



Cinvestav CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD ZACATENCO

**PROGRAMA DE DESARROLLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO
PARA LA SOCIEDAD**

“El hidrógeno como fuente alterna de energía”

TESIS

que presenta

Griselda Argelia Rivera Vargas

Para obtener el grado

DOCTORA EN CIENCIAS

**EN DESARROLLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO
PARA LA SOCIEDAD**

Directores de tesis:

Dr. Rafael Baquero Parra Dr. Yasuhiro Matsumoto Kuwabara

CDMX, JUNIO 2016

AGRADECIMIENTOS

A MIS DIRECTORES DE TESIS

Agradezco profundamente a los Doctores Rafael Baquero Parra y Yasuhiro Matsumoto Kuwabara por su apoyo y guía en la realización de este trabajo, sin ellos este sueño no sería posible.

A MIS SINODALES

Dr. Miguel Ángel Pérez Angón, Dr. Fray de Landa Castillo Alvarado, Dr. Alejandro Zacarías Santiago y Dr. Ricardo López Fernández, un agradecimiento muy especial por sus comentarios y observaciones que enriquecieron este trabajo.

A MI FAMILIA

Agradezco a mi familia por su cariño en especial a mi madre por sus consejos, mi hermana Atenea, a mis hijos Iovan y Tristan son mi luz, a mi esposo Erick por su amor.

A mis tíos Roger y Susana un ejemplo en mi vida y mi hermano Gonzalo por su compañía.

A los que ya no están gracias los tengo en mi mente siempre.

A MIS PROFESORES

Agradezco a todos aquellos maestros que me han aportado parte de sus conocimientos en lo largo de mi trayectoria académica.

Agradezco a CONACyT, México por la beca (No. 221931), que apoyo este trabajo de investigación.

CONTENIDO

• Índice de contenidos.....	2
• Índice de tablas.....	4
• Índice de figuras.....	5
• Bibliografía.....	56

Índice de contenido

RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
CAPITULO 1.....	11
1.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
1.1.2 Hidrógeno.....	12
1.1.3- Procesos para la producción de hidrógeno.	12
1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	15
1.3.1 Objetivo general.....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 HIPÓTESIS.....	16
CAPITULO 2.....	17
2.1 MARCO TEÓRICO.....	17
2.1.3 Sistema Eléctrico Nacional.....	20
2.1.4 Biomasa.....	24
2.1.5 Energía solar.....	25
2.2 EI HIDRÓGENO.....	26
2.2.1 Procesos comerciales de obtención de hidrógeno.....	27
2.2.2 <i>Aplicaciones industriales del hidrógeno:</i>	30
2.3 AGUA.....	32
2.3.1 <i>Definición de contaminación del agua</i>	32
2.3.2 <i>Tipos de contaminación del agua.</i>	32
2.4 PULQUE.....	37
2.4.1 Pellets de Energía.....	40
2.4.1.1 Diseño del secador solar.....	43
2.4.1.2 Cálculo del flujo de aire que entra al secador solar.....	44
CAPITULO 3.....	48
3.1 METODOLOGÍA.....	48
3.1.1 Metodología experimental.....	48
CAPITULO 4.....	50

4.1 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.2 CONCLUSIONES.....	54
4.3 REFERENCIAS	55
4.4 PRODUCTOS DE LA INVESTIGACIÓN	57
Artículos publicados:.....	57

Índice de Tablas

Tabla 1 Demanda mundial primaria de petróleo	9
Tabla 2 Producción de energía por fuente de generación	20
Tabla 3 Capacidad efectiva real de energías renovables CFE Y LFC por mes en 2014 en Petajoules	23
Tabla 4 Consumo energético de Leña y Bagazo por año y su relación con el consumo energético total en la Industria.	25
Tabla 5 Consumo real de Energía Solar en México en Petajoules.	26
Tabla 6 Propiedades físicas del Hidrógeno	27
Tabla 7 Análisis de agua del Rio Atoyac.....	35
Tabla 8 Características Físicas y Químicas del Pulque (A Sánchez., et al, 1967).....	39
Tabla 9 Concentración de los diferentes gases liberados de la muestra de pulque (100 ml) sometido a temperatura 50 °C.	51

Índice de Figuras

Figura 1. Desarrollo sustentable	11
Figura 2 Combustibles y fuentes de energía para la generación eléctrica mundial, 2006-2025 (TWh) Fuente: EnergyInformationAdministration e International Energy Outlook (SENER).	19
Figura 3 Producción nacional de Hidroenergía por año en México.	20
Figura 4 Producción nacional de Geenergía por año en México.....	21
Figura 5 Producción nacional de Energía Eólica por año en México.....	22
Figura 6 Producción nacional de Energía Eólica por año en México.....	22
Figura 7 Capacidad efectiva real de energías renovables CFE Y LFC por mes en 2014 en Petajoules	23
Figura 8 Producción de energía con Bagazo de caña en México por año.....	24
Figura 9 Producción de energía con Leña en México por año.	24
Figura 10 Consumo energético de Leña y Bagazo de caña por año en México y su relación con el consumo energético total.	25
Figura 11 Producción de energía Solar en México por año.	25
Figura 12 Consumo de Energía solar por sector por año en México.....	26
Figura 13 Usos industriales del hidrógeno.	31
Figura 14 Distribución geográfica de Agave. (Elaboración con datos de CONABIO).	37
Figura 15 Diseño del prototipo (AutocaD)	46
Figura 16 Cromatograma de la identificación y cuantificación de los gases liberados de la muestra líquida, medidos durante 40min de reacción.	50
Figura 17 Concentración contra tiempo de los	51
Figura 18 Producción de H ₂ con respecto al tiempo.....	52
Figura 19 Muestra de bacterias en pulque muestra saturada objetivo 40X, caracterización del género Zymomonas (ovalito), Saccharomyces (triángulo) y Leuconostoc (rectángulo). 53	
Figura 20 Muestra de bacterias en pulque muestra saturada objetivo 100X, Zymomonas, Saccharomyces, Leuconostoc y Salmonella.	54

RESUMEN

Actualmente los hidrocarburos son la principal fuente para la obtención de energía, de forma directa como en los automóviles o indirecta como el reformado catalítico que consiste en hacer pasar vapor de agua aun gas como metano para obtención de hidrógeno y poder utilizarlo como combustible; esta dependencia energética es nociva para el país debido a que al tratarse de una energía no renovable encarece los precios al ser más difícil su obtención. México se sitúa entre los países más dependientes de petróleo. El 91% de la energía consumida es suministrada por este recurso, y es una de las principales fuentes de ingresos del país. Es por ello que las nuevas políticas en energía se están enfocando al uso de energías renovables para amortiguar el impacto de los precios del petróleo y gas natural así como el incremento en la demanda de energía por el crecimiento de la población. Una solución es el uso del Hidrógeno como energético el cual se puede obtener a partir de recursos renovables como la biomasa y generar energía limpia para pequeñas ciudades. Se ha demostrado que la obtención de hidrógeno a partir de desechos orgánicos con ciertas características fisicoquímicas, es viable. Analizando estas características y comparándolas con las encontradas en el pulque, bebida tradicional mexicana, se propone éste producto como opción para la obtención de hidrógeno.

Abstract:

Currently hydrocarbons are the main source for obtaining energy, directly and indirectly in cars or as catalytic reforming which involves passing water vapor and methane gas even for obtaining hydrogen and use it as fuel.; ,the energy dependence is harmful to the country since oil is a non-renewable product, prices tend to rise since it is harder and harder to obtain.

Mexico is among the most dependent countries on oil. 91% of the energy is supplied by oil, and it is one of the main sources of income. For that reason, new policies are focusing on the use of renewable energy to diminish the impact of oil and natural gas prices and of the increase in the demand of energy due to population growth. A possible solution is the use of hydrogen as a source of energy which can be obtained from renewable resources such as biomass. This could provide clean energy for small towns. To obtain hydrogen from organic waste with certain physicochemical characteristics and analyzing and comparing these features with those found in traditional Mexican drink pulque gave rise to the proposal that this could be an option to obtain hydrogen.

Palabras Clave: Hidrógeno, Biomasa, Energía, Petróleo.

INTRODUCCIÓN

La demanda de recursos energéticos en el mundo exige la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles, ya que existen evidencias científicas de que las emisiones provocadas por el uso intensivo de éstos es una de las principales causas del incremento en la temperatura global y los potenciales efectos en el clima derivados de este fenómeno. La demanda del petróleo, según estadísticas del IEA (Agencia Internacional de Energía), va en aumento como se muestra en la Tabla 1. En México, el 91 % de la energía generada proviene de la combustión de hidrocarburos (SENER 2008).

Debe recordarse que las reservas de hidrocarburos en el mundo son finitas y su agotamiento es inminente. En los países desarrollados la demanda energética es muy superior a su oferta, lo cual implica que su creciente consumo es abastecido por países en vías de desarrollo; tal es el caso de México que es actualmente el séptimo país exportador de petróleo; además, la tasa de producción mundial de petróleo es mayor que la incorporación de nuevas reservas. A nivel global, el sector eléctrico contribuirá en más de 50% al incremento de la demanda. Este hecho pone de manifiesto la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías para la generación de energías alternas en nuestro país.

Desde una perspectiva económica y de rentabilidad, el desarrollo de bioenergéticos se presenta como una alternativa que permitirá desarrollar una economía menos dependiente de las importaciones del petróleo y del comportamiento de los precios internacionales de éste.

Aunque existen algunas opciones energéticas sustentables que pueden emerger, una alternativa que cumple con las características de ser limpia y sustentable: es la utilización de hidrógeno como combustible. El hidrógeno posee un alto rendimiento energético (122-142 KJ/g), 2.75 veces mayor que el de los hidrocarburos, y puede ser utilizado directamente para producir electricidad mediante celdas de combustible. Esta tecnología tiene las ventajas de ser

altamente eficiente, factible a cualquier escala y que solo produce agua y calor como desechos.(Claassen et al., 1999). Con ello, en la generación de energía se reducen a cero las emisiones contaminantes que acompañan la combustión de hidrocarburos (Reith et al., 2003). Sin embargo, el hidrógeno no está disponible en forma natural como los combustibles fósiles, por lo tanto el mayor interés está dado en la forma de producirlo y especialmente a partir de materiales renovables tales como la biomasa o el agua. Entre las distintas formas de obtención de hidrógeno, la producción biológica a partir de biomasa presenta el mayor interés por ser potencialmente inagotable. La bio-producción consiste en obtener hidrógeno a partir de organismos vivos, ya sea en presencia de luz solar o por fermentación. Actualmente, alrededor de la mitad del hidrógeno que se produce en el mundo se obtiene de procesos termo catalíticos y de gasificación, los cuales utilizan gas natural como materia prima. Otras fuentes importantes de hidrógeno requieren aceites pesados y naftas; a estas les siguen la utilización de carbón natural y solo el 4% de hidrógeno es generado a partir de la electrolisis del agua (Logan, 2004).

Tabla 1 Demanda mundial primaria de petróleo
(Millones de barriles diarios)

	1980	2004	2005	2010	2015	2030	2005-2030**
OECD	41,9	47,5	47,7	49,8	52,4	55,1	0,6%
América del Norte	21,0	24,8	24,9	26,3	28,2	30,8	0,9%
Estados Unidos	17,4	20,5	20,6	21,6	23,1	25,0	0,8%
Canadá	2,1	2,3	2,3	2,5	2,6	2,8	0,8%
México	1,4	2,0	2,1	2,2	2,4	3,1	1,6%
Europa	14,7	14,5	14,4	14,9	15,4	15,4	0,2%
Pacífico	6,2	8,2	8,3	8,6	8,8	8,9	0,3%
Economías en Transición	8,9	4,3	4,3	4,7	5,0	5,7	1,1%
Rusia	n.d.	2,5	2,5	2,7	2,9	3,2	1,0%
Países en desarrollo*	11,4	27,2	28,0	33,0	37,9	51,3	2,5%
Asia en desarrollo*	4,4	14,2	14,6	17,7	20,6	29,7	2,9%
China	1,9	6,5	6,6	8,4	10,0	15,3	3,4%
India	0,7	2,6	2,6	3,2	3,7	5,4	3,0%
Indonesia	0,4	1,3	1,3	1,4	1,5	2,3	2,4%
Medio Oriente	2,0	5,5	5,8	7,1	8,1	9,7	2,0%
África	1,4	2,6	2,7	3,1	3,5	4,9	2,4%
Norte de África	0,5	1,3	1,4	1,6	1,8	2,5	2,4%
América Latina	3,5	4,8	4,9	5,1	5,6	7,0	1,5%
Brasil	1,4	2,1	2,1	2,3	2,7	3,5	2,0%
Bunker de Marines	2,2	3,6	3,6	3,8	3,9	4,3	0,6%
Mundo	64,4	82,5	83,6	91,3	99,3	116,3	1,3%
Unión Europea	n.d.	13,5	13,5	13,9	14,3	14,1	0,2%

Fuente: World Energy Outlook 2006.

**Nota: Países en desarrollo, son los países no miembros de la OECD con economías en crecimiento en su PIB.*

Asia en desarrollo: Singapur, Indonesia, Malasia y Tailandia

*** Prospectiva del sector con los últimos Datos de crecimiento.*

Los estudios en la producción de hidrógeno biológico se han enfocado principalmente en la biofotólisis del agua empleando algas y cianobacterias; la foto fermentación de compuestos orgánicos por bacterias fotosintéticas y la fermentación oscura de compuestos orgánicos ricos en carbohidratos mediante bacterias anaerobias.

La producción de hidrógeno por biofotólisis, también citada como foto disociación biológica del agua, es la conversión de agua y energía solar (utilizada) a hidrógeno y oxígeno usando microorganismos, comúnmente micro algas o cianobacterias.

La foto fermentación es un proceso que utiliza bacterias púrpuras no sulfurosas que producen hidrógeno, catalizado por la nitrogenasa bajo condiciones deficientes en N_2 , usando luz y compuestos reducidos, como ácidos orgánicos, que muchas veces están contenidos en sustancias de desecho.

La generación de bio-hidrógeno a través de la fermentación oscura se logra principalmente por bacterias estrictamente anaerobias o anaerobias facultativas. Este proceso no depende de la luz. Usualmente, los monosacáridos son la principal fuente de carbono donde se destaca particularmente la glucosa seguido de la xilosa, el almidón, la celulosa y otras fuentes que pueden ser generadas a partir de la hidrólisis de polisacáridos, proteínas y lípidos. (Londoño, Rodríguez 2012).

CAPITULO 1.

1.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

El desabasto de energía en el mundo lleva a la búsqueda de fuentes alternas de energía que cubran las necesidades energéticas bajo principios de sustentabilidad y sostenibilidad; la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en su reforma del 9 de enero de 2015, menciona que: “El Desarrollo Sustentable es el proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.”

El desarrollo sostenible está definido como desarrollo que cubre las necesidades presentes sin comprometer la necesidad de cubrir las necesidades de las futuras generaciones; en el marco de esta definición fueron evaluados cuatro indicadores del desarrollo sustentable de los diferentes ciclos de combustible en la producción de hidrógeno en México. Estos indicadores toman en consideración las emisiones de dióxido de carbono en la atmósfera (ambiente), la disponibilidad de los recursos energéticos (tecnología), los impactos en el uso de suelo (social) y los costos de producción de los ciclos (economía) [3].



Figura 1. Desarrollo sustentable

1.1.2 Hidrógeno

El hidrógeno fue descubierto por el científico británico Henry Cavendish, en 1776, quién informó de un experimento en el que había obtenido agua a partir de la combinación de oxígeno e hidrógeno, con la ayuda de una chispa eléctrica. Como estos elementos, no eran conocidos los denominó “aire sustentador de la vida” y “aire inflamable” respectivamente. El químico francés Antoine Laurent Lavoisier consiguió repetir con éxito el experimento en 1785 y dio el nombre de oxígeno al “aire sustentador de la vida” y el de hidrógeno al “aire inflamable”.

El hidrógeno es un energético secundario y puede producirse por una gran variedad de métodos, cada uno de ellos se caracteriza por la fuente de energía primaria utilizada para obtenerlo.

El método de obtención de hidrógeno será una decisión crítica en la apuesta por un modelo energético sostenible [4].

El estudio del impacto para la obtención de hidrógeno debe incluir el costo ambiental y social debido a que dentro de las fuentes primarias para su obtención están incluidos recursos fósiles como el gas natural y el carbón; también se incluyen fuentes renovables como la biomasa, la energía solar, la eólica, la hidráulica y la nuclear. Las tecnologías de producción también representan una gran cantidad de alternativas, existen procesos químicos, biológicos, electrolíticos, foto líticos y termoquímicos.

1.1.3- Procesos para la producción de hidrógeno.

El hidrógeno es un energético secundario y puede producirse por medio de una gran variedad de métodos, que se caracterizan por la fuente de energía primaria utilizada para obtenerlo.

En el estudio del impacto para la obtención de hidrógeno, se debe incluir el costo ambiental y social. Esto debido a que dentro de las fuentes primarias para su obtención, están incluidos recursos fósiles como el gas natural y el carbón además

de otras fuentes renovables como la biomasa, la energía solar, la eólica, la hidráulica y la nuclear. Las tecnologías de producción presentan una gran cantidad de alternativas como procesos químicos, biológicos, electrolíticos, fotolíticos y termoquímicos.

La investigación sobre el hidrógeno es un tema muy activo; Soria et al, estudian la obtención de hidrógeno a partir de bio-digestores de líquidos orgánicos que producen metano y CO₂ (Soria et al., 2001). Buitrón, utiliza aguas residuales de la industria del tequila para la producción de hidrógeno mediante procesos anaeróbicos, sin recurrir a la formación de metano (Buitron, et al., 2011); Vargas, lo produce a partir de reformado de etanol el cual es un alcohol presente en los fermentos de bebidas alcohólicas y algunos destilados (Vargas, et al, 2004)

Algunos grupos de bacterias como los géneros *Serratia*, *Enterobacter* y *Bacillus*, mediante fermentación butanodiólica, producen butanodiol, etanol e hidrógeno y es un método bastante utilizado, hoy en día. Los géneros *Escherichia*, *Salmonel*, *Shigella*, *Proteus*, *Yersina*, *Photobacterium* y *Vibrio*, producen principalmente una variedad de ácido (acético, láctico, fórmico) y etanol e hidrógeno por fermentación ácido mixta. Mediante fermentación butírica utilizando bacterias anaeróbicas de los géneros *Clostridium* y *Sarcinase* se obtienen elevados rendimientos de hidrógeno junto con ácido butírico, acético y dióxido de carbono. La fermentación de la acetona-butanol, utilizando *Clostridium* es otra variante de este proceso. El género *Rhodobacterspharoides* ha sido identificada para producir hidrógeno a partir de aguas de residuos ricas en nutrientes orgánicos de bajo peso molecular mediante fermentación (Noike, et al., 2000).

En general el hidrógeno forma parte de la generación de biogas por procesos fermentativos, los cuales conducen al rompimiento de complejos orgánicos biodegradables en un proceso de cuatro etapas:

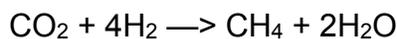
1. Hidrólisis: Grandes macromoléculas de proteínas, grasas y polímeros de carbohidratos (como la celulosa y almidón) se descomponen a través de hidrólisis en aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga y azúcares.

2. Acidogénesis: Estos productos posteriormente son fermentados durante la acidogénesis para formar ácidos grasos de cadena corta, principalmente láctico, propiónico, butírico y ácido valérico.

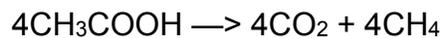
3. Acetogénesis: las bacterias consumen los productos de la fermentación y generan ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno.

4. Metanogénesis: Los organismos metanogénicos consumen el acetato, el hidrógeno y algo de dióxido de carbono para producir metano.

Bacterias Metanogénicas Hidrógenofílicas: son aquellas que utilizan el hidrógeno (H_2) para reducir el anhídrido carbónico (CO_2) y así producir metano.

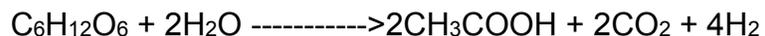


Bacterias Metanogénicas Acetoclásticas: son aquellas que hidrolizan el acetato, oxidando el grupo carbonilo a anhídrido carbónico (CO_2), reduciendo el grupo metilo a metano (CH_4). Se estima que aproximadamente el 70% del metano producido procede de la “descarboxilación del ácido acético” con bacterias metanogénicas acetoclásticas (Gutiérrez, et al., 2012).



Es importante mencionar que el metano (CH_4) es producido sólo si las bacterias metanogénicas se encuentran involucradas en la descomposición anaeróbica. En diferentes condiciones y con otros microorganismos anaeróbicos, podrían producir otros gases como hidrógeno (H_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). Sin embargo, las bacterias metanogénicas se encuentran comúnmente en la naturaleza y en la mayoría de los casos resulta predominantemente la generación de la mezcla CH_4 y CO_2 (Abbasi, et al., 2011)

Un esquema general del proceso de producción fermentativa de hidrógeno se basa en la siguiente reacción:



Este proceso es capaz de generar 0.5 m³ de hidrógeno por kg de hidrato de carbono utilizado.

Además de dichos sistemas fotosintéticos y fermentativos, también se han desarrollado sistemas mixtos que combinan diversos procesos a la vez (Kataoka, et al., 1999)

1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En lo que se refiere al uso de fuentes energéticas, los combustibles fósiles (petróleo, gas natural, carbón, etc.) producen un enorme impacto sobre el planeta en diferentes formas, incluyendo la seguridad y el aspecto ambiental, debido a que producen enormes cantidades de sustancias tóxicas, tales como SO_x, NO_x, y principalmente CO₂. El H₂ es considerado como un combustible limpio, ya que en la combustión sólo se genera agua. Por lo tanto puede ser utilizado en diversas aplicaciones: como combustible no contaminante en los vehículos, o combustible doméstico.

Siendo la obtención de energía sustentable una de las principales problemáticas, a nivel mundial, es de suma importancia encontrar sistemas sustentables para su obtención, una opción es la producción de hidrógeno.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para la obtención de hidrógeno de manera sustentable considerando los tres ejes ambiental, social y económico.

1.3.2 Objetivos específicos

Analizar los factores de sustentabilidad en las etapas de producción de hidrógeno con la metodología propuesta

Cuantificar la producción de hidrógeno en el proceso seleccionado

1.4 HIPÓTESIS

Las bebidas fermentativas producen biogás, producto de sus procesos naturales de fermentación, dicho biogás contiene hidrógeno, generado en la degradación de azúcares por diversos tipos de bacterias; debido a ello se puede considerar cualquier proceso fermentativo para la obtención de hidrógeno como el de la producción de pulque.

CAPITULO 2

2.1 MARCO TEÓRICO

La bioenergía se define como la manera de generar energía a partir de biomasa: "materia viva" o derivada de seres vivos. Incluye un rango amplio de productos, que se han dividido en tres tipos de combustible: los sólidos (leña, carbón, residuos agrícolas y pecuarios), residuos municipales que se gasifican para producir calor y electricidad, y los combustibles líquidos, que utilizan cultivos energéticos (caña de azúcar, oleaginosas, higuera, palma de aceite y coco) para generar etanol y biodiesel.

La FAO (2001) agrupa los biocombustibles —o bioenergéticos—, en tres categorías: 1) combustibles de madera; 2) agrocombustibles, y 3) subproductos de origen municipal. En el caso de México se han clasificado siete subcategorías:

- 1) Combustibles de madera (bosques naturales y plantaciones).
- 2) Subproductos de la extracción forestal e industria maderera.
- 3) Subproductos agrícolas.
- 4) Subproductos pecuarios.
- 5) Subproductos agroindustriales.
- 6) Cultivos energéticos.
- 7) Subproductos de origen municipal.

La producción de biocombustibles depende sobre todo del potencial ambiental, social y económico de cada región del mundo. (María E. González)

2.1.2 Fuentes renovables de energía estudio del arte en México

En el entorno internacional, el uso de la energía primaria y los combustibles para generación de electricidad depende de diferentes factores que varían de una región a otra, así como de la disponibilidad de fuentes económicamente competitivas. Adicionalmente, la utilización de dichas fuentes depende de restricciones imperantes como la volatilidad en los precios de los energéticos, la disponibilidad de los combustibles, el impacto social que la utilización de éstos conlleva y, por la normatividad ambiental. Las estimaciones indican que durante los próximos años los combustibles de mayor utilización para generación eléctrica serán el carbón y el gas natural, en detrimento de la utilización de combustibles derivados del petróleo, como el combustóleo. Esto obedece a los altos precios del combustible y a la disponibilidad de tecnologías de mayor eficiencia y con un impacto ambiental sensiblemente menor al de las plantas convencionales que utilizan derivados del petróleo. Se estima que durante el periodo 2006-2025, el combustible de mayor crecimiento en la generación eléctrica será el gas natural, el cual pasará de 20.0% a 22.1%, lo cual complementará la participación mayoritaria del carbón, que se mantendrá en 41.0% hacia ese último año.

Hacia el final del periodo, la energía nuclear reducirá ligeramente su participación en la generación mundial como resultado del incremento en el uso del gas natural mientras que la participación de las energías renovables permanecerá en alrededor de 21% de la generación mundial. Hacia 2025 y sólo después del carbón, el gas natural tendrá la mayor participación en la generación mundial de energía eléctrica, seguido de cerca por las energías renovables (incluye hidroeléctrica).

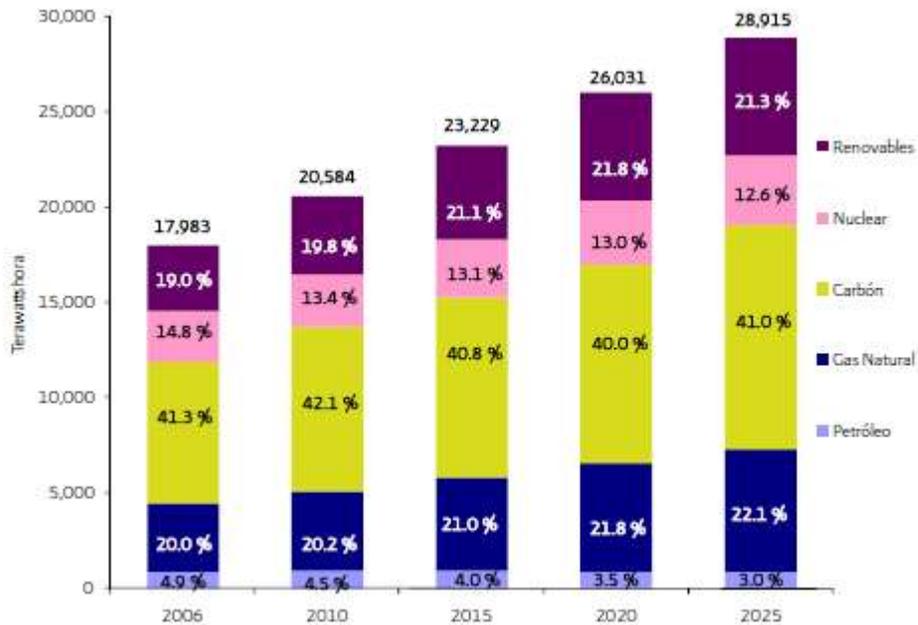


Figura 2 Combustibles y fuentes de energía para la generación eléctrica mundial, 2006-2025 (TWh) Fuente: EnergyInformationAdministration e International Energy Outlook (SENER).

El entorno para México será muy semejante debido a la reforma energética que plasma un aumento al uso de gas y energías renovables. Para el estudio de caso se presentaran datos de la producción de energía por fuentes renovables en México considerando tres rubros: Sistema eléctrico nacional, Biomasa y energía solar. El primero abarca las siguientes fuentes de energía renovable: hidroenergía, geoenergía y energía eólica. El segundo abarca la energía generada por bagazo de caña y leña, y el último como su nombre lo indica, la energía generada por la luz solar.

En la tabla 2 se indican la producción de energía en el país, por su tipo de fuente donde sobresale el uso de gas natural y petróleo.

Tabla 2 Producción de energía por fuente de generación

Producción de energía primaria por fuente (petajoules)					
	2010	2011	2012	2013	2014
Total	9,316.53	9,292.55	9,059.05	9,020.21	8,826.1
Carbón	306.49	392.28	310.81	316.27	303.4
Hidrocarburos	8,304.88	8,152.10	8,035.66	7,945.54	7,755.2
Petróleo crudo	6,008.65	5,933.53	5,918.86	5,798.74	5,597.2
Condensados	92.51	100.38	87.69	101.20	78.5
Gas natural	2,203.72	2,118.19	2,029.11	2,045.61	2,079.5
Nucleoenergía	63.94	106.40	91.32	122.60	100.6
Renovables	641.21	641.77	621.27	635.80	667.0
Hidroenergía	132.26	130.57	114.69	100.66	140.0
Geoenergía	149.95	149.32	133.14	131.33	129.9
Energía solar	4.97	5.81	6.67	7.52	8.7
Energía eólica	4.46	5.94	13.12	15.07	23.1
Biogas	1.30	1.47	1.82	1.97	1.9
Biomasa	348.28	348.67	351.82	379.26	363.3
Bagazo de caña	88.97	90.58	95.08	123.83	109.2
Leña	259.31	258.09	256.74	255.42	254.1

¹ Los datos fueron obtenidos del Sistema de Información Energética. El portal se consultó el 5 de Julio 2016 <http://sie.energia.gob.mx/>.

2.1.3 Sistema Eléctrico Nacional

Hidroenergía: Es la energía generada por el H₂O, representa la principal fuente de energía renovable en el país.

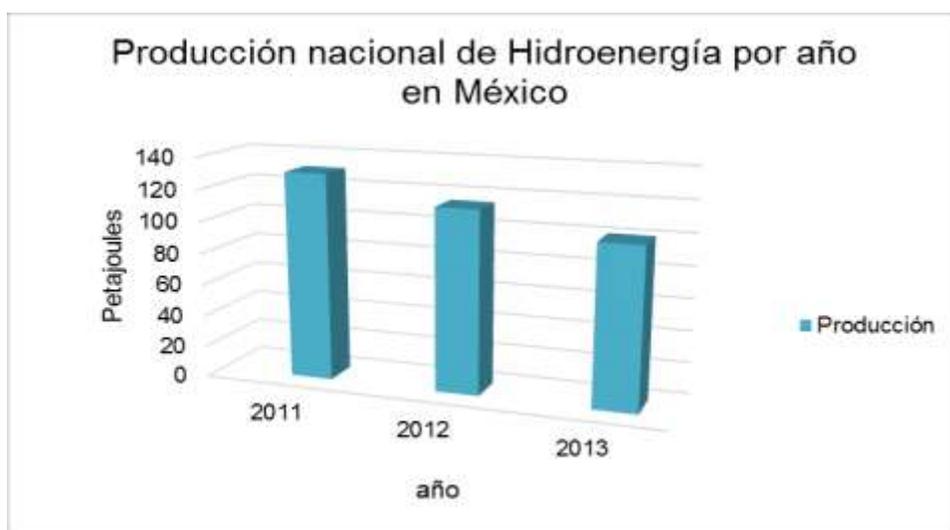
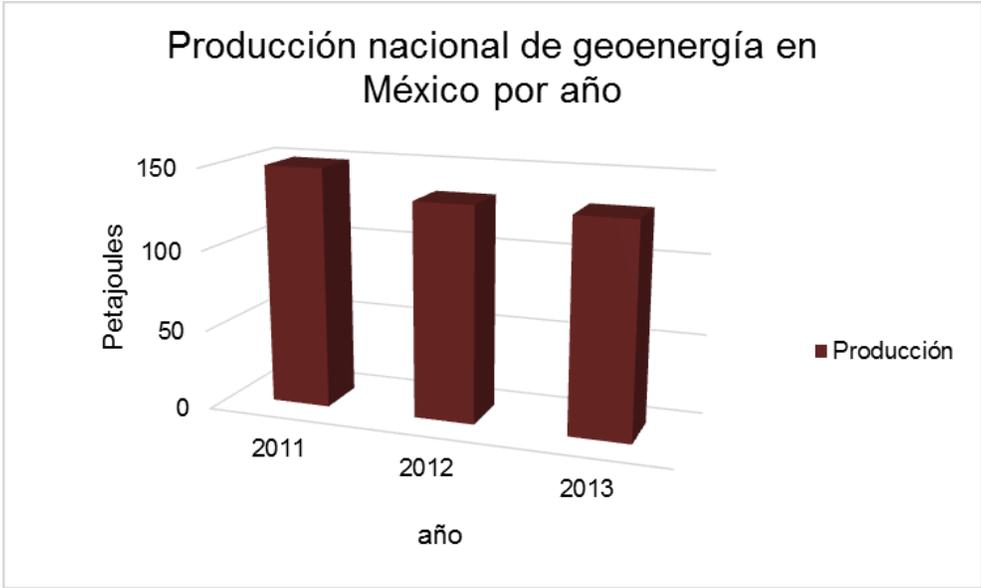


Figura 3 Producción nacional de Hidroenergía por año en México.

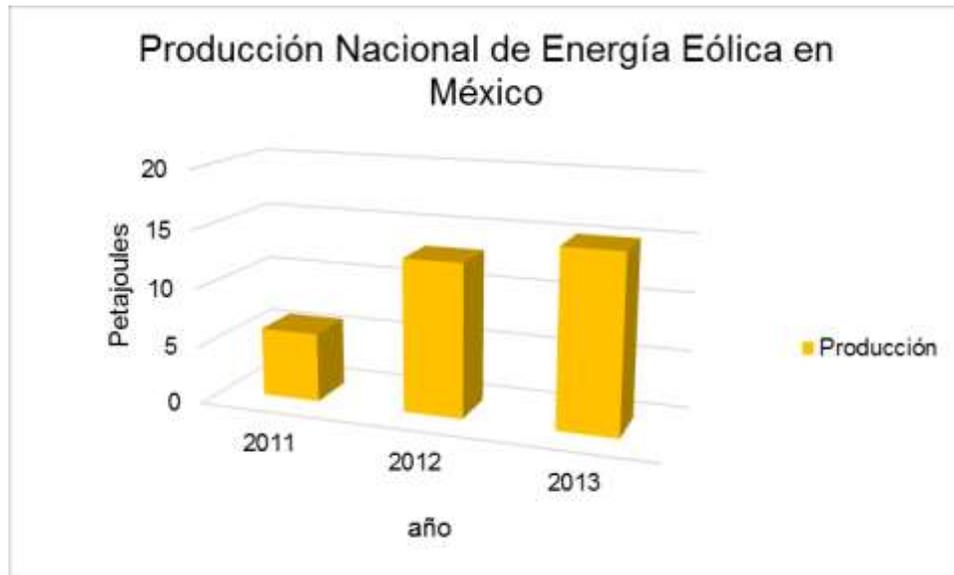
Geoenergía: Es la energía generada por vapor de agua proveniente del subsuelo, México es el tercer productor a nivel mundial de energía geotérmica, en el país ocupa el tercer lugar en producción con capacidad instalada: Baja California planta Cerro Prieto (720 MW); Los Azufres en Michoacán (188 MW), Las Tres Vírgenes en Baja California Sur (10MW) y Los Humeros en Puebla (40 MW). Se instalarán los Humeros II, fase A, y Humeros II, fase B, con (25 MW y 21 MW).

Figura 4 Producción nacional de Geoenergía por año en México.



Energía Eólica: Es la energía generada con el viento, en el país existen 31 parques eólicos en operación, es junto con la energía solar las que reciben subsidios del gobierno para su implementación.

Figura 5 Producción nacional de Energía Eólica por año en México.



Nucleoenergía: Es la energía generada con elementos radiactivos mediante una fisión nuclear en el caso de Laguna verde única central nuclear en México, se utiliza uranio 235 enriquecido.

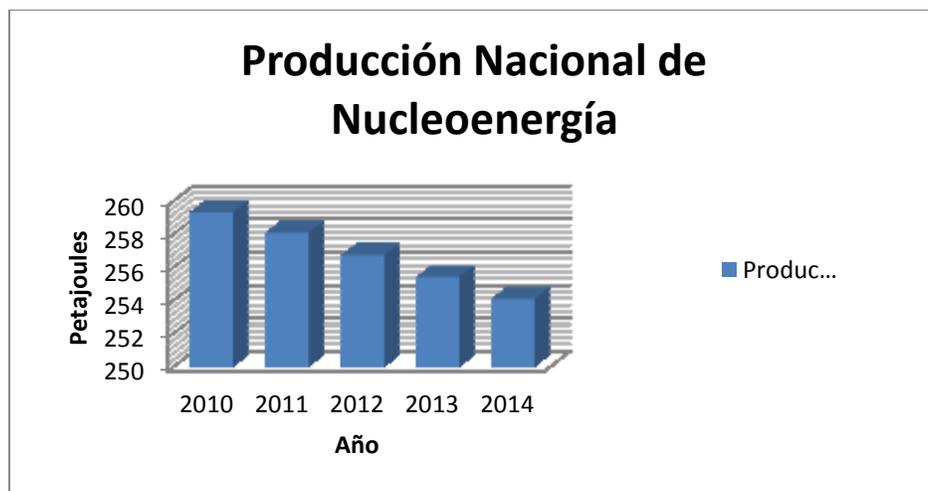


Figura 6 Producción nacional de Nucleoenergía por año en México.

Tabla 3 Capacidad efectiva real de energías renovables CFE Y LFC por mes en 2014 en Petajoules.

Mes	Ene/ 2014	Feb/ 2014	Mar/ 2014	Abr/ 2014	May/ 2014	Jun/ 2014	Jul/ 2014	Ago/ 2014	Sep/ 2014	Oct/ 2014	Nov/ 2014
Total	12408	12409	12449	13161	13161	13161	13161	13161	13161	13160	13168
Geotérmica	813	813	813	813	813	813	813	813	813	813	813
Eólica	86	87	87	87	87	87	87	87	87	86	86
Hidroeléctrica	11509	11509	11549	12261	12261	12261	12261	12261	12261	12261	12269

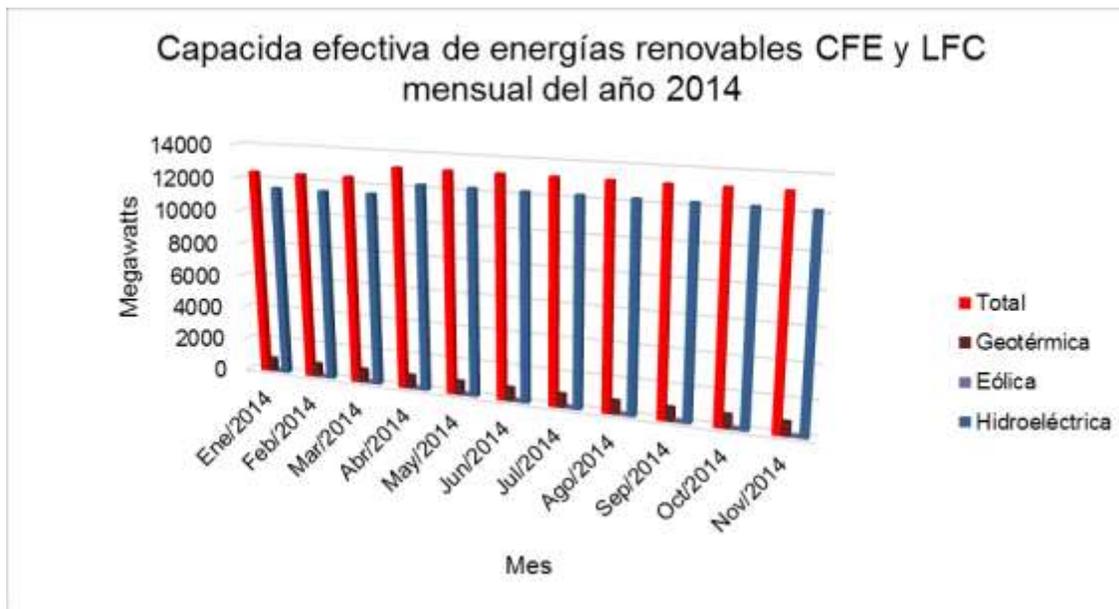


Figura 7 Capacidad efectiva real de energías renovables CFE Y LFC por mes en 2014 en Petajoules

2.1.4 Biomasa

Bagazo de caña



Figura 8 Producción de energía con Bagazo de caña en México por año.

Leña

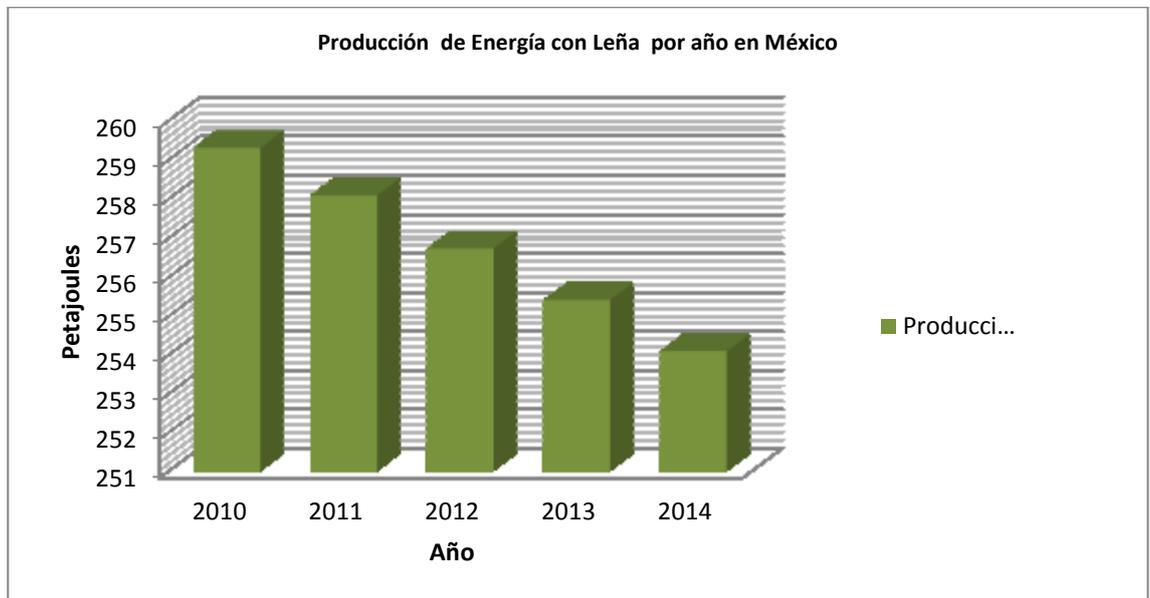


Figura 9 Producción de energía con Leña en México por año.

En México el uso de biomasa se basa fundamentalmente en el bagazo de caña y la leña que aun son usados en la industria como fuente de energía como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 Consumo energético de Leña y Bagazo por año y su relación con el consumo energético total en la Industria.

Año	2011	2012	2013
Consumo energético total	5052.404	4900.3	4941.411
Leña	258.0858	256.7428	255.4224
Bagazo de caña	41.67	40.99	61.991

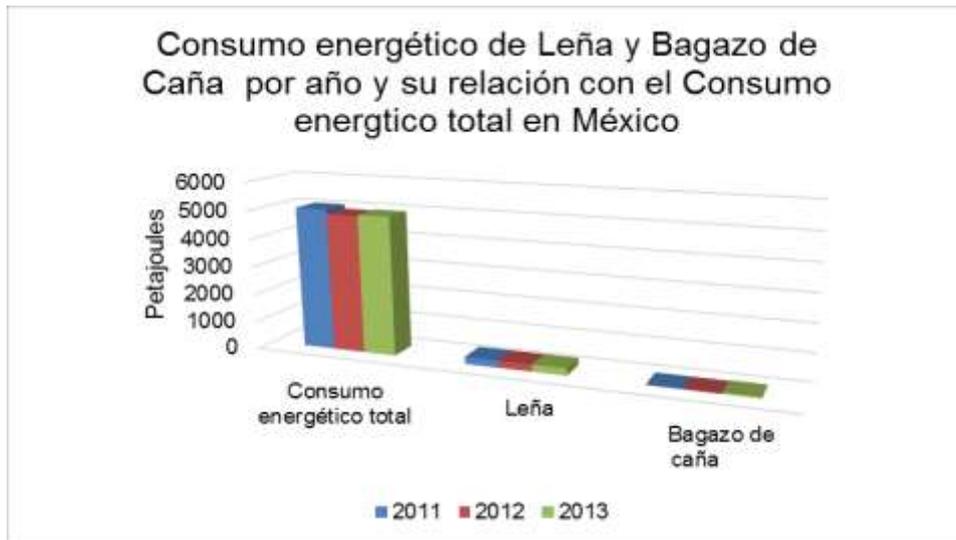


Figura 10 Consumo energético de Leña y Bagazo de caña por año en México y su relación con el consumo energético total.

2.1.5 Energía solar

La energía Solar en México se divide en dos aplicaciones la fotovoltaica y la de aplicación térmica, los valores mostrados en la grafica son de ambas, utilizada para la generación de energía primaria.

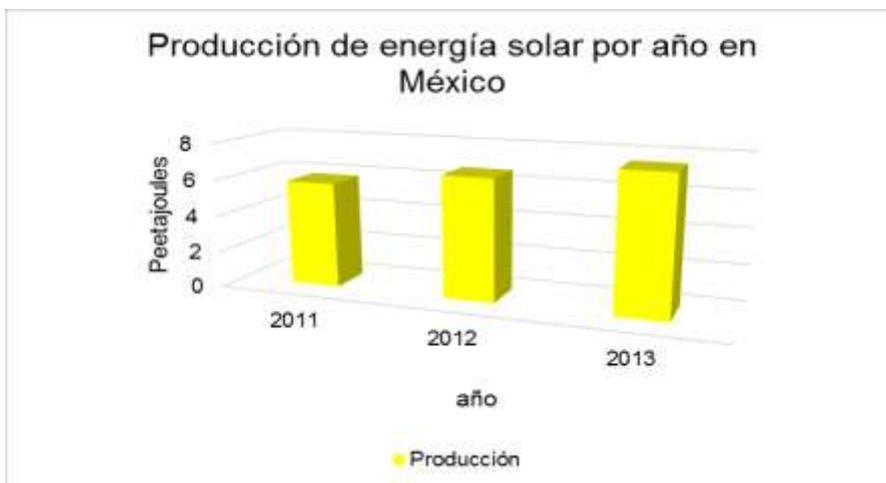


Figura 11 Producción de energía Solar en México por año.

Tabla 5 Consumo real de Energía Solar en México en Petajoules.

Año	2011	2012	2013
Consumo final energético	5.66	6.42	7.14
Sector comercial	2.17	2.47	2.74
Sector residencial	3.23	3.66	4.07
Sector industrial	0.26	0.30	0.33

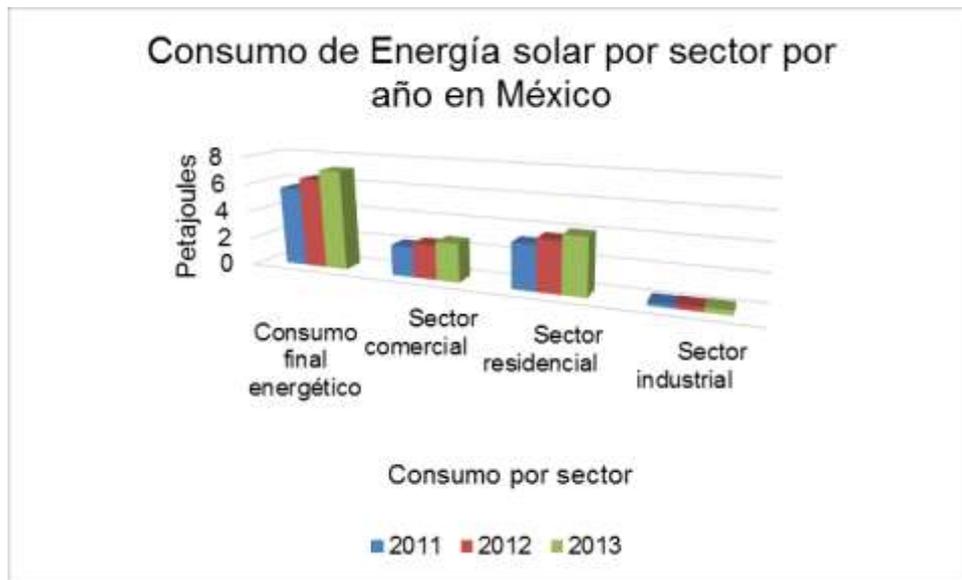


Figura 12 Consumo de Energía solar por sector por año en México.

2.2 EI HIDRÓGENO

El hidrógeno es una de las primeras moléculas que se conocen y es ampliamente utilizado por muchas industrias para una variedad de aplicaciones.

La mayor parte de su uso se basa en su reactividad y no en sus propiedades físicas. Recientemente, su uso en la refinación del petróleo ha estado creciendo muy rápidamente debido a una combinación de los factores relativos a los cambios en el crudo, el medio ambiente y normas como los límites de azufre en el diesel, los límites permisibles de Óxidos de N y S (NO_x y SO_x), de

las emisiones de gases de la atmósfera, las concentraciones de hidrocarburos aromáticos y de la energía en la gasolina, etc. (R. Navarro., et al ,2009)

El hidrógeno promete ser una alternativa viable para procurar la Energía de futuro comparando sus propiedades con la de los combustibles convencionales se puede apreciar su alto poder calorífico, nula toxicidad entre otras características como se muestran en la tabla 5.

Tabla 6 Propiedades físicas del Hidrógeno

	Hidrógeno	Gasolina	Metano
Poder calorífico inferior (kJ/gr)	120	43	50
Densidad gas (kg/Nm ³)	0,090	-	0,717
Densidad energética gas	10,8	-	35,8
Densidad liquido (kg/l)	0,071	0,733	-
Densidad energética liq. (MJ/ l)	10,8	31,5	-
Limites de inflamabilidad (%)	4,0 - 75	1,0 - 7,6	5,3 - 15,0
Limites de detonación (%)	18,3 - 59	1,1 - 3,3	6,3 - 13,5
Mínima energía de activación (mJ)	0,02	0,24	0,29
Temp. de comb. espontánea (K)	858	501-744	813
Emisiones (mg CO ₂ / kJ)	0	~ 80	55
Visibilidad de la llama	no	sí	sí
Toxicidad (combustible y emisiones)	no/no	sí/ sí	sí/ sí

2.2.1 Procesos comerciales de obtención de hidrógeno

El Hidrógeno es producido en la actualidad por procesos de reformado catalítico en su mayoría; las fuentes económicas para la producción de hidrógeno son el carbón y el gas natural, con un costo estimado de 1.83 \$ / kg y 3.17 \$ / kg para cada fuente de energía, respectivamente.

Reformado de Gas natural. Específicamente, la metodología más extendida de producción de H₂ es el reformado con vapor de agua conforme a la reacción:



$$(\Delta H^\circ = 206 \text{ kJ/mol})$$

El gas natural reacciona con vapor de agua en catalizadores de Ni en un reformador primario a temperaturas próximas a 1200 K y presión total de 20-30 bar. Aunque la estequiometría de la reacción solamente requiere 1 mol de H₂O por mol de CH₄, se incorpora un exceso de H₂O (usualmente 2.5-5.0) para reducir la formación de carbón. La conversión de CH₄ a la salida del reformador está en el orden 90-92% y la composición de la mezcla se acerca a la que predice el equilibrio termodinámico.

A la salida del reformador primario se coloca un segundo reformador autotérmico en el que 8-10% del CH₄ no convertido reacciona con oxígeno en la parte superior del tubo. La composición del gas se equilibra con un catalizador de Ni colocado en la zona de combustión.

Para la producción de H₂ (amoníaco, uso en refinería, petroquímica, metalurgia, pilas de combustible), el CO presente en la corriente de salida se convierte en H₂ adicional en sendos reactores de desplazamiento a elevada y baja temperatura, respectivamente. La reacción del gas de agua:



$$(\Delta H^\circ = -41.1 \text{ kJ/mol})$$

Ajusta la relación H₂ /CO. Si el gas de síntesis se convierte a H₂, son precisos dos reactores: uno de alta temperatura (HTS) que opera a 670 K y otro de baja temperatura (LTS) a 470 K. El proceso de reformado con vapor (SMR) produce gas de síntesis con cerca de 75 vol% (base seca) a elevada presión.

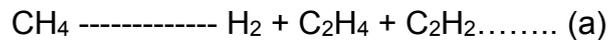
El hidrógeno se purifica después en unidades PSA (pressure swing adsorption), en las que se alcanza una pureza típica de 99.99 vol%. En estas unidades PSA, los gases diferentes al H₂ que vienen del reformador y los reactores de desplazamiento se adsorben a elevada presión sobre zeolitas o carbón activo. Estos gases que no contienen H₂ se desorben por expansión hasta presión próxima a la atmosférica y posteriormente se reinyectan en el reformador como fuente de energía térmica.

Electrólisis del agua: El paso de la corriente eléctrica a través del agua, produce una disociación entre el hidrógeno y el oxígeno, componentes de la molécula del agua H₂O. El hidrógeno se recoge en el cátodo (polo cargado negativamente) y el oxígeno en el ánodo. El proceso es mucho más caro que el reformado con vapor, pero produce hidrógeno de gran pureza. Este hidrógeno se utiliza en la industria electrónica, farmacéutica o alimentaria.

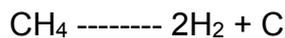
De forma teórica se puede afirmar que la electrólisis del agua se produce cuando se hace pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en un electrolito.



La pirólisis catalítica del gas natural a elevada temperatura produce H₂ e hidrocarburos con dos átomos de carbono



y una pirólisis a temperatura media el CH₄ e hidrocarburos más largos en H₂ y un material de carbono mediante la reacción:



La reacción (a) es un proceso altamente endotérmico, conocido con detalle desde hace décadas debido a que es una de las fuente de producción de acetileno (C₂H₂) en arco eléctrico o producción de H₂ en condiciones de no equilibrio mediante descarga de microondas o plasma.

Conforme a los cálculos termodinámicos, la formación de H₂ y de hidrocarburos C₂ ocurre preferentemente a temperaturas superiores a 1300K.

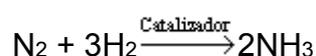
Cabe destacar que el hidrógeno es un combustible con un gran poder calorífico, es decir que un gramo de hidrógeno libera mucha más energía que un gramo de otros combustibles.

El hidrógeno como energético representa en equivalencia:

1 kg de Hidrógeno equivale a 2.78 kg de gasolina, 2.80 kg de gasóleo, 2.40 kg de metano, entre 2.54 y 3.14 kg de gas natural (dependiendo de la composición del GN), 2.59 kg de propano, 2.62 kg de butano y 6.09 kg de metanol.

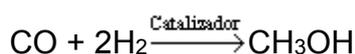
2.2.2 Aplicaciones industriales del hidrógeno:

- En el proceso de síntesis del amoníaco o proceso Haber:



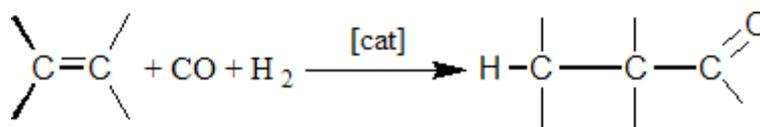
- Proceso de síntesis de metanol:

[cat] = cobalto



Este proceso adquirió gran importancia sobre todo en los años de la crisis del petróleo, como síntesis de combustibles alternativos.

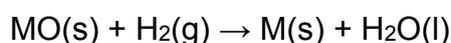
- Procesos de Hidroformilación de olefinas:



[cat] = cobalto

En este proceso se forma un aldehído que contiene un átomo de carbono más que la olefina de partida.

- La hidrogenación catalítica de aceites vegetales insaturados para producir grasas sólidas comestibles.
- El hidrógeno se utiliza también para transformar diferentes óxidos metálicos en metales (como los de plata, cobre, plomo, bismuto, mercurio, molibdeno y wolframio):



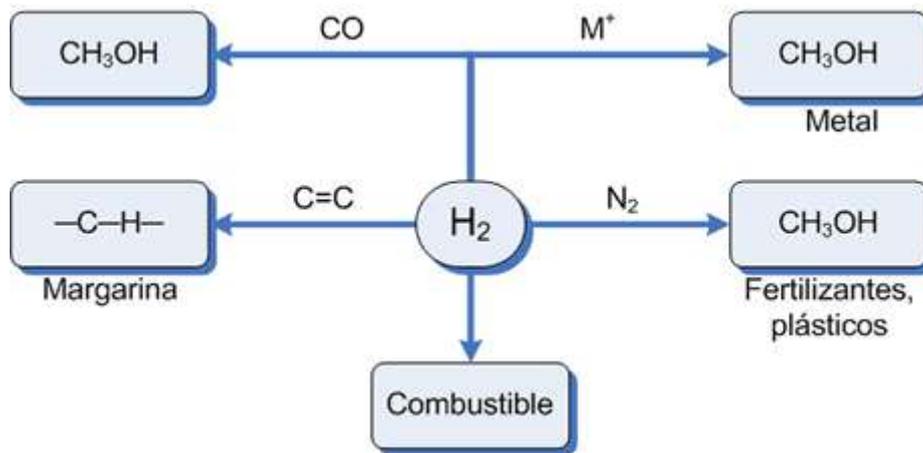


Figura 13 Usos industriales del hidrógeno.

La gran ventaja del hidrógeno líquido es que su densidad a presión atmosférica y a 20 °K es 76.4 kg/m³ (850 veces mayor que la del gas en condiciones normales) lo que permite confinarlo en recipientes especiales no muy voluminosos y de paredes delgadas, lo que es esencial para su uso como fluido energético en cohetes y vehículos de todo tipo.

Sus principales aplicaciones como reactivo son:

1. Con el nitrógeno para producir amoníaco.
2. Con el CO y el CO₂ para producir metanol.
3. Con hidrocarburos insaturados y aromáticos para saturar sus dobles enlaces.
4. Con hidrocarburos sulfurados para desulfurarlos produciendo sulfuro de hidrógeno.
5. Para reducir numerosos productos químicos en procesos de síntesis de otros.
6. Como reactivo en los procesos de hidrogenación, aquí átomo de hidrógeno se utiliza para producir molecular inferior compuestos de peso o para saturar los compuestos o hidrocarburos "crack" o para eliminar el azufre y el nitrógeno compuestos.
7. Como refrigerante en generadores eléctricos, para aprovechar de sus propiedades físicas únicas (R. Ramachandra., et al, 1998)

2.3 AGUA

2.3.1 Definición de contaminación del agua

La acción y el efecto de introducir materias, o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica (Ley de Aguas).

2.3.2 Tipos de contaminación del agua.

La contaminación del agua puede estar producida por:

Compuestos minerales: pueden ser sustancias tóxicas como los metales pesados (plomo, mercurio, etc.), nitratos, nitritos. Otros elementos afectan a las propiedades organolépticas (olor, color y sabor) del agua que son el cobre, el hierro, etc. Otros producen el desarrollo de las algas y la eutrofización (disminución de la cantidad de O₂ disuelto en el agua) como el fósforo.

Compuestos orgánicos (fenoles, hidrocarburos, detergentes, etc.) Producen también eutrofización del agua debido a una disminución de la concentración de oxígeno.

La contaminación microbiológica se produce principalmente por la presencia de fenoles, bacterias, virus, protozoos, algas unicelulares. La contaminación térmica provoca una disminución de la solubilidad del oxígeno en el agua.

Tipos de agua en función del origen de su contaminación.

Aguas residuales urbanas: aguas fecales, aguas de fregado, agua de cocina. Los principales contaminantes de éstas son la materia orgánica y microorganismos. Estas aguas suelen verterse a ríos o al mar tras una pequeña depuración.

Aguas residuales industriales: contienen casi todos los tipos de contaminantes (minerales, orgánicas, térmicos por las aguas de refrigeración). Estas aguas se vierten a ríos u mares tras una depuración parcial.

Aguas residuales ganaderas: el tipo de contaminantes va a ser materia orgánica y microorganismos. Pueden contaminar pozos y aguas subterráneas cercanas.

Aguas residuales agrícolas: los contaminantes que contienen son materia orgánica (fertilizantes, pesticidas). Pueden contaminar aguas subterráneas, ríos, mares, embalses, etc.

Mareas negras. La causa de éstas es el vertido de petróleo debido a pérdidas directas de hidrocarburos (solo un 9%), siendo las fuentes de contaminación marina por petróleo más importantes las constituidas por las operaciones de limpieza y lastrado de las plantas petrolíferas.

La gran variedad de procesos industriales genera un amplio abanico de efluentes, que requiere en cada caso una investigación individual y frecuentemente un proceso de tratamiento específico.

Además es necesario conocer el sistema de producción de la industria en concreto y los sistemas de organización de los procesos involucrados. Hay cuatro tipos de efluentes industriales a considerar:

Efluentes de los procesos generales de fabricación. La mayoría de procesos aumentan la contaminación de los efluentes por el contacto que tienen con gases, líquidos o sólidos. Los efluentes pueden ser continuos o intermitentes. Algunos sólo se producen algunos meses al año (campañas en la industria agroalimentaria). Generalmente la producción es regular, produciendo flujos de contaminantes conocidos. Sin embargo para determinados sectores (química sintética, farmacéutica, etc.) Es muy dificultoso analizar los efluentes ya que cambian constantemente.

1. Efluentes específicos. Algunos efluentes son separados de corrientes específicas del proceso tal es el caso: Baños de electro platinado, sosa cáustica gastada, licores de amonio de plantas de carbón. Condensados de la producción de papel, líquidos madres de la industria alimentaria. Efluentes tóxicos y concentrados.
2. Efluentes procedentes de servicios generales.

3. Efluentes intermitentes. No deben olvidarse y pueden provenir de vertidos accidentales de productos, durante su manejo o almacenamiento.

Para conocer qué tipo de agua se está manejando es necesario conocer los métodos normalizados para análisis de aguas; entre los más importantes se encuentran:

- Determinación de parámetros físico-químicos: turbidez, color, olor, sólidos totales.
- Determinación de contaminantes inorgánicos específicos: metales, aniones.
- Determinación de contaminantes orgánicos: DQO, DBO, COT.
- Elementos insolubles separables físicamente con o sin floculación. Se incluyen en este grupo tanto las materias grasas (grasas, hidrocarburos, aceites, etc.) como los posibles sólidos en suspensión (arenas, óxidos, hidróxidos).
- Elementos separables por precipitación. En este caso encontramos los metales como Fe, Cu, Ni, Cr, etc., y aniones como su sulfatos, fosfatos, fluoruros, etc.
- Ácidos y bases. Como ácido clorhídrico, sulfúrico, y bases como hidróxido sódico que deben previamente neutralizarse.
- Elementos que pueden necesitar reacciones de oxido-reducción. Como cianuros, cromo hexavalente, sulfuros, cloro, etc.
- Elementos orgánicos tratables biológicamente. En este grupo se incluiría todos los elementos biodegradables como azúcares, proteínas, fenoles, etc.
- Elementos que pueden eliminarse por intercambio iónico. Entre estos se encuentran los radionucleidos y las sales.
- Elementos separables por desgasificación o "stripping". Como ácido sulfhídrico, amoniaco, etc

Se tomaron muestras en las aguas del río Atoyac para verificar la factibilidad de utilizar estas para la obtención de hidrógeno y se comparó el resultado con las de la delegación Iztapalapa como referencia, las muestras fueron tomadas en

tres etapas diferentes, las dos primera antes del derrame de PEMEX en el río y la tercera después del derrame, la primera muestra las márgenes del río y la segunda en el río con corriente.

Tabla 7 Análisis de agua del Río Atoyac

Elementos detectados *	Iztapalapa	Río Atoyac (1)	Río Atoyac (2)	Río Atoyac (derrame)
Cloro libre	0	0	0.25	10
Cloro total	0	0.25	0	10
Alcalinidad	240	240	20	240
Ácido cianúrico	20	0	0	25
pH	7.0	7.8	7	8.8
Dureza	50	50	50	50

**Nota: Valores reportados en ppm*

Los contenidos de los diferentes contaminantes subieron después del derrame. Las diferencias en las muestras (1) y (2) se deben a que, dependiendo del día o la hora, las concentraciones varían por la calidad de las aguas que los afluentes viertan en el río y a las descargas que se hayan realizado en el momento anterior a la toma por parte de todas las industrias que laboran en los alrededores.

Adicionalmente, el contenido de bacterias es preocupante ya que la baja cantidad registrada en un análisis bacteriológico indica la escasa presencia de materia orgánica y oxígeno, indispensables para la vida. El río está, literalmente, muerto en la zona donde ocurrió el derrame petrolero. Este es el resultado del análisis realizado de Bacterias sulfato reductoras (anaerobias) utilizando Placas Petrifilm™ 3M™. Existen, además, reportes que muestran la presencia de cloroformo y tolueno en el río, materias que son consideradas cancerígenas. Las aguas también contienen plomo y mercurio, entre otros. La basura es otro problema serio, pues se pueden apreciar, incluso a simple vista, botellas y bolsas de plástico, entre otros desechos.

Estos estudios son preliminares y básicos pero sus resultados son suficientes para justificar una alarma por el estado del río. Una caracterización más profunda es necesaria. El análisis para la caracterización de contaminantes requeriría estudios físico-químicos y biológicos más extensos, los cuales ayudarían a evaluar con mayor precisión las concentraciones y el tipo de contaminantes existentes en el agua, permitiendo la adecuación de plantas de tratamiento. Es importante recordar que no hay ningún tratamiento químico que sirva para todo, al contrario, las plantas deben estar funcionando en concordancia con el tipo de contaminantes en el agua.

En el 2005, la sociedad civil (Centro Fray Julián Garcés) realizó una denuncia ante el tribunal latinoamericano del agua por posibles daños a la salud provocados por la contaminación del río Atoyac. Hay que recordar que las aguas de éste se filtran y contaminan los pozos subterráneos existentes en su ribera. Esto es grave pues se ha comprobado la contaminación de pozos en estudios realizados por el Instituto Politécnico Nacional y la Universidad Nacional Autónoma de México lo que lo convierte en un problema de salud pública ya que estas aguas son para consumo humano.

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.

Las aguas residuales plantean un gran reto para la producción de hidrógeno debido a sus múltiples componentes orgánicos como inorgánicos en particular en la Ciudad de México donde sus efluentes son mixtos esto es que toda el agua de desecho se mezcla en los ductos de drenaje profundo por lo que es muy complicado determinar sus compuestos en periodos prolongados de tiempo y poder implementar una ruta de investigación para encontrar el método más adecuado de producción de hidrógeno datos en la literatura muestran un alto contenido en metales en especial de cromo por lo que se

descartan las aguas residuales como estudio de caso para la producción de hidrógeno.

2.4 PULQUE

El pulque es una bebida tradicional mexicana que se obtiene por la fermentación de la savia azucarada conocida como aguamiel obtenida a partir de diferentes especies de maguey (*Agave americana*, *A. atrovirens*, *A. ferox*, *A. mapisaga*, *A. salmiana*) y existen 150 especies diferentes (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad, CONABIO).

Estas plantas se encuentran en el valle de México, principalmente en Puebla e Hidalgo así como el estado de México, la figura 14 muestra la ubicación de las especies de maguey.

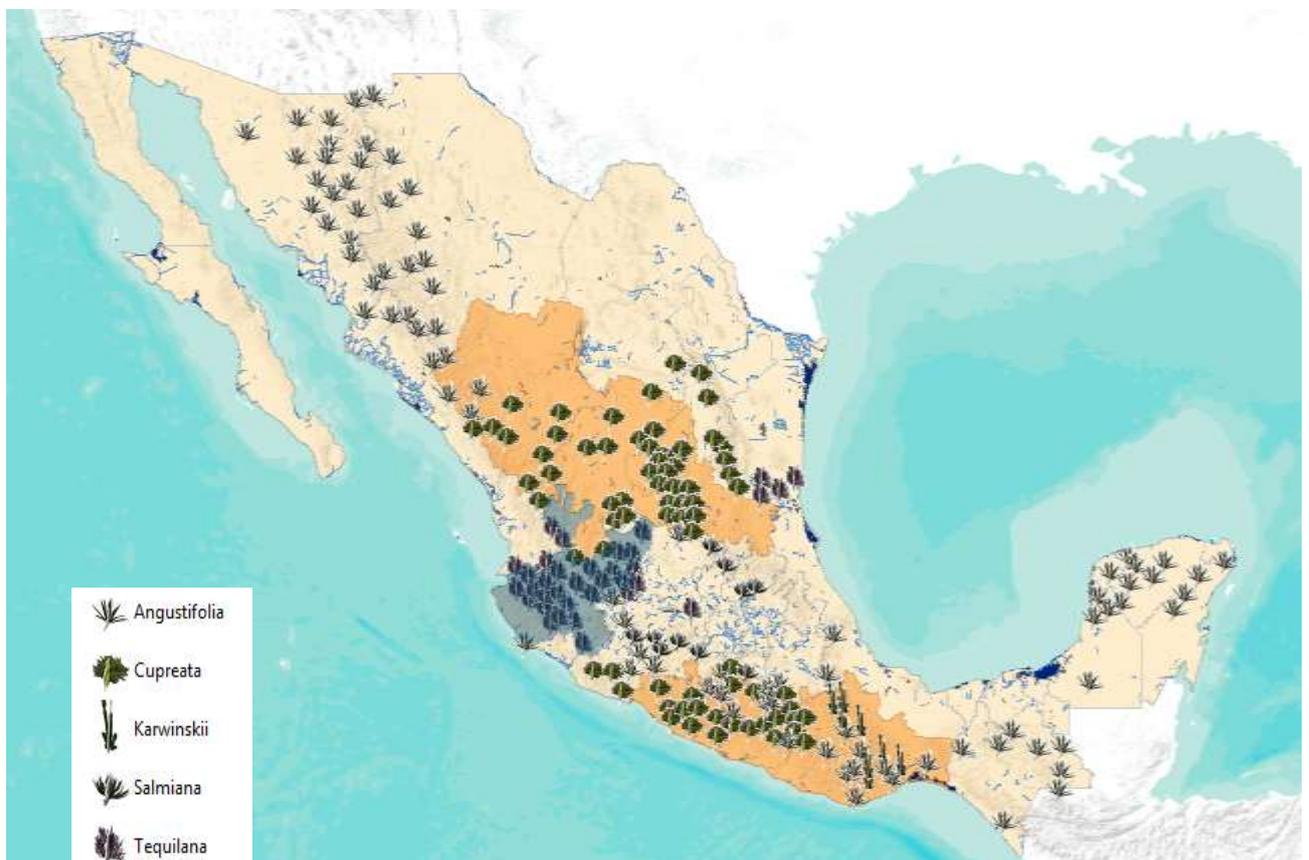


Figura 14 Distribución geográfica de Agave. (Elaboración con datos de CONABIO).

El maguey pulquero requiere aproximadamente diez años para alcanzar su madurez y poder ser aprovechado. La etapa productiva de un maguey pulquero comienza cuando éste es "capado", es decir cuando se le corta el conjunto de pencas más tiernas del centro de la planta para que, al cabo de cuatro meses, comience a dar sus primeros litros de aguamiel. El periodo de producción del aguamiel dura generalmente de tres a cuatro meses y rinde, en promedio, unos 300 litros por planta. De la fermentación del aguamiel, que tarda menos de 24 horas, se obtiene la bebida alcohólica que conocemos como pulque. El contenido alcohólico depende del tiempo que haya fermentado. La concentración en grados Gay Lussac varía entre los 6 para pulques tiernos y los 20 para pulques fuertes; (Lima. Gonçalves de. et al, 1990).

La caracterización del contenido del pulque abarca varios trabajos de investigación; Correa Ascencio et al, catalogaron la composición de pulque de origen prehispánico por su valor nutrimental (Correa Ascencio., et al, 2014) Valadez Blanco et al, han realizado la caracterización de bacterias formadoras de ácido láctico para analizar la relación entre éstas así como el lugar de obtención del pulque (Rogelio Valadez., et al, 2012). Otra de las características estudiadas del pulque, es su contenido de alcohol y la relación que tiene con su contenido propio de bacterias, como lo muestra Cervantes. M. et al (M. Cervantes., et al, 2008). En esos trabajos se logró caracterizar al menos un grupo de bacterias propias del pulque *Zymomonas* y *Saccharomyces*.

Tabla 8 Características Físicas y Químicas del Pulque (A Sánchez., et al, 1967)

Medio	Cantidad
PH	5.3
Acidez total (En ácido láctico)	0.279
Densidad 20° C	1.014
Sólidos totales	4.63
Cenizas	0.25
Reductores directos en glucosa	Huellas
Gomas	0.398
Proteínas (NX6.25)	0.350
Índice de refracción 20° C (Inmersión)	45.38
Etanol	4.26
Humedad	97.0
Proteínas	0.30
Calcio	20
Fosforo	9
Hierro	No determinado
Tiamina	0.02
Niacina	0.40
Vitamina C	6.7

Por el grado de alcohol y de componentes orgánicos el pulque es una excelente opción para la obtención de biomasa y posterior extracción de hidrógeno por alguna de las técnicas antes mencionadas su estudio será una apuesta al futuro de los energéticos y se podría contribuir a la reutilización y siembra del agave pulquero en peligro de extinción; así como impulsar las zonas agrícolas cercanas a los valles de hidalgo Tlaxcala y Jalisco.

2.4.1 Pellets de Energía

El agave pulquero cuando agota su producción de pulque, queda como residuo de biomasa la cual puede ser utilizada como un energético, una forma de utilizar la biomasa del agave es pelletizando sus residuos para su mejor aprovechamiento; el peletizado es el proceso de conversión de desechos en combustible sólido. Los pellets se utilizan para combustión térmica y constituyen uno de los productos menos comunes derivados de la peletización. Los pellets pueden fabricarse a partir de cualquier tipo de residuo agro-forestal. El contenido en humedad final debe ser menor del 12%.

La quema de Pellets no genera humo, al contrario de otros combustibles. Además de las ventajas de eficiencia en el consumo independientes a su propio proceso de fabricación, tiene estabilidad garantizada en los precios por ser una fuente renovable, al contrario de lo que les sucede a los combustibles fósiles.

Los residuos lignocelulósicos utilizados para la fabricación de pellets son un recurso abundante que, si fuese debidamente explotado, permitiría reducir sustancialmente la dependencia energética que actualmente tenemos en relación al petróleo, resultando en inmensos beneficios para la economía, y consecuentemente, en los precios de comercialización.

El Diámetro o longitud del material a ser procesado en la maquina Peletizadora no puede pasar de 25mm y el contenido de humedad normalmente no exceda el 10%. A compactación encima de los 1000 bar permite que estas se mantengan estables, durante el transporte y manoseo, hasta su quema. Como resultado de cado y compactación, los pellets presentan un contenido de humedad máximo del 8%, una densidad de más de 650 Kg por metro cubico y un poder calorífico entre 4,9 y 5,4 Kwh por kilogramo. Regle general, 2kg de pellets de madera substituyen cerca de 1 litro de aceite combustible.

Los pellets tienen varias ventajas respecto a la madera y al carbón cómo combustibles (en zonas rurales):

- No se necesita talar árboles. Se utilizan desperdicios de podas o residuos de material espinado.
- Al ser material reaprovechado, es un combustible más barato.
- Se puede dosificar. Una estufa de leña normal solo puede regular el fuego ahogándolo. Lo que perjudica mucho el rendimiento. En las estufas de pellets, se añade combustible según la demanda de energía.
- Cómo no se regulan ahogándolas se produce mucho menos monóxido de carbono.
- Generan una cantidad que al rellenar mejor el espacio y tener mayor densidad aparente, ocupan menos que los troncos o ramas y caben en cualquier recipiente de cualquier forma apreciable de cenizas de origen vegetal y no tóxicas que se pueden aprovechar como abono o suplemento mineral de animales. Estas cenizas son ricas en magnesio, calcio y potasio.

El proceso de fabricación de pellets a partir de del agave agotado (cuando concluyo su ciclo de producción de pulque) inicia con la separación de las pencas del resto de la piña o corazón del maguey y cortando estas en trozos de aproximadamente 1 cm, el producto que se encuentre en etapa de descomposición se retira para añadirlo en un mezclado posterior ayudando a formar una pasta, se inicia un primer secado del producto para reducir el contenido de humedad entre un 30 y un 40 %, cuando alcanzo el contenido de humedad deseado se muele el producto para obtener un polvo que es mezclado con el producto que se separo en la 2°etapa, esta masa se amolda y prensa , concluyendo un secado final, como se muestra en el siguiente diagrama de bloques.



Almacenamiento de la materia prima



Separación en función de la calidad y la humedad
(la materia mas humeda o en estado casi de putrefaccion es retirada para secarla aparte pero se reincorpora al proceso en el prensado)



Reducción granulométrica



Molienda. Reducir el tamaño de partícula a 3-4mm



Secado Final

2.4.1.1 Diseño del secador solar

Para el secado se seleccionó un secador solar de tipo mixto. El tipo de colector que se ha seleccionado es el colector solar metálico cubierto. Este colector consiste en una placa delgada de cobre cubierta de pintura negra.

La cubierta protectora transparente será de vidrio, esto podrá permitir el paso de la radiación solar y así evitar las pérdidas de calor por convección del viento (NMX-ES-001-NORMEX-2005).

El tipo de circulación a utilizar será la circulación forzada, por medio de un ventilador de mano que gira a una velocidad de 4000 rpm.

La fórmula para calcular la eficiencia del secador es la siguiente:

$$\eta_c = \frac{Q_c}{I_c A_c} \dots \dots \dots (1)$$

- Donde: η_c = Eficiencia del colector
- Q_c = Energía entregada por el colector
- I_c = Energía solar incidente sobre el colector
- A_c = Área del colector

Según la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005, la eficiencia del colector debe ser de 50% (0.5). Además, de acuerdo con las mediciones de radiación solar, la I_c tiene un valor de 588 W/m², por lo que nuestra incógnita es Q_c .

Despejando se obtiene:

$$Q_c = \eta_c * I_c A_c \dots \dots \dots (2)$$

Por lo que tenemos que:

$$Q_c = 0.5 * 588 \text{ W/m}^2 (1 \text{ m}^2) = \mathbf{294 \text{ W/m}^2}$$

El calor que está recibiendo el colector tiene esta igualdad:

$$Q_c = m * C_p * (T_f - T_i) \dots \dots \dots (3)$$

donde:

m = flujo másico del agua

C_p = Calor específico del fluido de transferencia de calor. ($C_{pH_2O} = 4186$ J/kg°C)

T_f = Temperatura a la salida del colector (26°C)

T_i = Temperatura a la entrada del colector (15.45°C)

De esta fórmula se despeja m y obtenemos el flujo másico:

$$m = \frac{Q_c}{c_p(T_f - T_i)} \dots \dots \dots (4)$$

Sustituyendo los valores:

$$m = \frac{294 \frac{J}{sm^2}}{4186 \frac{J}{kg^\circ C} (26 - 15.45^\circ C)} = 0.00666 \frac{kg}{sm^2} = 6.67 g/s m^2$$

2.4.1.2 Cálculo del flujo de aire que entra al secador solar.

Para calcular el flujo másico de aire que está formando el ventilador, tenemos que:

$$m_{aire} = \rho * Q_{aire} \dots \dots \dots (5)$$

Donde: m = flujo másico del aire que entra al secador
 ρ = Densidad del aire a 26°C ($\rho = 1.18$ kg/m³)
 Q_{aire} = Caudal del aire

Sin embargo, hace falta calcular el valor del caudal, para lo cual tenemos la siguiente fórmula:

$$Q_{aire} = V * A \dots \dots \dots (6)$$

Donde: Q_{aire} = Caudal del aire
 V = Velocidad del ventilador (4000 rpm)
 A = Área del orificio por el cual entra el flujo de aire (4 cm²)

La velocidad se encuentra en revoluciones por minuto, por lo cual se hace la siguiente conversión: **1 rpm = 0.1047 rad/s**. Con este valor podemos obtener la velocidad en m/s, tomando en cuenta que el radio de nuestro ventilador de mano es de **3 cm = 0.03 m**, de la siguiente manera:

$$V = 4000rpm * 0.1047 = 418.8 \frac{rad}{s}$$

$$V = 418.8 * 0.03m = 0.37692 \frac{m}{s}$$

El valor de la velocidad es 0.3769 m/s. Este valor se sustituye dentro de la fórmula del caudal (Ec.6), obteniendo el resultado siguiente:

$$Q_{aire} = V * A = 0.37692 \frac{m}{s} * 0.0016m^2 = 0.0006 \frac{m^3}{s}$$

Una vez obtenido el valor del caudal, se sustituye en la fórmula del flujo másico, donde se obtiene el siguiente resultado:

$$M_{aire} = p * Q_{aire} = 1.18 \frac{kg}{m^3} * 0.0006 \frac{m^3}{s} = 0.000708 \frac{kg}{s}$$

El flujo de aire que está pasando por el secador diseñado con las especificaciones establecidas es de **0.0007kg/s**.

Tenemos el calor suministrado por el colector

$$Q_C = 0.5 * 588 W/m^2 = \mathbf{294W/m^2}$$

La masa de materia orgánica será un kilogramo de agave con 80% de humedad y se desea llevarla al doce por ciento, alguna bibliografía recomienda hacer esto en dos etapas pero es cuando se utiliza para consumo animal para su consumo en pellets se puede bajar en un solo paso, por lo que utilizando la ecuación de 3.

1 kg de agave ---- 800 g de agua --- para llevarla a 200 g

Por lo que solo queremos evaporar 600 gr que es nuestra masa de agua.

La fabricación de los pellets, consta del corte de las pencas en pequeños trozos una vez hecho esto se compactan mediante prensado en pequeños cilindros de PVC y estos se meten al secador, para con ello quitar el exceso de

humedad, siguiendo la metodología de proceso, el poder calorífico del agave es de 4183 kcal/kg.

La figura 15 esquematiza el modelo propuesto.

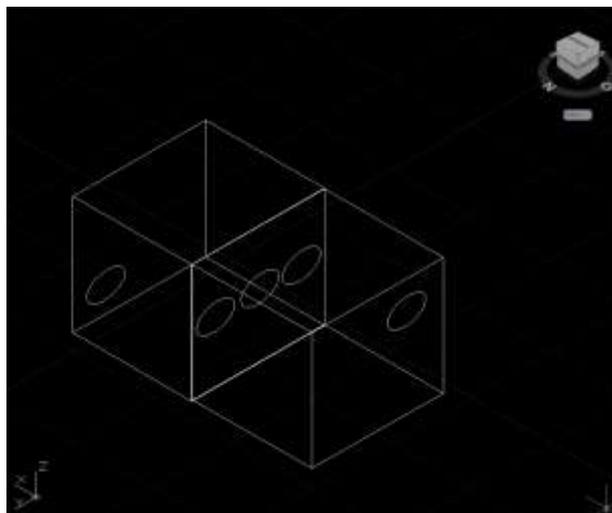


Figura 15 Diseño del prototipo (Autocad)

Ante las implicaciones sociales y económicas que conlleva el empleo de productos alimenticios (caña de azúcar, maíz, etc.) en la obtención de biocombustibles y las limitaciones agroecológicas para la producción masiva de los cultivos energéticos en nuestro país, el residuo de agave representa una excelente alternativa para impulsar el desarrollo sustentable del país, dada su alta productividad aun en condiciones restrictivas de humedad, temperatura y suelo, y a que en su producción no se requiere abrir nuevas tierras al cultivo, se pueden reconvertir suelos marginales o degradados y sus requerimientos de insumos son muy bajos. México tiene en los residuos agaváceos una fuente potencial de energía y el insumo ideal para desarrollar bioindustrias sustentables, sobre todo ante la presencia de características biológicas y físico-químicas que le permiten ser considerado un insumo de interés para ser empleado en diferentes procesos como la producción de biocombustibles.

Lo anterior, brinda una idea del potencial del agave para ser empleado como insumo bio-energético.

Durante la producción anual de pulque se generan miles de toneladas de residuos de agave, no comestibles que en algún momento son arrancados y quemados, lo cual representa un problema de contaminación del aire y esa energía no es aprovechada, por lo que existen grandes oportunidades de investigación para desarrollar procesos de peletización ya que es técnicamente factible, eficiente y económicamente atractivo.

Los productos bio-energéticos obtenidos del agave pueden utilizarse como combustible alternativo en aquellas comunidades rurales del país donde el suministro de energía sea deficiente o bien no se tiene acceso a fuentes convencionales.

CAPITULO 3

3.1 METODOLOGÍA

En el presente trabajo se realizó un estudio cromatográfico para determinar la presencia de H₂ en los gases producidos por la fermentación natural de algunas bacterias y posteriormente, mediante imágenes de microscopía se caracterizaron las bacterias que están implicadas en los procesos fermentativos. Así mismo se hizo un análisis de la factibilidad del proceso de obtención del H₂ a partir de la fermentación del pulque.

3.1.1 Metodología experimental

Las muestras de pulque se obtuvieron en el Estado de México, en el pueblo de Tlalmanalco del municipio de Chalco, 19° 8' 48"N, 98° 37' 58" W, que se encuentra a una altitud de 2,400 m s.n.m. Las muestras se colocaron en frascos de 200 ml, en los cuales se vertieron 100 ml de líquido de cada una de las etapas (aguamiel, semilla, y contrapunta pulque).

El aguamiel es el líquido que escurre directamente de las pencas del maguey. Este es muy dulce y transparente, y no presenta la consistencia viscosa del pulque ya fermentado o maduro. La semilla es un pulque con fermentación de dos semanas o más y es muy viscoso, de olor fuerte parecido al vinagre. La contrapunta es un pulque de 24 horas de fermentación obtenido por una mezcla 1:1 de aguamiel y semilla.

El biogás generado a partir de cada muestra líquida, fue analizado en un cromatógrafo del tipo Gas Chromatograph GC-8A, Shimadzu con detector de conductividad térmica equipado con columna capilar de Shin carbón. La muestra líquida (100mL) se colocó en un reactor vidrio de 250mL y, posteriormente, se selló el sistema a presión atmosférica, posteriormente se conservó con una agitación constante (600 rpm), el sistema sometió a una rampa de calentamiento de 2 °C cada minuto desde la temperatura ambiente que osciló entre 22 y 23 °C hasta llegar a una temperatura de 50 °C manteniéndola estable, durante el análisis de gas (15 min). La rampa de

calentamiento se utilizó para acelerar el proceso de fermentación y no afectar a las bacterias que podrían morir al sufrir un cambio brusco de temperatura.

Antes y después de alcanzar la temperatura y durante el tiempo de reacción, se tomaron muestras de los gases liberados de la muestra líquida, en intervalos de tiempo de 0, 15, 40 y 80 minutos. El gas liberado se hizo recircular, mediante una bomba neumática, del sistema de reacción al cromatógrafo de gases, y por medio de un sistema de recolección de datos (PeakData), se registró la señal de la cantidad de gases liberados. Para la cuantificación del gas H_2 se realizó una curva de calibración a diferente presión, obteniendo el área bajo la curva. A partir de ella se realiza los cálculos correspondientes para determinar la cantidad de H_2 (micromoles).

Se realizó microscopia para las muestras líquidas, con un microscopio Olympus adaptado con cámara digital y filtro infrarrojo.

CAPITULO 4

4.1 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la figura 18 se presenta el cromatograma obtenido de la muestra líquida a 50°C, medido a diferentes tiempos. A tiempo inicial de reacción se observa solamente el pico cromatográfico que corresponde al O₂ del medio ambiente. Posteriormente, a medida que transcurre el tiempo se observa los picos cromatográficos del H₂ y del CH₄, lo que sugiere que estos gases han sido liberados de la muestras por acción de la fermentación a 50°C. En las muestras líquidas (semilla y contrapunta) se observa la presencia de hidrógeno liberado excepto en el aguamiel. En el pulque fermentado por dos días, hay una presencia del 5% de hidrógeno del total de biogás producido por las muestras de 100 ml; en las muestras de pulque de fermentación por más de dos días, la concentración de H₂ es de 5 μmol en promedio. A partir del cromatograma, se determinó el área cromatográfica del pico de H₂, O₂ y CH₄, respectivamente, y haciendo uso de la curva de calibración realizada para el H₂, en donde cada área cromatográfica corresponde a 2 micromol de H₂, así en la Tabla 8 se presenta los datos de área y la relación de producción de hidrógeno con respecto al oxígeno y metano.

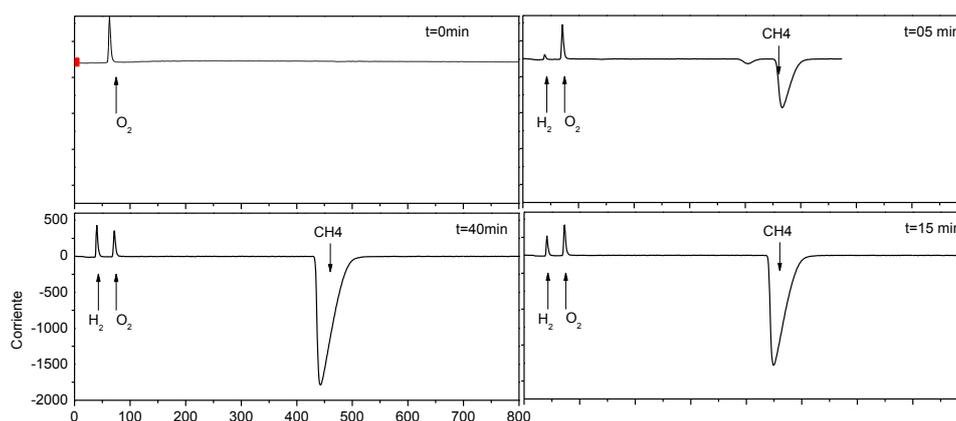


Figura 16 Cromatograma de la identificación y cuantificación de los gases liberados de la muestra líquida, medidos durante 40min de reacción.

Tabla 9 Concentración de los diferentes gases liberados de la muestra de pulque (100 ml) sometido a temperatura 50 °C.

Tiempo (min)	Área				μmol de H ₂
	H ₂	O ₂	CH ₄	CH ₄ /H ₂	
0	0.33	2.10	14	42	0.66
15	1.10	1.99	39	35	2.20
40	1.68	1.61	52	31	3.36
80	2.00	1.51	55	28	4.00

En la Tabla 8, se aprecia que el área cromatográfica de la cantidad de hidrógeno liberado en las muestra, respecto a la del metano, es muy baja. Se observa un pequeño aumento en su formación hasta un límite (80 min) cuando se estabiliza, a diferencia del metano que incrementa muy rápidamente su área cromatográfica, sin embargo se observa un cambio en la relación CH₄/H₂ de 42 a 28 veces. En términos de concentración, la cantidad de H₂ liberado a partir de la muestra, es muy baja (4 micromoles), por lo que se considera casi despreciable comparada con la del metano (42 veces). Las diferentes concentraciones de los componentes del biogás se pueden apreciar en la figura 16, mostrando la prevalencia del metano, donde se puede observar la similitud del comportamiento del metano y el hidrógeno, no así para el oxígeno que presenta un decrecimiento con respecto al tiempo.

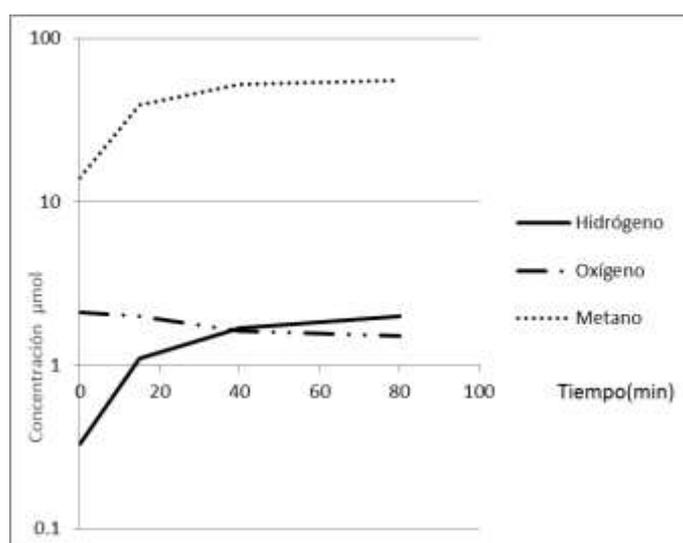


Figura 17 Concentración contra tiempo de los componentes del biogás de pulque contrapunta.

Se realizaron mediciones de contenido de hidrógeno para tres muestras de diferentes pulques, encontrando similitud en su composición, como se muestra en la figura 17.

La muestra C, es el aguamiel-pulque recolectado en el mes de enero época de frío y de lluvias, la muestra B fue tomada de un maguey joven en la misma época y la muestra A fue tomada en los meses de marzo con mayor temperatura y sin lluvias.

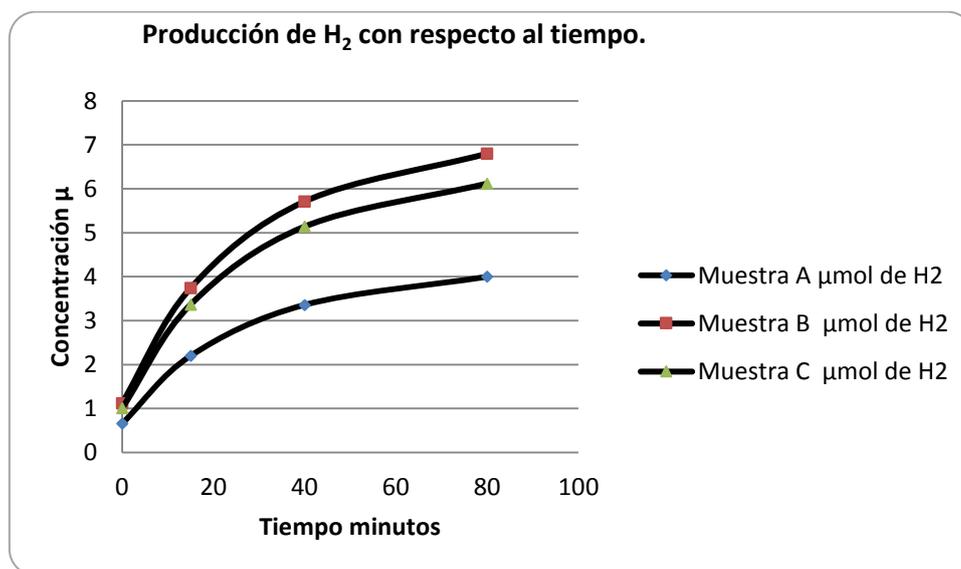


Figura 18 Producción de H₂ con respecto al tiempo.

El comportamiento es el mismo, aunque las cantidades varían entre sí debido a que la composición del pulque depende de diferentes factores como son tipo de suelo, clima y nivel de maduración de la planta, por ello las muestras se tomaron del mismo sitio para evitar que estos factores generaran valores muy dispersos de producción de biogás, la muestra B se tomó de una planta joven de siete años (el promedio de maduración es de diez a doce años), la muestra A y C fueron de plantas adultas, los resultados difieren entre sí pero conservan el patrón de producción de hidrógeno.

Así mismo como se mencionó, la cosecha fue en meses distintos del año por lo que las condiciones climáticas difieren, en época de sequía el maguey trata de conservar su humedad, lo que también sucede si está sembrado en terrenos áridos o semiáridos, que genera aguamiel más espeso y con más

carga de bacterias, lo que limita la producción de hidrógeno al ser consumido más rápido por las bacterias al tener menor alimento; en los meses de lluvia el maguey produce un aguamiel más azucarado y líquido que genera más alimento para las bacterias y aumenta la cantidad de hidrógeno producido.

Los estudios realizados en las muestras arrojan una escasa presencia de hidrógeno siendo de 12 micromoles la mayor concentración esto debido a que no se detuvo el proceso de fermentación por lo que las bacterias Metanogénicas Hidrógenofílicas, presentes en la mezcla realizaron su proceso natural agotando el hidrógeno y produciendo metano. Este tipo de bacterias son muy comunes en biodigestores, el no detener el proceso obedeció a no modificar a la bebida natural, sin embargo, si este proceso se detuviera la producción de hidrógeno sería mayor esto iniciando desde el momento de la adición de la semilla no dejando que se agotara el suministro de azúcares; al realizar el calentamiento se aceleró el ciclo de vida de las bacterias incrementando aún más la presencia de metano, ya que los estudios nos dan evidencia de una mayor producción de éste, el cual en sí mismo es utilizado como combustible en generadores de electricidad, lo cual daría un insumo utilizándolo como biogás.

Mediante el uso del microscopio óptico se logró identificar comunidades de bacterias pertenecientes al pulque de los géneros *Saccharomyces* sp, *Zymomonas* sp, y *Lactobacillus* sp [22]. Como se muestra en las figuras 19 y 20 [22].

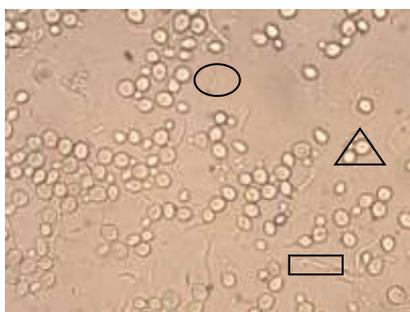


Figura 19 Muestra de bacterias en pulque muestra saturada objetivo 40X, caracterización del género *Zymomonas* (oval), *Saccharomyces* (triángulo) y *Leuconostoc* (rectángulo).



Figura 20 Muestra de bacterias en pulque muestra saturada objetivo 100X, Zymomonas, Saccharomyces, Leuconostoc y Salmonella.

Las bacterias pertenecientes a los géneros Escherichia, Salmonella, Shigella, Proteus, Yersinia, Vibrio y Photobacterium presentan el enzima formicohidrogenilasa que rompe la molécula de ácido en dióxido de carbono e hidrógeno, en las muestras se logró encontrar Salmonella, aunque la presencia de esta indica cierta insalubridad en el proceso.

4.2 CONCLUSIONES

Las concentraciones de hidrógeno, aun cuando en todas las muestras dieron valores escasos, se observa la presencia del gas sin alterarla bebida natural. Al calentar las muestras de pulque, se aceleró el proceso de fermentación que produce hidrógeno y a su vez lo consume de forma natural por los procesos metabólicos de las bacterias. Esto lo constatamos mediante el monitoreo cromatográfico, donde se mostró mayor presencia de metano y una disminución en la producción de hidrógeno. Cabe señalar que las muestras no se dejaron más tiempo al llegar, a un cuasi equilibrio, donde ya no hay gasto de hidrógeno ni producción de metano considerable.

La producción de hidrogeno energéticamente es de 0. 00013 kw por 100 ml de pulque, una cantidad despreciable si consideramos que un foco requiere 0.1 KW por segundo para su funcionamiento.

El metano generado puede a su vez ser utilizado para producción de hidrógeno mediante el proceso de craqueo catalítico, por lo que no se descarta esta forma de obtención; el metano se puede recuperar y con ello producir energía, recordando que el metano es un gas de efecto invernadero, con lo que estaríamos aportando a la disminución de éste en el ambiente.

4.3 REFERENCIAS

1. Claassen PAM, van Lier JB, Lopez Contreras AM, van Niel EWJ, Sijtsma L, Stams AJM, de Vries SS & Weusthuis RA (1999) Utilisation of biomass for the supply of energy carriers. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 52:741-755.
2. Reith JH, Wijffels RH & Barten H (2003) Bio-methane & Bio-hydrogen: Status and perspectives of biological methane and hydrogen production. Dutch Biological Hydrogen Foundation, La Haya, Holanda.
3. Logan BE (2004) Extracting hydrogen and electricity from renewable resources. *Environ. Sci. Technol.* 38:160A-167A.
4. Blanco Londoño, Sergio Andrés, & Rodríguez Chaparro, Tatiana. (2012). Producción de biohidrógeno a partir de residuos mediante fermentación oscura: una revisión crítica (1993-2011). *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 20(3), 398-411. Recuperado en 23 de noviembre de 2015, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052012000300014&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0718-33052012000300014.
5. Ozkan, M., Desai, S. G., Zhang, Y., Stevenson, D. M., Beane, J., White, E. A., Guerinot, M. L., and Lynd, L. Characterization of 13 newly isolated strains of anaerobic cellulolytic, thermophilic bacteria, *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 27 (5): 275–280, October, 2001.
6. Soria F., Ferrera C., Etchevers J., Gonzales. A., Trinidad J, Borges, “Biodigestion of Hog Slurry to Produce Biomanure”, 19 (4): 353-362, September, 2001.
7. Buitrón G. Carvajal M. Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales. *Revista Digital Universitaria* [en línea]. Vol. 10, Número 6, 10 de Agosto, 2009 [fecha de consulta 2 de Septiembre 2011] Disponible en <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art50/art50.pdf>
8. Vargas J.C., Sternenberg F., Roger A.C., Kiennemann A., Steam reforming of bioethanol on Co/Ce-Zr-Co and Co/Ce-Zr catalysts a comparison between cobalt integration and cobalt impregnation, *Chem. Eng. Trans*, 4:247-252, 2004.
9. Noike, T. y Mizuno, O. Hydrogen fermentation of organic municipal wastes. *Water Science & Technology* . 42 (12): 155-162, December 2000
10. Gutiérrez, G. G. de J., Moncada F. I., Meza M. M., Fuentes, A. F., Balderas, C. J. de J., y Gortáres M. P. (2012). Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía. *Ide@s CONCYTEG*, 7 (85), pp. 881 – 894. (en línea). Obtenido el 18 de febrero 2015, de: http://concyteg.gob.mx/ideasConcyteg/Archivos/85_1_GUTIERREZ_GA_RCIA_ET_AL.pdf
11. Abbasi, T., Tauseef, S.M. y Abbasi, S.A. (2011). *Biogas energy*. New York: Springer Science & Business Media.
12. Kataoka, N., Miya, A. y Kiriya, K. “Studies on Hydrogen Production System using Microorganisms”. *Ebara Engineering Review* nº 183 (1999).

13. -E. Ortega Valencia, J. L. François Lacouture, Producción de hidrógeno mediante energía nuclear, un escenario sostenible en México *Simposio LAS/ANS 2007 / 2007 LAS/ANS Symposium, XVIII Congreso Anual de la SNM*
14. R. Navarro, F. del Valle, *et al.*, “*Photocatalytic water splitting under visible light: Concept and catalysts development*”, *Advances in Chemical Engineering* 36 (2009) pp111.
15. R. Ramachandran, R. K. Menont, *J. HydrogenEnrvgy*, Vol. 23, No. 7, pp. 593-598, 1998
16. María E. González Ávila, Producción de bioenergía en el norte de México: Tan lejos y tan cerca..., *Frontera Norte*, Vol. 21, Núm. 41, Enero-junio de 2009 (en línea) obtenido el 10 de Noviembre del 2011 de: <https://www.colef.mx/fronteranorte/articulos/FN41/8-f41.pdf/>
17. Lima, Oswaldo Gonçalves de. *Pulque, Balché y Pajauaru en la Etnobiología de las bebidas y de los alimentos fermentados*. 1a ed., Mexico, Fondo de Cultura Económica, 1990, pp 100-483.
18. Correa-Ascencio *et al.* *PNAS* ,September 30, 2014 , vol. 111 , no. 39 .
19. Rogelio Valadez-Blanco • Griselda Bravo-Villa, Norma F. Santos-Sanchez, Sandra I. Velasco-Almendarez Thomas J. Montville, *The Artisanal Production of Pulque, a Traditional Beverage of the Mexican Highlands*, *Probiotics & Antimicro. Prot* 4:140–144, (2012)
20. M. Cervantes-Contreras, Pedroza A. M, *Caracterización microbiológica del pulque y cuantificación de su contenido de etanol mediante espectroscopia Raman*, *Superficies y Vacío* 20(3): 1-5, marzo de 2008
21. Sanchez-Marroquin A, Larios C, Vierna L (1967) *Estudios sobre la microbiología del pulque*. XIX. *Elaboración de la bebida mediante cultivos puros, en planta piloto*. *Rev Latinoam Microbiol Parasitol* 9:83–85
22. AG. Rivera, R. Baquero, Y. Matsumoto, *Análisis para la obtención de hidrógeno a partir de biogás proveniente de la fermentación de bebidas naturales*. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVII (Num 2), abril-junio 2016:251-256

4.4 PRODUCTOS DE LA INVESTIGACIÓN

Ponente en el Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2011, Cuernavaca Morelos, México., 23 a 25 de Noviembre 2011.

Ponente “XXXVI Semana Nacional de Energía Solar ANES 2012, Cuernavaca Morelos. México, 1 a 5 de Octubre del 2012.

Ponente cuarto congreso Internacional de Energías Renovables 2013, IPN, D.F, México, 16 al 18 de Octubre 2013.

Ponente “Congreso internacional de AcademiaJournals.com Celaya 2013” Celaya, Guanajuato, México, 6 al 8 de Noviembre 2013.

Artículos publicados:

AG. Rivera, R. Baquero, Y. Matsumoto , “El hidrógeno como fuente de energía ¿Es el pulque una solución?”, Artículo periodístico, La crónica de Hoy; México D.F, 21-06-2011.

AG. Rivera, R. Baquero, Y. Matsumoto, Avance y perspectiva, “Rescate al Rio Atoyac” vol 4, Nom. 4, Octubre Diciembre 2012, México.

AG. Rivera, R. Baquero, Y. Matsumoto, “Análisis para la obtención de hidrógeno a partir de biogás proveniente de la fermentación de bebidas naturales”. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVII (Num 2), abril-junio 2016:251-256