos en la zona de estudio.

Respuestas a la pregunta 4: *¿Separa los residuos en orgánicos e inorgánicos?* (Tabla 7.4 y Figura 7.3).

Tabla 7.4- Separación de residuos en los comedores y las barras de alimentos

Comedor	Sí	No	No sabe	Comedor	Sí	No	No sabe
1	•			9	•		
2	•			10	•		
3	•			11	•		
4	•			12	•		
5	•			13	•		
6	•			14	•		
7	•			15	•		
8	•			16	•		
Barra de alimentos	Sí	No	No sabe	Barra de alimentos	Sí	No	No sabe
1	•			4	•		
2	•			5	•		
3		•		6	•		



Figura 7.3- Separación de residuos en los comedores y las barras de alimentos

No obstante que el 95% de los encuestados aseguró que sí se realizaba la separación de residuos sólidos dentro de sus establecimientos, esta cifra pudiera simplemente ser un espejismo, sobre todo en el caso de los comedores. Al registrar con detenimiento los comedores se observó que, si bien es cierto que la mayoría de éstos disponen de contenedores suficientes, los residuos orgánicos e inorgánicos no siempre se depositan por separado (Figura 7.4), añadiendo el inconveniente de que muy pocos tienen los contenedores señalizados con claridad.



Figura 7.4- Separación de los residuos sólidos en algunos comedores (A) Separación prácticamente nula; B) Separación poco efectiva; C) Separación medianamente efectiva; D) Separación efectiva)

Sin embargo, la señalización de los contenedores no garantiza del todo la correcta segregación de los desechos (Figura 7.5). Lo que conduce a la identificación de quienes pudieran ser los principales responsables de las deficiencias en la separación de residuos; se trata de los clientes que acuden a estos comercios y que normalmente muestran indiferencia o desconocimiento en relación a este tema. Aunque también el personal que labora en estos sitios es partícipe de esta problemática (Figura 7.6).



Figura 7.5- La señalización de los contenedores parece no solucionar el problema de la separación de residuos



Figura 7.6- Clientes y personal de los establecimientos contribuyen a la inapropiada separación de los residuos

La adecuada separación de los residuos sólidos, fundamentalmente en los comedores, es de suma importancia dado que permitiría la captación de la fracción orgánica de los residuos, que es la materia prima, en las mejores condiciones posibles, lo que sin duda se reflejaría en la eficiencia y simplicidad del método de producción así como también en la calidad del producto deseado, en este caso el hidrógeno.

Respuesta conjunta a la pregunta 5: *¿Considera que la separación de residuos lo beneficia en algo?* (Figura 7.7).

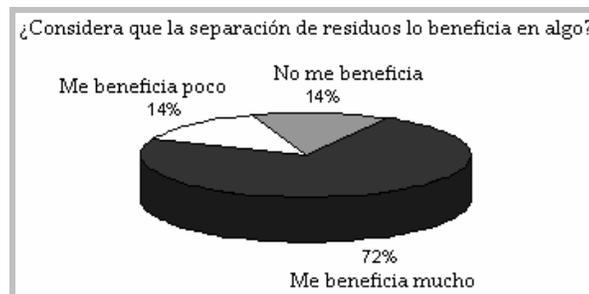


Figura 7.7- Conocimiento de los beneficios derivados de la separación de los residuos

De acuerdo con los datos obtenidos, puede decirse que casi 9 de cada 10 encuestados admitió que la separación de los residuos si le representa algún beneficio, lo cual indica que en general sí se tiene la noción de que esta sencilla acción contribuye de cierta forma en el mejoramiento de la calidad de vida de las personas y en el cuidado de su entorno.

Respuesta conjunta a la pregunta 6: *¿Considera que el actual sistema de separación de residuos es eficiente, poco eficiente o deficiente?* (Figura 7.8).

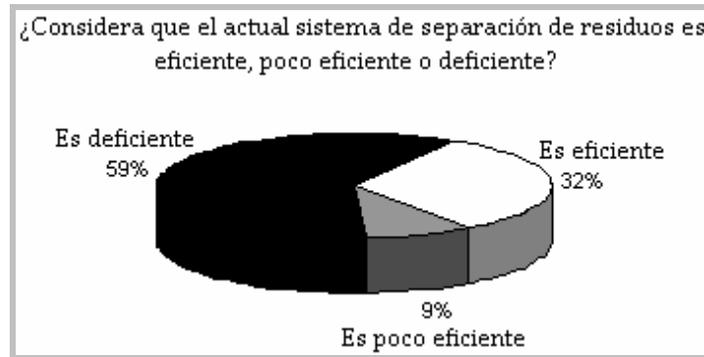


Figura 7.8- Eficiencia del actual sistema de separación de residuos

Cerca del 60% de las personas encuestadas reconoció que el actual sistema de separación de residuos es deficiente, es decir que a su juicio no cumple con el objetivo central de un manejo integral de los desechos. Esta percepción de ineficiencia pudiera ser la causa de la apatía o desidia de un gran número de personas ante la práctica constante de la separación de los residuos sólidos.

Respuesta conjunta a la pregunta 7: *¿Tiene alguna idea para mejorar este sistema?* (Figura 7.9).

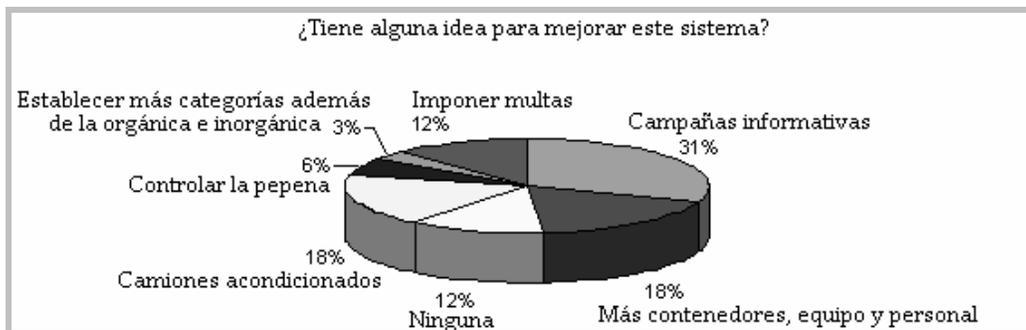


Figura 7.9- Sugerencias para el mejoramiento del sistema de separación de residuos

Campañas informativas, más contenedores, equipo, personal y camiones acondicionados, son las propuestas más citadas por las personas encuestadas con la finalidad de que el sistema de separación de residuos funcione de manera eficaz. Las personas consultadas hacen hincapié en la necesidad de informar oportunamente en relación al manejo de los residuos como una medida para involucrar y alentar más la participación de la ciudadanía en esta labor.

En este contexto, resultaría conveniente, por ejemplo, hacer del dominio público la existencia de tecnologías a través de las cuales es posible producir de forma sustentable y con mínimo impacto ambiental una diversidad de combustibles mucho más limpios y de mayor contenido energético, como el hidrógeno, utilizando como materia prima los residuos orgánicos que se generan en todos los ámbitos de la actividad humana.

Respuesta conjunta a la pregunta 8: *Teniendo en cuenta los posibles beneficios ambientales y económicos a largo plazo de los combustibles producidos a partir de residuos, ¿los utilizaría?* (Figura 7.10).

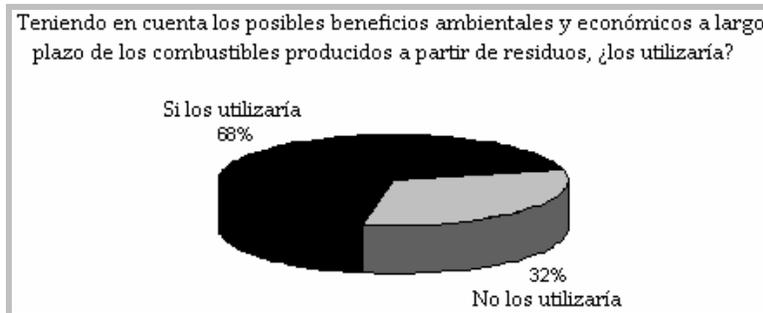


Figura 7.10- Posturas en torno a la utilización de combustibles producidos a partir de residuos

Con base en los resultados, alrededor de 7 de cada 10 personas encuestadas respondió que sí utilizaría combustibles producidos a partir de residuos, el número indica que este tipo de combustibles gozarían de buena aceptación entre la gente que formó parte de esta investigación, aunque con la difusión de más información probablemente se elevaría este porcentaje.

Respuestas a la pregunta 9: Comedores.- *¿Qué cantidad aproximada de residuos sólidos orgánicos produce diariamente?*

En algunas ocasiones la estimación de los residuos sólidos que se obtuvo fue en relación al volumen de éstos, razón por la cual fue preciso contar con un parámetro que relacionara su peso con su volumen, o sea su densidad. Para calcularla se tomó una porción equivalente a 25 L y se registró su peso, que fue de 11 kg. Así, la densidad de los de residuos sólidos orgánicos sin compactar (ρ_{rsosc}) resultó ser de:

$$\rho_{rsosc} = \frac{11\text{kg}}{25\text{L}} = 0.44 \frac{\text{kg}}{\text{L}} = 440 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \dots(7.1)$$

En la Tabla 7.5 se muestran las cantidades aproximadas de los residuos orgánicos generados en cada uno de los comedores visitados.

Respuestas a la pregunta 9: Barras de alimentos.- *Del siguiente listado de frutas y hortalizas, ¿cuáles y en que cantidad aproximadamente los utiliza?*

Para establecer la cifra aproximada de residuos orgánicos que se producen diariamente en estos comercios, primero se debió determinar por separado un estimado de la

cantidad de residuos orgánicos generados, por ejemplo al quitarles la corteza o extraerles el jugo, por kilogramo de cada una de las frutas y hortalizas contempladas en este estudio (Tabla 7.6).

Tabla 7.5- Estimación de los residuos sólidos orgánicos de los comedores

Comedor	Estimación de los residuos orgánicos producidos por día	Peso aprox. de los residuos kg	Comedor	Estimación de los residuos orgánicos producidos por día	Peso aprox. de los residuos kg
1	70 kg	70	9	20 kg	20
2	60 kg	60	10	50 kg	50
3	6 botes de 30 L c/u llenos	79.2	11	20 kg	20
4	1 bote de 80 L lleno 1 bote de 125 L lleno	90.2	12	1 bote de 60 L lleno	26.4
5	60 kg	60	13	40 kg	40
6	75 kg	75	14	70 kg	70
7	1 bote de 50 L lleno 1 bote de 30 L lleno	35.2	15	5 botes de 30 L c/u llenos	66
8	1 bote de 60 L lleno	26.4	16	60 kg	60
Estimación del total de residuos sólidos orgánicos por día = 848.4 kg					

Tabla 7.6- Estimación de los residuos orgánicos generados por kilogramo de las frutas y hortalizas incluidas en el cuestionario tipo encuesta

Nombre común de la fruta u hortaliza	Residuos orgánicos por kilogramo g	Nombre común de la fruta u hortaliza	Residuos orgánicos por kilogramo g
Mandarina	321.10	Pera	101.83
Mango	193.54	Piña	166.17
Manzana	95.23	Plátano	258.62
Melón	211.76	Sandía	361.25
Naranja	378.78	Toronja	426.08
Papa	76.92	Zanahoria	376.92
Papaya	200.00		

Partiendo de los datos de la Tabla 7.6 y de la información proporcionada por los encargados de los establecimientos, fue posible estimar el monto total de los residuos orgánicos que se originan por día en estos sitios de forma individual y en conjunto, tal como se aprecia en la Tabla 7.7.

7.4.2- Segunda sección de la muestra: Granja porcina de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM

Con referencia al excremento de los porcinos, según datos proporcionados por el Dr. Martínez Gamba, el Departamento de Producción Animal Porcina de la FMVZ-UNAM tiene a su cuidado **11 cerdos**, con edades que varían entre las **15 y 20 semanas** y que los ubican en una etapa de desarrollo conocida como *engorda*.

Tabla 7.7- Estimación de los residuos sólidos orgánicos de las barras de alimentos

Barra de alimentos	Mandarina	Mango	Manzana	Melón	Naranja	Papa	Papaya	Pera	Piña	Plátano	Sandía	Toronja	Zanahoria	Cifras totales
1	100 kg × sem.	100 kg × sem.	--	100 kg × sem.	300 kg × sem.	--	200 kg × sem.	--	150 kg × sem.	10 kg × sem.	300 kg × sem.	80 kg × sem.	100 kg × sem.	Total de residuos orgánicos
Consumo aprox. por día	16.66 kg	16.66 kg	--	16.66 kg	50 kg	--	33.33 kg	--	25 kg	1.66 kg	50 kg	13.33 kg	16.66 kg	
Residuos orgánicos aprox. por día	5.35 kg	3.22 kg	--	3.52 kg	18.93 kg	--	6.66 kg	--	4.15 kg	0.43 kg	18.06 kg	5.68 kg	6.28 kg	
2	--	--	5 kg × día	3 kg × día	100 kg × día	--	8 kg × día	3 kg × día	3 kg × día	4 kg × día	3 kg × día	6 kg × día	5 kg × día	Total de residuos orgánicos
Consumo aprox. por día	--	--	5 kg	3 kg	100 kg	--	8 kg	3 kg	3 kg	4 kg	3 kg	6 kg	5 kg	
Residuos orgánicos aprox. por día	--	--	0.476 kg	0.635 kg	37.87 kg	--	1.60 kg	0.305 kg	0.498 kg	1.03 kg	1.08 kg	2.556 kg	1.884 kg	
3	1 kg × sem.	--	5 kg × sem.	--	30 kg × día	--	--	--	--	1 kg × día	--	--	--	Total de residuos orgánicos
Consumo aprox. por día	0.166 kg	--	0.833 kg	--	30 kg	--	--	--	--	1 kg	--	--	--	
Residuos orgánicos aprox. por día	0.053 kg	--	0.079 kg	--	11.36 kg	--	--	--	--	0.258 kg	--	--	--	
4	30 kg × día	3 kg × día	--	5 kg × día	45 kg × día	--	3 kg × día	--	10 kg × día	0.5 kg × día	5 kg × día	15 kg × día	5 kg × día	Total de residuos orgánicos
Consumo aprox. por día	30 kg	3 kg	--	5 kg	45 kg	--	3 kg	--	10 kg	0.5 kg	5 kg	15 kg	5 kg	
Residuos orgánicos aprox. por día	9.63 kg	0.58 kg	--	1.058 kg	17.04 kg	--	0.60 kg	--	1.66 kg	0.129 kg	1.80 kg	6.391 kg	1.884 kg	
5	60 kg × día	--	--	15 kg × día	100 kg × día	--	30 kg × día	--	--	10 kg × día	40 kg × día	40 kg × día	15 kg × día	Total de residuos orgánicos
Consumo aprox. por día	60 kg	--	--	15 kg	100 kg	--	30 kg	--	--	10 kg	40 kg	40 kg	15 kg	
Residuos orgánicos aprox. por día	19.26 kg	--	--	3.176 kg	37.87 kg	--	6 kg	--	--	2.58 kg	14.45 kg	17.043 kg	5.653 kg	
6	--	--	--	--	5 kg × día	20 kg × sem.	--	--	--	2 kg × sem.	--	--	10 kg × sem.	Total de residuos orgánicos
Consumo aprox. por día	--	--	--	--	5 kg	3.33 kg	--	--	--	0.33 kg	--	--	1.66 kg	
Residuos orgánicos aprox. por día	--	--	--	--	1.893 kg	0.256 kg	--	--	--	0.086 kg	--	--	0.628 kg	
Estimación del total de residuos sólidos orgánicos por día = 281.64 kg														

La Tabla 7.8, cedida por el Dr. Martínez Gamba, asocia la edad del animal con la cantidad de excremento que produce por día, deduciéndose fácilmente el total de residuos orgánicos que se generan en la pequeña granja porcina.

Tabla 7.8- Estimación de la producción diaria de excretas de acuerdo a la edad del cerdo

Edad del animal	Etapa de desarrollo	Peso promedio del animal kg	Peso del excremento kg
3-7 semanas	Destetado	17.5	1.15
11-14 semanas	Crecimiento	32.5	2.1
15-20 semanas	Engorda	75	4.9
21-25 semanas	Engorda	100	6.5
>1 año (adulto)	Gestante	137.5	4.45
	Lactante (madre)	187.5	16.5
	Macho	175	5.5
Estimación del total de residuos sólidos orgánicos por día = 53.9 kg			

7.4.3- Tercera sección de la muestra: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNAM

En cuanto a los fangos o biosólidos que se producen en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNAM (PTAR-UNAM), la cifra estimada por el Mtr. Hilario García indica que la cantidad diaria que se genera de estos residuos es cercana a las 45 toneladas (Tabla 7.9).

Tabla 7.9- Estimación de la producción diaria de biosólidos en la PTAR-UNAM

Lodos o biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNAM
Estimación del total de residuos orgánicos por día = 45,000 kg

7.5- Situación actual del manejo de residuos sólidos en Ciudad Universitaria

Paralelamente, se efectuó un recorrido por ciertos puntos de Ciudad Universitaria con la finalidad de llevar a cabo una inspección visual que posibilitara la detección de algunos factores que pudieran vincularse con la problemática de la administración o manejo de los residuos sólidos, y que complican su eventual aprovechamiento mediante distintas vías.

Durante el trayecto se pudo constatar que en realidad no impera el modelo más simple de disposición de los desechos sólidos. A excepción de los residuos forestales (Figura 7.11), que son procesados en la Planta de Composta de la UNAM situada en Avenida del Imán, la separación en residuos orgánicos e inorgánicos es en realidad inexistente en gran parte de Ciudad Universitaria (Figura 7.12).

La Planta de Composta de la UNAM produce una especie de abono o fertilizante natural denominado composta, el cual genera a partir del tratamiento de un volumen importante de residuos provenientes de la poda y mantenimiento del césped, plantas, arbustos y árboles que están distribuidos en todo el territorio de Ciudad Universitaria.



Figura 7.11- Disposición de los residuos forestales



Figura 7.12- Caos en el manejo de residuos sólidos

Una vez que llegan a la Planta de Composta, los residuos son triturados con ayuda de maquinaria, enseguida, guardando una proporción específica entre los residuos que aportan carbono y los que aporta nitrógeno, se apilan en forma de prisma triangular y se les agrega agua. Se requiere además que toda la materia orgánica se remueva o mezcle constantemente, puesto que de esta forma se evita la incubación de organismos nocivos y también se acelera el proceso, que en promedio lleva hasta 6 meses completarlo.

Producto quizá de la indiferencia o desconocimiento que persiste al momento de deshacerse de los residuos sólidos, lo cierto es que el problema del manejo integral de los residuos sólidos también se agrava por la carencia de equipamiento e infraestructura apropiada.

En este sentido, los contenedores que se utilizan para el depósito de los residuos parecen no ser los idóneos. A pesar de que el ritmo de generación y características propias de los residuos sólidos catalogados como inorgánicos tienden a exigir espacios más amplios para su confinamiento, en comparación con los residuos sólidos orgánicos, los contenedores destinan volúmenes iguales para ambas clases de residuos, lo que da lugar, según se deduce de lo observado, a la saturación de las dos secciones por los residuos inorgánicos (Figura 7.13).



Figura 7.13- Saturación de los contenedores por residuos sólidos inorgánicos

Una posible solución podría ser rediseñar los contenedores, con mayor aforo para los residuos sólidos inorgánicos y reducir el volumen reservado para los de tipo orgánico.

El manejo habitual de los residuos que se generan en Ciudad Universitaria, reveló el jefe del Taller de Transportes de la Dirección General de Obras y Talleres de Conservación de la UNAM, el señor Joel Pérez del Olmo, tiene las siguientes particularidades:

- Los residuos recolectados se envían a la Planta de Traslado de Huipulco, por lo cual en el 2007 se pagaron \$128,340.00 pesos mensualmente; es decir, alrededor de \$1'540,080.00 pesos por año.
- La Planta de Traslado de Huipulco utiliza de lunes a viernes 8 camiones por día y los fines de semana sólo 2 camiones por día. Cada camión tiene una capacidad de carga promedio de 3 toneladas.
- Los horarios de recolección varían, pueden ser de 6 a 10 de la mañana y en ciertas ocasiones desde las 7:30 horas hasta las 21:30 horas.
- Cerca del 30% del total de los residuos recolectados proviene de las colonias aledañas u otras entidades externas.
- Solamente se separan los envases de plástico PET, separación que está a cargo del Departamento de Barrido.
- El cartón, las latas de aluminio, metales y demás materiales reutilizables, en su mayoría, son recuperados por los grupos de *pepenadores*.
- Parte de la materia orgánica, principalmente residuos forestales, se traslada a la Planta de Composta de la UNAM y el resto la recibe el Jardín Botánico de la UNAM.
- A raíz del problema de separación de residuos, se desconoce con exactitud la cantidad que corresponde a la materia orgánicos del total de desechos que se recolectan en Ciudad Universitaria.

Otro elemento que recrudece aún más el problema de la separación de los residuos sólidos es la actividad de la *pepena*, que ve en ciertos materiales de desecho un recurso económico pocas veces disputado (Figura 7.14).

Por una parte la labor de los *pepenadores* contribuye a las tareas de reciclaje o reutilización de ciertos residuos, en esencia cartón y envases fabricados con aluminio, pero también representa un serio inconveniente, dado que la ardua búsqueda de estos

materiales inevitablemente desemboca en un desorden todavía más profundo de todos los residuos sólidos vertidos en los contenedores.



Figura 7.14- Presencia de los denominados pepenadores o recuperadores

La regulación o control del oficio de la *pepena* podría tener un efecto positivo en la dinámica de la administración de los residuos sólidos. Además, una correcta separación de los residuos sólidos simplificaría el trabajo de los *pepenadores*, puesto que les permitiría encontrar con mayor facilidad y abundancia los materiales que recolectan, lo que posiblemente representaría una reutilización más eficaz de éstos.

7.6- Potencial de los residuos orgánicos generados en Ciudad Universitaria para la producción de hidrógeno

7.6.1- Potencial de los residuos orgánicos de comedores y barras de alimentos

Para determinar la cantidad de hidrógeno que se produciría a través del método biológico de fermentación oscura empleando como materia prima los residuos orgánicos de los comedores y barras de alimentos, se utilizarán los parámetros especificados en la Tabla 7.10.

Tabla 7.10- Parámetros para el cálculo de la producción de hidrógeno a partir de los residuos orgánicos de los comedores y barras de alimentos

Substrato (materia prima)	Coefficiente de conversión producto/substrato	Contenido de H ₂ en el biogás %	Referencias
Fración orgánica de los residuos sólidos municipales - FORSM	150 mL H ₂ /g FORSM	66	Lay y col., 1999
Residuos orgánicos de cocina	176.2 mL H ₂ /kg ST	55-60	Jayalakshmi y col., 2007
Residuos de comida	1.8 mol H ₂ /mol hexosa	55	Shin y col., 2004

De acuerdo con los resultados que arrojo la aplicación del cuestionario tipo encuesta a los establecimientos seleccionados, se estima que diariamente se generan 848.40 kg de residuos orgánicos en los comedores y 281.64 kg en las barras de alimentos.

7.6.1.1- Primer conjunto de parámetros

Son cifras provenientes de la investigación realizada por Lay y col. (1999), en donde reportaron los siguientes datos:

- Substrato: **Fracción orgánica de los residuos sólidos municipales - FORSM.**
- Coeficiente de conversión producto/substrato: **150 mL H₂/g FORSM.**

Dado que la producción de hidrógeno se encuentra en términos de la FORSM, que básicamente se trata de restos de comida, fruta, hortalizas y otros desechos orgánicos domésticos, la materia prima disponible en este caso es la suma de los residuos orgánicos de los comedores y de las barras de alimentos:

$$FORSM = 848.4kg + 281.64kg = 1,130.04 kg \quad \dots(7.2)$$

El coeficiente de conversión producto/substrato permite calcular el volumen total de hidrógeno a presión y temperatura ambiente que se generaría a partir de los 1,130.04 kg de FORSM, y multiplicando el valor anterior por la densidad del hidrógeno en estado gaseoso bajo las mismas condiciones se obtiene la cantidad equivalente en kilogramos:

$$H_2 = 150 \frac{mL H_2}{g FORSM} \cdot 1,130.04kg FORSM = 169,506 L de H_2 \quad \dots(7.3)$$

$$H_2 = 169,506L \cdot 0.08344 \frac{kg}{m^3} = 14.1436 kg de H_2 \quad \dots(7.4)$$

7.6.1.2- Segundo conjunto de parámetros

Tomados del experimento que llevaron a cabo Jayalakshmi y col. (2007), quienes publicaron la información que a continuación se detalla:

- Substrato: **Residuos orgánicos de cocina.**
- Coeficiente de conversión producto/substrato: **176.2 mL H₂/kg ST.**

Ahora la producción de hidrógeno está indicada en función de los kilogramos de los sólidos totales (ST), que se definen como la cantidad de materia que queda como residuo después de una evaporación o calentamiento entre los 103 y 105 °C.

Una manera sencilla de obtener el porcentaje de ST consiste en restar del 100% el porcentaje de humedad, o sea que para en el caso de la FORSM, cuyo porcentaje de humedad fluctúa entre 72.78-76.56% (Soliva, 2002), si se toma el valor promedio, 74.67%, los sólidos totales de la FORSM serían aproximadamente de:

$$\%ST = 100 - 74.67 = 25.33\% \quad \dots(7.5)$$

De nueva cuenta, se considera que el sustrato es la FORSM, cuya cantidad es igual a 1,130.04 kg, por lo tanto los ST son iguales a:

$$ST = 1,130.04kg \cdot 0.2533 = 286.24 kg \quad \dots(7.6)$$

Utilizando el coeficiente de conversión producto/sustrato se determina el volumen total de hidrógeno que se generaría con base en los parámetros citados:

$$H_2 = 176.2 \frac{mLH_2}{kgST} \cdot 286.24kgST = 50,435.49 mL = 50.43 L de H_2 \quad \dots(7.7)$$

$$H_2 = 50.43L \cdot 0.08344 \frac{kg}{m^3} = 4.2079 g de H_2 \quad \dots(7.8)$$

7.6.1.3- Tercer conjunto de parámetros

Derivan de un estudio efectuado por Shin y col. (2004), que arrojó la siguiente tasa de producción de hidrógeno:

- Sustrato: **Residuos de comida.**
- Coeficiente de conversión producto/sustrato: **1.8 mol H₂/mol hexosa - glucosa.**

En este caso la producción de hidrógeno está expresada en base a la cantidad de hexosa (glucosa) presente en los residuos de comida, donde también se incluye a los desechos de las frutas y hortalizas consideradas en la investigación. Por esta razón, primero se tuvo que indagar la cantidad aproximada de hexosa presente en los residuos, y luego determinar el volumen de hidrógeno que se produciría utilizándolos como sustrato.

La dieta regularmente consta de un 23.62% de carbohidratos (de Rosa, 1983), formados por monosacáridos, disacáridos y polisacáridos. Durante su desintegración, los disacáridos y polisacáridos se desdoblán en sus monosacáridos elementales; con lo cual cerca del 80% de los monosacáridos formados son glucosa (Salvat, 1980). Si se considera que los residuos de la comida guardan la misma composición que la comida misma, y con base en los valores establecidos, la cantidad estimada de hexosa en los residuos orgánicos de los comedores, 848.4 kg, correspondería a:

$$Carbohidratos = 848.4kg \cdot 0.2362 = 200.39 kg \quad \dots (7.9)$$

$$Hexosa(glu cosa) = 200.39kg \cdot 0.8 = 160.31 kg \quad \dots(7.10)$$

Para los residuos orgánicos de las barras de alimentos, nuevamente se parte de la premisa de que los residuos tienen una composición semejante a la de las frutas y hortalizas de donde provienen. De esta manera y con ayuda de la Tabla 7.7, se estimó la cantidad de hexosa (glucosa) presente en este tipo de residuos orgánicos (Tabla 7.11).

Tabla 7.11- Estimación del contenido de hexosa (glucosa) en los residuos de frutas y hortalizas

Residuo	Cantidad de glucosa por 100 g*	Estimación de los residuos por día	Estimación de la cantidad de glucosa en los residuos
	g	kg	g
Mandarina	2.8	34.293	960.20
Mango	0.7	3.8	26.60
Manzana	2.3	0.555	12.77
Melón	1.2	8.389	100.67
Naranja	2.8	124.963	3,498.96
Papa	0.4	0.256	1.02
Papaya	1.4	14.866	208.12
Pera	1.9	0.305	5.80
Piña	2.9	6.308	182.93
Plátano	4.2	4.514	189.59
Sandía	1.6	35.39	566.24
Toronja	2.7	31.671	855.12
Zanahoria	1.0	16.331	163.31
Estimación de la cantidad total de glucosa en los residuos			6,771.33

* (Matthews y col., 1987)

El total de hexosa (glucosa) presente en los residuos orgánicos de comedores y las barras de alimentos es:

$$Hexosa(glu\ cos\ a) = 160.31kg + 6.771kg = 167.08\ kg \quad \dots(7.11)$$

Para conocer el equivalente en moles de glucosa ($C_6H_{12}O_6$), se procede de esta forma:

$$Hexosa(glu\ cos\ a) = 167,080.0g \cdot \frac{1\ mol\ C_6H_{12}O_6}{180.144g} = 927.48\ mol\ C_6H_{12}O_6 \quad \dots(7.12)$$

Entonces, el hidrógeno que se produciría con los residuos orgánicos de los comedores y las barras de alimentos, según estos parámetros, sería:

$$H_2 = 927.48\ mol\ C_6H_{12}O_6 \cdot \frac{1.8\ mol\ H_2}{mol\ C_6H_{12}O_6} \cdot \frac{2.016\ g}{1\ mol\ H_2} = 3,365.64\ g\ de\ H_2 \quad \dots(7.13)$$

Cada conjunto de parámetros conduce a resultados que varían sustancialmente uno del otro, esto se debe a singularidades de cada experimento de donde surgieron los valores empleados en el cálculo teórico.

El tipo de cultivo de microorganismos, las condiciones al interior del reactor anaerobio y el estado del sustrato, son algunas de las causas que explicarían las notorias diferencias entre las tasas de conversión de hidrógeno que se reportan en la literatura especializada.

De los tres valores obtenidos, se elegirá el deducido a partir del primer conjunto de parámetros, puesto que expresa directamente la producción de hidrógeno en

términos de la FORSM, sin la necesidad de recurrir a factores de conversión intermedios como sucede con los otros dos grupos de parámetros empleados. Por lo tanto, la cantidad de hidrógeno que se produciría a partir de los residuos orgánicos que generan diariamente los comedores y las barras de alimentos, **1,130.04 kg de FORSM**, ascendería a **14.1436 kg de H₂**, es decir, un rendimiento de conversión del 1.25%.

7.6.2- Potencial de los residuos orgánicos de la granja porcina de la FMVZ-UNAM

La granja porcina de la FMVZ-UNAM genera, de acuerdo con la Tabla 7.8, 53.9 kg de excremento por día. La producción de hidrógeno se calculará tomando como referencia la investigación realizada por Thompson (2008), cuyos parámetros son los siguientes:

- Substrato: **Residuos ganaderos - excremento.**
- Coeficiente de conversión producto/substrato: **0.41 mmol H₂/L substrato.**

Dado que el coeficiente de conversión producto/substrato está en función de los litros de substrato, se precisa la densidad del excremento (8.33 lb/gal) para relacionar el peso (kg) con el volumen (L):

$$L_{substrato} = 53.9 \text{ kg} \cdot \left(8.33 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} \cdot \frac{0.45359 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} \cdot \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ L}} \right)^{-1} = 53.99 \text{ L} \quad \dots(7.14)$$

Con el dato anterior y el coeficiente de conversión producto/substrato, se puede determinar la cantidad de hidrógeno que se produciría con estos residuos:

$$H_2 = 53.99 L_{substrato} \cdot 0.41 \frac{\text{mmol}H_2}{L_{substrato}} \cdot \frac{2.016 \text{ g}}{1 \text{ mol}H_2} = 0.04463 \text{ g de } H_2 \quad \dots(7.15)$$

El hidrógeno que se sintetizaría a partir de los **53.9 kg** de residuos orgánicos que se acumulan cada día en la granja porcina de la FMVZ-UNAM sería igual a **0.04463 g de H₂**, lo que se traduce en un rendimiento de conversión de apenas $8.28 \times 10^{-5}\%$.

7.6.3- Potencial de los lodos o biosólidos de la PTAR-UNAM

Según se aprecia en la Tabla 7.9, diariamente se dispone de 45 Ton de lodos o biosólidos que se producen en la PTAR-UNAM. La generación de hidrógeno de esta clase de residuos se deducirá empleando los valores registrados en la investigación emprendida por Wang y col. (2003):

- Substrato: **Biosólidos - lodos o fangos de las plantas de tratamiento de aguas residuales.**
- Coeficiente de conversión producto/substrato: **1.2 mg H₂/g DQO.**

Aquí el coeficiente de conversión producto/substrato está ligado a la demanda química de oxígeno (DQO) de los biosólidos. La DQO es un indicador de la cantidad de contaminación orgánica presente en las aguas residuales. De acuerdo con la

información recabada, los biosólidos de la PTAR-UNAM poseen 2,300 mg DQO/L y una densidad similar a la del agua, 1,000 kg/m³; entonces la DQO total de los biosólidos de la PTAR-UNAM equivale a:

$$DQO = 45,000 \text{ kg} \cdot \left(1 \frac{\text{kg}}{\text{L}}\right)^{-1} \cdot 2,300 \frac{\text{mgDQO}}{\text{L}} = 103,500 \text{ g de DQO} \dots(7.16)$$

Para determinar la cantidad de hidrógeno que se generaría utilizando los biosólidos como materia prima, se multiplica la DQO de los biosólidos por el coeficiente de conversión de referencia:

$$H_2 = 103,500 \text{ g DQO} \cdot \frac{1.2 \text{ mgH}_2}{\text{g DQO}} = 124.2 \text{ g de H}_2 \dots(7.17)$$

Los **45,000 kg** de lodos o biosólidos que cada día se producen en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNAM tendrían el potencial para generar **124.2 g de H₂**, registrando un rendimiento de conversión producto/substrato del $2.76 \times 10^{-4}\%$.

7.6.4- Velocidad de la síntesis de hidrógeno en la fermentación oscura

En la fermentación oscura, la síntesis o formación de hidrógeno alcanza un ritmo de hasta de 77 mmol H₂/h por litro de cultivo (Kumar y Das, 2002). Se observa que la velocidad de síntesis del hidrógeno depende del volumen de cultivo existente, es decir, a medida que se tenga mayor número de microorganismos productores de hidrógeno actuando sobre el substrato, la generación de hidrógeno será, en teoría, más sustancial y en menor tiempo.

De los puntos 7.6.1 al 7.6.3 se desprende que la cantidad total de hidrógeno que se produciría a partir de todos los residuos orgánicos disponibles por día corresponde a:

$$H_2 = 14,143.6 \text{ g} + 0.04463 \text{ g} + 124.2 \text{ g} = 14,267.84 \text{ g} = 14.2678 \text{ kg de H}_2 \dots(7.18)$$

Debido a que se pretende que la cifra anterior se produzca diariamente, con objeto de satisfacer la demanda de hidrógeno, y al mismo tiempo procesar y aprovechar los residuos orgánicos disponibles; los litros de cultivo (L_c) necesarios para cumplir esta meta serían:

$$L_c = (24h)^{-1} \cdot \left(14,267.84 \text{ g de H}_2 \cdot \frac{1 \text{ molH}_2}{2.016 \text{ g}} \cdot \frac{h \cdot L}{0.077 \text{ molH}_2} \right) = 3,829.71 \text{ L} \dots(7.19)$$

De esta forma, el esquema de producción de hidrógeno por la vía de la fermentación oscura de los residuos orgánicos de C.U. tendría, teóricamente, una capacidad máxima:

$$14.2678 \frac{\text{kg de H}_2}{\text{día}} \dots(7.20)$$

7.7.- Conclusiones

Si hay algo que en distintas épocas ha caracterizado a los mecanismos para la recolección de los residuos son sus múltiples deficiencias, y que a consecuencia de la sobrepoblación y el descontrol en los procesos productivos y de consumo de los últimos años, se han tornado más patentes, sobre todo en ciudades y suburbios.

La problemática asociada a la generación de residuos en C.U., como en la mayoría de las localidades urbanas, ha alcanzado ya dimensiones críticas. Aún cuando se recupera un porcentaje importante de materiales reciclables, gracias a la nutrida afluencia de pepenadores, el volumen de desechos es tan grande que obliga el despliegue de numerosas brigadas de servicios de limpia y de varios camiones recolectores que trasladan decenas de toneladas de desperdicios a la Planta de Trasbordo de Huipulco para después ser enviados a alguno de los depósitos de relleno, labores que en 2007 tuvieron un costo mensual de \$128,340 pesos (\$1'540,080 pesos por todo el año); así, se desestima el potencial energético de los residuos materiales para producir combustibles como el hidrógeno.

Con la finalidad de recolectar, procesar y confinar de forma oportuna los residuos se ha trazado un conjunto de acciones y normas en distintos ámbitos, una de las más importantes y elementales es la disposición diferenciada o separación de los residuos sólidos. Sin embargo, en general estas medidas poco respaldo han recibido de parte de sociedad y autoridades, dejándolas prácticamente sin efecto. En C.U. el escenario es muy similar; aún se tienen problemas con la separación de residuos sólidos, aunado a la falta de equipamiento e infraestructura adecuada y que junto con la desinformación entorno al tema son los principales causantes del deficiente manejo de los residuos sólidos.

A últimas fechas, el aprovechamiento energético de los residuos materiales ha suscitado mayor interés dado que se trata de un recurso renovable de bajo o nulo costo de adquisición, y compatible con los cada vez más necesarios modelos sustentables de generación de energía. Especialmente llaman la atención los residuos de corte orgánico, que al degradarse con facilidad y reintegrarse al ecosistema de manera natural, ofrecen un beneficio ambiental agregado siendo posible obtener, a partir de diversos métodos, desde hidrógeno hasta metano.

Algunos de los desechos orgánicos generados cotidianamente en C.U. que podrían emplearse como materia prima para la producción biológica de hidrógeno son los residuos sólidos orgánicos de los comedores y las barras de alimentos, en particular las que expenden frutas y hortalizas frescas; los residuos de una granja porcina de la FMVZ-UNAM que cuenta con 11 de estos animales, y los fangos o biosólidos de la PTAR-UNAM.

De acuerdo con las cifras estimadas, a diario se dispondría de 848.4 kg de residuos sólidos orgánicos provenientes de 16 comedores instalados dentro de C.U.; 281.64 kg, de 6 barras de alimentos; 53.9 kg, de la pequeña granja porcina, y 45 Ton de fangos de la planta de tratamiento; lo que en suma representaría 46.18394 Ton de residuos orgánicos por día.

El potencial para la generación de hidrógeno mediante el bio-método de fermentación oscura difiere para cada tipo de residuo. Con base en las tasas de conversión seleccionadas, se estima que los residuos sólidos orgánicos de los comedores y las barras de alimentos producirían 14.1436 kg de H₂; los residuos de la granja porcina, 0.04463 g de H₂, mientras que los fangos solamente 124.2 g de H₂; totalizando 14.2678 kg de H₂. Con el propósito de procesar todos los residuos disponibles a diario y que la generación de los 14.2678 kg de H₂ sea también a diario, en teoría, se requerían de 3.82971 m³ de cultivo de microorganismos productores de hidrógeno.

CAPÍTULO VIII

ASPECTOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DE C.U.

Los resultados obtenidos dan la pauta para aseverar que los residuos orgánicos considerados en este análisis, sí tienen el potencial para satisfacer la futura demanda de hidrógeno del vehículo ECOVIA, y también, si se distribuye apropiadamente el volumen generado, la de algunas facultades e institutos de investigación de la UNAM.

Para aprovechar según lo previsto esta clase de recursos renovables es indispensable contar con la infraestructura adecuada, en donde la columna vertebral es la planta para la producción biológica de hidrógeno.

En esta sección se abordarán los principales atributos técnicos y económicos que se deberán ponderar, y reajustar si es preciso, al momento de formalizar una propuesta que plantee la generación de hidrógeno por medio del proceso de fermentación oscura de residuos materiales de tipo orgánico.

8.1- Aspectos de carácter técnico

8.1.1- Diagrama de flujo del proceso

La Figura 8.1 reproduce, con evidente simplicidad, los componentes y la secuencia del método biológico de fermentación oscura para la producción de hidrógeno. Tomándola como referencia, enseguida se describirán la función y cualidades generales de los principales elementos que intervienen en el proceso.

8.1.1.1- Materia prima

La materia prima son los residuos orgánicos de los comedores, las barras de alimentos, la granja porcina de la FMVZ-UNAM y los lodos o biosólidos de la PTAR-UNAM. Con base en el estudio realizado, se estima que diariamente se dispondría de **46.18394 Ton de residuos orgánicos**, integrados de la forma siguiente:

Disponibilidad diaria de residuos orgánicos: 46.18394 Ton	}	Residuos sólidos orgánicos de los comedores:
		848.4 kg (1.84% del total)
		Residuos sólidos orgánicos de las barras de alimentos:
		281.64 kg (0.61% del total)
		Residuos orgánicos de la granja porcina de la FMVZ-UNAM:
		53.9 kg (0.12% del total)
		Lodos o biosólidos de la PTAR-UNAM:
		45,000 kg (97.43% del total)

Cabe recalcar que la composición de los residuos orgánicos provenientes de los comedores y las barras de alimentos varía en función de los cambios estacionales, de un establecimiento a otro, así como de otros factores que tendrán que considerarse dado que podrían modificar el ritmo de producción de hidrógeno.

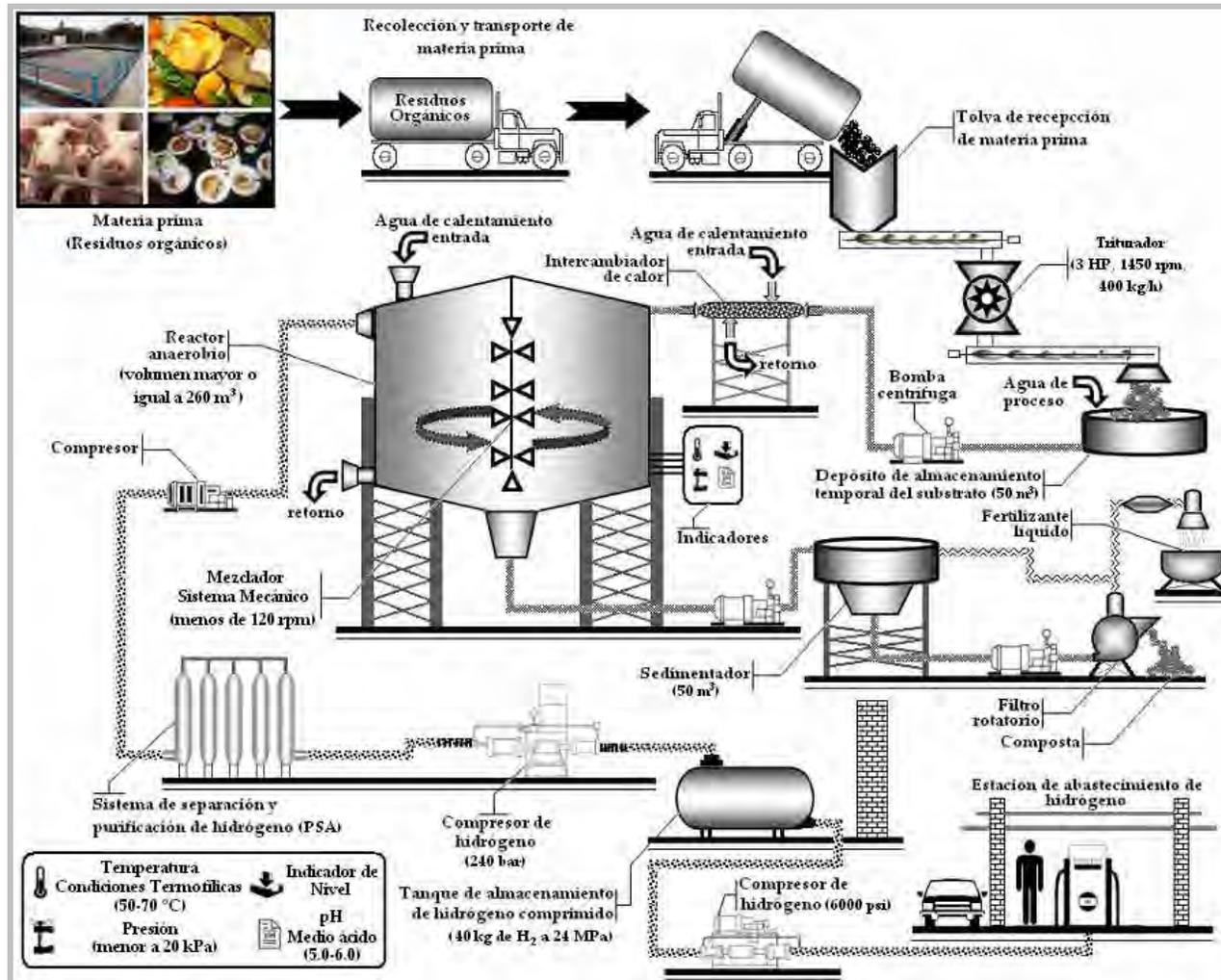


Figura 8.1- Diagrama de flujo del proceso de producción de hidrógeno mediante la técnica de fermentación oscura de residuos orgánicos

Los residuos de la granja porcina de la FMVZ-UNAM y los biosólidos de la PTAR-UNAM también pudieran experimentar alteraciones en distintas temporadas, sin embargo estas serían más de índole cuantitativa que cualitativa.

8.1.1.2- Recolección y transporte de la materia prima

Los residuos orgánicos de los comedores y las barras de alimentos podrían recogerse en los mismos establecimientos, o bien de contenedores reservados exclusivamente para éstos, en donde se depositarían para luego ser concentrados y trasladados a la planta de producción de hidrógeno. En cualquier caso, consolidar el hábito de la correcta separación de los residuos sólidos es un requisito imprescindible.

El excremento de los cerdos, por sus características particulares, se recogería preferentemente en la propia granja de la FMVZ-UNAM, una vez concluidas las labores de limpieza cotidiana de los animales, y se llevaría a las instalaciones de la planta de generación de hidrógeno.

Para recolectar y transportar, en secciones separadas, tanto el excremento de la granja porcina como los residuos orgánicos de los comedores y las barras de alimentos, se emplearía a dos personas asistidas por un vehículo con una capacidad máxima de carga de 1.5 Ton.

En el caso de los biosólidos de la PTAR-UNAM lo más recomendable sería someterlos primero a un proceso de deshidratación, puesto que además de facilitar su manejo, favorecería su tratamiento conjunto con otros residuos orgánicos (Campos y col., 2005). No obstante, la deshidratación de los fangos es un procedimiento que suele ser muy costoso, por lo cual se optaría por emplearlos en su estado húmedo. Un camión cisterna con aforo para 15,000 L operado por un par de trabajadores, sería el medio propuesto para trasladar los biosólidos hasta la planta de producción de hidrógeno.

8.1.1.3- Recepción y trituración de la materia prima

Los residuos orgánicos de los comedores y las barras de alimentos se verterían en una tolva receptora que los conduciría hacia un triturador, donde serían procesados hasta obtener porciones menudas con el propósito de acelerar su biodegradabilidad y reducir su volumen. Al concluir el proceso se obtendría una mezcla con la consistencia de una pasta, y se almacenaría en el depósito temporal. Por otra parte, los residuos de la granja porcina y los lodos de la PTAR-UNAM pasarían directamente al depósito de almacenamiento temporal.

8.1.1.4- Depósito de almacenamiento temporal

Sitio en el que los biosólidos de la PTAR-UNAM y el excremento de los cerdos se expondrían a un pre-tratamiento térmico a baja temperatura, de 80 a 100 °C, con ello aumentaría su biodegradabilidad y, lo más importante, se eliminarían las cepas de microorganismos hidrogenófilos (Campos y col., 2005; Thompson, 2008). Mientras tanto, los residuos orgánicos ya triturados se acopiarían en otra sección del depósito.

8.1.1.5- Reactor anaerobio

Es el lugar donde acontecerían todos los fenómenos químicos y biológicos propios de la fermentación oscura, los cuales propiciarían la generación de una mezcla de gases denominada biogás, constituida esencialmente por hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2).

Al interior del reactor se encontrarían las poblaciones de microorganismos productores de hidrógeno, éstas serían alimentadas continuamente con raciones específicas de la materia orgánica que ha sido preparada siguiendo el procedimiento anterior. Un indicador de nivel en el reactor anaerobio permitiría regular el suministro de la materia orgánica, con la finalidad de evitar la saturación o, por el contrario, la deficiencia de sustrato para el desarrollo de los microorganismos productores.

Las condiciones dentro del reactor anaerobio deberán ser las idóneas para la subsistencia y replicación de los microorganismos productores de hidrógeno. Los parámetros más importantes son los siguientes:

- Temperatura en el reactor anaerobio

Para regular su temperatura interna, los reactores cuentan con un sistema de calentamiento que emplea, por ejemplo, serpentines por los cuales se hace circular agua caliente cuando se requiere elevar la temperatura o agua fría para disminuirla (Flores, 1980). El proceso de fermentación oscura podría llevarse a cabo a diferentes temperaturas, las más comunes son: Condiciones psicrófilas, por debajo de los $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; condiciones mesófilas, entre 30 y $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; y condiciones termófilas, entre 50 y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Es de esperar que con un aumento en la temperatura se acentúe el crecimiento de los microorganismos y, por ende, la velocidad de producción de biogás (Campos y col., 2005). La fermentación oscura bajo condiciones termófilas se desempeña mejor, en términos de velocidad y volumen de producción de hidrógeno, en comparación con las mesófilas (Shin y col., 2004), aunque requieren mayor control y vigilancia.

La magnitud y estabilización de la temperatura en el rango termófilo podrían permitirían no sólo alcanzar la tasa de producción de hidrógeno proyectada, sino también prevenir la incubación de microorganismos hidrogenófilos.

El reactor anaerobio deberá estar equipado con un sistema de agitación y mezclado, dado que contribuye a la distribución uniforme de calor en todo el medio en descomposición, la homogeneización y la transferencia de gases en los sustratos y evita la formación de espumas o sedimentos (Campos y col., 2005).

El mezclado varía en función del volumen y geometría del reactor, y también de las características del sustrato. Se podría utilizar un sistema de mezclado mecánico o neumático, en cualquier caso éste nunca ha de ser demasiado violento ya que podría desestabilizar el proceso; por tal motivo se recomienda que la velocidad de mezclado no exceda las 120 rpm (Chia-Hung y col., 2008).

- pH en el reactor anaerobio

El pH es una escala numérica para expresar el grado de acidez ($\text{pH} < 7$) o alcalinidad ($\text{pH} > 7$), el valor neutro corresponde al del agua pura ($\text{pH} = 7$), en algún medio o entorno físico.

Durante el proceso de fermentación oscura, los microorganismos actúan a plenitud en un rango específico de pH en el cual se maximiza la producción de hidrógeno. Este intervalo de pH va de 5.0 a 6.0 (Chen y col., 2001; Lay, 2001; Fang y Liu, 2002; Khanal y col., 2004), y sería crucial mantenerlo dentro de estos límites, ya que una variación gradual del pH podría ocasionar una disminución e inclusive el cese de la producción de hidrógeno (Dabrock y col., 1992).

Gracias a su alta alcalinidad, los residuos orgánicos complejos, como los ganaderos o los municipales, muestran una autorregulación permanente del pH, y las mezclas de diversos residuos podrían permitir afianzar el pH deseado (Campos y col., 2005).

- Presión en el reactor anaerobio

La llamada presión parcial del hidrógeno es un factor muy importante para la mantener la síntesis continua de hidrógeno. Se ha identificado que conforme la concentración de hidrógeno crece, la síntesis de hidrógeno decrece; sin embargo, a medida que la temperatura se incrementa, el proceso es menos vulnerable a la concentración de hidrógeno (Levin y col., 2004).

La síntesis continua de hidrógeno a una temperatura de 60 °C requiere una presión parcial < 50 kPa (Lee y Zinder, 1988); a 70 °C, < 20 kPa (van Niel y col., 2002); y a 98 °C, < 2 kPa (Adams, 1990). Para asegurar que la síntesis de hidrógeno no se interrumpa a causa de la presión, el biogás generado en el reactor anaerobio deberá extraerse con regularidad.

En cuanto al tamaño del reactor anaerobio éste se calcula con base en la cantidad y el tipo de materia orgánica que se pretende degradar, los litros necesarios de cultivo de los microorganismos y el tiempo de residencia hidráulica o de retención hidráulica (TRH), que es periodo en el cual la producción de hidrógeno se mantiene en sus valores máximos.

Dada la naturaleza de los residuos que se emplearían como materia prima, la generación inicial de hidrógeno comienza después de 2.2 días, posteriormente, en los días 3.2 y 4 la producción de hidrógeno desciende a causa de la formación de alcoholes como el propanol y el butanol (Lay y col., 1999); entonces el TRH apropiado sería de 5 días dado que permitiría obtener el mayor volumen de hidrógeno sin que la concentración de alcoholes que inhiben la producción alcance niveles críticos.

Suponiendo que se dispondrían de 46,183.94 kg de residuos, de los cuales 45,000 kg son fangos de la PTAR-UNAM que ocuparían alrededor de 45 m³; 1,130.04 kg es FORSM que abarcaría 2.5683 m³; 53.9 kg de residuos orgánicos de la granja de la FMVZ-UNAM que representarían 0.0539 m³, y que se requerirían 3.8297 m³ de cultivo para lograr la producción estimada de hidrógeno; el volumen total (V) sería igual a:

$$V = 45m^3 + 2.5683m^3 + 0.0539m^3 + 3.8297m^3 = 51.4519 m^3 \quad \dots(8.1)$$

A fin de aprovechar oportunamente los 46,183.94 kg de residuos orgánicos que se generarían a diario, y asumiendo que el TRH es de 5 días; el volumen del reactor anaerobio (V_{RA}) deberá ser por lo menos cercano a:

$$V_{RA} = 51.4519 m^3 \times 5 = 257.2595 m^3 \approx 260 m^3 \quad \dots(8.2)$$

Para determinar las dimensiones del reactor anaerobio se parte del criterio que lo considera de forma cilíndrica, en donde el diámetro de la base (d_B) es el doble de la altura (h), misma que nunca debe ser mayor de 5 metros. De esta manera, el diámetro de la base y la altura del reactor anaerobio de $260 m^3$ de volumen tendrían las siguientes magnitudes:

$$V_{RA} = \pi \times \left(\frac{d_B}{2}\right)^2 \times h = \pi \times h^2 \times h = 260 m^3 \therefore h = 4.35 m, d_B = 8.71 m \quad \dots(8.3)$$

8.1.1.6- Sistema de separación y purificación de hidrógeno

El biogás generado sería succionado del reactor anaerobio y conducido a través de ductos hacia un compresor, que le proporcionaría la presión necesaria para ingresar al sistema de separación y purificación de hidrógeno. La Tabla 8.1 reúne los aspectos más relevantes, como el grado de pureza y el porcentaje de recuperación de hidrógeno, de las algunas de las principales tecnologías de separación y purificación.

Dado que la celda de combustible que empleará el ECOVIA funciona con hidrógeno al 99.999% de pureza, la tecnología de purificación conocida como PSA (abreviatura de *Pressure Swing Adsorption*) es la que mejor calificaría para este propósito.

En el método de purificación PSA las impurezas del gas de síntesis (biogás) se adsorben, a alta presión, en un compuesto especial conocido como lecho o estrato de absorción, mientras que las moléculas de hidrógeno presentes en el gas continúan su camino. Posteriormente, a una presión inferior, las impurezas se expelen en forma gaseosa, y de esta manera se restablecen las condiciones que permiten reiniciar el proceso de depuración.

La purificación a través de la tecnología PSA puede adecuarse a la composición particular del gas de alimentación y a los requerimientos de pureza buscados, ya sea intercambiando los materiales de adsorción o efectuando ajustes en algunas fases del ciclo. El grado de pureza del hidrógeno que se logra por medio de la técnica PSA llega a ser mayor o igual al 99.999% (PSA Plants, 2009).

8.1.1.7- Almacenamiento del hidrógeno

La elección del método de almacenamiento de hidrógeno se realiza a partir de criterios generales (Tabla 8.2), ligados con aspectos como la aplicación, la densidad de energía

deseada, el mantenimiento, la seguridad, la cantidad a almacenar y el presupuesto disponible (T-Raissi y Sadhu, 1994).

Tabla 8.1- Comparación entre distintas tecnologías de separación y purificación de hidrógeno (PSA Plants, 2009)

Tecnología	Principio de funcionamiento	Gas de alimentación	Hidrógeno		Particularidades
			Pureza (%)	Recuperación (%)	
Separación criogénica	Condensación parcial de los gases mezclados a bajas temperaturas	Gases de refinería y petroquímica	90-98	95	Ampliamente utilizado; requiere una etapa de pre-purificación para remover el agua y el H ₂ S
Difusión por membrana de polímero	Difusión diferencial de los gases a través de una membrana permeable	Gases residuales con amoniaco y de refinería	92-98	Mayor a 85	La membrana puede retener otros gases y compuestos además del hidrógeno
Separación por hidruros metálicos	Reacción reversible para extraer el hidrógeno de ciertos hidruros metálicos	Gases residuales con amoniaco	99	75-95	La absorción del hidrógeno puede contaminarse con oxígeno y nitrógeno
Celda electrolítica de polímero sólido	Los iones de hidrógeno atraviesan una membrana especial de polímero sólido	Purificación del hidrógeno producido en ciclos termoquímicos	99.8	95	Ciertos compuestos que contienen azufre pueden contaminar el electro-catalizador
PSA (iniciales de <i>Pressure Swing Adsorption</i>)	Adsorción selectiva de impurezas del gas de síntesis	Cualquier gas con alta concentración de hidrógeno	99.999	70-85	Es uno de las técnicas más utilizadas a nivel comercial; la recuperación de hidrógeno es relativamente baja
Difusión por membrana de paladio	Difusión selectiva de hidrógeno a través de una membrana de aleación de paladio	Cualquier gas con alta concentración de hidrógeno	Mayor o igual a 99.9999	Mayor a 99	Su utilización no está muy difundida; diferentes compuestos pueden mermar la permeabilidad de la membrana

Tabla 8.2- Criterios para la selección del formato de almacenamiento de hidrógeno (adaptada de Amos, 1998)

Formato de almacenamiento de hidrógeno	Criterios generales
Almacenamiento en cavernas subterráneas	Grandes cantidades de hidrógeno y periodos prolongados de almacenamiento
Almacenamiento en estado líquido	Grandes cantidades de hidrógeno, periodos prolongados de almacenamiento, bajo costo de la electricidad, aplicaciones que requieran el hidrógeno en forma líquida
Almacenamiento en forma de gas comprimido	Cantidades pequeñas de hidrógeno, periodos cortos o prolongados de almacenamiento
Almacenamiento en hidruros metálicos	Cantidades pequeñas de hidrógeno

Para cantidades pequeñas de hidrógeno, el almacenamiento en forma de gas comprimido es la alternativa más adecuada y sencilla, sólo se requiere un compresor y

un contenedor o tanque presurizado; ya que en otros casos, como el almacenamiento en estado líquido, el costo, por ejemplo, es comparativamente más elevado y su operación es más deficiente (Schwarz y Amonkwah, 1993; Carpetis, 1994).

Con base en el ritmo de producción estimado y en el uso que se le dará al hidrógeno, el almacenamiento en forma de gas comprimido sería la opción más conveniente. Para ello, se necesitaría de un compresor que tome el hidrógeno, después de haber sido purificado en el sistema PSA, lo comprima y lo deposite en un tanque de almacenamiento con una capacidad de 40 kg y una presión de llenado de alrededor de 24 MPa (240 bar), puesto que las presiones máximas para este tipo de contenedores presurizados van de los 20 – 30 MPa (2,900 – 4,350 psi) (Zittel y Wurster, 1996). Además, presiones de almacenamiento más elevadas implicarían costos capitales (mantenimiento) y de operación más onerosos (Garrett, 1989).

8.1.1.8- Estación de abastecimiento de hidrógeno

La estación de abastecimiento de hidrógeno sería el sitio donde el vehículo ECOVIA repondría el combustible en sus dos tanques de almacenamiento para continuar circulando.

El sistema para el suministro del combustible utilizaría un segundo compresor, que aprovecharía la presión del hidrógeno contenido en el tanque de almacenamiento de la planta (24 MPa) para recargar con facilidad los depósitos presurizados del ECOVIA a su presión nominal de 6,000 psi (41.36 MPa).

La instalación de una estación de abastecimiento de hidrógeno más sofisticada estaría plenamente justificada si se tuviera que atender a una flotilla numerosa de automóviles ECOVIA, por lo menos 20 unidades, pero como en este caso las necesidades de suministro de hidrógeno son mínimas, el sistema propuesto respondería de forma satisfactoria.

8.1.1.9- Desechos digeridos

La materia digerida se extraería con la debida periodicidad por la base del reactor anaerobio, y se enviaría a un sedimentador donde experimentaría un proceso o tratamiento adicional como pudiera ser el compostaje aerobio. Así, se conseguiría un producto orgánico estable, higienizado y de calidad que podría ser empleado como abono natural útil para incrementar la fertilidad de cualquier suelo, dado que conserva un gran porcentaje de nutrientes. La eliminación de patógenos, huevos y larvas de insectos dañinos estaría garantizada por las temperaturas en que se llevaría a cabo el proceso de fermentación oscura.

Además del hidrógeno y el dióxido de carbono, en la fermentación oscura se producen compuestos secundarios como los ácidos grasos. Eventualmente, estas sustancias podrían ser convertidas también en hidrógeno por vía de otro proceso biológico como la foto-fermentación, o bien en metano (CH₄) por medio de un reactor adicional (de Vrije y Claassen, 2005).

8.1.2- Capacidad de producción

La capacidad de producción de hidrógeno de la planta está determinada por la disponibilidad de la materia prima, es decir, los residuos orgánicos. De acuerdo con las estimaciones realizadas, la producción de hidrógeno alcanzaría los **14.2678 kg de H₂ por día**, sin embargo, suponiendo que el sistema de separación y purificación PSA sólo recupere el 70% del hidrógeno presente en el gas de síntesis (Tabla 8.1), la producción de hidrógeno con el 99.999% de pureza, listo para ser utilizado en el vehículo ECOVIA, sería de **9.98746 kg de H₂ por día**.

Es importante prever que la generación de los residuos orgánicos, en composición y cantidad, no será la misma en todas las épocas. En el Calendario de Actividades de la UNAM están contemplados distintos recesos en los cuales la producción de residuos orgánicos tendría un notorio declive, ya que, por ejemplo, los comedores y las barras de alimentos permanecen cerrados en esas fechas.

Bajo tales circunstancias, se considerarán 217 días por año en los que se esperaría que la generación de residuos orgánicos sea muy similar a las cifras estimadas. De esta forma, en la Tabla 8.3 se presentan los datos relacionados con la capacidad estimada de producción de hidrógeno de la planta partiendo de las suposiciones anteriormente descritas.

Tabla 8.3- Estimación de la capacidad de producción de hidrógeno

Estimado de la disponibilidad diaria de materia prima		Estimado de la producción diaria de hidrógeno		Estimado de la producción anual de hidrógeno
Residuos orgánicos de comedores y barras de alimentos: 1,130.04 kg (2.45%)	46,183.94 kg (100%)	Residuos orgánicos de comedores y barras de alimentos: 14.1436 kg de H ₂ (99.1293%)	14.2678 kg de H ₂ sin purificar (100%) (9.98746 kg de H ₂ con el 99.999% de pureza)	3,096.1126 kg de H ₂ sin purificar (2,167.2788 kg de H ₂ con el 99.999% de pureza)
Residuos orgánicos de la granja porcina FMVZ-UNAM: 53.9 kg (0.12%)		Residuos orgánicos de la granja porcina FMVZ-UNAM: 0.04463 g de H ₂ (0.0003%)		
Biosólidos de la PTAR-UNAM: 45,000 kg (97.43%)		Biosólidos de la PTAR-UNAM: 124.2 g de H ₂ (0.8704%)		

8.1.3- Localización

La ubicación ideal de la planta de producción de hidrógeno sería aquella que permitiera acortar al máximo las distancias para el traslado de la materia prima. Sin embargo, los comedores, las barras de alimentos, la granja porcina y la planta de tratamiento de aguas residuales se encuentran en zonas muy concurridas, donde no sería prudente colocar un complejo de esta naturaleza, por razones de seguridad y espacio.

Una alternativa sería situar la planta de producción de hidrógeno en los linderos de la Reserva Ecológica, ya que es una región relativamente aislada y tiene la extensión territorial necesaria para albergarla. Otra posibilidad sería alguna zona en las inmediaciones de la PTAR-UNAM, ya que de esta forma sería más ágil y sencillo el transporte de las 45 Ton de lodos que en ella se generan, y también del resto de los residuos orgánicos que se recolectarían.

En la Figura 8.2 se aprecia la localización aproximada de los comedores, las barras de alimentos, la granja porcina de la FMVZ-UNAM y la PTAR-UNAM, así como las correspondientes a las dos propuestas para la edificación de la planta de producción de hidrógeno.

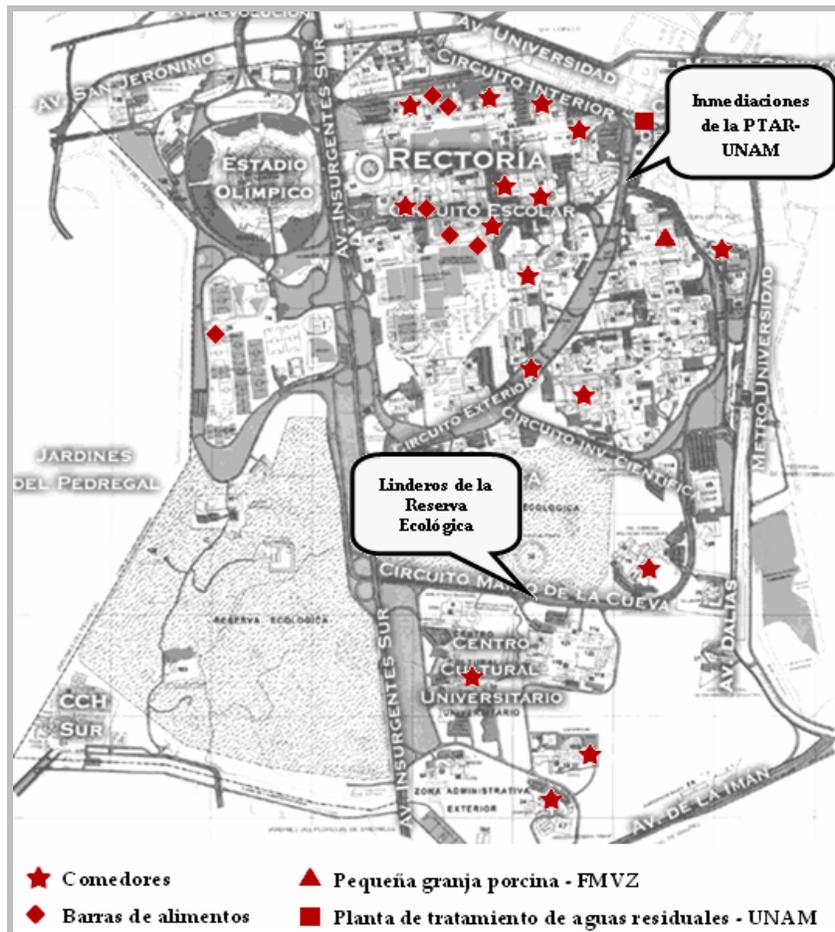


Figura 8.2- Opciones para la ubicación de la planta de producción de hidrógeno

8.1.4- Beneficio ambiental

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

se simula el ciclo natural del carbono (Figura 8.3); por lo tanto la fermentación oscura se clasifica como un proceso neutral de CO₂ (de Vrije y Claassen, 2005).

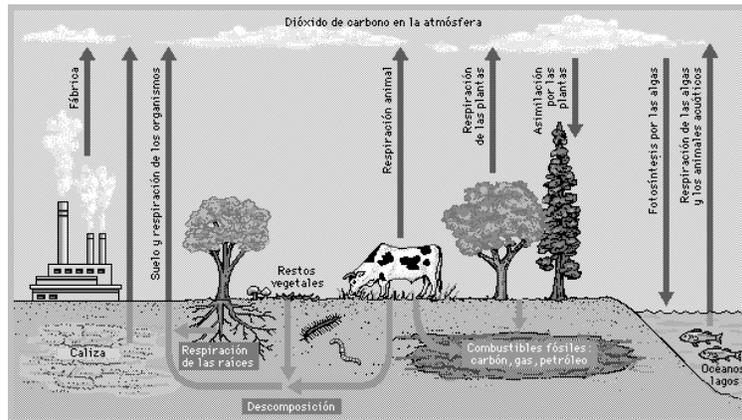


Figura 8.3- Ciclo del carbono (Enciclopedia Encarta, 2001)

Sin embargo, cabe destacar que al aprovechar oportunamente los residuos orgánicos para generar hidrógeno se evitaría su acumulación y abandono en depósitos o vertederos, que pudieran considerarse también como reactores en donde a menudo existen las condiciones anaerobias que detonan la descomposición de la materia orgánica, ocasionando la emisión incontrolada de otro gas, el metano (CH₄).

El metano llega a conformar del 45 al 60% del biogás que emana de un vertedero y, además de acarrear consigo el riesgo de explosión al mezclarse con oxígeno, es un gas que tiene un efecto invernadero 20 veces superior al del dióxido de carbono (CO₂).

El potencial máximo de generación de metano en un vertedero para residuos rápidamente degradables (RRD), como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, los residuos ganaderos y los fangos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, es de 0.20 m³ CH₄/kg RRD (Campos y col., 2005). De ahí que, al evitar que los 46.18394 Ton de los residuos orgánicos de C.U. se depositen en un vertedero como comúnmente se hace, se podría frenar la emisión de metano en la proporción de:

$$V_{CH_4} = 46,183.94 \text{ kg RRD} \times 0.20 \frac{m^3 CH_4}{kg} = 9,236.79 m^3 CH_4 \quad \dots(8.4)$$

Es importante mencionar que en un vertedero dada la inestabilidad de las condiciones que conducen a la descomposición de los residuos, la producción de metano se da de manera lenta y gradual, pudiendo tomar un lapso de hasta 5 años culminar el periodo de degradación de la materia (Campos y col., 2005).

Un proceso integral para el tratamiento de los residuos orgánicos, como sería la producción de bio-hidrógeno mediante fermentación oscura, constituye no sólo un sendero sustentable para aprovechar el potencial energético de los materiales de desecho, sino que también representa una medida de seguridad y de política ambiental altamente efectiva.

8.2- Aspectos de carácter económico

8.2.1- Inversión inicial estimada

La inversión inicial representa el capital monetario necesario para la adquisición de los materiales, el equipamiento y las instalaciones que permitirían desarrollar cabalmente el proceso de producción. En la Tabla 8.4 se muestra un estimado de la inversión inicial que se requeriría para la compra de la maquinaria y equipos indispensables en la generación de hidrógeno a través del método de fermentación oscura a partir de residuos orgánicos.

Tabla 8.4- Estimación de la inversión inicial para el proyecto
(adaptada de Amos, 1998; de Vrije y Claassen, 2005; Castro, 2009; PSA Plants, 2009)

Equipo	Costo estimado	Equipo	Costo estimado
Transporte de materia prima		Bomba centrífuga (3 kW)	\$55,140.00 × 3
Vehículo de carga 1.5 Ton	\$169,000.00	Intercambiador de calor (20 kW)	\$151,635.00
Camión cisterna 15,000 L	\$275,000.00	Sedimentador (50 m ³)	\$173,603.00
Triturador (3 HP – 400 kg/h)	\$129,794.00	Líneas de conducción de materia prima (≈30 m)	\$3,731.00
Deposito de almacenamiento temporal (50 m ³)	\$120,560.00	Líneas de calentamiento (≈100 m)	\$137,850.00
Reactor anaerobio		Sistema de separación y purificación PSA	\$772,474.00
Tanque (260 m ³)	\$761,680.00	Compresor de hidrógeno (240 bar)	\$360,057.00
Mezclador sumergido (7.5 kW)	\$159,906.00	Compresor de hidrógeno (6,000 psi)	\$407,691.00
Sistema de calentamiento (72 kW)	\$275,700.00	Tanque de almacenamiento de hidrógeno comprimido (40 kg)	\$913,500.00
Sistema de recuperación de biogás	\$333,647.00	Otros equipos y accesorios	\$270,000.00
Inversión inicial estimada = \$5'581,248.00 pesos			

8.2.2- Costo de producción

El costo de producción por kilogramo de hidrógeno se determina tomando en cuenta las contribuciones de los denominados costos capitales anuales de los equipos (aquellos que atañen a su mantenimiento preventivo y correctivo, su conservación, la eventual compra de refacciones, etc.), del consumo estimado de energía por año y de los costos derivados del transporte de la materia prima (residuos orgánicos); el resultado se divide entre la producción estimada de hidrógeno en el mismo periodo.

El costo capital anual de los equipos en esta clase de instalaciones generalmente representaría el 15% de su costo de adquisición, mientras que el gasto anual por consumo de energía equivaldría al 10% de dicho costo (de Vrije y Claassen, 2005).

En relación a los costos por transporte de la materia prima, se considerará que la planta de producción de hidrógeno se ubicará en los linderos de la Reserva Ecológica (ver

Figura 8.2), de esta forma, el vehículo de carga deberá realizar un trayecto diario de alrededor de 25 km, adjudicándole un rendimiento de 6 km/L de combustible (gasolina), para que los dos trabajadores recolecten los residuos de los comedores, las barras de alimentos y de la granja porcina. Asimismo, se establecerá un precio de \$7.33 pesos por litro de combustible para el vehículo.

Por otro lado, el personal abordo del camión cisterna, con un rendimiento promedio de 3 km/L de combustible (diesel), diariamente tendría que efectuar 3 viajes de 4 km cada uno a fin de hacer llegar los fangos de la PTAR-UNAM a la planta de generación de hidrógeno. En este caso, el precio del combustible se fijará en \$6.38 pesos por litro.

En la Tabla 8.5 se observan las estimaciones de los costos anuales por transporte y recolección de los residuos orgánicos, el costo capital y por consumo de energía de la planta de producción de bio-hidrógeno, asumiendo como nulo el costo de adquisición de la materia prima.

Tabla 8.5- Estimación de los costos anuales de la producción de bio-hidrógeno

Concepto	Costo capital anual	Costo por consumo de energía/combustible anual	Concepto	Costo capital anual	Costo por consumo de energía/combustible anual
Transporte y recolección de materia prima			Bombas centrífugas	\$24,813.00	\$16,542.00
Vehículo de carga 1.5 Ton	\$25,350.00	\$6,627.54 (4.16 L/día×217 días)	Intercambiador de calor	\$22,745.25	\$15,163.50
Camión cisterna 15,000 L	\$41,250.00	\$5,537.84 (4 L/día×217 días)	Sedimentador	\$26,040.45	\$17,360.30
Operadores (4)	\$192,000.00	--	Líneas de conducción de materia prima	\$559.65	--
Triturador	\$19,469.10	\$12,979.40	Líneas de calentamiento	\$20,677.50	--
Deposito de almacenamiento temporal	\$18,084.00	\$12,056.00	Sistema de separación y purificación PSA	\$115,871.10	\$77,247.40
Reactor anaerobio			Compresor de hidrógeno (240 bar)	\$54,008.55	\$272,634.00
Tanque	\$114,252.00	--	Compresor de hidrógeno (6,000 psi)	\$61,153.65	\$300,708.00
Mezclador sumergido	\$23,985.90	\$15,990.60	Tanque de almacenamiento de hidrógeno comprimido	\$137,025.00	--
Sistema de calentamiento	\$41,355.00	\$27,570.00	Otros equipos y accesorios	\$40,500.00	\$27,000.00
Sistema de recuperación de biogás	\$50,047.05	\$33,364.70	Energía adicional	--	\$100,000.00
Estimación de los costos totales anuales = \$ 1'969,968.48 pesos					

Dado que se estima que la producción anual de hidrógeno al 99.999% de pureza alcanzaría los 2,167.2788 kg, tal como aparece en la Tabla 8.3, y que los costos totales

anuales en la generación de bio-hidrógeno ascenderían a \$1'969,968.48 pesos; el costo estimado de producción por kilogramo de hidrógeno resulta ser:

$$Costo_{Producción\ Bio-H_2} = \frac{\$1969,968.48}{2,167.2788\ kg\ de\ H_2} = \$908.96\ kg\ de\ H_2 \quad \dots(8.5)$$

8.2.3- Evaluación financiera del proyecto

Toda inversión que se planee llevar a cabo debe estar sustentada en análisis profundo, certero y conciso que permita proceder de forma racional. En general, la evaluación financiera constituye la fase última de cualquier proyecto de inversión, y es sin duda una de las más decisivas, ya que intenta pronosticar lo que va a ocurrir una vez realizada la inversión, en otras palabras, revela la viabilidad económica del proyecto.

8.2.3.1- Valor Actual Neto

También llamado Valor Presente Neto (VPN), es un método de evaluación financiera por medio del cual se “traen” del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente, es decir, la ganancia que se conseguiría en tiempo presente si se decide invertir en algún proyecto.

El Valor Actual Neto (VAN) contempla tres posibles escenarios que definen la viabilidad económica del proyecto. Cuando el VAN es mayor a cero, se interpreta como que las ganancias que se conseguirán a través del proyecto serán superiores a la inversión, por lo tanto éste es viable y se acepta. Si el VAN resulta negativo, significa que las ganancias no serían suficientes para recuperar la inversión inicial proyectada, y lo más sensato sería rechazar la propuesta. Por último, si el VAN es igual a cero implica que sólo se recuperaría la inversión al costo del capital o Tasa Mínima de Rendimiento Aceptable (TMRA). El costo del capital representa el interés promedio por el uso del dinero proveniente de las distintas fuentes de recursos financieros.

El VAN se calcula mediante la siguiente ecuación matemática:

$$VAN = -P + \frac{f_{NE1}}{(1+i)} + \frac{f_{NE2}}{(1+i)^2} + \frac{f_{NE3}}{(1+i)^3} + \frac{f_{NE4}}{(1+i)^4} + \dots + \frac{f_{NE_n}}{(1+i)^n} \quad \dots(8.6)$$

El término P se refiere a la inversión inicial del proyecto; i , es la Tasa Mínima de Rendimiento Aceptable o costo del capital; n , es el número de periodos u horizonte del proyecto; y f_{NE} , son los flujos netos de efectivo. Los flujos de efectivo simbolizan el movimiento de dinero en cualquier tipo de entidad, por ello, se dice que el flujo de efectivo es positivo cuando entra o se recibe dinero (ingresos), y es negativo cuando sale o se gasta dinero (egresos). Los flujos netos de efectivo son los ingresos menos los egresos que se tienen en un lapso particular.

Para determinar el VAN del proyecto de la planta de producción de hidrógeno, los flujos netos de efectivo serán por anualidades, los egresos estarán representados por

las estimaciones de los costos totales por año, \$1'969,968.48 pesos, y se considerará que éstos aumentarán anualmente a un ritmo del 15%.

El estimado de la producción de hidrógeno en el mismo intervalo de tiempo, 2,167.2788 kg de H₂ por año, constituirá los ingresos de la planta, puesto que se traduce en el "ahorro" que se tendría al prescindir de la compra de hidrógeno al precio comercial de \$4,688.435 pesos por 0.5 kg de H₂ (\$9,376.87 pesos por kg de H₂); y para el cual se contemplará un incremento del 5% anual.

De esta manera, los flujos netos de efectivo, por ejemplo, de los dos primeros años de funcionamiento de la planta de producción de hidrógeno por el método de fermentación oscura de los residuos orgánicos de C.U. serían:

$$f_{NE1} = \left(2,167.2788 \text{kgH}_2 \cdot \frac{\$9,376.87}{\text{kgH}_2} \right) - \$1'969,968.48 = \$18'352,323.08 \quad \dots(8.7)$$

$$f_{NE2} = \left(2,167.2788 \text{kgH}_2 \cdot \frac{\$9,376.87 \cdot 1.05}{\text{kgH}_2} \right) - (\$1'969,968.48 \cdot 1.15) = \$19'072,942.39 \quad \dots(8.8)$$

El horizonte del proyecto se refiere a su vida útil estimada, en el caso de la planta de producción del hidrógeno el horizonte sería de 15 años, periodo de vida máximo de la mayoría de los reactores anaerobios (Steets, 2009).

Si la Tasa Mínima de Rendimiento Aceptable (TMRA) es del 20% ($i = 0.20$) o del 40% ($i = 0.40$), entonces las cifras del Valor Actual Neto (VAN) serían, respectivamente:

- TMRA = 20% ($i = 0.20$); VAN = \$93'028,606.80
- TMRA = 40% ($i = 0.40$); VAN = \$44'238,796.90

En ambos casos el **VAN es positivo**, y se traduce en que la inversión sí se recuperaría, en el lapso del primer año de funcionamiento sostenido según lo indican los flujos netos de efectivo, a la TMRA correspondiente y con una ganancia adicional, por lo tanto el proyecto de la planta de producción de hidrógeno por fermentación oscura utilizando los residuos orgánicos de C.U. se califica como **económicamente viable**.

8.2.3.2- Tasa Interna de Retorno

Se define como la tasa de descuento para la cual el Valor Actual Neto es cero, o sea que la suma del valor actual de los flujos netos de efectivo es igual a la inversión inicial. La fórmula para la obtención de la Tasa Interna de Retorno (TIR) es:

$$P = \frac{f_{NE1}}{(1+i)} + \frac{f_{NE2}}{(1+i)^2} + \frac{f_{NE3}}{(1+i)^3} + \frac{f_{NE4}}{(1+i)^4} + \dots + \frac{f_{NE_n}}{(1+i)^n} \quad \dots(8.9)$$

En esta expresión la i representa la Tasa Interna de Retorno; y el criterio para evaluar el proyecto radica en que si la TIR es mayor o igual que la TMRA, se acepta la inversión; en tanto que si la TIR es menor que la TMRA, el proyecto no se considera viable.

Con base en los cálculos efectuados para la determinación del VAN, la Tasa Interna de Retorno de la planta de producción de hidrógeno es igual a **332.71%**, valor que también supone que el proyecto **es económicamente viable**, dado que es una cifra muy superior a las TMRA usuales.

8.2.3.3- Relación Beneficio-Costo

Es una metodología de evaluación financiera que consiste en dividir la suma de los todos flujos netos de efectivo entre el monto total de la inversión inicial, de modo que si el cociente es mayor o igual a uno, el proyecto será viable en términos económicos, de lo contrario se cancela el financiamiento. La Relación Beneficio-Costo (RBC) se determina de la forma siguiente:

$$RBC = \frac{\frac{f_{NE1}}{(1+i)} + \frac{f_{NE2}}{(1+i)^2} + \frac{f_{NE3}}{(1+i)^3} + \frac{f_{NE4}}{(1+i)^4} + \dots + \frac{f_{NE_n}}{(1+i)^n}}{P} \quad \dots(8.10)$$

El cálculo de la RBC del proyecto de la planta de producción de hidrógeno se realizará con dos TMRA, como en el caso del VAN, una de 20% y la otra de 40%. Entonces, la Relación Beneficio-Costo para cada TMRA es de:

- TMRA = 20% ($i = 0.20$); RBC = 17.66, RBC > 1
- TMRA = 40% ($i = 0.40$); RBC = 8.92, RBC > 1

En las dos planteamientos **la Relación Beneficio-Costo es mayor a uno**, por lo tanto se concluye que el proyecto de la planta de generación de hidrógeno por el proceso biológico de fermentación oscura empleando los residuos orgánicos de C.U., es igualmente evaluado como **factible desde la perspectiva económica**.

8.2.4- Análisis de sensibilidad

El estudio económico de todo proyecto implica necesariamente una dosis de incertidumbre. Los valores estimados en diversos rubros, como por ejemplo los costos totales, son en esencia aproximaciones, cuya incertidumbre aumenta a medida que son trasladadas a tiempo futuro. Es probable que las cifras reales difieran de las mejores estimadas, es decir, de los esperados, de ahí que es recomendable advertir los efectos de tales variaciones en los parámetros económicos más significativos del proyecto evaluado.

Una metodología propuesta para ese fin consiste en modificar la magnitud de las variables más importantes en un determinado porcentaje, y posteriormente definir hasta qué punto es sensible a tales cambios el parámetro de interés. Mediante este

análisis de sensibilidad es posible identificar con bastante claridad los factores cruciales que tienen un impacto directo en el resultado del proyecto; además, propicia una mejor administración del mismo, ya que revela los puntos críticos que exigen mayor atención con miras a lograr la rentabilidad económica pronosticada.

Para el análisis de sensibilidad del proyecto de la planta de generación de hidrógeno mediante fermentación oscura empleando los residuos orgánicos de C.U., se eligió al costo de producción por kilogramo de hidrógeno como el parámetro de interés, teniendo tres variables económicas fundamentales: El costo capital anual de la planta, los costos anuales por consumo de energía en la planta y los costos anuales por transporte y recolección de la materia prima. El valor previamente estimado de cada una de las variables se modificó en $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ y $\pm 30\%$, conservando igual las demás condiciones, para así obtener el nuevo costo de producción. La Tabla 8.6 muestra los resultados conseguidos en cada uno de los escenarios explorados.

Tabla 8.6- Análisis de sensibilidad

I.- Costo capital anual de la planta (mantenimiento y conservación de los equipos)						
Costo de producción si el costo capital anual de la planta varía en:			Costo de producción esperado	Costo de producción si el costo capital anual de la planta varía en:		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
\$802.29 kg de H ₂	\$837.85 kg de H ₂	\$873.40 kg de H ₂	\$908.96 kg de H ₂	\$944.51 kg de H ₂	\$980.07 kg de H ₂	\$1,015.62 kg de H ₂
II.- Costos anuales por consumo de energía en la planta						
Costo de producción si los costos anuales por consumo de energía en la planta varían en:			Costo de producción esperado	Costo de producción si los costos anuales por consumo de energía en la planta varían en:		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
\$780.42 kg de H ₂	\$823.26 kg de H ₂	\$866.11 kg de H ₂	\$908.96 kg de H ₂	\$951.81 kg de H ₂	\$994.65 kg de H ₂	\$1,037.50 kg de H ₂
III.- Costos anuales por transporte y recolección de la materia prima (residuos orgánicos)						
Costo de producción si los costos anuales por transporte y recolección de la materia prima varían en:			Costo de producción esperado	Costo de producción si los costos anuales por transporte y recolección de la materia prima varían en:		
-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%
\$871.48 kg de H ₂	\$883.97 kg de H ₂	\$896.47 kg de H ₂	\$908.96 kg de H ₂	\$921.45 kg de H ₂	\$933.95 kg de H ₂	\$946.44 kg de H ₂

De acuerdo con las cifras calculadas, los costos anuales por consumo de energía en la planta constituyen la variable a la cual es más sensible el costo de producción, dado que en donde se registran las mayores desviaciones con respecto al costo de producción esperado.

La aseveración anterior se corrobora con la gráfica de la Figura 8.4, en ella está representada la variación porcentual, tomando como referencia el valor esperado, en el costo de producción por kilogramo de hidrógeno para las distintas variables económicas contempladas. La recta asociada a los costos anuales por consumo de energía en la planta posee una pendiente superior ($m=0.4715$, $\theta=25.24^\circ$) en comparación con las rectas del costo capital anual de la planta ($m=0.391$, $\theta=21.35^\circ$) y de los costos anuales por transporte y recolección de la materia prima ($m=0.1375$, $\theta=7.83^\circ$); por lo tanto, los costos anuales por consumo de energía en la planta conforman el parámetro de mayor peso en el costo de producción por kilogramo de hidrógeno.

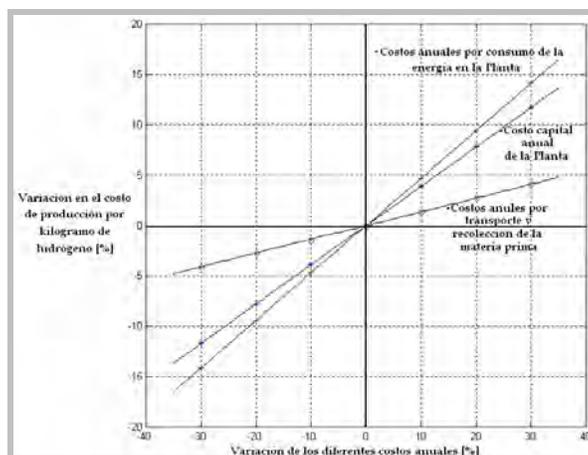


Figura 8.4- Resultados gráficos del análisis de sensibilidad

8.3- Conclusiones

La producción de hidrógeno a través de la técnica de fermentación oscura de residuos orgánicos de Ciudad Universitaria consistiría de una serie de etapas bien definidas, comenzando con la recolección y transporte de los residuos.

En el caso de los residuos sólidos orgánicos de los comedores y las barras de alimentos, 1,130.04 kg/día en conjunto que representarían 14.1436 kg de H₂, poco más del 99% de la producción total estimada por día, no habría complicaciones con su acopio y traslado; lo mismo sucedería con los residuos de la pequeña granja porcina de la FMVZ-UNAM, 53.9 kg/día que tan sólo generarían 0.04463 g de H₂, pero constituirían una fuente de nutrientes esenciales para los microorganismos. Por otro lado, de las 45 Ton/día de fangos de la PTAR-UNAM únicamente se obtendrían 124.20 g de H₂, menos del 1% de la producción total estimada por día, de ahí que sea oportuno analizar a detalle si es rentable emplearlos como materia prima dadas las dificultades, técnicas y económicas, asociadas con su transporte y procesamiento.

En fases posteriores como la recepción y trituración de la materia prima, el almacenamiento temporal y pre-tratamiento y la descomposición al interior del reactor anaerobio no manifestarían mayores inconvenientes, a excepción quizá de la regulación y control de las condiciones de temperatura, pH y presión en el reactor. En relación al sistema de separación y purificación de hidrógeno es importante señalar que si bien con la técnica PSA se lograría una pureza del 99.999%, existe la posibilidad de perder hasta un 30% del hidrógeno presente en el biogás. Sin embargo, la tecnología PSA es la más avanzada comercialmente disponible, ya que otras como el método de difusión por membrana de paladio que ofrece mayores porcentajes de pureza y recuperación, no tiene el estatus comercial apropiado.

Una vez purificado según las especificaciones iniciales, el hidrógeno producido se almacenaría en forma de gas comprimido a una presión máxima de 24 MPa en un tanque presurizado con aforo promedio de 40 kg. Para abastecer de hidrógeno al ECOVIA se instalaría una estación de suministro sumamente sencilla, con un compresor de hidrógeno que sea capaz de recargar los dos tanques del vehículo a su presión nominal de 6,000 psi (41.37 MPa).

Se estima que el proyecto para el desarrollo de una planta para la producción de hidrógeno mediante el proceso de fermentación oscura demandaría cerca de 5.6 millones de pesos como inversión inicial, misma que se recuperaría en el transcurso del primer año de operaciones, según lo indican los flujos netos de efectivo. Los métodos de evaluación financiera que se aplicaron indican que el proyecto es enteramente viable en términos económicos, a la luz de que se tendrían poco más de 1.9 millones de pesos de costos anuales totales, siendo los costos por consumo de energía los de mayor impacto final.

CAPÍTULO IX

CONCLUSIONES GENERALES

La Universidad Nacional Autónoma de México está desarrollando propuestas que fomenten el uso eficiente de la energía así como el empleo de fuentes alternas, enmarcadas en el Macroproyecto La Ciudad Universitaria y la Energía. El proyecto ECOVIA Vehículo Ecológico Multifuncional se inserta en la línea de investigación del Macroproyecto denominada Energía del Hidrógeno, a través de la cual se pretende aprovechar esta sustancia como vector energético.

El objetivo central del proyecto ECOVIA es la creación de un vehículo híbrido que funcione utilizando baterías y una celda de combustible alimentada con gas hidrógeno al 99.999% de pureza. El consumo de la celda de combustible que se instalará en el automóvil es de 10.6587 gH₂/min; de ahí que, si el ECOVIA requiere circular por un periodo de 8 horas diarias, su consumo de hidrógeno equivaldría a 5.11617 kg de H₂/día. Por lo tanto, para un año (217 días) considerando 8 horas de funcionamiento por día, se necesitaría más de una tonelada de hidrógeno, 1.1102 Ton de H₂ exactamente.

El costo de 0.5 kg de H₂ con el 99.999% de pureza es de \$4,688.435 pesos, esto significa que cubrir dicha demanda anual de hidrógeno del ECOVIA (1.1102 Ton de H₂) a través de proveedores comerciales representaría un gasto superior a 10.4 millones de pesos, más de dos veces y media el financiamiento total destinado al proyecto ECOVIA, que totaliza alrededor de 4 millones de pesos.

Pese a que es considerado como un combustible no contaminante, a la fecha la producción de hidrógeno aún depende fuertemente de recursos fósiles no renovables como carbón, gas natural y compuestos derivados del petróleo, emitiendo enormes cantidades de contaminantes. En 2003, el 48% del hidrogeno producido a nivel mundial se obtuvo a partir de la reformación de gas natural, el 30% de la reformación de compuestos derivados del petróleo, el 18% del carbón y sólo el 4% mediante electrólisis, una de las tecnologías que en apariencia tiene menor impacto ambiental. En México se mantienen las tendencias anteriores, cerca del 70% se genera mediante reformación de gas natural, el 16% de la reformación de propano, y el 14% a través de electrolizadores.

A nivel mundial, el hidrógeno se emplea fundamentalmente en procesos industriales relacionados con la elaboración de amoníaco (61% del consumo total) y en refinerías (23%), sólo el 3% se destina a otras aplicaciones como pudiera ser, en un mínimo porcentaje, al abastecimiento de los prototipos de vehículos alimentados con hidrógeno y los pocos que son distribuidos de manera comercial. La situación en México es bastante similar, con la diferencia de que aún no se dispone de medios de transporte impulsados con hidrógeno.

Los procesos que incorporan recursos y energías renovables para generar hidrógeno constituyen la respuesta lógica frente al previsible colapso de los recursos no renovables de origen fósil. La producción biológica de hidrógeno es una vertiente por medio de la cual se explota la capacidad que tienen ciertos microorganismos de sintetizar hidrógeno. La fermentación oscura, uno de estos métodos biológicos, abre la posibilidad de utilizar diversos tipos de residuos orgánicos, por ejemplo residuos urbanos, agrícolas, ganaderos, industriales y fangos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, como alimento para los microorganismos productores de hidrógeno.

Producir hidrógeno a través del bio-proceso de fermentación oscura utilizando ciertos residuos orgánicos generados en C.U., como son los desechos orgánicos de los comedores, de las barras de alimentos, de una granja porcina de la FMVZ-UNAM y los fangos de la PTAR-UNAM, representa una ruta sustentable con importantes contribuciones ambientales mediante la cual se podría cubrir la demanda de hidrógeno del vehículo ECOVIA, y la de distintas dependencias de la UNAM que igualmente lo emplean con regularidad.

De los resultados derivados del presente trabajo se deduce que, en teoría, el hidrógeno que se generaría por medio del proceso biológico de fermentación oscura usando como materia prima las 46.18 Ton (46,183.94 kg) diarias de residuos orgánicos producidos conjuntamente en los comedores (848.4 kg por día), las barras de alimentos (281.64 kg por día), la pequeña granja porcina de la FMVZ-UNAM (53.9 kg por día) y en la PTAR-UNAM (45,000 kg por día), sí permitiría satisfacer los requerimientos de hidrógeno del automóvil ECOVIA.

La producción diaria estimada de hidrógeno con el 99.999% de pureza alcanzaría una cifra de 9.98746 kg de H₂ (14.2678 kg de hidrógeno sin purificar). En la Figura 9.1 se expone una posible distribución del hidrógeno generado, sólo entre automóviles ECOVIA. Por ejemplo, los 9.98746 kg de hidrógeno por día se traducirían en 15 horas y 36 minutos de funcionamiento continuo de un solo ECOVIA, si se debiera abastecer a dos ECOVIA, el hidrógeno producido les permitiría circular durante un periodo de hasta 7 horas y 48 minutos a cada vehículo; para tres ECOVIA, 5 horas y 12 minutos; para cuatro ECOVIA, 3 horas y 54 minutos; para cinco ECOVIA, 3 horas y 6 minutos; para seis ECOVIA, 2 horas y 36 minutos; para siete ECOVIA, 2 horas y 12 minutos; para ocho ECOVIA, 1 hora y 57 minutos; para nueve ECOVIA, 1 hora y 44 minutos; para diez ECOVIA, 1 hora y 33 minutos; y así sucesivamente.

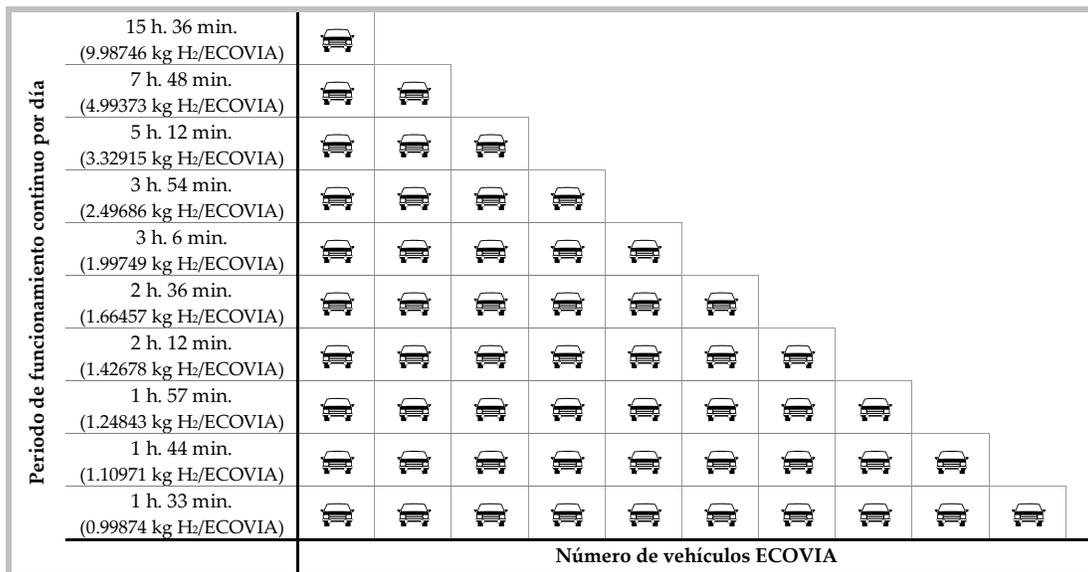


Figura 9.1- Distribución del hidrógeno producido entre vehículos ECOVIA

Si se contara con una flotilla de 150 automóviles ECOVIA, como plantea la visión futurista de reemplazar a los vehículos convencionales de vigilancia de la UNAM con ECOVIA, el hidrógeno generado permitiría un periodo de funcionamiento apenas mayor a 6 minutos para cada ECOVIA; ante tal panorama sería necesario incrementar el ritmo en la producción de hidrógeno, recolectando y procesando un volumen mayor de materia prima así como ampliando y mejorando las instalaciones de la planta. Sin embargo, el que se fabrique y disponga en el corto plazo de 150 vehículos ECOVIA es un suceso que se vislumbra sumamente remoto y, hasta cierto punto, improbable.

Un escenario mucho más plausible consistiría en reservar únicamente el hidrógeno necesario para 8 horas de funcionamiento por día de un vehículo ECOVIA (5.11617 kg de H₂), el resto (4.87129 kg de H₂) podría almacenarse para después, de manera paulatina, abastecer en pequeños tanques portátiles a las facultades e institutos de la UNAM que también requieren este compuesto para sus actividades regulares.

Si bien es cierto que las estimaciones en cuanto a la generación de hidrógeno son bastante alentadores, es indudable que las tasas de producción en condiciones particulares podrían diferir de aquellas que fueron tomadas como referencia; razón por la que sería indispensable la ejecución de ensayos previos, con todo el rigor científico que el caso amerita, a través de los cuales se corroboren experimentalmente los valores aquí obtenidos.

Los aspectos económicos del proyecto de una planta de producción de hidrógeno a través del proceso biológico de fermentación oscura de los residuos orgánicos de C.U. esbozados en la parte última de este trabajo, indican que se requeriría una inversión inicial estimada de \$5'581,248.00 pesos. Con base en una producción anual estimada de 2,167.2788 kg de hidrógeno al 99.999% de pureza, los costos anuales totales ascenderían a \$1'969,968.48 pesos; con ello, el costo de producción esperado por kilogramo de hidrógeno con el 99.999% de pureza sería de \$908.96 pesos, parámetro en el que los costos anuales por consumo de energía en la planta inciden con mayor fuerza, en comparación con el costo capital anual de la planta y los costos anuales por recolección y transporte de la materia prima; esto según lo revela el análisis de sensibilidad básico aplicado al proyecto.

No obstante, se recomienda abordar con mayor profundidad los elementos económicos si se pretende formalizar la propuesta de una planta para la generación de bio-hidrógeno a partir de residuos orgánicos; además, se debe contemplar que las inversiones en proyectos con periodos de vida útil muy prolongados, traen consigo mayor grado de incertidumbre.

Aún cuando se sometió a tres métodos de evaluación financiera, y que éstos arrojaron resultados positivos que avalan el proyecto mostrando un periodo de recuperación de la inversión menor de un año, cabe la sospecha de que la inversión inicial real sea superior a la estimada, o que la producción de hidrógeno se ubique por debajo de la calculada; de lo contrario, las atractivas ganancias que se conseguirían con esta clase de proyectos difícilmente serían ignoradas por la avidez de los grandes inversionistas.

El aprovechamiento de los residuos materiales, ya sea con la finalidad de obtener hidrógeno o cualquier otro combustible, sólo será posible en la medida en que se instaure y prevalezca un sistema para su manejo apropiado, con la infraestructura y el equipamiento suficientes y adecuados, información oportuna y convincente, pero sobre todo con la voluntad social para llevar a cabo la correcta separación de los desechos materiales, pieza clave para la explotación de estos recursos.

La implantación de estrategias para el tratamiento integral de los desechos representa una importante aportación al reciclaje de materiales tanto orgánicos como inorgánicos, manifiesta una opción viable para la generación de energía renovable y contribuye a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que en este caso particular, con el aprovechamiento oportuno de las 46.18 Ton de residuos se impediría la emanación de hasta 9,236.79 m³ de CH₄ (131.901 Ton métricas de CO₂ equivalentes), un gas que tiene un efecto de calentamiento 20 veces superior al del dióxido de carbono.

REFERENCIAS

- Abele, A. 2002. Advanced hydrogen fuel systems for fuel cell vehicles. En: Fuel cell Seminar, Palm Springs, California; EE.UU.A.
- Aceves, S., Berry, G., Martínez-Frías, J. y Espinosa-Loza, L. 2006. Vehicular storage of hydrogen in insulated pressure vessels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31:2274-2283.
- Aceves, S., Martínez-Frías, J. y García-Villazana, O. 2000. Analytical and experimental evaluation of insulated pressure vessels for criogenic hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 25:1075-1085.
- Adams, M. 1990. The metabolism of hydrogen by extremely thermophilic sulphur-dependent bacteria. *FEMS Microbiol. Rev.*, 75:219-238.
- Akansu, S., Dulger, Z., Kahraman, N. y Veziroglu, T. 2004. Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:1527-1539.
- AL-Garni, M. 1995. A simple and reliable approach for the direct injection of hydrogen in internal combustion engines at low and medium pressures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 20(9):723, 126.
- Alliat, I. 2006. ALT-HY-TUDE Project: The 2 first H₂/Hythane® refueling stations in France. En: Proceedings of the 23rd World Gas Conference. Amsterdam, Holanda.
- Amos, W. 1998. Costs of Storing and Transporting Hydrogen. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado; EE.UU.A.
- Arana, L., Shaevitz, S., Franz, A., Schmidt, M. y Jensen, K. 2003. A microfabricated suspended-tube chemical reactor for thermally efficient fuel processing. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 12:600-611.
- Aroutiounian, V., Arakelyan, V. y Shahnazaryan, G. 2005. Metal oxide photoelectrodes for hydrogen generation using solar radiation-driven water splitting. *Solar Energy*, 78:581-592.
- Call, D. y Logan, B. 2008. Hydrogen production in a single chamber microbial electrolysis cell lacking a membrane. *Environmental Science and Technology*, 42:3401-3406.
- Campos, E. 2001. Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos de la industria alimentaria. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida, España.
- Campos, E., Elías, X. y Flotats, X. 2005. Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje. En: Tratamiento y valorización energética de residuos. Editado por: Elías, X. Pp. 617-648. Fundación Universitaria Iberoamericana Díaz de Santos, España.

- Carpentis, C. 1994. A Technology and Costs of Hydrogen Storage. TERI Information Digest on Energy. Vol. 4.1. Pp. 1-13. EE.UU.A.
- Castro, A. 2009. Apuntes de la asignatura "Planeación e Instalación de Sistemas de Bioenergía". Licenciatura en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería; Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México.
- Chachuat, B., Mitsos, A. y Barton, P. 2005. Optimal design and steady-state operation of micro power generation employing fuel cells. *Chemical Engineering Science*, 60:4535-4556.
- Chalk, S. y Miller, J. 2006. Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems. *Journal of Power Sources*, 159:73-80.
- Chang, F. y Lin, C. 2004. Biohydrogen production using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:33-39.
- Chen, C. y Lin, C. 2000. Using sewage sludge as seed in an anaerobic hydrogen producing reactor. En: Proceedings 25th Wastewater Treatment Technology Conference, EE.UU.A.
- Chen, C. y Lin, C. 2003. Using sucrose as a substrate in an anaerobic hydrogen producing reactor. *Adv. Environ. Res.*, 7:695-699.
- Chen, C., Lin, C. y Chang, J. 2001. Kinetics of hydrogen production with continuous anaerobic cultures utilizing sucrose as limiting substrate. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 57:56-64.
- Chen, J. y Wu, F. 2004. Review of hydrogen storage in inorganic fullerene-like nanotubes. *Appl. Phys. A.*, 78:989-994.
- Cheng, S. y Logan, B. 2007. Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis. *PNAS*, 104:18871-18873.
- Cheong, D. 2005. Studies of high rate anaerobic bio-conversion technology for energy production during treatment of high strength organic wastewaters. PhD Dissertation, Utah State University, Logan, Utah; EE.UU.A.
- Cheong, D., Hansen, C. y Stevens, D. 2006. Production of bio-hydrogen by mesophilic anaerobic fermentation in an acid-phase sequencing batch reactor. *Biotechnol. Bioeng.*, 96:421-432.
- Chia-Hung, C., Cheng-Wei, W., Chieh-Chen, H. y Jiunn-Jyi, L. 2008. Pilot study of the influence of stirring and pH on anaerobes converting high-solid organic wastes to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(5):1550-1558.
- Chin, H., Chen, Z. y Chou, C. 2003. Fed-batch operation using *Clostridium acetobutylicum* suspension culture as biocatalyst for enhancing hydrogen production. *Biotechnol. Prog.*, 19:383-388.

Chum, H. y Overend, R. 2001. Biomass and renewable fuels. *Fuel Processing Technology*, 71:187-195.

Clean Energy BMW Group. 2007. Hydrogen 7 combustion engine by BMW, which can operate both on gasoline and hydrogen, NHA.

Collet, C., Adler, N., Schwitzguébel, J. y Péringer, P. 2004. Hydrogen production by *Clostridium thermolacticum* during continuous fermentation of lactose. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:1479-1485.

Dabrock, B., Bahl, H. y Gottschalk, G. 1992. Parameters affecting solvent production by *Clostridium pasteurium*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 58:1233-1239.

Daintith, J. 1985. Diccionario de química. Colección Llave de la ciencia. Norma. Santa Fe de Bogotá, Colombia.

Das, L. 1990. Hydrogen engines: A view of the past and a look into the future. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15:425-443.

Das, L. 1991. Exhaust emission characterization of hydrogen operated design systems: Nature of pollutants and their control techniques. *International Journal of Hydrogen Energy*, 16:765-775.

Demirbas, A. 2005. Recovery of Chemicals and Gasoline-Range Fuels from Plastic Wastes via Pyrolysis. *Energy Sources*, 27:1313-1319.

Demirbas, A. y Arin, G. 2004. Hydrogen from Biomass via Pyrolysis: Relationships between Yield of Hydrogen and Temperature. *Energy Sources*, 26:1061-1069.

Demirbas, M. 2006. Hydrogen from Various Biomass Species via Pyrolysis and Steam Gasification Processes. *Energy Sources*, 28:245-252.

de Rosa, E. 1983. Alimentación y trabajo. Enciclopedia familiar de la salud. Tomo IX. Pp. 1612-1615. Promexa. México D. F., México.

de Vrije, T. y Claassen, P. 2005. Dark Hydrogen Fermentations. En: Bio-Methane & Bio-Hydrogen: Status and Perspectives of Biological Methane and Hydrogen Production. Editado por Reith, J., Wijffels, R. y Barten, H. Pp. 103-120. Dutch Biological Hydrogen Foundation, Petten, Holanda.

Ditzig, J., Liu, H. y Logan, B. 2007. Production of hydrogen from domestic wastewater using a bioelectrochemically assisted microbial reactor (BEAMR). *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:2296-2304.

DOE. 2004. Workshop on Hydrogen Production via Direct Fermentation. En: Proceedings DOE Fermentative Hydrogen Workshop. Baltimore, Maryland; EE.UU.A.

Drennen, T. y Rosthal, J. 2007. Pathways to a Hydrogen Future. Pp. 3-251. Elsevier Academic Press. Gran Bretaña, R. U.

- Enciclopedia Encarta. 2001. Ciclo del carbono. Microsoft Corporation. EE.UU.A.
- Eggeman, T. 2004. Boundary Analysis for H₂ Production by Fermentation. Neoterics International y National Renewable Energy Laboratory. Colorado, EE.UU.A.
- Eichlseder, H., Wallner, T., Freyman, R. y Ringler, J. 2003. The potencial of hydrogen internal combustion engines in a future mobility scenario. SAE Paper 2003-01-2267; Warrendale, Pennsylvania; EE.UU.A.
- Fabiano, B. y Perego, P. 2002. Thermodynamic study and optimization of hydrogen production by *Enterobacter aerogenes*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27:149-156.
- Fang, H. y Liu, H. 2002. Effect of pH on hydrogen production from glucose by mixed culture. *Bioresour. Technol.*, 82:87-93.
- Farrauto, R., Hwang, S., Shore, L., Ruettinger, W., Lampert, J., Giroux, T., Liu, Y. y Illinich, O. 2003. New material needs for hydrocarbon fuel processing: Generating hydrogen for the PEM fuel cell. *Annual Review of Materials Research*, 33:1-27.
- Fascetti, E., D'Addario, E., Todini, O. y Robertiello, A. 1998. Photosynthetic hydrogen evolution with volatile organic acid derived from the fermentation of source selected municipal wastes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23:753-760.
- Flores, J. 1980. Química: Aplicaciones industriales de los compuestos del carbono. Vol. IX. Pp. 50-59. Trillas. México D. F., México.
- Frankzky, S. 2002. High pressure 825 bar hydrogen storage. *Fuel Cells Bulletin*, 9:72-77.
- Funk, J. 2001. Thermochemical hydrogen production: Past and present. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26:185-190.
- Galarza, C. 2008. Hidrógeno. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, CONUEE (antes Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía, CONAE). México D. F., México.
- Galloni, E. y Minutillo, M. 2007. Performance of spark ignition engine fuelled with reformat gas produced on-board vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13):2532-2538.
- Garrett, D. 1989. Chemical Engineering Economics. Von Nostrand Reinhold. New York, EE.UU.A.
- Geiger, S. 2006. Fuel cell market survey: Automotive hydrogen infrastructure. Disponible en: http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles/Article_1110_Infrastructure%20survey%202006.pdf.
- GI. 2009. Hydrogen Storage in Carbon Nanotubes. Greener Industry. Organización avocada al desarrollo de tecnologías ecológicas en distintos rubros. Disponible en: http://www.greener-industry.org/pages/greener_cars/5_greener_cars_PM2.htm

- Ginkel, S., Oh, S. y Logan, B. 2005. Biohydrogen production from food processing and domestic wastewaters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30:1535-1542.
- Gratzel, M. 2000. Perspectives for dye-sensitized nanocrystalline solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8:171-185.
- Gunardson, H. 1998. Industrial Gases in Petrochemical Processing. Capítulo III. Marcel Dekker. New York, EE.UU.A.
- Guzmán, F. 2008. Crean el primer auto híbrido mexicano. *El Universal*. p. F-2. Fecha de publicación: 21 de agosto de 2008. México D. F., México.
- Hammer, T., Kappes, T. y Baldauf, M. 2004. Plasma catalytic hybrid processes: Gas discharge initiation and plasma activation of catalytic processes. *Catalysis Today*, 89:5-14.
- HCN. 2009. Hydrogen Fuel Stations. Sitio de Internet especializado en vehículos de hidrógeno y temas afines. Hydrogen Cars Now. Laguna Beach, California; EE.UU.A. Disponible en: <http://www.hydrogencarsnow.com/>.
- Hino, R., Haga, K., Aita, H. y Sekita, K. 2004. R&D on hydrogen production by high-temperature electrolysis of steam. *Nuclear Engineering and Design*, 233:363-375.
- Hohn, K. y Schmidt, L. 2001. Partial oxidation of methane to syngas at high space velocities over Rh-coated spheres. *Applied Catalysis A: General*, 211:53-68.
- Holladay, J., Hu, J., King, D. y Wang, Y. 2008. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, doi:10.1016/j.cattod.2008.08.039.
- Holladay, J., Jones, E., Palo, D., Phelps, M., Chin, Y., Dagle, R., Hu, J., Wang, Y. y Baker, E. 2003. Miniature Fuel Processors for Portable Fuel Cell Power Supplies. En: Materials Research Society Symposium-Proceedings. Pp. 429-434. Materials Research Society, Boston, Massachusetts; EE.UU.A.
- Holladay, J., Wang, Y. y Jones, E. 2004. Review of Developments in Portable Hydrogen Production Using Microreactor Technology. *Chemical Reviews*, 104:4767-4789.
- Huber, G. y Dumesic, J. 2006. An overview of aqueous-phase catalytic processes for production of hydrogen and alkanes in a biorefinery. *Catalysis Today*, 119-132.
- Hussy, I., Hawkes, F., Dinsdale, R. y Hawkes, D. 2005. Continuous fermentative hydrogen production from sucrose and sugar beet. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30:471-483.
- Ike, A., Murakawa, T., Kawaguchi, H., Hirata, K. y Miyamoto, K. 1999. Photo-production of hydrogen from raw starch using a halophilic bacterial community. *J. Biosci. Bioeng.*, 88:72-77.

- Jayalakshmi, S., Sukumaran, V. y Kurian, J. 2007. Hydrogen production from kitchen waste using heat treated anaerobic biogas plant slurry. En: Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management. Pp. 356-362. Chennai, India.
- JM. 2009. Fuel Cell Today. Organización dedicada a difundir los avances y tendencias en torno a la industria de las celdas de combustible alimentadas con hidrógeno. Johnson Matthey plc. Group. Hatton Garden, Londres; Reino Unido. Disponible en: <http://www.fuelcelltoday.com/reference/image-bank/>.
- Kanai, T., Imanaka, H., Nakajima, A., Uwamori, K., Omori, Y. y Fukui, T. 2005. Continuous hydrogen production by the hyperthermophilic archaeon. *J. Biotechnol.*, 116:271-282.
- Kapdan, I. y Kargi, F. 2006. Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 38:569-582.
- Kawaguchi, H., Hashimoto, K., Hirata, K. y Miyamoto, K. 2001. Hydrogen production from algal biomass by mixed culture of *Rhodobium marinum* A-501 and *Lactobacillus amylovorus*. *J. Biosci. Bioeng.*, 91:277-282.
- Kengen, S., Stams, A. y de Vos, W. 1996. Sugar metabolism of hyperthermophiles. *FEMS Microbiol. Rev.*, 18:119-137.
- Khanal, S., Chen, W., Li, L. y Sung, S. 2004. Biological hydrogen production: Effects of pH and intermediate products. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:1123-1131.
- Kim, J., Kim, Y., Ryu, J., Song, B., Kim, I. y Yeom, S. 2005. Immobilization methods for continuous hydrogen gas production biofilm versus granulation. *Process. Biochem.*, 40:1137-1331.
- Kim, S., Han, S. y Shin, H. 2004. Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:1607-1616.
- King, D., Brooks, K., Fisher, C., Pederson, L., Rawlings, G., Stenkamp, S., TeGrotenhuis, W., Wegeng, R. y Whyatt, G. 2005. Microreactor Technology and Process Intensification. Editado por: Wang, Y. y Holladay, J. Pp. 119-128. ACS. Washintong DC, EE.UU.A.
- Kirk-Othmer, F. 2002. Encyclopedia of chemical technology. Vol. 12, Wiley, New York, EE.UU.A.
- Kirsch, M. 2005. Charakterisierung und Optimierung des Betankungsprozesses von Brennstoffzellenfahrzeugen Ulm. Tesis de Maestría. University of Applied Sciences, Department of Production Engineering and Production Economics.
- Kovacs, K., Maróti, G. y Rákhely, G. 2006. A novel approach for biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31:1460-1468.

- Kreiser, E. 1994. Analyse von Störfällen mit Wasserstoff in bisherigen Anwendungsbereichen mit besonderer Berücksichtigung von LH₂. Universität Stuttgart, Alemania.
- Krummenacher, J., West, K. y Schmidt, L. 2003. Catalytic partial oxidation of higher hydrocarbons at millisecond contact times: decane, hexadecane, and diesel fuel. *Journal of Catalysis*, 215:332-343.
- Kumar, N. y Das, D. 2000. Enhancement of hydrogen production by *Enterobacter cloacae* IIT-BT 08. *Process. Biochem.*, 35:589-593.
- Kumar, N. y Das, D. 2002. Continuous hydrogen production by immobilized *Enterobacter cloacae* IIT-BT 08 using lignocellulosic materials as solid matrices. *Enzyme Microbiol. Technol.*, 29:280-287.
- Lanz, A., Heffel, J. y Messer, C. 2001. Hydrogen use in internal combustion engines. En Manual del curso: Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. College of the Desert y SunLine Transit Agency. Diciembre, Palm Desert, California; EE.UU.A.
- Lay, J. 2001. Biohydrogen generation by mesophilic anaerobic fermentation of microcrystalline cellulose. *Biotechnol. Bioeng.*, 74:281-287.
- Lay, J., Lee, Y. y Noike, T. 1999. Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste. *Water Res.*, 33:2579-2586.
- LBS. 2006. Information system for hydrogen refueling stations worldwide. Sitio de Internet que ofrece un censo de las estaciones de abastecimiento de hidrógeno existentes a nivel mundial. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH y TÜV SÜD. Disponible en: <http://www.h2stations.org/>.
- Lee, K., Lo, Y., Lin, P. y Chang, J. 2004. Operating strategies for biohydrogen production with high-rate anaerobic granular sludge bed bioreactor. *Enzyme Microbiol. Technol.*, 35:605-612.
- Lee, M. y Zinder, S. 1988. Hydrogen partial pressures in a thermophilic acetate-oxidizing methanogenic co-culture. *Appl. Environ. Microbiol.*, 54:1457-1461.
- Levin, D., Pitt, L. y Love, M. 2004. Biohydrogen production: Prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:173-185.
- Levin, D., Zhu, H., Beland, M., Cicek, N. y Holbein, B. 2007. Potential for hydrogen and methane production from biomass residues in Canada. *Bioresource Technology*, 98:654-660.
- Li, L., Jinsen, G., Chunming, X. y Xianghai, M. 2006. Reaction behaviors and mechanisms of catalytic pyrolysis of C₄ hydrocarbons. *Chemical Engineering Journal*, 116:155-161.
- Lin, C. y Chang, R. 2004. Fermentative hydrogen production at ambient temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:715-720.

- Lin, C. y Jo, C. Hydrogen production from sucrose using an anaerobic sequencing batch reactor process. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 78:678-684.
- Liss, W. 2004. Development and validation testing of hydrogen fast-fill fueling algorithms. En: Proceedings of the Fifteenth National Hydrogen Association Annual Conference, Los Angeles, EE.UU.A.
- Liu, G. y Shen J. 2004. Effects of culture medium and medium conditions on hydrogen production from starch using anaerobic bacteria. *J. Biosci. Bioeng.*, 98:251-256.
- Liu, H., Zhang, T. y Fang, H. 2003. Thermophilic H₂ production from cellulose containing wastewater. *Biotechnol. Lett.*, 25:365-369.
- Logan, B., Oh, S. y Ginkel, S. 2002. Biological hydrogen production measured in batch anaerobic respirometer. *Environ. Sci. Technol.*, 36:2530-2535.
- López, R. 2008. Uso eficiente de energía en CU. *El Universal*. Sección Cultura. p. F4. Fecha de publicación: 7 de agosto del 2008. México D. F., México.
- Marbán, G. y Valdés-Solís, T. 2007. Towards the hydrogen economy? *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:1625-1637.
- Matthews, R., Pehrsson, P. y Farhat-Sabet, M. 1987. Sugar content of selected foods: Individual and total sugars. Home Economics Research Report Number 48. United States Department of Agriculture. EE.UU.A.
- Matsui, Y., Kawakami, S., Takashima, K., Katsura, S. y Mizuno, A. 2005. Liquid-Phase Fuel Re-forming at Room Temperature Using Nonthermal Plasma. *Energy and Fuels*, 19:1561-1565.
- Maus, S., Hapke, J., Na Ranong, C., Wüchner, E., Friedlmeier, G. y Wenger, D. 2008. Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33:4612-4621.
- McHugh, K. 2005. Hydrogen Production Methods. Report MPR-WP-0001. Pp. 41-46. MPR Associates Inc. Virginia, EE.UU.A.
- Meusinger, J. 2003. 700 bar hydrogen storage breakthrough extends FCV range. *Fuel Cells Bulletin*, 4:25-34.
- Midilli, A., Dincer, I. y Rosen, M. 2005. On hydrogen and hydrogen energy strategies. I: Current status and needs. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 9(3):255-271.
- Minnan, L., Jinli, H., Xiaobin, W., Huijuan, X., Jinzao, C. y Chuannan, L. 2005. Isolation and characterization of a high H₂-producing strain *Klebsiella oxytoca* HP1 from a hot spring. *Res. Microbiol.*, 156:76-81.

- Mohammadia, A., Shiojib, M., Nakaib, Y., Ishikurab, W. y Taboc, E. 2007. Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:296-304.
- Moriarty, P. y Honnery, D. 2007. Intermittent renewable energy: The only future source of hydrogen? *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:1616-1624.
- Morimoto, M., Atsuko, M., Atif, A. y Ngan, M. 2004. Biological production of hydrogen from glucose by natural anaerobic microflora. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:709-713.
- IP. 2008. Motor de Hidrógeno, sitio en Internet dedicado al hidrógeno y sus aplicaciones. Internet Proxima. Disponible en: <http://www.motordehidrogeno.net/>.
- Muradov, N. 2003. Emission-free fuel reformers for mobile and portable fuel cell applications. *Journal of Power Sources*, 118:320-324.
- Mutaf-Yardimci, O., Saveliev, A., Fridman, A. y Kennedy, L. 1998. Employing plasma as catalyst in hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23:1109-1111.
- National Academy of Science. 2004. The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs. National Academies Press, Washington DC; EE.UU.A.
- Navarro, R., Peña, M. y Fierro, J. 2007. Hydrogen production from carbon feedstocks: fossil fuels and biomass. *Chemical Reviews*, 107:3952-3991.
- Noike, S., Mizuno, Osamu, N., Miyahara y Takashi. 2003. Method of producing hydrogen gas by using hydrogen bacteria. Japan Science and Technology Corporation, Patente #6,860,996.
- Norbeck, J., Heffel, J., Durbin, T., Tabbara, B., Bowden, J. y Montani, M. 1996. Hydrogen Fuel for Surface Transportation. p. 548. Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale; EE.UU.A.
- Oh, S., Van Ginkel, S. y Logan, B. 2003. The relative effectiveness of pH control and heat treatment for enhancing biohydrogen gas production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37:5186-5190.
- Oh, Y., Kim, S., Kim, M. y Park, S. 2004. Thermophilic biohydrogen production from glucose with trickling biofilters. *Biotechnol. Bioeng.*, 88:690-698.
- Okamoto, Y. y Miyamoto, Y. 2001. *Ab initio* investigation of physisorption of molecular hydrogen on planar and curved graphene. *J. Phys. Chem.*, B105:3470
- Ortega, E. y François, J. 2007. Producción de hidrógeno mediante energía nuclear, un escenario sostenible en México. En: Memorias del Congreso Internacional Conjunto Cancún, Quintana Roo. México.

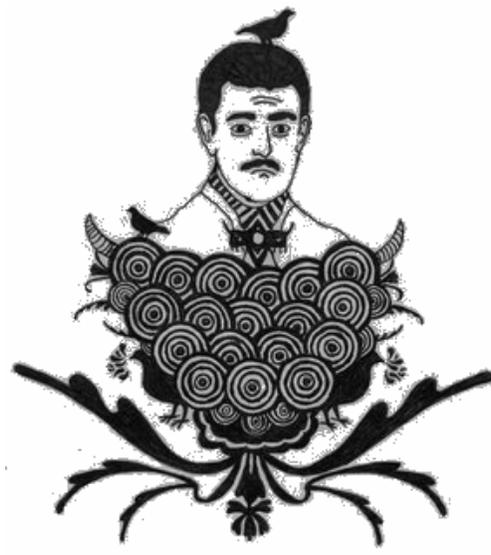
- Pant, K. y Gupta, R. 2009a. Fundamentals and use of hydrogen as a fuel. En: Hydrogen fuel: production, transport and storage. Editado por Gupta, R. B. Pp. 4-29. CRC Press, EE.UU.A.
- Pant, K. y Gupta, R. 2009b. Hydrogen storage in metal hydrides. En: Hydrogen fuel: production, transport and storage. Editado por Gupta, R. B. Pp. 381-404. CRC Press, EE.UU.A.
- Pant, K. y Gupta, R. 2009c. Hydrogen storage in carbon materials. En: Hydrogen fuel: production, transport and storage. Editado por Gupta, R. B. Pp. 409-433. CRC Press, EE.UU.A.
- Pehr, K., Sauermann, P., Traeger, O. y Bracha, M. 2001. Liquid hydrogen for motor vehicles – the world's first public LH₂ filling station. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26:777-782.
- Penninger, J. 2006. Reforming of aqueous wood pyrolysis condensate in supercritical water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31:1597-1606.
- Peschika, W. 1998. Hydrogen: The future cryofuel in internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(1):27-43.
- Pettersson, J., Ramsey, B. y Harrison, D. 2006. A review of the latest developments in electrodes for unitised regenerative polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources*, 157:28-34.
- Pino, L., Recupero, V., Beninati, S., Shukla, A. K., Hegde, M. S. y Bera, P. 2002. Catalytic partial-oxidation of methane on a ceria-supported platinum catalyst for application in fuel cell electric vehicles. *Applied Catalysis A: General*, 225:63-75.
- Podestá, J., Navarro, A., Estrella, C. y Estesó, M. 1997. Electrochemical measurements of trace concentrations of biological hydrogen produced by *Enterobacteriaceae*. *Inst. Pasteur*. 148:87-93.
- PSA Plants. 2009. Sitio en Internet dedicado a la promoción de la tecnología PSA de purificación de hidrógeno. Disponible en: <http://www.psaplants.com/hydrogen-purification.html>.
- Rambach, G. y Hendricks, C. 1996. Hydrogen transport and storage in engineered microspheres. En: Proceedings of the U.S. DOE Hydrogen Program Review, Miami, Florida; EE.UU.A.
- Rapp, D. y Shelby, J. 2004. Photo-induced hydrogen outgassing of glass. *J. Non-Crystalline Solids*, 349:254-259.
- Reijerkerk, J. 2006. Hydrogen logistics – production, conditioning, distribution, storage and refueling. En: Proceedings of the third International Hydrogen Energy Congress, Essen; Alemania.

- Rostrup-Nielsen, J. 2003. Encyclopedia of Catalysis. Vol. 4. Editada por Horvath, I. Wiley Interscience. New York, EE.UU.A.
- Rozmiarek, B. 2008. Hydrogen Generation from Biomass-Derived Carbohydrates via Aqueous Phase Reforming Process. Editado por: Milliken, J. p. PD-6. U.S. Department of Energy. Washintong DC, EE.UU.A.
- Rüdiger, H. 1992. Design characteristics and performance of a liquid hydrogen tank system for motor cars. *Cryogenics*, 32(3):327-329.
- Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., Hirscher, M. y Dogan, B. 2007. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(9), 1121-1140.
- Salakhov, I., Ekimova, A., Eiyatdinov, A., Diyarov, I., Gilmanov, K. y Shangareeva, A. 2005. Effect of Feedstock Hydrocarbon Composition on the Distribution of Products of Initiated Pyrolysis. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 41:386-394.
- Salvat, J. 1980. Metabolismo y nutrición. En: El libro guía de la medicina familiar. Tomo II. Editado por: Navarro, J. Pp. 214-217. Salvat Editores. Barcelona, España.
- Sarkar, A. y Banerjee, R. 2004. Net energy analysis of hydrogen storage options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30:867-877.
- Schafer, A., Heywood, J. y Weiss, A. 2006. Future fuel cell and internal combustion engine automobile technologies: A 25-year life cycle and fleet impact assessment. *Energy*, 31:2064-2087.
- Schlapbach, L. y Zuttel, A. 2001. Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nature*, 414:353-358.
- Schmitt, M., Shelby, J. y Hall, M. 2006. Preparation of hollow glass microspheres from sol-gel derived glass for application in hydrogen gas storage. *J. Non-Crystalline Solids*, 352:626-631.
- Schneider, J. 2005. Optimizing the fuelling of hydrogen vehicles. *The Fuel Cell Review*, 40:28-39.
- Schwarz, J. y Amonkwah, K. 1993. Hydrogen Storage Systems. U.S. Geological Survey. Washington DC, EE.UU.A.
- Shin, H., Youn, J. y Kim, S. 2004. Hydrogen production from food waste in anaerobic mesophilic and thermophilic acidogenesis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:1355-1363.
- Soliva, M. 2002. El compostatge com a activitat industrial aplicada a la gestió dels residus orgànics. En: Quarta jornada tècnica sobre la gestió de residus municipals. El compostatge. Pp. 11-39. Col. Jornades Tècniques/4. Servei d'Informació, Imatge i Publicacions de la Universitat Politècnica de Catalunya, España.

- Solomon, B., Zeng, A., Biebl, H., Schlieker, H., Posten, C. y Deckwer, W. 1995. Comparison of the energetic efficiencies of hydrogen and oxychemicals formation in *Klebsiella pneumoniae* and *Clostridium butyricum* during anaerobic growth on glycerol. *J. Biotechnol.*, 39:107-117.
- Song, C. 2002. Fuel processing for low-temperature and high-temperature fuel cells: Challenges, and opportunities for sustainable development in the 21st century. *Catalysis Today*, 77:17-49.
- Sørensen, B. 2005. Hydrogen and Fuel Cells Emerging Technologies and Applications. Pp. 349-359. Elsevier Academic Press, New York, EE.UU.A.
- Sørensen, B. 2005a. Underground hydrogen storage in geological formations and comparison with other storage solutions. Department of Environmental, Social and Spatial Change Energy. Environment and Climate Group, Roskilde University. Roskilde, Dinamarca.
- Standard SAE TIR J2799. 2007. 70 MPa compressed hydrogen surface vehicle fueling connection device & optional vehicle to station communications.
- Steets, J. 2009. De la vaca al kilovatio - Fructífero ejemplo de transferencia de tecnología. Climate Change Programme. Global Public Policy Institute. Disponible en: http://www.wipo.int/wipo_magazine/es/2009/02/article_0007.html.
- Steinfeld, A. 2005. Solar thermochemical production of hydrogen – A review. *Solar Energy*, 78:603-615.
- Strobel, R., Garcke, J., Moseley, P., Jorissen, L. y Wolf, G. 2006. Hydrogen storage by carbon materials. *J. Power Sources*, 159:781-801.
- Tanisho, S. e Ishiwata, Y. 1994. Continuous hydrogen production from molasses by bacterium *Enterobacter aerogenes*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19:807-812.
- Taylor, J., Herdman, C., Wu, B., Wally, K. y Rice, S. Hydrogen production in a compact supercritical water reformer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28:1171-1178.
- Thesen, G. y Langhelle, O. 2008. Awareness, acceptability and attitudes towards hydrogen vehicles and filling stations: A Greater Stavanger case study and comparisons with London. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33:5859-5867.
- Thompson, R. 2008. Hydrogen Production by Anaerobic Fermentation Using Agricultural and Food Processing Wastes Utilizing a Two-Stages Digestion System. Tesis de Maestría. Utah State University, Logan, Utah; EE.UU.A.
- Timm, D. y Onsan, Z. 2001. Onboard fuel conversion for hydrogen-fuel-cell-driven vehicles. *Catalysis Review*, 43:31-84.

- Toshio, S. y Hiroyuki, Y. 2007. Hydrogen as an ignition-controlling agent for HCCI combustion engine by suppressing the low-temperature oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(14):3066-3072.
- T-Raissi, A. y Sadhu, A. 1994. A System Study of Metal Hydride Storage Requirements. En: Proceedings of 1994 DOE/NREL Hydrogen Program Review. Livermore, California; EE.UU.A.
- Turner, J., Sverdrup, G., Mann, M., Maness, P., Kroposki, B., Ghirardi, M., Evans, R. y Blake, D. 2008. Renewable hydrogen production. *International Journal of Energy Research*, 32:379-407.
- Twigg, M. 1989. Catalyst Handbook. Editado por: Twigg, M. Wolfe Publishing Ltd. Londres, Inglaterra.
- Ueno, Y., Haruta, S., Ishii, M. e Igarashi, Y. 2001. Characterization of a microorganism isolated from the effluent of hydrogen fermentation by microflora. *J. Bioscience Bioeng.*, 92:397-400.
- U.S. Department of Energy Hydrogen. 2007. Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program, Multi-Year Research. Development and Demonstration Plan, U.S. Department of Energy, EE.UU.A.
- Valenzuela, M., Jones, C. y Agrawal, P. 2006. Batch Aqueous-Phase Reforming of Woody Biomass. *Energy and Fuels*, 20:1744-1752.
- van Niel, E., Claassen, P. y Stams, A. 2002. Substrate and product inhibition of hydrogen production by the extreme thermophile *Caldicellulosiruptor saccharolyticus*. *Biotechnol. Bioeng.*, 81:255-262.
- Verhelst, S. y Sierens, R. 2001. Hydrogen engine-specific properties. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(9):987-990.
- Wang, C., Chang, C., Chu, C., Lee, D., Chang, B. y Liao, C. 2003. Using filtrate of waste biosolids to effectively produce bio-hydrogen by anaerobic fermentation. *Water Res.*, 37:2789-2793.
- Wang, C., Chang, C., Chu, C., Lee, D., Chang, B. y Liao, C. 2004. Efficient production of hydrogen from wastewater sludge. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 79:426-427.
- Wee, J. 2007. Applications of proton exchange membrane fuel cell systems. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 11:1720-1738.
- Weinert, J., Shaojun, L., Ogden, J. y Jianxin, M. 2007. Hydrogen refueling station costs in Shanghai. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(16):4089-4100.
- Wetzel, F. 1998. Improved handling of liquid hydrogen at filling stations: Review of six years of experience. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(5):339-348.

- White, C., Steeper, R. y Lutz, A. 2006. The hydrogen fueled internal combustion engine: A technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31:1292-1305.
- Wilhelm, D., Simbeck, D., Karp, A. y Dickenson, R. 2001. Syngas production for gas-to-liquids applications: technologies, issues and outlook. *Fuel Processing Technology*, 71:139-148.
- Wojcik, A., Middleton, H., Damopoulos, I. y Van Herle, J. 2003. Ammonia as a fuel in solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 118:342-348.
- Wu, W. y Yoshikawa, K. 2002. R & D on micro-pyrolyzer for solid wastes using high temperature steam and air. *JSME International Journal Series B-Fluids and Thermal Engineering*, 45:487-491.
- Yamada, O. 2006. Generation of hydrogen gas by reforming biomass with superheated steam. *Thin Solid Films*, 509:207-211.
- Yan, Z., Chen, L. y Wang, H. 2006. *Xuebao Huagong/Journal of Chemical Industry and Engineering*, 57:1432-1437.
- Yokoi, H., Maki, R., Hirose, J. y Hayashi, S. 2002. Microbial production of hydrogen from starch manufacturing wastes. *Biomass Bioenergy*, 22:89-395.
- Yokoi, H., Saitsu, A., Uchida, H., Hirose, J., Hayashi, S. y Takasaki, Y. 2001. Microbial hydrogen production from sweet potato starch residue. *J. Biosci. Bioeng.*, 91:58-63.
- Yokoi, H., Tokushige, T., Hirose, J., Hayashi, S. y Takasaki, Y. 1997. Hydrogen production by immobilized cells of aciduric *Enterobacter aerogenes* strain HO-39. *J. Ferment. Bioeng.*, 83:481-484.
- Yokoi, H., Tokushige, T., Hirose, J., Hayashi, S. y Takasaki, Y. 1998. Hydrogen production from starch by mixed culture of *Clostridium buytricum* and *Enterobacter aerogenes*. *Biotechnol. Lett.*, 20:143-147.
- Yu, H., Zhu, Z., Hu, W. y Zhang, H. 2002. Hydrogen production from rice winery wastewater in an up-flow anaerobic reactor by mixed anaerobic cultures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27:1359-1365.
- Zhang, T., Liu, H. y Fang, H. 2003. Biohydrogen production from starch in wastewater under thermophilic conditions. *J. Environ. Manag.*, 69:149-156.
- Zhou, L. 2005. Progress and problems in hydrogen storage methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(4):395-408.
- Zittel, W. y Wurster, R. 1996. Hydrogen in the Energy Sector. SRI International. Menlo Park, California; EE.UU.A.



"MALVERDE MILAGROSO"
SHUCHI CO-ZOMB E- VHEMMIX