



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TÍTULO

**GENERACIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTROLISIS,
ESTADO DEL ARTE**

Trabajo monográfico
PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

PRESENTA

KENNET ROMAN CRUZ CASTELLOT

supervisores

DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL
DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO MONOGRÁFICO TITULADO
“GENERACIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTROLISIS, ESTADO DEL ARTE”

ELABORADO POR
KENNET ROMAN CRUZ CASTELLOT

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA Y APROBADO COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

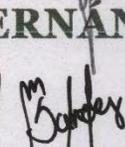
INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

COMITÉ SUPERVISOR

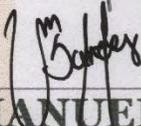
SUPERVISOR:


DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL

SUPERVISOR:


DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

SUPERVISOR:


DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA



DEDICATORIA

DEDICO ESTE TRABAJO MONOGRAFICO A LAS PERSONAS QUE ME APOYARON DURANTE MI PROCESO, QUE ME ENTREGARON SU CONFIANZA, AMOR, ADMIRACION Y SOBRE TODO QUE CREYERON EN MI, GRACIAS POR ESTAR SIEMPRE A MI LADO.

A MIS PADRES:

ROMAN CRUZ ARGUELLO
ANNETTE CASTELLOT VILLEGAS

A MI HIJO:

JADEN ROMAN CRUZ CASTELLOT

A MI ESPOSA:

NUVIA EVELYN SALAZAR ROMERO

A MIS HERMANOS:

HERSON CRUZ CASTELLOT
ISMAEL CRUZ CASTELLOT

AGRADECIMIENTO

EN ESTOS PARRAFOS QUIERO AGRADECER A TODAS LAS PERSONAS QUE ESTUVIERON A MI LADO DURANTE ESTE PROCESO DE APRENDIZAJE, A TODAS LAS PERSONAS QUE CONFIARON EN MI Y ME DIJERON SAL ADELANTE, GRACIAS POR ESAS PALABRAS.

A MIS PADRES, ROMAN Y ANNETTE; LES AGRADEZCO SU APOYO INCONDICIONAL, SUS CONSEJOS PARA SALIR ADELANTE Y SOBRE TODO EL ESFUERZO QUE HICIERON PARA QUE ESTO FUERA POSIBLE.

A MI HIJO JADEN; YA QUE FUISTE LA MAS GRANDE MOTIVACION QUE YO NECESITABA PARA SEGUIR ESTE PROCESO Y ACABARLO, TE AMO.

A MI ESPOSA NUVIA; ERES MI COMPAÑERA DE MUCHAS BATALLAS, SIEMPRE ESTAS A MI LADO DANDOME TODO EL APOYO QUE NECESITO PARA SEGUIR ADELANTE, GRACIAS POR TODO.

A MIS HERMANOS, HERSON Y ISMAEL; USTEDES SON UN GRAN APOYO PARA MI, YA QUE SOY SU EJEMPLO A SEGUIR Y ESO HACE QUE YO QUIERA SUPERAME DIA CON DIA PARA QUE TENGAN UNA BUENA IMPRESIÓN DE SU HERMANO MAYOR.

A MIS COMPAÑEROS DE CLASES QUE ESTUVIERON DURANTE MI PROCESO EN LA INGENIERIA ; JOSE LUIS , ERICK, YASSER , PICAZO, FRANCISCO, ARACELY, MANUEL , GRACIAS POR COMPARTIR MUCHAS ALEGRÍAS A MI LADO Y SOBRE TODO APOYARME CON SUS CONOCIMIENTOS DURANTE ESTE PROCESO, GRACIAS POR DEJAR UNA HUELLA EN MI VIDA.

A MIS PROFESORES QUE COMPARTIERON SUS CONOCIMIENTOS DURANTE LA CARRERA; FERNANDO FLORES, JOSE HERNANDEZ, VICTOR SANCHEZ, LORENA PUC, JORGE OVIDIO, MARLON, JESUS, PERO ESPECIALMENTE A LOS PROFESORES; INOCENTE BOJORQUEZ, ROBERTO ACOSTA, OMAR YAM, SET JUBAL Y ROMELI BARBOSA, POR APOYARME, CREER EN MI Y DARMÉ SU CONFIANZA, MUCHAS GRACIAS POR LOS ENORMES CONOCIMIENTOS QUE APORTARON EN MI Y HACER QUE ESTA CARRERA FUERA EXTRAORDINARIA.

CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
CONTENIDO.....	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABLAS.....	v
RESUMEN.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	vi
OBJETIVOS GENERAL	vii
OBJETIVOS PARTICULARES	vii
CAPÍTULO I – ENERGÍA RENOVABLE	1
1.1. Las Energías Renovables.....	1
1.2. Energía Solar.....	2
1.3. Energía Eólica	3
1.4. Energía Geotérmica	3
1.5. Energía Hidráulica	4
1.6. Biomasa	4
1.7. Situación Energética en México.....	4
CAPÍTULO II – HIDRÓGENO, VECTOR ENERGÉTICO	10
2.1. Propiedades del Hidrógeno	10
2.2. Uso del Hidrógeno	12
2.3. La Economía del Hidrógeno	12
2.4. Tecnología del Hidrógeno.....	13
2.5. Producción del Hidrógeno	14
2.5.1. Métodos de Producción de Hidrógeno a Partir de Combustibles Fósiles.....	14
2.5.6. Foelectrólisis	15
2.5.7. Producción Fotobiológica	15
2.5.8 Producción de Hidrógeno Mediante Electrólisis del Agua	16
2.5.9. Electrólisis con Fuentes Alternas de Energía	18
2.6. Tecnologías de Almacenamiento de Hidrógeno.....	18

2.6.1. Almacenamiento en Forma Gaseosa	19
2.6.2. Almacenamiento en Forma Liquida	19
2.6.3. Almacenamiento en Forma de Adsorción en Nanotubos de Carbón	19
CAPÍTULO III – ELECTRÓLISIS Y ELECTROLIZADORES	20
3.1. La Electrólisis del Agua.....	20
3.2. Principales Tipos de Electrolizadores	21
3.2.1. Electrolizadores Alcalinos.....	21
3.2.2. Electrolizadores de Membrana de Intercambio Protónico (tipo PEM).....	23
3.2.3. Electrolizadores de Óxido Sólido.....	23
3.2.4. Comparación de los Distintos Tipos de Electrolizadores	24
CAPÍTULO IV – ESTADO DEL ARTE	26
CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES	40
BIBLIOGRAFÍA.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Capacidad instalada de generación de energía eléctrica por tipo de fuente, 2013 (GWh), [12].	9
Figura 1. 2. Generación de energía eléctrica por fuente de energía utilizada, 2003 y 2013 (TWh y participación porcentual), [12].. . . .	9
Figura 2. 1. Esquema de un electrolizador alcalino con electrodos metálicos y en solución electrolítica de hidróxido de potasio (KOH) [15].	17
Figura 2. 2. Esquema de un electrolizador tipo PEM [23].	18
Figura 3. 1. Esquema típico de un electrolizador de agua, [25].	20
Figura 3. 2. Esquema de la configuración de los electrolizadores: a. monopolar y b. bipolar, [25].	22
Figura 4. 1. Sección de búsqueda avanzada en la página de Science Direct [46].....	26
Figura 4. 2. Cuadro de entrada de comandos para búsqueda en el motor de Science Direct [46].	27
Figura 4. 3. Cantidad de publicaciones por revista, con respecto al tema de Electrolizador PEM (Elaboración propia con datos de Science Direct [46])	28
Figura 4. 4. Cantidad de publicaciones por revistas, Electrolizador Alcalino (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	29
Figura 4. 5. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema de Electrolizador de Óxido Sólido (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	30
Figura 4. 6. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	31

Figura 4. 7. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema Energía del Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	32
Figura 4. 8. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema Almacenamiento de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	33
Figura 4. 9. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema Producción de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	34
Figura 4. 10. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema Electrólisis del Agua (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	35
Figura 4. 11. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Electrolizador PEM (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	36
Figura 4. 12. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Electrolizador Alcalino (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	36
Figura 4. 13. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Electrolizador de Óxido Sólido (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	37
Figura 4. 14. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	37
Figura 4. 15. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Energía de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	38
Figura 4. 16. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Almacenamiento de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	38
Figura 4. 17. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Producción de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	39
Figura 4. 18. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Electrólisis del Agua (Elaboración propia con datos de Science Direct [46]).	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1. Propiedades del hidrógeno.	11
Tabla 2. 2. Factor de compresibilidad del hidrógeno.	11
Tabla 2. 3. Equivalencia hidrógeno-energía	11
Tabla 3. 1. Comparación de las principales tecnologías de electrólisis del agua.	24

RESUMEN

En este trabajo se exponen diversos temas relativos a las energías renovables y su situación actual en México, poniendo énfasis en el Hidrógeno como vector energético. Esto se desarrolla en cuatro capítulos, que conforman este trabajo monográfico.

En el Capítulo I, Energía Renovable, habla sobre las diferentes tipos de energías renovables y la situación actual de estas en México, y se divide en siete subtemas: las energías renovables, energía solar, energía eólica, energía geotérmica, energía hidráulica, biomasa y situación energética en México. En cuanto el Capítulo II, Hidrógeno, Vector Energético, trata extensamente lo relativo al hidrógeno y está dividido en seis subtemas: propiedad del hidrógeno, uso del hidrógeno, la economía del hidrógeno, tecnología del hidrógeno, producción del hidrógeno y tecnología de almacenamiento del hidrógeno. El Capítulo III, Electrólisis y Electrolizadores, presenta lo respectivo a la electrolisis del agua y los principales tipos de electrolizadores desarrollados, se subdivide en dos subtemas: la electrolisis del agua y principales tipos de electrolizadores. Por otra parte, el Capítulo IV, Estado del Arte, presenta un análisis de los trabajos publicados en diversas revistas científicas, en el periodo que va del 2000 al 2017 en ocho temas relacionados con el hidrógeno, que son: electrolizador PEM (PEM electrolyzer), electrolizador alcalino (alkaline electrolyzer), electrolizador de óxido sólido (solid oxide electrolyzer), hidrógeno (hydrogen), energía del hidrógeno (hydrogen energy), producción de hidrógeno (hydrogen production), almacenamiento de hidrógeno (hydrogen storage) y electrolisis del agua (water electrolysis). Por último, se presentan las conclusiones y comentarios finales de este trabajo.

INTRODUCCIÓN

En el contexto energético de hoy, la mayor parte de la energía utilizada a nivel mundial es producida por combustibles fósiles, tales como los derivados del petróleo, el carbón y gas natural. La utilización de estos recursos en forma masiva ha producido los daños ecológicos, problemas a los que se enfrenta el mundo y las generaciones a futuro. Estos problemas son causados por la forma en la que los combustibles fósiles son aprovechados, tal como, la quema de combustibles, que librea grandes cantidades de CO₂ a la atmosfera, abonando a la causa del efecto invernadero.

Las energías renovables han adquirido relevancia actualmente, pues éstas contribuyen a reducir los riesgos asociados al impacto ambiental e impulsar el desarrollo sostenible, perfilándose como una opción a los combustibles fósiles.

La energía solar y eólica, energías renovables, tienen las ventajas de ser limpias y provenir de recursos inagotables como el sol y el aire. Sin embargo, estas fuentes cuentan con las desventajas de ser intermitentes y en su proceso de transformación a energía eléctrica requieren normalmente, de un método de almacenamiento, comúnmente baterías, que son ineficientes, poco prácticas y muy caras.

En este sentido la opción más viable a los combustibles fósiles es el hidrógeno y se perfila para convertirse en el combustible del futuro. Es utilizado en varias aplicaciones que van desde las estacionarias hasta las móviles, su combustión en los procesos electroquímicos prácticamente no genera contaminantes, si lo comparamos con otros métodos de generación de energía. La electricidad para generar hidrógeno puede provenir de fuentes alternas, como las energías renovables. Con ello, se obtendría energía de calidad, en abundancia y limpia.

OBJETIVOS GENERAL

Crear un panorama descriptivo de las energías renovables, poniendo énfasis en la investigación, el uso, la producción y el almacenamiento del hidrógeno.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Desarrollar una descripción de los diferentes tipos de energías renovables y su situación en México.
- Presentar los usos, propiedades, producción y almacenamientos del hidrógeno como vector energético.
- Realizar un análisis de los trabajos publicados, en revistas científicas en el periodo del 2000 al 2017, en temas relativos al hidrógeno.

CAPÍTULO I – ENERGÍA RENOVABLE

En este capítulo se describen las generalidades de las energías renovables, que se definen como: aquellas que se producen de forma continua, son inagotables a escala humana y se renuevan a diferencia de los combustibles fósiles, de los que existen unas determinadas cantidades o reservas finitas, en un plazo más o menos determinado.

Las principales formas de energías renovables a tratar en este capítulo son:

- a) Energía solar.
- b) Energía eólica.
- c) Energía geotérmica.
- d) Energía hidráulica.
- e) Biomasa.

Las energías renovables provienen de forma directa o indirecta de la energía del Sol; a excepción de la energía geotérmica.

1.1. Las Energías Renovables

Las energías renovables son aquellas cuya fuente reside en fenómenos naturales, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, y que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua [1].

De manera general, Tzec [2] clasifica las energías renovables de la siguiente manera:

- a) **Energía Solar:** aprovecha la energía contenida en la radiación solar. Esta a su vez puede ser convertida en electricidad a través de celdas fotovoltaicas, o transformarse en calor por medio de colectores solares, para luego utilizarse directamente este calor, o para producir vapor y generar electricidad.
- b) **Energía Eólica:** es la energía contenida en el viento en movimiento. La energía del viento mueve una turbina, con lo cual se produce directamente energía mecánica, que puede aprovecharse como tal, o convertirse en electricidad por medio de un generador
- c) **Energía Geotérmica:** es aquella que aprovecha el calor del interior de la Tierra para producir energía. Parte de este calor llega a la superficie, provocando que en ciertos lugares las aguas subterráneas alcancen temperaturas de ebullición, el vapor resultante puede ser utilizado para calefacción o para generar electricidad por medio de turbinas.
- d) **Energía Hidráulica:** es la energía cinética y potencial contenida en las masas de agua en movimientos, como los ríos, o en saltos a desnivel como en las presas. La fuerza del agua mueve unas ruedas hidráulicas o turbinas que, a su vez generan electricidad acopladas a una flecha que hace funcionar un generador eléctrico.
- e) **Biomasa:** se refiere a la energía del Sol convertida en materia orgánica por los vegetales en la fotosíntesis. Esta energía puede ser recuperada por combustión directa o mediante la transformación de la biomasa en otros combustibles. Los métodos para la conversión de la biomasa en energía pueden ser termoquímicos, como la combustión y la pirolisis, o biológicos como la fermentación alcohólica y la digestión anaerobia.

Entre las principales ventajas de las energías renovables, está el hecho de que pueden ser utilizadas durante miles de años sin que se acaben, porque se regeneran y son muy abundantes o bien porque la fuente principal de energía se considera como inagotable, como es el caso del Sol y del viento.

Sin embargo, ante la evidencia del cambio climático y la realidad de que los combustibles fósiles son finitos, muchos países han comenzado a implementar la utilización de las energías renovables.

En el apartado siguiente se presenta una descripción de las energías renovables más utilizadas.

1.2. Energía Solar

La Energía Solar es la fuente principal de vida en el planeta, dirige los ciclos biofísicos, geofísicos y químicos que mantienen la vida en la Tierra, los ciclos del oxígeno, del agua, del carbono y del clima. El sol suministra alimentos (mediante la fotosíntesis), induce el movimiento del viento y del agua. La Energía Solar es el origen de la mayoría de las fuentes de energía renovables (la Energía Mareomotriz, Energía de la Biomasa, la Energía Hidroeléctrica, la Energía Eólica y de la Energía Solar).

La Energía Solar absorbida por la Tierra en un año es equivalente a 20 veces la energía almacenada en todas las reservas de combustibles fósiles en el mundo y 10 mil veces superior al consumo actual [3].

La energía del sol suele ser aprovechada principalmente por la energía solar fotovoltaica, nombre dado al proceso de conversión de la energía solar a energía eléctrica a través de celdas fotovoltaicas. El principio de funcionamiento de las celdas fotovoltaicas es el efecto fotoeléctrico y fotovoltaico, el cual consisten en la absorción fotones (presentes en energía solar) por la celda fotovoltaica y como resultado de esto se liberan electrones del material que compone la celda. Estos electrones libres son capturados y en consecuencia se genera una corriente eléctrica que puede ser utilizada. Un conjunto de celdas fotovoltaicas conforma un módulo o colector fotovoltaico, en él, las celdas se encuentran acopladas en serie, permitiendo obtener de voltajes mayores que para la alimentación dispositivos eléctricos o electrónicos.

En resumen, cuando estos electrones son capturados, el resultado obtenido es una corriente eléctrica continua que puede ser aprovechada y transformada en corriente alterna, y así ser inyectada a la red eléctrica.

El atractivo de la tecnología fotovoltaica es que se trata de una tecnología limpia, silenciosa y confiable, amigable con el medio ambiente y con un tiempo de vida que puede hasta más de tres décadas. Además, sus costos de operación y mantenimiento son muy bajos, pues no poseen partes móviles ni requieren de ningún insumo (salvo la luz del sol). Su gran inconveniente es el alto costo por kW de potencia. Sin embargo, estos costos han venido disminuyendo desde hace más de una década y esta tendencia promete continuar [4].

En 1994 Japón fue el primer país que fomentó el equipamiento de las viviendas y las industrias con generadores fotovoltaicos (PV, Photovoltaics). Alemania le siguió los pasos a Japón con su plan para lograr 100.000 techos solares en base a un programa de subsidios que fue implementado en 2004, por la ley de Fuentes de Energía Renovable (EEG). La EEG buscó conectar la micro generación PV a la red interconectada del país, en lugar de promover la autonomía energética a nivel de cada vivienda; esto obliga a los operadores de red a adquirir la electricidad PV pagando tarifas más bajas que resultan más favorables y están garantizadas por un periodo de tiempo considerable [5].

1.3. Energía Eólica

La Energía Eólica ha sido utilizada a lo largo de los siglos para moler granos, bombear el agua y en otras aplicaciones. Hoy en día, existen miles de molinos de viento funcionando en el mundo, muchos de los cuales son utilizados como elementos de bombeo.

Sin embargo, para la producción de electricidad suelen recibir el nombre de aerogeneradores. Los intentos de generar energía eléctrica a partir de la eólica se han venido haciendo desde los años 30 del siglo pasado, fabricando pequeñas maquinas cuya misión era cargar las baterías, sin embargo, no fue hasta los 80 cuando la tecnología fue lo suficientemente madura para permitir la evolución hacia una industria de escala mayor. El costo de los aerogeneradores disminuyó de una manera notable entre 1980 y los 2000. El viento es en la actualidad, una de las fuentes de energía con mejor relación costo-eficiencia para la producción de energía eléctrica [6].

El perfeccionamiento del tradicional molino de viento ha, dado lugar a modernos aerogeneradores que aprovechan la energía eólica para generar electricidad, estos aerogeneradores pueden instalarse aislados o bien en agrupaciones que aportan energía a las redes de distribución. Sin embargo, el viento tiene dos características que lo diferencian de otras fuentes energéticas: su imprevisible variabilidad y su dispersión. Ello obliga a sutiles perfeccionamientos en el diseño de las palas y el sistema de control que regula las revoluciones por minuto, para evitar velocidades excesivas durante los vendavales y orientar el rotor hacia la posición más favorable. La fuente de la energía eólica es el viento, en otras palabras, energía cinética que transporta aire en movimiento. El viento se origina por el desigual calentamiento de la superficie de nuestro planeta, originando movimientos convectivos de la masa atmosférica. La tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del sol, esta energía en lugares favorables puede ser del orden de 2000 kW/m² anuales, el 2% de ella se transforma en energía eólica con un valor capaz de dar una potencia de 10X10¹¹ Gigawatt [7].

1.4. Energía Geotérmica

La Geotérmica es la única forma de energía renovable que no depende del sol, teniendo su única fuente del calor en el interior de la Tierra. Es un recurso comparativamente difuso; la cantidad de calor existente en el interior de la Tierra es de 10²¹ J/año, muy pequeña si la comparamos con los 5.4X10²⁴ J/año de energía solar que calienta la Tierra. Existen, sin embargo, muchos lugares en la Tierra donde el flujo es lo suficientemente concentrado para su aprovechamiento en forma de vapor y agua caliente (180 a 250 °C), normalmente se encuentra en rocas a gran profundidad y puede explotarse para la generación de energía eléctrica.

Las técnicas para explotar este recurso, en principio son muy sencillas y análogas a las bien establecidas en la extracción del petróleo y gas natural. Se realizan una o más perforaciones en el recipiente, el agua caliente fluye en estado líquido o es bombeada hasta la superficie para alimentar turbinas de vapor convencionales o equipos de calefacción.

Evidentemente, el producto final más valioso es la electricidad, mucho más que el agua caliente. Así que la mayor parte de la atención se centra en los recursos capaces de generar energía eléctrica. Es decir, tratar de conseguir el suficiente calor que sea capaz de generar finalmente electricidad de forma barata. En el año 2000, se había alcanzado en el mundo una capacidad de producción de energía geotérmica de 8 GWe, una pequeña pero significativa contribución energética [6].

1.5. Energía Hidráulica

Como la mayor parte de las energías renovables la energía hidráulica es una forma de energía solar indirecta y ha realizado a lo largo de los tiempos, una contribución muy importante en el mundo de la energía. La Hidroeléctrica es una tecnología bien establecida, que proporciona cerca de la sexta parte de la electricidad mundial de forma fiable y a precios competitivos desde hace más de un siglo, suponiendo más del 90% de la electricidad suministrada por los renovables.

Los recursos hidroeléctricos como ocurre con la mayor parte de las energías renovables no son una cantidad infinita de energía almacenada sino un flujo de energía que va sumando año tras año nuevas cantidades adicionales de energía, esta energía proviene de lluvia o nieve que cae en las montañas. Normalmente se expresa en kWh/año o TWh/año [6].

En la actualidad, la energía hidráulica se utiliza fundamentalmente para producir electricidad en las denominadas centrales hidroeléctricas. El agua retenida, en un embalse o presa, se deja caer por una tubería, cuya salida se coloca una turbina, el eje de la cual comienza a girar al caer el agua; este giro pone en marcha el generador eléctrico obteniéndose así la electricidad. Una de las grandes ventajas de la producción de electricidad con energía hidráulica es que puede ser constante y previsible y por lo tanto, se puede utilizar para satisfacer la demanda eléctrica base. Las centrales hidroeléctricas se pueden situar junto al cauce de un río o al pie de una presa [8].

1.6. Biomasa

La energía del Sol es utilizada por las plantas para sintetizar la materia orgánica, materia que puede ser incorporada y transformada por los animales y por el hombre. El término biomasa abarca un conjunto muy heterogéneo y variado de materia orgánica y se emplea para denominar a una fuente de energía basada en la transformación de la materia orgánica utilizando normalmente un proceso de combustión.

Las fuentes de biomasa que se utilizan para la obtención de energía son:

- Biomasa natural: la biomasa natural constituye la base del consumo energético de muchos países en vías de desarrollo, pero su sobreexplotación está ocasionando aumento de la desertización.
- Biomasa residual: se produce en explotación agrícola forestal o ganaderas; también se generan residuos orgánicos en la industria y en núcleos urbanos, denominados en este caso como RSU (Residuos Sólidos Urbanos).
- Cultivos energéticos: en estos casos los terrenos y los agricultores no se dedican a producir alimentos sino a obtener cultivos que se aprovechan energéticamente. Entre otros, podemos distinguir los siguientes tipos:
 - ✓ Cultivos tradicionales: son los cultivos que normalmente se utilizan para la alimentación.
 - ✓ Cultivos no alimentarios: son cultivos que pueden plantarse en terrenos en los que es difícil cultivar productos tradicionales [8].

1.7. Situación Energética en México

México sigue dependiendo de los derivados del petróleo para satisfacer su demanda energética. La producción de energía primaria es mayoritariamente por medio de hidrocarburos, con el 87.2% del total en 2015, de los cuales el 61.34% los constituye el petróleo crudo y el 24.66% gas natural [9]. Sin embargo, aunque México es un país petrolero, al ritmo actual de explotación y de acuerdo a las reservas probadas de petróleo,

según Petróleos Mexicanos (PEMEX), se estima que este recurso podría agotarse para el año 2025 [10]. Esta situación muestra la necesidad de que se implemente en el país programas para desarrollar las energías alternativas, ya que es imperativo buscar opciones que permitan traspasar el predominio de los hidrocarburos hacia las fuentes renovables de energía [2].

Energía Solar

En 2011, la capacidad total instalada de sistemas fotovoltaicos fue de 32 MW, principalmente en electrificación rural, suministro de energía en el sector residencial, bombeo de agua, en los sectores comercial e industrial (p. e. iluminación de exteriores, alimentación de sistemas de emergencia, etc.) [11].

A partir de la publicación de los instrumentos regulatorios que facilitan la interconexión de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, la CFE registró una capacidad adicional instalada de estos sistemas en pequeña y mediana escala por 3.48 MW, en el periodo 2010-2011. Considerando el crecimiento de la capacidad de generación eléctrica por este tipo de sistemas interconectados a la red, principalmente en el sector residencial y de servicios, su crecimiento fue del 763% (1.34 MW) en el año 2010 y 128% (1.95 MW) en 2011. Por otro lado, la capacidad de generación eléctrica por sistemas fotovoltaicos aislados de la red fue de 0.2 MW (5.71%); se estima que el factor de planta promedio fue de 0.207 [11].

México se localiza geográficamente entre los 14° y 33° de latitud septentrional. Esta característica resulta ideal para el aprovechamiento de la energía solar, pues la irradiación global media diaria en el territorio nacional, es de alrededor de 5.5 KWh/m²/d, siendo uno de los países con mayor potencial en aprovechamiento de la energía solar en el mundo. La irradiación promedio diaria cambia a lo largo de la república y depende también del mes en cuestión, descendiendo ligeramente por debajo de 3 KWh/m² y pudiendo alcanzar valores superiores a 8 KWh/m² [11].

Energía Eólica

Con relación a la capacidad de generación eoloeléctrica para el servicio público, la CFE tuvo en operación, a finales de 2011, las centrales de La Venta en Oaxaca (84.7 MW), Guerrero Negro en Baja California Sur (0.6MW) y el generador de la COP 16 (1.5 MW), lo que suma una capacidad total de generación de 86.8 MW [11].

Por su parte, al 31 de diciembre de 2011, la CRE (Comisión Reguladora de Energía) había otorgado 27 permisos para la generación eoloeléctrica en las modalidades de autoabastecimiento, exportación, pequeña producción y productor independiente de energía. De estos permisos, sólo siete corresponden a plantas que entraron en operación en 2011, ubicadas en los estados de Baja California y Oaxaca, con una capacidad autorizada total de 588.3 MW y una generación autorizada anual 2,063.59 GWh/año. En 2012 entraron en operación 3 plantas en la modalidad de productor independiente de energía, ubicadas en el estado de Oaxaca. A su vez, 17 plantas con 2,281.0 MW de capacidad autorizada, ubicadas en los estados de Baja California, Nuevo León, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz, se encuentran en construcción o por iniciar obras [11].

Prácticamente, la totalidad de los proyectos en desarrollo en el estado de Oaxaca se originaron en un primer ejercicio de temporada abierta, lo que permitió la planeación y desarrollo de nueva infraestructura de transmisión para el aprovechamiento del recurso eólico en el Istmo de Tehuantepec. A pesar de que la línea de transmisión ya está en

operación, diversos proyectos fueron afectados por la crisis mundial que redujo las alternativas de financiamiento desde el año 2009 [11].

En México, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) lleva a cabo estudios para estimar el potencial eoloenergético nacional. Estos estudios se basan en el supuesto de que sólo el 10% del área total con potencial es aprovechable para la instalación de parques eólicos. Esto debido a factores orográficos, ambientales, sociales y de factibilidad técnica y económica. Como resultado, el potencial energético del recurso eólico estimado en el país es del orden de 71 mil MW, considerando factores de planta superiores a 20%. Para factores de planta mayores que 30%, se estima un potencial de 11,000 MW y con más de 35% de factor de planta se estima en 5,235 MW. Este último potencial representa los proyectos de inversión más atractivos; sin embargo, en las condiciones que rigen actualmente el mercado nacional de electricidad, los proyectos con factores de planta inferiores al 30% resultan económicamente factibles en ciertos nichos de oportunidad [11].

Energía Geotérmica

De acuerdo con datos de la CFE, al 31 de diciembre de 2011 se encontraban en operación 38 unidades de generación geotermoeléctrica, con el mayor aprovechamiento localizado cerca de Mexicali, Baja California, en la central de Cerro Prieto con 645 MW. Ésta representaba el 72% de la capacidad geotermoeléctrica en operación, mientras que el 28% restante estaba integrado por los Azufres, Michoacán (191.6 MW), Humeros, Puebla (40 MW) y Tres Vírgenes, Baja California Sur (10 MW) [11].

De acuerdo con estudios preliminares, en el país existen reservas de aprovechamiento geotérmico equivalentes a 10,644 MWe distribuidas de la siguiente manera [11]:

- **Reservas probadas**, aquellas reservas de yacimientos conocidas que, de acuerdo con el análisis de geología e ingeniería, se estima con “razonable certeza”, recuperables comercialmente en las condiciones económicas y métodos de operación actuales; en este caso el potencial estimado es de 1,144 MWe e incluye a Cerro Prieto, Baja California, Los Azufres, Michoacán, Los Humeros, Puebla y Cerritos Colorados, Jalisco.
- **Reservas probables**, aquellas donde el análisis geológico y de ingeniería de yacimientos, incorporado a un análisis probabilístico (Montecarlo) del método volumétrico, indica que hay una probabilidad de, al menos, 50% de que las cantidades por recuperar sean iguales o mayores que la suma de las reservas probadas y reservas probables; en este caso, el potencial estimado para estas reservas es de 2,077 MWe distribuido en las siguientes localidades: La Primavera, San Marcos y Los Hervores en el estado de Jalisco; zonas cercanas a Los Humeros en Puebla; Araró, Ixtlán y San Agustín, en Michoacán; y San Bartolomé y Puroaguita en Guanajuato.
- **Reservas posibles**, aquellas que, por sus volúmenes, situación geológica y de diseño son de recuperación comercial menos segura que las reservas probables. De acuerdo con esta definición, cuando son utilizados métodos probabilísticos la suma de las reservas probadas, probables y posibles, tendrá al menos una probabilidad del 10% de que las cantidades realmente recuperadas sean iguales o mayores. Para este tipo de reservas el potencial estimado es de 7,423 MWe. Análisis realizados recientemente aplicando un modelo volumétrico con simulación Montecarlo, indican que el potencial de recursos hidrotermales susceptibles de ser explotados mediante plantas de condensación y plantas de ciclo binario se

encuentra entre 887 y 948 MWe. Por su parte, la CFE ha identificado proyectos geotermoeléctricos en etapa de estudio por una capacidad de 434.1MW.

De acuerdo con el estudio elaborado por la consultora PWC para el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, en donde participaron los principales actores del sector por parte de instituciones públicas, privadas y la academia, se partió de la base de un potencial de geotermia de 10,000 MW a nivel nacional, proveniente de la información y tecnologías vigentes. Además, se consensó que existe un objetivo alcanzable de 2,200 MW geotermoeléctricos que pudieran ser desarrollados en el país hacia el 2020 dados los escenarios de precios de gas natural vigentes y la evolución esperada de la tecnología. A partir de este potencial, se cuantificó que se podría tener un impacto en el PIB estimado en 95.4 miles de millones de pesos, 117.3 miles de millones de pesos de inversión con un 65% de contenido local e ingresos tributarios por 8 mil millones de pesos. Dicha capacidad permitiría también reducir hasta en un 13% las importaciones diarias de gas natural hacia el 2020 con energía firme, capturar un 14% de las emisiones evitadas de CO₂ estimadas para el mismo periodo y generar hasta 36,700 empleos directos e indirectos en los sectores involucrados de la industria nacional. Otros de los impactos esperados de dicha penetración serían el desarrollo de la industria local con gran potencial de exportaciones de alto nivel agregado y el desarrollo consecuente de las regiones donde se ubica dicho recurso renovable en el país [11].

Energía Hidráulica

La capacidad de generación hidráulica para servicio público, que opera la CFE en centrales con una capacidad igual o menor que 30 MW, se integra por 94 unidades en 42 centrales, con una capacidad total de 286.6 MW. Esta capacidad instalada para la generación eléctrica por medio de, mini y micro hidroeléctricas (menores a 30 MW) se concentra en 14 estados de la República. Se destaca la existencia de plantas instaladas hace ya más de cien años, las cuales siguen en servicio, como es el caso de las ubicadas en los estados de Hidalgo, México y Puebla [11].

En lo que corresponde a plantas hidráulicas que no son de servicio público, la CRE otorgó 27 permisos de generación al 31 de diciembre de 2011 con una capacidad de 305.1 MW, las cuales están situadas en nueve estados de la República. De estas plantas, 24 tienen permiso para autoabastecimiento y 3 de pequeña producción, pero sólo 16 plantas se encuentran en operación con una capacidad de 147.0 MW, para una generación autorizada anual de 774 GWh/año [11].

Dentro de la evaluación integral realizada por la CFE, respecto del potencial hidroeléctrico en México, no se contempla el potencial de la pequeñas, mini y micro hidroeléctricas. Esto se debe a que los potenciales estimados por CFE corresponden a proyectos con una capacidad de generación mayor a los 40 GWh/año. Sin embargo, existen algunos estudios que permiten conocer los potenciales regionales, e identificar de manera general el potencial dichas escalas de proyecto en el país. Investigaciones llevadas a cabo por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, antes Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, CONAE) identificaron, en la sierra norte de Puebla y Veracruz, un potencial estimado de 364 MW de potencia media y 61 MW de potencia instalada, con una generación media anual de más de 3,526.1 GWh/año [11].

Biomasa

Al 31 de diciembre de 2011, la CRE tenía registrados 50 permisos de generación eléctrica bajo las modalidades de autoabastecimiento, cogeneración y usos propios continuos en

ingenios azucareros, de los cuales 49 permisos iniciaron operación con una capacidad autorizada de 461.1 MW, y una generación anual de 852.3 GWh/año. Asimismo, se tiene registrado un proyecto en construcción al cierre del año con una capacidad de 35.3 MW, con una generación de 117.3 GWh/año. De la capacidad autorizada, 94% está destinado al autoabastecimiento y usos propios continuos, el resto se genera bajo la modalidad de cogeneración [11].

Por otro lado, existen 3 permisionarios de autoabastecimiento, cogeneración y usos propios continuos en operación en el sector papelerero y otras industrias, con una capacidad autorizada de 71.5 MW y una producción anual de 217.4 GWh/año. En el caso de la industria química, se encuentra en construcción un proyecto que aprovechará el bagazo de caña con una capacidad de 8 MW y será destinado a satisfacer parte de la demanda de una empresa del ramo [11].

Actualmente no se dispone de datos acerca de capacidad instalada de generación a partir de residuos forestales. Sin embargo, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) llevó a cabo estudios que arrojan datos, que sirven como punto de referencia para el desarrollo de información en la materia en México, así como para el planteamiento de nuevos proyectos de generación de energía a partir de biomasa forestal. Estos datos se presentan en el apartado de potencial de generación [11].

El biogás se produce naturalmente como resultado de la descomposición de la materia orgánica. Sus principales fuentes son los residuos, ya sean urbanos o ganaderos, y las aguas municipales e industriales [11].

El biogás proveniente de los residuos orgánicos tiene una composición aproximada del 50% de metano y el otro 50% de CO₂ y otros gases, existiendo la posibilidad técnica de convertirlos en electricidad. La generación de residuos sólidos urbanos en México va incrementándose en promedio de 2.3% anual. Para el 2010, aproximadamente el 52.4% de los residuos sólidos urbanos es materia orgánica [11].

La CRE otorgó al cierre de 2011, diez permisos para generar energía eléctrica con biogás, seis de ellos en la modalidad de autoabastecimiento en los estados de Aguascalientes, Chihuahua, Guanajuato y Nuevo León, y cuatro en la modalidad de cogeneración en Jalisco, Nuevo León, Estado de México y Querétaro. En conjunto representan una capacidad autorizada de 44.76 MW y una producción de 269 GWh/año [11].

El 20 de mayo del 2011 fue inaugurada una de estas plantas en el relleno sanitario de Ciudad Juárez, Chihuahua, misma que cuenta con una capacidad autorizada de 6.4 MW, y una producción de 39.2 GWh/año. En ese contexto, podemos afirmar que existe un alto potencial de producción de biogás en el país a partir de los rellenos sanitarios, el cual aún no se aprovecha [11].

Por otra parte, en México la generación de energía recae directamente en CFE, quien en términos generales es la encargada de realizar la generación, distribución y venta de la energía eléctrica. En la Figura 1.1, se presenta la capacidad instalada de generación de energía eléctrica por tipo de fuente en el año 2013.

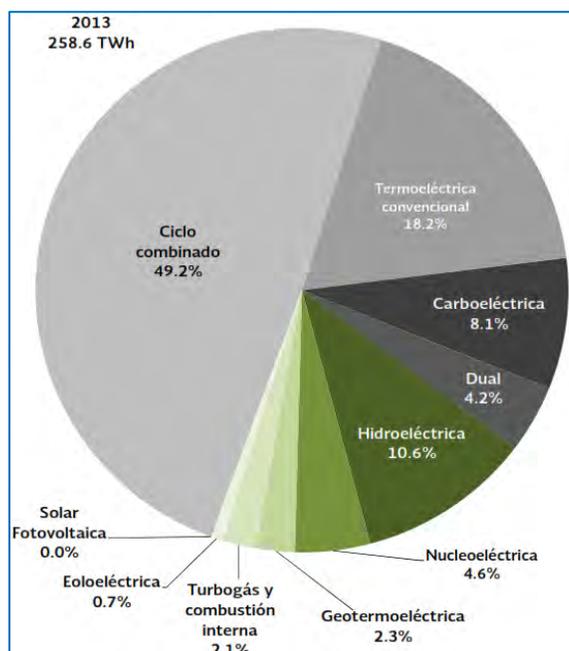


Figura 1. 1. Capacidad instalada de generación de energía eléctrica por tipo de fuente, 2013 (GWh), [12].

El 81.9% de la energía eléctrica producida en el país depende de los combustibles de origen fósil. La Figura 1.2, permite apreciar cómo un lapso de 10 años ha representado un cambio marcado, en las fuentes de energía utilizadas para generar energía eléctrica en la nación.

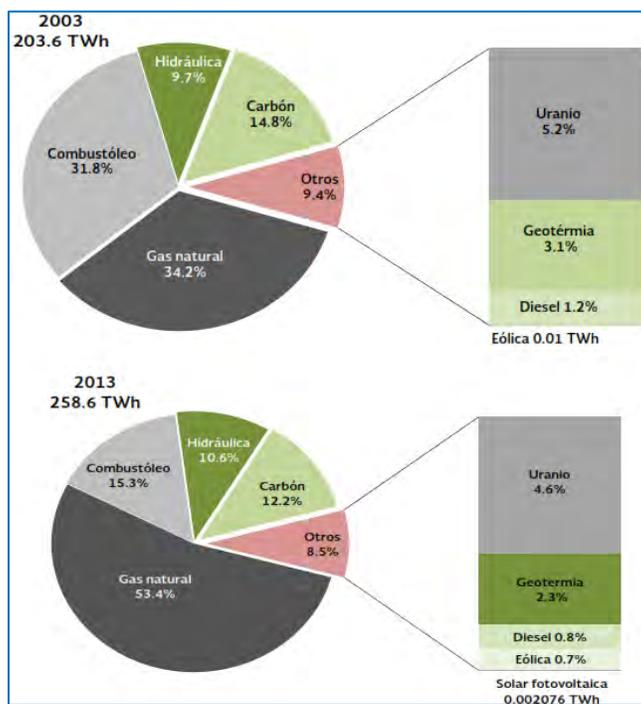


Figura 1. 2. Generación de energía eléctrica por fuente de energía utilizada, 2003 y 2013 (TWh y participación porcentual), [12].

CAPÍTULO II – HIDRÓGENO, VECTOR ENERGÉTICO

El hidrógeno fue descubierto por el científico británico Henry Cavendish, en 1776, quien informo 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 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” [13].

El hidrógeno es el elemento más ligero, con una masa atómica de 1,00794 u, y es también, el elemento más abundante, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia visible del universo. A nivel del mar, un pie cúbico de hidrógeno (H_2) pesa tan sólo 2.55 gramos. Tiene el número atómico 1 en la tabla periódica de los elementos. La mayoría de los átomos del hidrógeno están unidos con otros átomos de carbono y/o oxígeno, si queremos tener solo átomos de hidrógeno tendremos que separarlos y para ello necesitaremos gran cantidad de energía [14].

El hidrógeno tiene un alto contenido energético, su combustión u oxidación electroquímica genera energía útil y sus subproductos son únicamente calor y agua. Generalmente se encuentra en combinación con otros elementos, en hidrocarburos, en algunos minerales como la arcilla, en compuestos orgánicos como las plantas y en materiales de origen animal, muy difícilmente se encuentra libre en la naturaleza. La producción del hidrógeno como combustible contribuye a la reducción de la energía relacionada con el impacto ambiental, que es el caso actual de los combustibles fósiles. El hidrógeno se genera de diversas formas; separándolo de los hidrocarburos, a lo que se llama reformación de hidrocarburos (como la del gas natural), también a partir de la biomasa, de las aguas negras, de los residuos sólidos que lo contengan, de llantas, desechos del petróleo, por medio de una corriente eléctrica que separa los componentes del agua (electrólisis) y por fotólisis. Actualmente se pretende usar energías renovables con el fin de promover economías sustentables para solucionar los problemas de contaminación y de efecto invernadero. La utilización de estas fuentes de energía para la producción de hidrógeno son las más adecuadas ya que actualmente se depende del monopolio de los combustibles fósiles (que están próximos a agotarse) [14].

2.1. Propiedades del Hidrógeno

El hidrógeno se puede presentar en dos estados: gaseoso y líquido. En estado gaseoso es más ligero que el aire y se disipa rápidamente (3.8 veces más rápido que el gas natural) aproximadamente a 20 m/s [15]. El hidrógeno gaseoso es inflamable y volátil. Es inflamable en un rango más amplio que en los vapores de Nafta o gas natural pero debido a su bajo peso específico se disipa más rápidamente que cualquiera de estos combustibles ante una fuga. El hidrógeno como otros gases, debe usarse en áreas que puedan ventilarse fácilmente [16].

El hidrógeno no es tóxico ni venenoso, no contamina el agua, los mantos freáticos, ni el aire. Bajo condiciones atmosféricas estándar (20 °C y 1 atm), se presenta en estado gaseoso. Sin embargo, las condiciones normales son llamadas NTP (Normal Temperature and Pressure) y se consideran a 0 °C y 1 atm [15].

En el caso del hidrógeno líquido, como cualquier líquido criogénico (se licua por debajo de los -252 °C), puede causar graves quemaduras si entra en contacto con la piel. Por tal motivo, el manejo de hidrógeno criogénico requiere el uso de tanques extra reforzados y

perfectamente aislados de doble pared, donde en situaciones de fuga, la primera reacción que sufre el hidrógeno es gasificarse, lo cual disminuye, en cierta medida, las lesiones por contacto [14].

Tabla 2. 1. Propiedades del hidrógeno.

Propiedad		Valor
Densidad		0.0899 kg/Nm ³ (gas) 0.0708 kg/Nm ³ (liquido)
Poder Calorífico	Inferior	120 MJ/kg
	Superior	141.86 MJ/kg
Límite de explosión		4.0-75.0 % (concentración de H ₂ en aire)
Límite de detonación		18.3-59.0 % (concentración de H ₂ en aire)
Capacidad calorífica específica		C _p =14.199 kJ/(kg·K) C _v =10.074 kJ/(kg·K)
Coeficiente de difusión:		0.61 cm ² /s

Fuente: [17].

Tabla 2. 2. Factor de compresibilidad del hidrógeno.

Propiedad	Valores							
Presión (Bar)	1	50	100	150	200	250	300	350
Factor de compresión	1	1.032	1.065	1.089	1.132	1.166	1.201	1.236
Presión (Bar)	400	500	600	700	800	900	1000	
Factor de compresión	1.272	1.344	1.416	1.489	1.560	1.632	1.702	

Fuente: [17].

Tabla 2. 3. Equivalencia hidrógeno-energía

Masa H ₂ (kg)	↔	H ₂ gas (Nm ³)	< >	H ₂ líquido ¹ (litros)	< >	Energía ² (MJ)	< >	Energía ² (kW·h)
1	=	11.12	=	14.12	=	120	=	33.33
0.0899	=	1	=	1.270	=	10.8	=	3.00
0.0708	=	0.788	=	1	=	8.495	=	2.359
0.00833	=	0.0926	=	0.1177	=	1	=	0.278
0.0300	=	0.333	=	0.424	=	3.6	=	1

Fuente: [17].

En las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se observan las propiedades químicas y físicas del hidrógeno, el cual es el elemento químico más simple. Está formado por un núcleo de carga positiva y un electrón. En condiciones normales de presión y temperatura es un gas incoloro, inodoro

e insípido y altamente inflamable. Un 1 kg de H₂ equivale aproximadamente 2,78 kg de gasolina, a 2,80 kg de gasóleo, a 2,40 kg de metano, entre 2,54 y 3,14 kg de gas natural (dependiendo de la composición del GN), a 2,59 kg de propano, a 2,62 kg de butano, a 6,09 kg de metanol. 1 litro de H₂ líquido equivale aproximadamente a 0,268 litros de gasolina, a 0,236 litros de gasóleo, a 0,431 litros de metanol. En presencia de oxígeno puede convertirse en agua, liberando calor y trabajo útil, por lo que es especialmente atractivo para utilizarse como combustible.

2.2. Uso del Hidrógeno

Las principales aplicaciones industriales actuales del hidrógeno son, el refinado de combustibles fósiles, producción de metanol, producción de diésel bajo en azufres y la producción de amoníaco (usado principalmente para fertilizantes). Además, existen otras aplicaciones como en procesos alimenticios. Para la producción de vidrio, acero, medicamentos, resinas, fibras sintéticas y componentes electrónicos [18].

Durante años el hidrógeno, en su estado líquido, se ha usado como combustible en los vehículos espaciales. Tiene una energía de la combustión alta por unidad de peso, con lo que comparado con cualquier otro combustible lo hace muy eficaz y atractivo para su uso. Puede ser distribuido por cañerías, camiones, trenes y buques-tanques y en recipientes portátiles. Sus propiedades de combustión deben de tomarse con la misma cautela que en el caso de cualquier combustible [16].

2.3. La Economía del Hidrógeno

Hoy en día, la utilización del hidrógeno como combustible se limita a proyectos demostrativos y prototipos experimentales, principalmente a desarrollos de carros que funcionen con hidrógeno. Sin embargo, ante la creciente evidencia de la gravedad de la contaminación ambiental y la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, varios países han implementado, programas destinados a la investigación y desarrollo de tecnología para aprovechar el potencial del hidrógeno, con miras a su utilización masiva en un futuro cercano [2].

La economía del hidrógeno es una economía hipotética en la cual el hidrógeno es un medio de transporte de energía y no una fuente primaria de energía como lo son la energía atómica, el petróleo, el carbón o el gas natural. La propuesta de una economía de hidrógeno tiene el propósito de resolver el efecto invernadero generado por el uso de combustibles fósiles en el transporte y otras aplicaciones donde se libera CO₂ a la atmósfera.

En esta economía, el hidrógeno sería manufacturado a través de alguna fuente primaria de energía y usado como reemplazo de los combustibles fósiles usados para el transporte. El hidrógeno sería utilizado como combustibles en celdas de combustibles, ya que estas pueden lograr eficiencias de entre un 45% y un 50% en aplicaciones móviles (automoviles, autobuses, etc.) y entre 60% y 70% en aplicaciones fijas (generadores de potencia eléctrica) [19].

Así el término responde a una a una visión de futuro donde este gas, generado de forma limpia y económica, serviría para alimentar el grueso de las necesidades energéticas de la sociedad. Estas propuestas reducirían la dependencia actual a los combustibles fósiles, ya que el hidrógeno podría ser generado a partir de otras fuentes primarias como las renovables o la nuclear llevando a una mayor independencia y autonomía energética de las diferentes regiones del mundo y una mayor equidad. Igualmente, se disminuiría la contaminación atmosférica y la emisión de gases de efecto invernadero, puesto que el único residuo generado por una celda de combustible es el vapor de agua [14].

Se prevee que en el futuro el hidrógeno sea utilizado como vector energético en tres principales aplicaciones [2]:

1. En dispositivos portátiles, por medio de celdas de combustibles para proporcionar la energía necesaria para hacer funcionar celulares, computadoras y diversos aparatos electrónicos como juegos de videos, cámaras, entre otros.
2. Para generación de potencia estacionaria, que incluye plantas de potencia para villas y pueblos, estaciones de telecomunicaciones, etc. Puede ser quemado mezclado con gas natural en turbinas y máquinas reciprocantes para proveer de electricidad y calor a edificios, oficinas y fábricas, ó utilizarse en celdas de combustible para suministrar energía a las casas-habitación.
3. Tal vez la aplicación más importante del hidrógeno será como combustible en automóviles y transporte público.

2.4. Tecnología del Hidrógeno

Los principales elementos que contemplan la tecnología de hidrógeno son [14]: producción, almacenamiento, distribución y aplicaciones tecnológicas. Estos elementos básicos en conjunto y su estrecha relación forman el concepto de la **Tecnología del Hidrógeno**.

Un diseño efectivo de la implementación de los sistemas de energía basado en el hidrógeno requiere un enfoque de un “sistema integrado”, para no romper la compleja dependencia entre los diversos componentes del sistema; producción, almacenamiento, distribución y aplicación final. Estos aspectos determinarán cuales son los asuntos que deberán recibir prioridad y especial atención [20].

Todos los segmentos individuales de la tecnología del hidrógeno, así como el sistema integrado de la economía del hidrógeno involucran muchos retos intersectoriales. Estos retos incluyen la seguridad, construir las relaciones gobierno-industria para la demostración y comercialización de la tecnología, mantener fuertes programas de investigación y desarrollo en las áreas de ciencias y tecnología, e implementar políticas públicas efectivas [20].

También existe la necesidad de crear una enorme infraestructura de distribución para soportar el desarrollo esperado de la producción, almacenamiento y aplicación del hidrógeno. Los esfuerzos iniciales deberán estar enfocados sobre el desarrollo de mejores componentes de los existentes sistemas de distribución, como sensores de hidrógeno, materiales para las líneas de distribución, compresores, mangueras de alta presión. Los problemas de costos, seguridad y confiabilidad deberán influir en la planeación, diseño y desarrollo de las centrales de producción y los sistemas de distribución, es decir los componentes de la infraestructura de producción y suministro deberán también estar relacionados con las aplicaciones de uso final del hidrógeno, estaciones de abastecimiento y parques de producción.

El almacenamiento del hidrógeno es un punto clave en el desarrollo de la tecnología de hidrógeno. La coordinación del gobierno y la industria deberán enfocar los esfuerzos sobre la reducción de costos, el mejoramiento de las tecnologías comerciales existentes y el desarrollo de materiales avanzados, incluyendo la compresión del hidrógeno gaseoso y líquido, así como la exploración de las tecnologías de almacenamiento que involucran los materiales avanzados como son los hidruros metálicos de peso ligero y nanotubos de carbono [20].

Finalmente se deberá desarrollar el plan de tal forma que los consumidores puedan utilizar el hidrogeno como fuente de energía ya sea para transportación, energía eléctrica o para

cualquier otra aplicación tecnológica que se logre desarrollar. Los problemas de costo y desempeño asociados a los sistemas de energía del hidrógeno deberán ser tratados en conjunto con la conciencia y aceptación del cliente. Los puntos clave de las demandas del cliente incluyen, seguridad, accesibilidad y amigabilidad con el ambiente [20].

2.5. Producción del Hidrógeno

Una de las áreas más importantes para favorecer a la economía del hidrógeno es, la dedicada a la producción de éste. En la actualidad existen varias técnicas de producción, algunas de estas son tecnologías maduras que se utilizan ampliamente y otras todavía están en proceso de desarrollo y experimentación [2].

El hidrógeno puede ser producido por una variedad de fuentes, incluyendo combustibles fósiles como el gas natural, carbón o fuentes de energías renovables (biomasa, solar, eólica, hidroeléctrica). Hay una gran variedad de procesos tecnológicos que se pueden utilizar en la producción de hidrógeno: químico, biológico, electrolítico, fotoelectrolítico, termoquímico. El grado de desarrollo para cada tecnología de producción es diferente, y cada una ofrece diferentes oportunidades y beneficios.

2.5.1. Métodos de Producción de Hidrógeno a Partir de Combustibles Fósiles.

Los métodos para la obtención de hidrógeno mediante combustible fósiles se realizan mediante procesos químicos del gas natural y/o carbón [14].

El hidrógeno se puede producir a partir de gas natural por tres procesos químicos diferentes: el reformado de vapor, la oxidación parcial de gas natural y el reformado autotérmico [14].

2.5.2. Reformado de Vapor

Según Quiñones [2], el gas natural contiene metano, que puede ser usado para producir hidrógeno por medio de procesos térmicos, como el reformado de vapor de gas metano y la oxidación parcial.

El reformado de vapor de gas metano en un proceso catalítico que consiste en hacer reaccionar el gas natural (u otros hidrocarburos ligeros) con vapor a presiones de entre 3-25 bar para producir una mezcla de hidrógeno, CO y CO₂. Luego, se hacen reaccionar el CO y el vapor para producir CO₂ y más hidrógeno. Por último, el CO₂ y otras impurezas son removidas, quedando prácticamente hidrógeno puro. La materia prima más utilizada es el gas natural, pero pueden ser utilizados otros combustibles como etanol, propano o incluso gasolina.

Actualmente ésta técnica es la manera más barata y común de producir hidrógeno, con costos en un rango aproximado de entre 2-3.6 USD/kg en grandes centrales, hasta más de 6 USD/kg en plantas pequeñas. Las diferencias en los costos se deben principalmente a la volatilidad en los precios del gas natural, que es la fuente primaria más importante en este Método.

2.5.3. Oxidación Parcial

Según Quiñones [2], en la oxidación parcial, el metano y otros hidrocarburos presentes en el gas natural reaccionan con cierta cantidad de oxígeno, que no es suficiente para llevar a cabo la oxidación completa de los hidrocarburos en CO₂ y agua. Como resultado, la reacción forma principalmente hidrógeno y monóxido de carbono, y pequeñas cantidades de dióxido de carbono y otros compuestos. Posteriormente, el monóxido de carbono reacciona con el agua para formar dióxido de carbono y más hidrógeno. La oxidación parcial

produce menos hidrógeno por unidad de materia prima suministrada que el reformado de gas metano.

2.5.4. Reformado Autotérmico

El reformado autotérmico incluye etapas del reformado con vapor de agua y de la oxidación parcial, y se utiliza con algunos hidrocarburos pesados. Después de la etapa de reformado, se necesita purificar el gas resultante para eliminar el CO₂, el CO y otros subproductos no deseados. La complejidad del proceso de purificación depende de la técnica de reformado utilizada y de la aplicación final de hidrógeno producido.

2.5.5. Gasificación de la Biomasa

En el proceso de conversión de biomasa, el hidrógeno se produce de manera similar que a partir de carbón por gasificación [14].

Se denomina gasificación de biomasa a un conjunto de reacciones termoquímicas que se produce en un ambiente pobre en oxígeno, y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente acondicionados [21].

En el proceso de gasificación, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso en monóxido de carbono e hidrógeno. Esta mezcla de gases, llamada gas de síntesis o “syngas”, tiene un poder calorífico inferior (PCI) equivalente a la sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural, cuando se emplea aire como agente gasificante. El agente gasificante es un gas, o mezcla de ellos, que aporta calor para iniciar las reacciones y oxígeno [21].

El hidrógeno se produce haciendo reaccionar la materia prima con oxígeno y vapor a altas temperaturas y presiones para formar gas de síntesis, una mezcla de monóxido de carbono e hidrogeno principalmente. Luego se remueven las impurezas del gas de síntesis, y el monóxido de carbono de la mezcla se hace reaccionar con vapor para obtener más hidrógeno y dióxido de carbono [2]. El hidrógeno se separa de la mezcla y el dióxido de carbono puede ser recolectado y secuestrado, de tal manera que las emisiones de este gas sean muy pequeñas [2].

2.5.6. Fotoelectrólisis

Los sistemas fotovoltaicos ofrecen una mayor flexibilidad, produciendo energía desde las celdas fotovoltaicas e hidrógeno desde el electrolizador. La fotoelectrólisis directa representa una alternativa avanzada a la anterior, uniendo los dos sistemas en un solo dispositivo [14].

En la separación electroquímica, en lugar de producir electrones el semiconductor usa la energía del sol para disociar directamente la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno. Este es un proceso limpio que no genera gases contaminantes, pero al igual que la hidrólisis aún está en desarrollo, pero se espera que en el largo plazo sea un método importante de producción en plantas grandes y medianas [2].

2.5.7. Producción Fotobiológica

La producción biológica de hidrógeno es energéticamente más eficiente y ambientalmente más amigable que la producción electroquímica y termoquímica. De manera natural, muchos son los microorganismos, fotosintéticos y fermentadores, que tienen la capacidad de producir hidrógeno. Las nitrogenasas y hidrogenasas son las enzimas responsables de dicha producción [22]. Las algas y bacterias fotosintéticas son capaces de producir

hidrógeno bajo determinadas condiciones, los pigmentos en las algas absorben la energía del sol y las enzimas de la célula actúan como catalizadores para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno [23].

Los rendimientos hasta ahora alcanzados son de alrededor de 5 moles de H_2 por kg de clorofila por hora a un costo de aproximadamente 200 dólares por kg de hidrógeno. Con la manipulación genética de las cianobacterias se ha mejorado la generación de hidrógeno. Además de las condiciones y sistemas de cultivo, es necesario hacer estudios de ingeniería para poder encontrar un sistema económicamente viable de producción de hidrógeno [22].

2.5.8 Producción de Hidrógeno Mediante Electrólisis del Agua

La disociación por electrólisis del agua es conocida desde la primera revolución industrial. En 1800, Nicholson y Carlisle descubrieron este proceso en electrolitos ácidos, y ya hasta 1902 se contaban 400 electrolizadores industriales en todo el mundo. La primera planta electrolizadora de agua de alta capacidad (10000 Nm³ de H₂/h) data de 1939, y en 1948 la primera planta presurizada de Zdansky/Lonza comenzó a funcionar. Los primeros sistemas de polímeros fueron construidos en 1966, y a principios de la década de los 70's aparecieron los electrolizadores de óxidos sólidos y alcalinos avanzados [16].

La electrólisis es el proceso en el cual la molécula del agua o de un electrolito que se encuentra en una solución conductora se separa o fragmenta en hidrógeno y oxígeno a través de la aplicación de la energía eléctrica proveniente de una fuente externa a través de electrodos llamados cátodo y ánodo [14].

Según Quiñones [2], existen dos tipos de electrolizadores comercialmente disponibles en la actualidad y la diferencia entre ellos radica en el tipo de electrolito utilizado:

- Los electrolizadores alcalinos funcionan con un electrolítico líquido, que generalmente es una solución acuosa de hidróxido de potasio, hidróxido de sodio o cloruro de sodio. El agua reacciona en el ánodo formando oxígeno e iones positivos de hidrógeno (protones), los electrones sueltos se hacen circular por un círculo externo, y el electrolito permite el movimiento de los protones hacia el cátodo, en donde se combinan para formar el hidrógeno. De acuerdo con el acomodo de los electrodos los electrolizadores alcalinos pueden ser de placas unipolares o bipolares. Han estado en el mercado por muchos años y son una tecnología probada. La Figura 2.1, muestra el esquema de un electrolizador alcalino.

En el caso de electrolitos alcalino, su reacción más simple se puede representar por [13]:



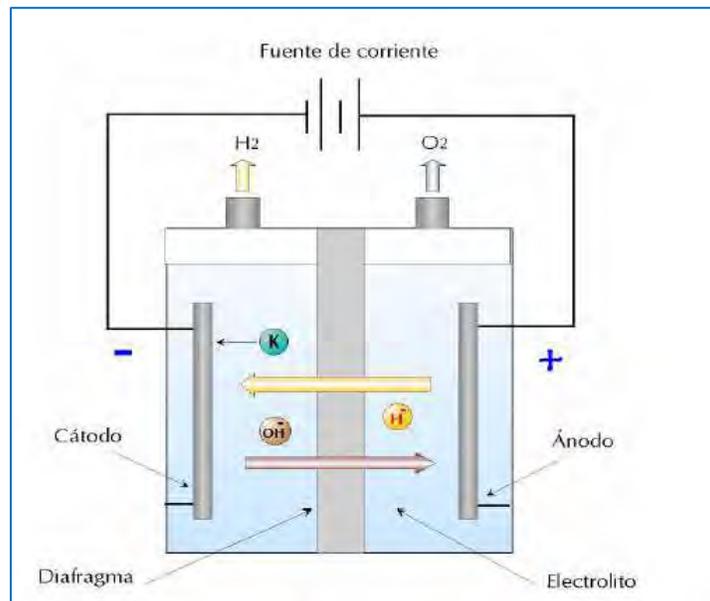


Figura 2. 1. Esquema de un electrolizador alcalino con electrodos metálicos y en solución electrolítica de hidróxido de potasio (KOH) [16].

- Electrolizadores tipo PEM (Proton Exchange Membrane), una membrana polimérica sólida cumple la función de electrolítico y su funcionamiento es muy similar a los electrolizadores alcalinos. Operan a temperaturas menos en comparación a estos últimos, típicamente entre 80 – 100 °C y, tienen la ventaja de poder mantener una presión diferencial entre el ánodo y el cátodo, permitiendo de esta forma tener una presión relativamente elevada en el hidrogeno a la salida, con lo que puede reducirse o eliminarse las etapas de compresión de su almacenamiento.

Los electrolizadores PEM, son una tecnología relativamente reciente y aunque ya se encuentran unidades disponibles comercialmente, su costo aún es elevado en comparación con los alcalinos. Se espera que el mejoramiento en su diseño y el desarrollo de nuevos materiales, principalmente en la membrana separadora y los electrodos puedan disminuir sus costos sensiblemente en los próximos años y hacerlos económicamente competitivos. En la Figura 2.2, se presenta el esquema de un electrolizador PEM.

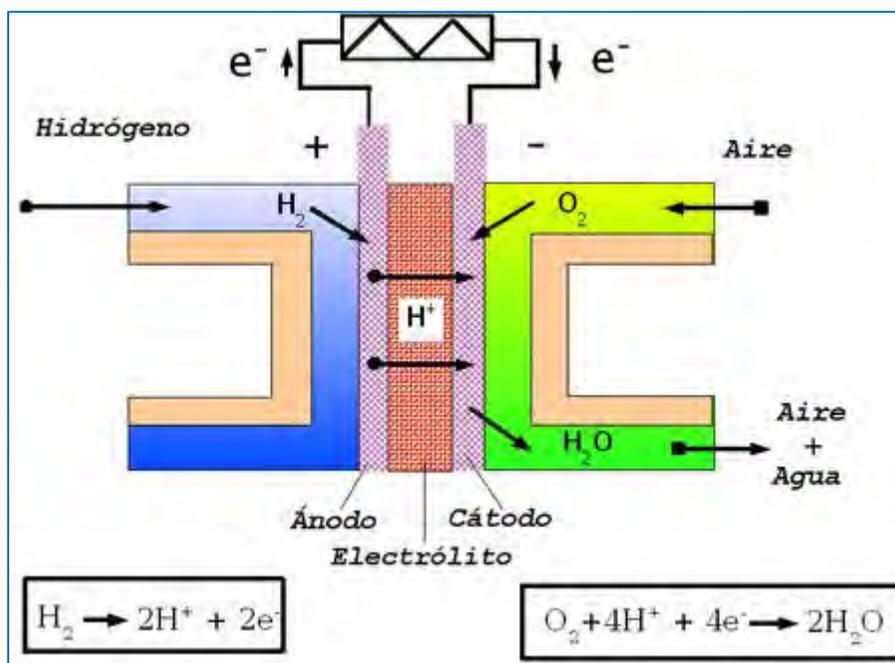


Figura 2. 2. Esquema de un electrolizador tipo PEM [24].

2.5.9. Electrólisis con Fuentes Alternas de Energía

La electrólisis puede adaptarse a diferentes tecnologías de generación de energías alternas, como lo son la energía hidráulica, energía solar, energía eólica, etc. Mediante la utilización de celdas fotovoltaicas, aerogeneradores e hidroeléctricas, así evitando contaminantes en el ciclo de producción del hidrógeno ya que las energías renovables son consideradas libres de emisiones de contaminantes.

La idea de producir hidrógeno por electrólisis usando energías renovables fue expuesta desde 1923 por John B.S. Haldane, quien propuso que la electricidad requerida para el proceso de generación de hidrógeno proviniera de turbinas eólicas. En 1930, Hermann Honnef conceptualizó la utilización de turbinas eólicas de grandes dimensiones para los mismos propósitos [2].

Los sistemas pequeños para aplicaciones residenciales fueron ya propuestos desde 2001 por L.W. Zelbey, para la misma época impulsados por las nuevas tecnologías solares algunos investigadores como J. Bockris, K. Cox y J. Hanson, estudiaron la posibilidad de producir hidrógeno por electrólisis utilizando la electricidad fotovoltaica [2].

Pero una de las principales barreras de la producción del hidrógeno a partir de las energías renovables es la falta de infraestructura ya que requiere enormes cantidades de recursos tanto económicos como humanos y es una tarea que requiere llevarse a cabo por etapas. Por lo tanto, es una tecnología por desarrollarse en los próximos años.

2.6. Tecnologías de Almacenamiento de Hidrógeno

En la actualidad existen distintas formas de almacenar hidrógeno, tanto para aplicaciones estacionarias como para el sector del transporte las cuales son: en forma gaseosa, líquida o mediante adsorción en nanotubos de carbón. Su elección depende de diferentes factores como el uso final, la densidad energética requerida, la cantidad a almacenar y la duración

de almacenamiento, además de los costos de mantenimiento y operación de la instalación [23].

Para conseguir que se generalice el uso del hidrógeno como vector energético, se debe lograr su transporte y almacenamiento de forma económica. Esto supone un considerable cambio con respecto al transporte y almacenamiento de los combustibles fósiles convencionales, debido a la baja densidad energética del hidrogeno [23].

2.6.1. Almacenamiento en Forma Gaseosa

El gas comprimido es la solución más simple de almacenamiento, ya que solo se requiere de un compresor y contenedores a presión, su desventaja es la baja densidad de energía en su almacenamiento si no se cuenta con contenedores de alta presión. A mayores presiones mayor densidad de energía almacenada, lo cual implica sistemas más robustos y mayores costos de operación [13].

2.6.2. Almacenamiento en Forma Líquida

El hidrógeno posee la más alta densidad de energía acumulada con relación al volumen cuando se licua antes de su almacenamiento, este elemento se licua a 235 ° C aproximadamente, las pérdidas resultantes del calentamiento gradual del hidrógeno líquido en el tanque (pérdidas por vapor disipado) pueden mantenerse en niveles muy bajos [25].

2.6.3. Almacenamiento en Forma de Adsorción en Nanotubos de Carbón

Este material con base de carbono puede revolucionar algún día la tecnología de almacenamiento de hidrógeno. Hace algunos años se descubrió que se podían acumular grandes cantidades de H en tubos formados microscópicamente por una pequeña estructura de grafito. A bajas temperaturas (-193 °C) y relativamente altas presiones, la adsorción es más eficiente, llegando al 8% en peso sobre el adsorbente, pero si consideramos que 1 gr de nanotubos cuesta miles de dólares, se vislumbra que hace falta mucho desarrollo todavía, para permitir su aplicación comercial [25].

CAPÍTULO III – ELECTRÓLISIS Y ELECTROLIZADORES

En la actualidad, la mayor parte de la producción de hidrógeno se realiza mediante el procesamiento de combustibles fósiles (CF). Esta técnica, contribuye al agotamiento de los CF y genera como subproducto CO_2 , el cual tiene efectos nocivos contra el planeta [26]. En este capítulo se describe la electrólisis del agua y los diferentes tipos de electrolizadores desarrollados en el mundo.

3.1. La Electrólisis del Agua

En los 60, del siglo pasado, aparecieron los electrolizadores con membranas de intercambio protónico (Nafion[®] de DuPont y otras membranas semejantes) y comenzaron a desarrollarse los óxidos cerámicos conductores de O^{2-} para electrólisis a altas temperaturas. La crisis del petróleo de 1973 motivó los esfuerzos en el desarrollo de este tipo de tecnología, sin embargo, se abandonaron cuando la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) reanudó la exportación de este combustible [27] y [28]. La concientización emergente actual sobre seguridad energética y el mantenimiento de nuestro ecosistema global ha reavivado la búsqueda de procesos eficientes, económicos y prácticos para la producción de hidrógeno a gran escala [26].

La electrólisis del agua consiste en la ruptura de la molécula de agua, a través de una corriente eléctrica, para generar hidrógeno y oxígeno. La unidad básica para la electrólisis del agua es la celda, consiste en un ánodo, un cátodo, un separador o diafragma, una fuente alimentación y un electrolito, como muestra la Figura 3.1. Los componentes más importantes de las celdas de electrólisis son los electrodos [26].

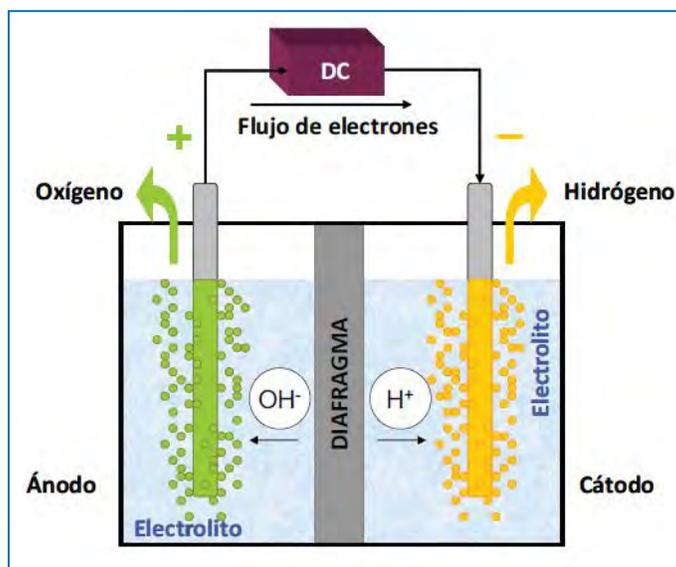


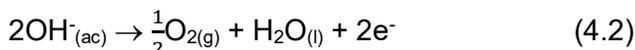
Figura 3. 1. Esquema típico de un electrolizador de agua, [26].

En medio alcalino tienen lugar las siguientes semi-reacciones [26]:

Cátodo

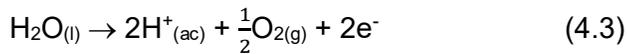


Ánodo



Mientras que en medio ácido se producen las semi-reacciones [26]:

Ánodo



Cátodo



Siendo la reacción química global de la electrólisis del agua en ambos casos [26]:

Global



3.2. Principales Tipos de Electrolizadores

Los elementos básicos de un electrolizador, Figura 3.1, son comunes para todos los sistemas de electrólisis. Sin embargo, dependiendo del electrolito utilizado, los electrolizadores pueden clasificarse principalmente en: electrolizadores alcalinos, alcalinos, electrolizadores de membrana de intercambio protónico y electrolizadores de óxido sólido [26].

3.2.1. Electrolizadores Alcalinos

La electrólisis alcalina es una tecnología madura, que se consideran el estándar para la electrólisis a gran escala. El electrolito empleado es una disolución acuosa de una base fuerte como el NaOH o el KOH. Este tipo de electrolito es apropiado porque presenta una gran conductividad iónica, no sufre descomposición química al voltaje de operación, por tanto, no afecta a la eficiencia de la electrólisis, y soporta las variaciones de PH que resultan de cambios en la concentración protónica sobre los electrodos durante el proceso. La conductividad de la disolución de KOH es máxima cuando la concentración se encuentra en torno al 28% en peso de KOH, por esta razón los electrolizadores alcalinos trabajan a concentraciones en el rango de 25-30% en peso [29]. Además, la conductividad del electrolito aumenta con la temperatura, alcanzando un máximo a los 150°C [30]. No obstante, a esas temperaturas el electrolito se encuentra en estado de vapor por lo que la temperatura habitual de trabajo de los electrolizadores alcalinos comerciales es de 80-90°C. Durante el proceso, la concentración del electrolito se mantiene por adición de agua pura a medida que se necesita, dependiendo de la velocidad de producción de hidrógeno.

Para evitar el contacto entre el hidrógeno y el oxígeno producidos en el cátodo y en el ánodo según las semi-reacciones (4.1) y (4.2), respectivamente, se emplea un separador/diafragma poroso que permite el flujo del electrolito. El separador debe tener un tamaño de poro inferior al del diámetro de las burbujas de gas más pequeñas (10 µm en el caso de las burbujas de hidrógeno) y debe presentar una porosidad mayor al 50%, con la finalidad de mantener la resistencia eléctrica en valores relativamente bajos. Los separadores empleados comúnmente son de asbestos ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Actualmente, su uso está prohibido por los problemas de salud asociados al manejo de este compuesto, por lo que, se emplean materiales poliméricos como el politetrafluoroetileno (PTFE); óxidos cerámicos como el NiO; y cermets como el Ni-BaTiO₃. Los electrodos empleados son de níquel o níquel aleado con algún catalizador, como el platino, iridio y/o rodio [29, 31, 32].

Los electrolizadores alcalinos consisten en varias celdas unidad que pueden estar dispuestas, básicamente, en dos configuraciones (ver Figura 3.2): monopolar o tipo tanque, y bipolar o de filtro prensa. La configuración más común es monopolar, Figura 3.2a, donde

cada electrodo presenta una única polaridad, estando conectados de forma paralela los electrodos de la misma polaridad. Ánodo y cátodos se encuentran conectados alternadamente, con los electrodos y separadores inmersos en un tanque que contiene al electrolito. Los electrolizadores monopolares se construyen de forma más sencilla y presentan un coste relativamente bajo. Sin embargo, son más voluminosos y no pueden operar a altas temperaturas o presiones, por lo que su temperatura normal de operación se encuentra entre los 60 y 90°C (temperaturas mayores provocan evaporación rápida del electrolito) y la presión es cercana a la atmosférica [29]. Las conexiones eléctricas son relativamente largas, lo que origina pérdidas energéticas indeseadas. En los electrolizadores alcalinos bipolares, Figura 3.2b, las celdas se conectan en serie, consistiendo cada celda en un diafragma comprimido por ambos lados dos electrodos. Un separador sólido, conductor de la corriente eléctrica, une a los electrodos de las celdas adyacentes y sirve como partición entre la cavidad del hidrógeno de una celda y la cavidad del oxígeno de la otra. Por tanto, el electrodo a un lado del plato separador actúa como cátodo de una celda, mientras que en el otro lado actúa como ánodo de la celda adyacente. Los electrolizadores avanzados presentan una geometría de “espacio-nulo (zero-gap, en inglés)” [33], con el ánodo y el cátodo directamente formados sobre los lados opuestos del diafragma poroso. Este tipo de electrolizador es muy compacto, y permite trabajar a temperatura y presiones más altas (normalmente 150°C y presiones de hasta 30 bares [34]. Consecuentemente, los electrolizadores de filtro prensa pueden trabajar a voltajes menores obteniéndose densidades de corriente más altas. Sin embargo, tanto la construcción de este tipo de sistemas como su mantenimiento son muy complicados, siendo las altas temperaturas un obstáculo para la producción de hidrógeno a gran escala [26].

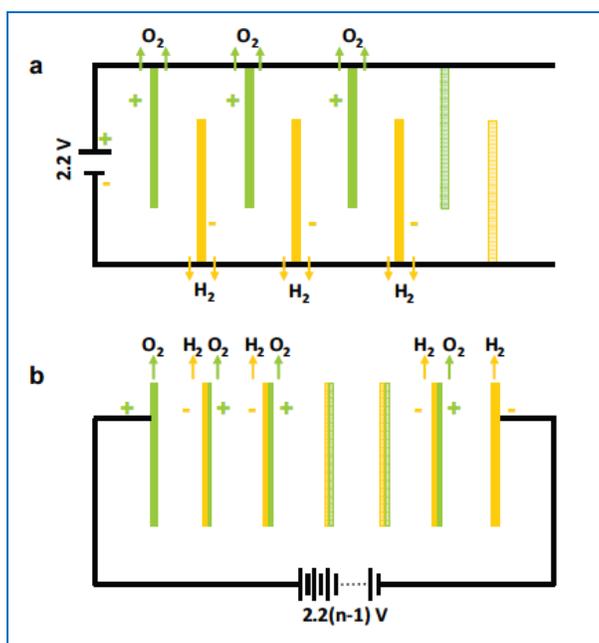


Figura 3. 2. Esquema de la configuración de los electrolizadores: a. monopolar y b. bipolar, [26].

Los electrolizadores alcalinos permiten obtener hidrógeno de una pureza nominal del 99.8%. Las celdas convencionales operan a voltajes de 1.8-2.2 V, con densidades de corriente por debajo de 0.4 Acm⁻². Los electrolizadores avanzados trabajan a voltajes relativamente bajos, sobre 1.6 V, y densidades de corriente más elevadas, de hasta 2 Acm⁻² [29, 31]. Los electrolizadores monopolares presentan eficiencias del 60-80%, mientras

que los electrolizadores “zero-gap” pueden trabajar al 90% de eficiencia. Por otra parte, las velocidades de producción varían desde 0.01 a 10 m³h⁻¹. Sin embargo, para una producción de hidrógeno a gran escala mediante esta tecnología son necesarios unos requisitos eléctricos muy elevados. Además, dentro del contexto de energía global es fundamental reducir la emisión de CO₂, por lo que las necesidades eléctricas de esta tecnología deberían ser abastecidas por energías renovables, como la eólica o la solar [26].

3.2.2. Electrolizadores de Membrana de Intercambio Protónico (tipo PEM)

El desarrollo de los electrolizadores tipo PEM está ligado al desarrollo de las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM) [35, 36, 37]. En los años 50, investigadores de General Electric Corporation (GE), desarrollaron celdas de combustible empleando un electrolito de poliestireno sulfonado [36, 37]. En 1966 se desarrollaron celdas de combustible que empleaban membranas muy superiores, las Nafion® de DuPont, para proyectos espaciales de la NASA. En 1973 GE desarrolló los electrolizadores tipo PEM, empleando la tecnología de membranas de intercambio protónico inicialmente utilizadas para la generación de oxígeno en submarinos nucleares [37]. Los electrolizadores tipo PEM se han consolidado como una tecnología aceptada y viable industrialmente. Son electrolizadores compactos y limpios. En comparación con los alcalinos, tipo PEM pueden operar a voltajes de celdas más bajos, densidades de corriente más alta, así como temperatura y presiones superiores. Las eficiencias de estos sistemas pueden alcanzar casi el 100%, pero normalmente trabajan en un rango del 80-90% [29, 38, 39]. Una de las principales ventajas de la tecnología PEM es que puede generar hidrógeno de extremada pureza (>99.999%) [26].

Los electrolizadores tipo PEM tienen una configuración similar a la bipolar de filtro prensa de los electrolizadores alcalinos, pero una membrana polimérica perfluorada conductora de protones, como la Nafion, que presenta cadenas terminadas en grupos de intercambio iónico sulfonados, sirve simultáneamente de electrolito y separador [38]. El agua ultra-pura que circula a través de la celda se disocia en oxígeno e hidrógeno, siguiendo las reacciones (4.3) y (4.4), respectivamente, gracias a la ayuda de electrocatalizadores ubicados sobre la superficie de la membrana. El espesor de ésta es normalmente de 150-300 µm, y es impermeable al agua y a los gases. La membrana posee una baja conductividad iónica pero una elevada conductividad de protones cuando está saturada con agua. Los grupos ácidos sulfónico (HSO₃⁻) incorporados en la membrana se hidratan cuando están en contacto con agua y, entonces, se disocian (SO₃^{-ac} + H^{+ac}) facilitando la conducción protónica [40]. Por tanto, la membrana es muy ácida, por lo que se requieren materiales resistentes a este medio, empleándose metales muy nobles, como platino, iridio, rutenio, rodio, o sus óxidos o aleaciones como materiales de electrodo [35, 38].

3.2.3. Electrolizadores de Óxido Sólido

Los electrolizadores de óxidos sólidos se empezaron a desarrollar a principios de los años 70 [27]. Operan a temperaturas muy altas, cercanas a los 1000°C, explotando al máximo el efecto ventajoso de las altas temperaturas sobre las cinéticas y los parámetros termodinámicos de control de la electrólisis del agua para generar hidrógeno a partir de vapor de agua. Las celdas de óxido sólidos trabajan a potenciales más bajos, entre 0.95 y 1.33 V, que los requeridos para los otros tipos de electrolizadores. El electrolito en este tipo de celdas son cerámicas sólidas, que son buenas conductoras del ión (O²⁻) [41]. La temperatura de operación se decide por la conductividad iónica del electrolito. La alimentación gaseosa, mezcla de agua con hidrógeno, se hace pasar por el compartimento catódico. En este compartimento, la reacción que tiene lugar es:

Cátodo:



Como el electrolito es impermeable al hidrógeno gaseoso, los iones O^{2-} migran a través del electrolito hacia el ánodo bajo la acción del campo eléctrico, donde forman el oxígeno gaseoso según la reacción:

Ánodo:



Los electrolizadores de óxido sólido pueden fabricarse con geometrías planas o tubulares [42, 43], siendo mínimos tanto el voltaje como las pérdidas de corriente en la disposición plana. En ambos casos el electrolito se encuentra apesado entre electrodos porosos. Las celdas se conectan de forma bipolar, empleando elementos que sirven simultáneamente de conductores eléctricos y de distribuidores de corriente.

A pesar de que se han probado muchos tipos de electrolitos para las celdas de óxido sólido el más empleado actualmente es el electrolito de zirconio estabilizado con itrio [44]. Habitualmente se utilizan materiales cermets como el Ni-ZrO_2 y Pt-ZrO_2 como materiales de electrodo, empleándose perovskitas conductoras (LaNiO_3 y LaCoO_3) como ánodos [45].

La tecnología de las celdas de óxido sólido todavía se encuentra en estado de desarrollo. Es necesario actuar sobre los bajos tiempos de vida de los materiales empleados en su construcción, así como la mezcla de fases adyacentes y otros problemas de ingeniería relacionados con el sellado de gases y el control térmico, para que esta tecnología puede comercializarse satisfactoriamente [34]. Sin embargo, esta tecnología presenta ventajas únicas que la hacen muy atractiva con respecto a las otras [46]. Comparado con los otros tipos de electrolizadores, el consumo de energía eléctrica es inferior. Si se compara con los electrolizadores alcalinos avanzados, las celdas de óxido sólido requieren al menos un 10% menos de energía. La eficiencia de la electrólisis a altas temperaturas puede ser prácticamente del 100% [29].

3.2.4. Comparación de los Distintos Tipos de Electrolizadores

La Tabla 3.1 presenta un resumen de las características de los electrolizadores más importantes empleados en la actualidad, destacando las principales ventajas e inconvenientes del uso de cada una de las tecnologías.

Tabla 3. 1. Comparación de las principales tecnologías de electrólisis del agua.

Electrolizador	Alcalino	Tipo PEM	Óxido Sólido
Electrolito	NaOH o KOH	Polímero	Cerámica
Portador carga	OH^-	H^+	O^{2-}
Temperatura	80°C	80°C	1000°C
Ventajas	-Tecnología madura	- H_2 de mayor pureza	-Menor consumo de
Continuación de "Tabla 3.1. Comparación de las principales tecnologías de electrólisis del agua".			
Ventajas	-Gran durabilidad de los electrolizadores -Producción de H_2 a gran escala	-Menores costes energéticos -Puede trabajar a altas presiones	energía eléctrica
Inconvenientes	-Electrolito es una sustancia corrosiva	-Electrolito más caro	-Fase inicial de desarrollo

	<ul style="list-style-type: none"> -No puede trabajar a altas presiones -Alto coste de electrodos -Altos costes energéticos 	<ul style="list-style-type: none"> -Electrolito ácido, lo que encarece los materiales -Tecnología en vías de desarrollo, solo empleado a baja escala 	<ul style="list-style-type: none"> -Las altas temperatura requieren materiales muy estables
Fuente: [26].			

En la Tabla 3.1, se deduce que la electrólisis alcalina, la más empleada en la actualidad, permite obtener hidrógeno a gran escala, siendo su principal problema los costos altos en los materiales electródicos y de operación. Por tanto, los esfuerzos en investigación y desarrollo deben focalizarse en la búsqueda de materiales económicos con gran actividad catalítica para la reacción de evolución de hidrógeno, es decir, bajos sobrepotenciales.

CAPÍTULO IV – ESTADO DEL ARTE

Se realizó una búsqueda, de ocho temas relacionados con el hidrógeno: Electrolizador PEM (PEM Electrolyzer), Electrolizador Alcalino (Alkaline Electrolyzer), Electrolizador de Óxido Sólido (Solid Oxide Electrolyzer), Hidrogeno (Hydrogen), Energía del Hidrógeno (Hydrogen Energy), Producción de Hidrógeno (Hydrogen Production), Almacenamiento de Hidrógeno (Hydrogen Storage) y Electrolisis del Agua (Water Electrolysis). Se ha encontrado que el monto de artículos publicados varía significativamente, según el tema.

La búsqueda se efectuó a través de la página de *ScienceDirect* (www.sciencedirect.com) y abarco el periodo del 2000 al 2017. Para ello se utilizaron las herramientas de búsqueda avanzada “*Advanced search*” del *ScienceDirect*, como se muestra en la Figura 4.1.

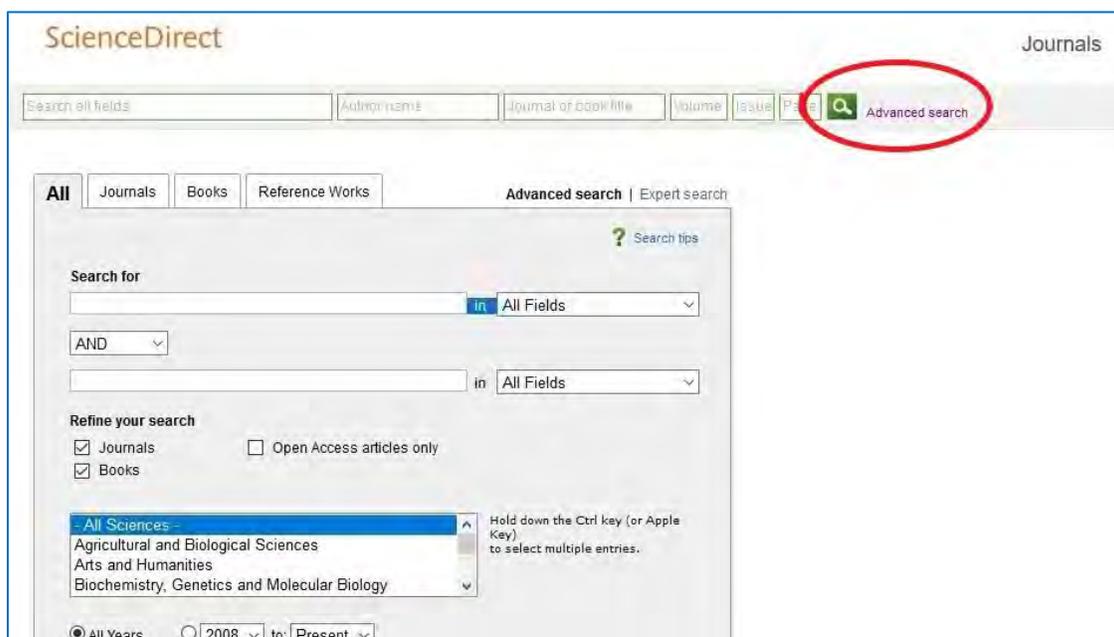


Figura 4. 1. Sección de búsqueda avanzada en la página de Science Direct [47].

Posteriormente, se utilizaron los conectores booleanos (and, or, entre otros) requeridos para realizar una búsqueda personalizada en el campo “búsqueda experta” (*expert search*), que se encuentra marcado por la elipse roja en la Figura 4.2. Resultado de la búsqueda.

The image shows the Science Direct search interface. At the top, there are tabs for 'All', 'Journals', 'Books', and 'Reference Works'. To the right, there are links for 'Advanced search' and 'Expert search'. Below the tabs is a search bar with a red oval around it. The search bar contains the text 'Search for (Enter terms using Boolean connectors e.g. "heart attack" AND stress)'. To the right of the search bar is a 'Search tips' link. Below the search bar, there is a 'Refine your search' section with checkboxes for 'Journals', 'Books', and 'Open Access articles only'. A dropdown menu is open, showing 'All Sciences' selected, with other options like 'Agricultural and Biological Sciences', 'Arts and Humanities', and 'Biochemistry, Genetics and Molecular Biology'. Below the dropdown menu, there are radio buttons for 'All Years' and '2008 to Present', and a 'Search' button.

Figura 4. 2. Cuadro de entrada de comandos para búsqueda en el motor de Science Direct [47].

Las Figuras 4.3 a 4.10, muestran el número de artículos publicados en las revistas de interés, en el periodo 2000 al 2017, en los ocho temas arriba mencionados: electrolizador PEM, electrolizador alcalino, electrolizador de óxido sólido, hidrógeno, energía del hidrógeno, producción de hidrogeno, almacenamiento de hidrogeno, electrólisis del agua. La búsqueda se llevó acabo, por ejemplo, "*TITLE: (electrolyzer and solid oxide)*". De esta manera se indicaba al motor de búsqueda, que buscara documentos que en su título tengan las palabras "**electrolyzer**" y que en el resto de la publicación se busquen las palabras "**solid oxide**".

En la Figura 4.3 se observa que el mayor número de publicaciones fueron registradas por la revista "International Journal of Hydrogen Energy (ISSN: 0360-3199)", debido a que la revista tiene como objetivo publicar todo lo referente a nuevas ideas, desarrollo tecnológico e investigación en el campo de la Energía de Hidrógeno [48].

En el otro extremo, tenemos a casi veinte revistas "Solar Energy, Catalysis Today, Electrochemistry Communications, Chemical Engineering Research and Design, Renewable Energy, Coordination Chemistry Reviews, Comptes Rendus Chimie, Journal of Electroanalytical Chemistry, Journal of Energy Storage, Journal of Energy Chemistry, Applied Thermal Engineering, Energy and Building, Fusión Engineering and Design, Corrosion Science, Sealing Technology, Journal of Membrane Science, Dyes and Pigments y Fuel and Energy Abstracts", las cuales según información publicada en el sitio Elsevier (<https://www.elsevier.com/>) [48] se dedica a temas con poco relacionado con la electrólisis, aunque si publican investigaciones referentes a los electrolizadores, no es su único tema.

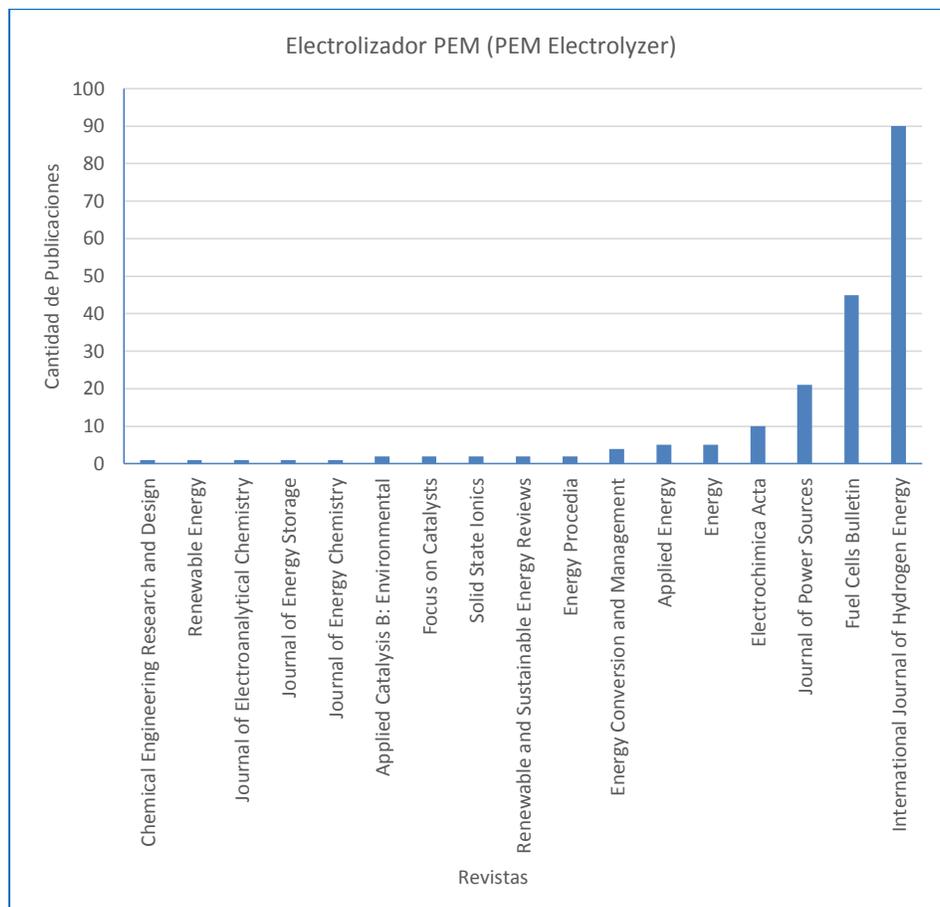


Figura 4. 3. Cantidad de publicaciones por revista, con respecto al tema de Electrolizador PEM (Elaboración propia con datos de Science Direct [47])

En la Figura 4.4, se presenta la cantidad de artículos referentes a Electrolizadores Alcalinos. Se puede observar que la revista de mayor publicación es, nuevamente, la “International Journal of Hydrogen Energy, ISSN: 0360-3199”, esto debido a las razones antes explicadas.

En el extremo se encuentra las revistas “Renewable Energy (ISSN:0960-1481), Energy (ISSN: 0360-5442), Fuel Cells Bulletin (ISSN: 1464-2859), Energy Conversion and Management (ISSN: 0196-8904) y Applied Thermal Engineering (ISSN: 1359-4311)”, la razón de esto es que su rango de temas a publicar es más amplio y no sólo lo referente a hidrógeno y electrolizadores, según información proporcionada por Elsevier [48].

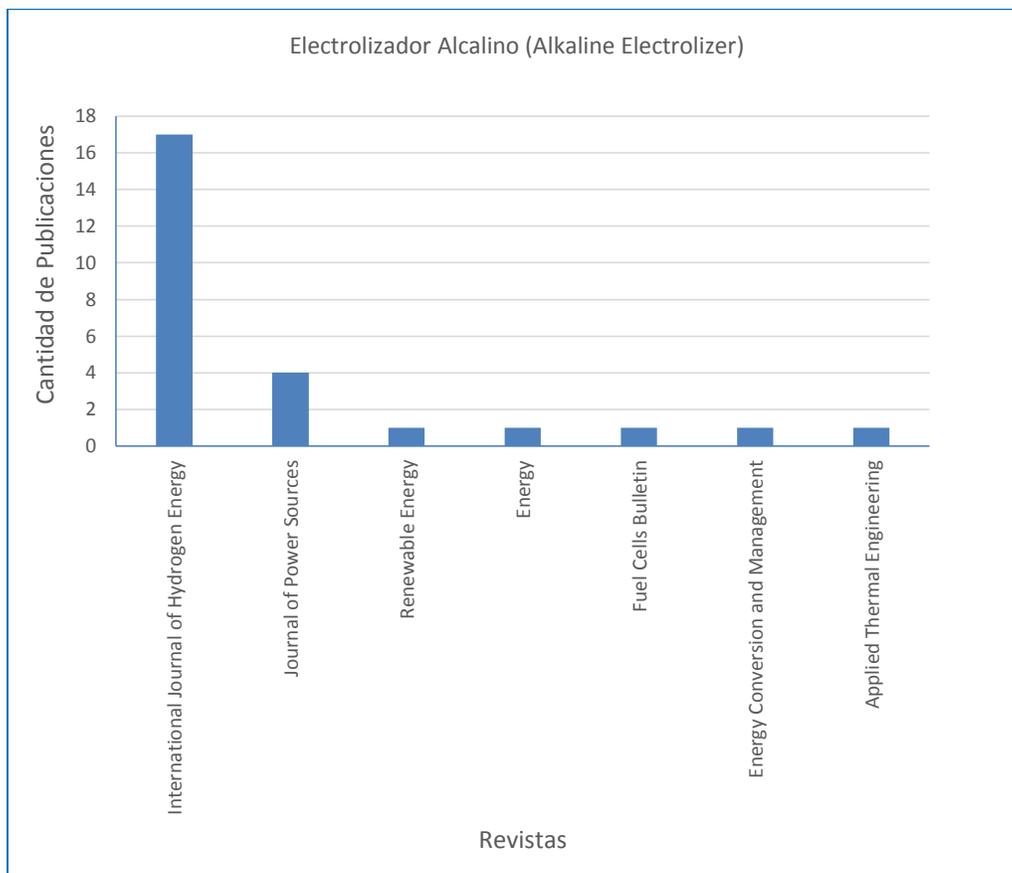


Figura 4. 4. Cantidad de publicaciones por revistas, Electrolizador Alcalino (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

La Figura 4.5, presenta la cantidad de artículos publicados en el tema “Electrolizador de Óxido Sólido”, se puede notar que la “International Journal of Hydrogen Energy, *ISSN: 0360-3199*” y “Journal of Power Sources, *ISSN: 0378-7753*”, son las revistas con mayor publicación. La razón de esto es que ambas revistas publican trabajos en todo lo referente con fuentes de energía [48].

En el extremo se encuentra las revistas “Fuel Cells Bulletin (*ISSN: 1464-2859*)”, Renewable and Sustainable Energy Reviews (*ISSN: 1364-0321*), Energy Procedia (*ISSN: 1876-6102*), Solid State Ionics (*ISSN: 0167-2738*), Energy (*ISSN: 0360-5442*), Electrochimica Acta (*ISSN: 0013-4686*) y Applied Energy (*ISSN: 0306-2619*). Esto es que el espectro de temas a publicar, de las revistas antes mencionadas, es más amplio, pues no sólo publican los resultados de investigaciones, si no también opiniones, noticias, entre otras cosas. En algunos casos como la “Electrochimica Acta” que se centra sólo en un campo de la electroquímica. Todos lo anterior según información proporcionada por Elsevier [48].

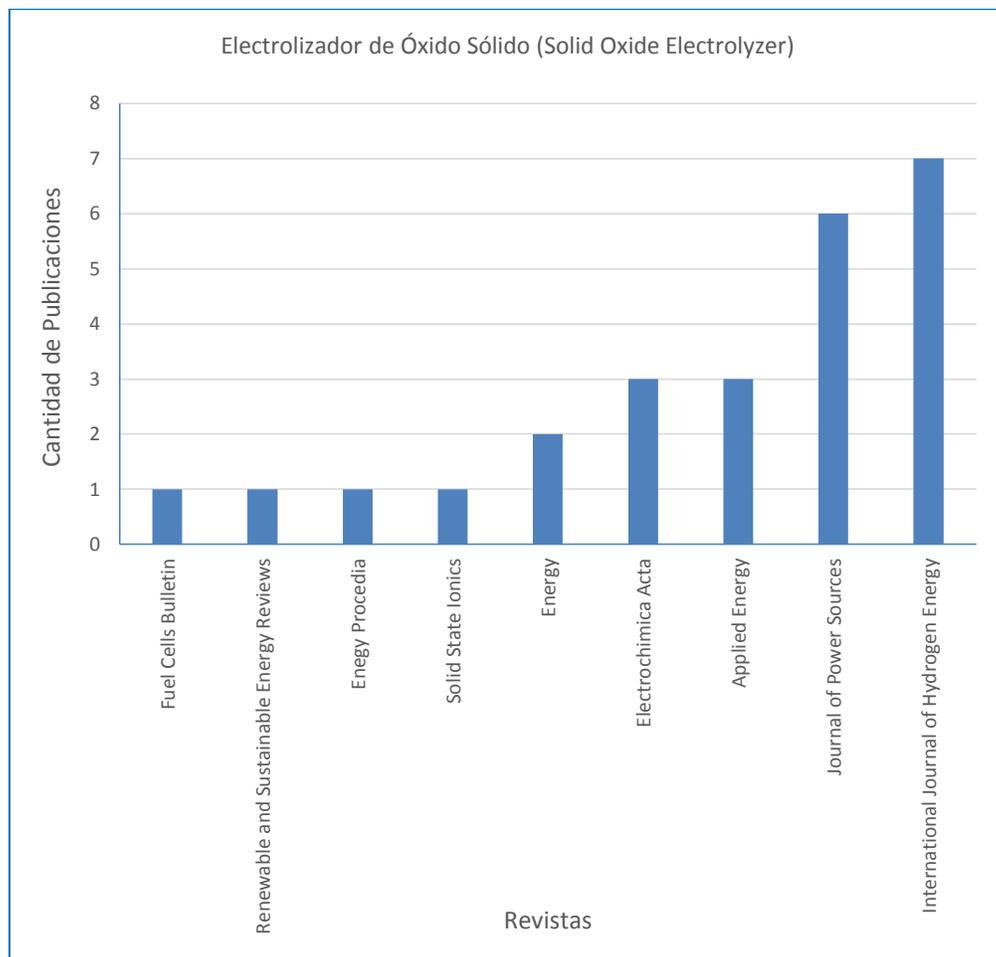


Figura 4. 5. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema de Electrolizador de Óxido Sólido (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

En la Figura 4.6, se presenta la cantidad de artículos referentes a Hidrógeno. Se puede observar que la revista de mayor publicación es “International Journal of Hydrogen Energy, ISSN: 0360-3199”, debido a que la revista se dedica a temas en todo lo relacionado al campo de la Energía de Hidrógeno [48]. Le siguen otras revistas, entre las que se encuentra; “Scripta Materialia, ISSN: 1359-6462” y “Energy Procedia, ISSN: 1876-6102”, que tienen publicaciones que van de 10 a 24 artículos.

Por otro lado, se puede observar revistas con publicaciones que van de 1 a 10 artículos, entre ellas se encuentran “Journal of Energy Chemistry (ISSN: 2095-4956)” y Journal of Membrane Science (ISSN: 0376-7388)”, la razón de la menor publicación es que su rango de temas a publicar es más amplio y no sólo lo referente temas relacionados a hidrógeno, según información proporcionada por Elsevier [48].

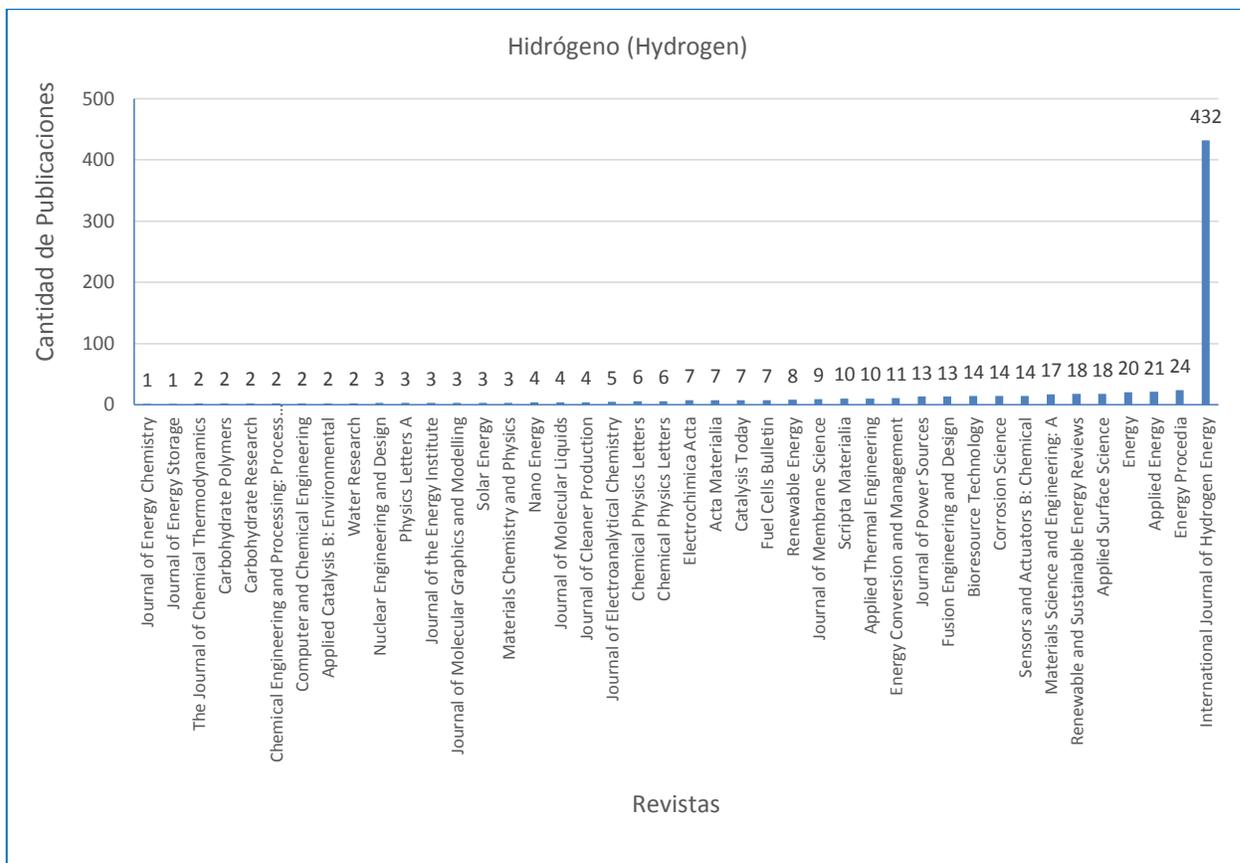


Figura 4. 6. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

En cuanto al tema “Energía del Hidrógeno”, la Figura 4.7 muestra la cantidad de artículos publicados por revista. En ellas se observa que la revista de mayor publicación es la “International Journal of Hydrogen Energy, *ISSN: 0360-3199*”, debido a que la revista se dedica a temas en todo lo relacionado al campo de la Energía de Hidrógeno [48]. Le siguen otras tres revistas que son “Fuel Cells Bulletin, *ISSN: 1464-2859*”, “Energy Procedia, *ISSN: 1876-6102*” y “Fuel and Energy Abstracts, *ISSN: 0140-6701*”, tienen publicaciones que van de 16, 30 y 79 artículos, respectivamente. La menor publicación de estas revistas es debido a que su alcance es muy amplio o muy puntualizado en solo algunos temas.

Por otro lado, se puede observar revistas con publicaciones que van de 1 a 9 artículos, entre las que se encuentran “Applied Thermal Engineering (*ISSN: 1359-4311*)” y “Transactions of Nonferrous Metals Society of China (*ISSN: 1003-6326*)”. El motivo de la menor publicación se debe a que se trata de revista con un rango de temas a publicar más amplio y no sólo lo referente temas relacionados a hidrógeno, según información proporcionada por Elsevier [48].

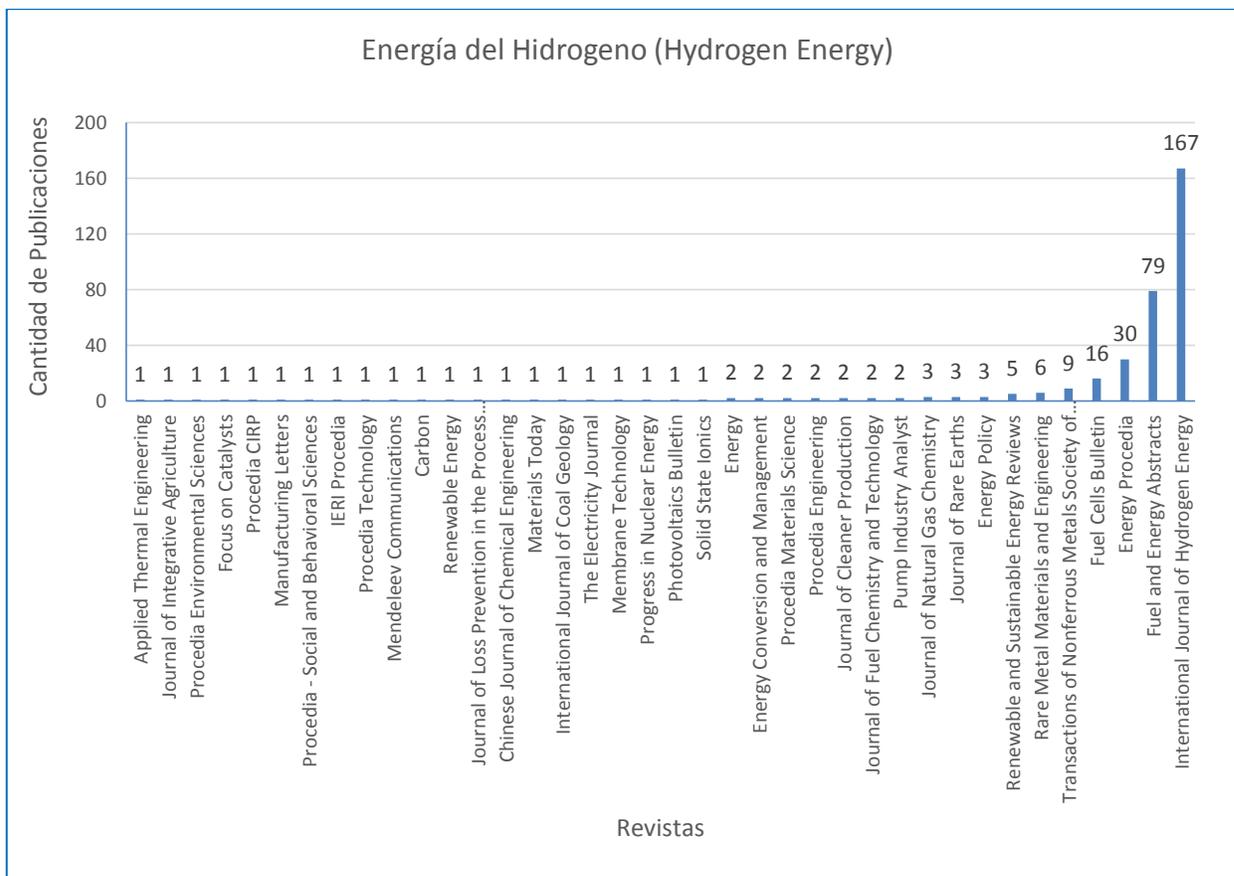


Figura 4. 7. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema Energía del Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

La Figura 4.8, presenta la cantidad de artículos referentes al tema “Almacenamiento de Hidrógeno”. Las revistas de mayor publicación son “International Journal of Hydrogen Energy, ISSN: 0360-3199” y “Journal of Alloys and Compound, ISSN: 0925-8388”. Esto se debe a que la primera revista se dedica a temas en todo lo relacionado al campo de la Energía de Hidrógeno, y la segunda es una revista dedicada a publicaciones relacionadas con ciencias de los materiales, química y física de estado sólido, temas relacionados con el almacenamiento de hidrógeno [48].

También se puede observar otras revistas con publicaciones que van de 1 a 12 artículos, entre ellas se encuentran “Journal of Energy Storage (ISSN: 2352-152X)” y “Journal of Power Sources (ISSN: 0378-7753)”. La causa de menor publicación es que su rango y alcance de temas a publicar es más amplio (abarca otros campos de la ciencia) y no sólo lo referente temas relacionados a hidrógeno y su almacenamiento, según información proporcionada por Elsevier [48].

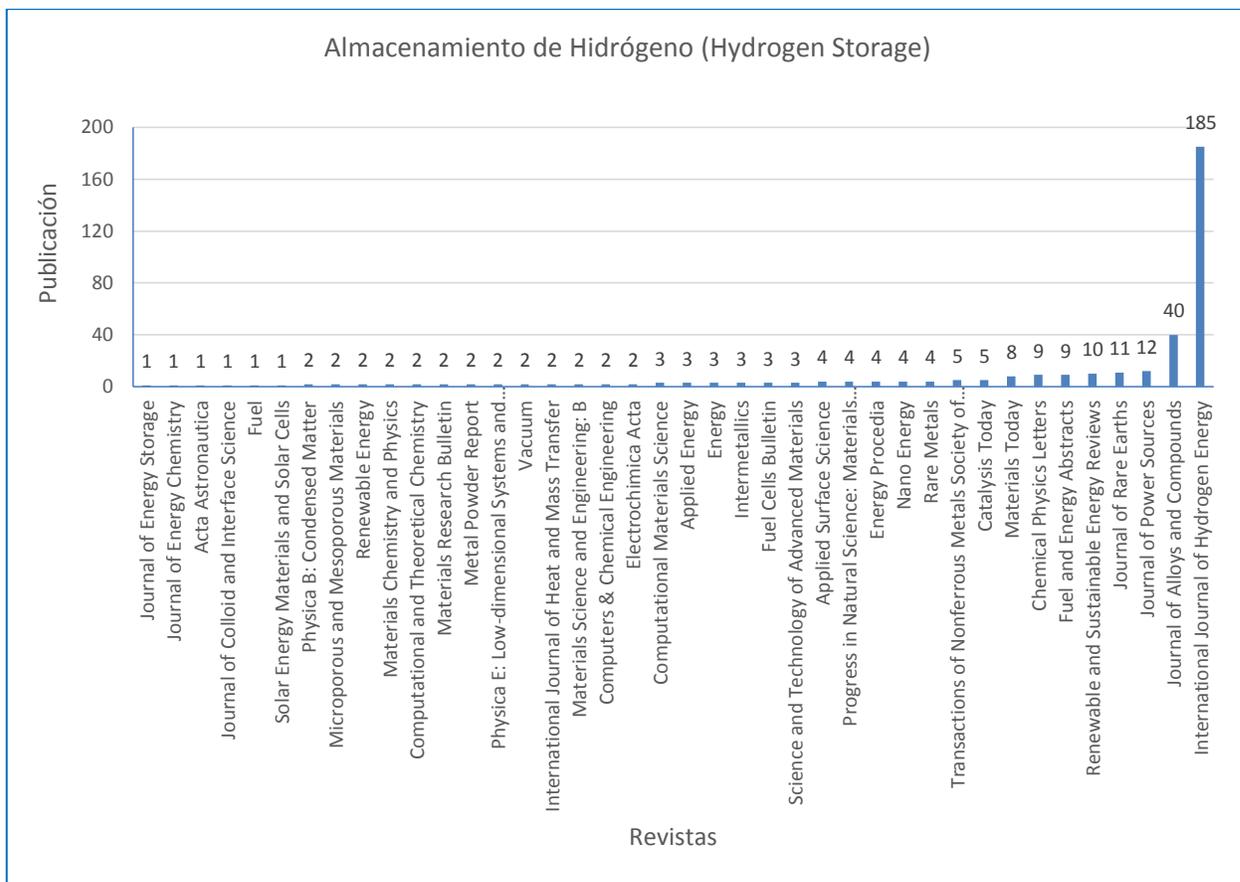


Figura 4. 8. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema Almacenamiento de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

En la Figura 4.9, se presenta la cantidad de artículos referentes al tema “Producción de Hidrógeno”. La revista de mayor publicación es la “International Journal of Hydrogen Energy, ISSN: 0360-3199”, pues se dedica a temas en todo lo relacionado al campo de la Energía de Hidrógeno. Le siguen cinco revistas, entre ellas se encuentran; “Journal of Power Sources, ISSN: 0378-7753”, “Applied Energy, ISSN: 0306-2619” y “Renewable and Sustainable Energy Reviews, ISSN: 1364-0321”, con publicaciones de van de 10 a 29 artículos [48].

Por otra parte, en la Figura 4.9, también se encuentran revistas con publicaciones que van de 1 a 6 artículos, entre ellas se encuentran “Sustainable Energy Technologies and Assesments (ISSN: 2213-1388)” y “Energy Conversion and Management (ISSN: 0196-8904)”. El porqué de la menor publicación, es el amplio rango y alcance de temas que manejan (abarca otros campos de la ciencia) y no sólo lo referente temas relacionados a hidrógeno y producción como combustible, según información proporcionada por Elsevier [48].

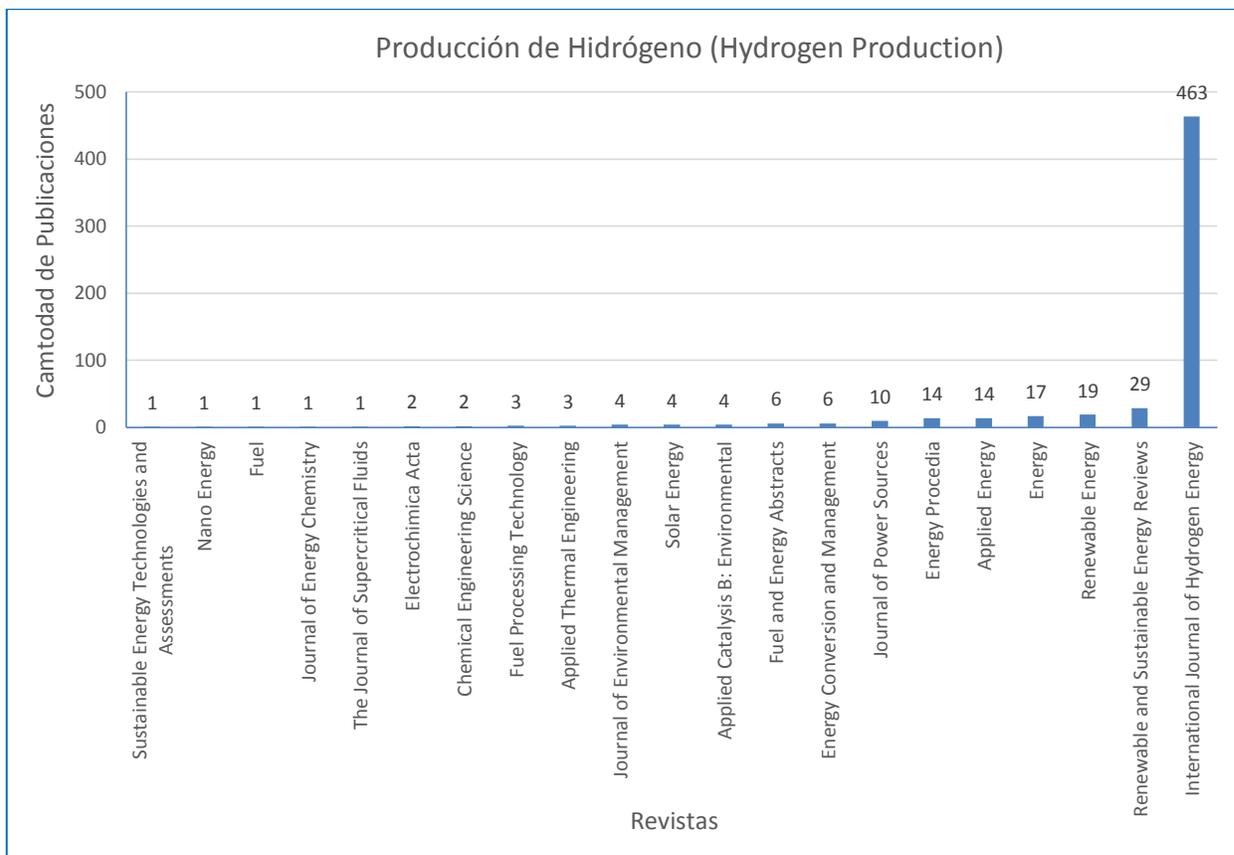


Figura 4. 9. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema Producción de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

Las revistas de mayor publicación, en el tema “Electrólisis del Agua”, son la “International Journal of Hydrogen Energy, ISSN: 0360-3199”, dedicada a temas en todo lo relacionado al campo de la Energía de Hidrógeno, y la “Electrochimica Acta, ISSN: 0013-4686”. Así lo muestra la Figura 4.10. Le siguen cuatro revistas, entre ellas se encuentran “Journal of Power Sources, ISSN: 0378-7753” y “Renewable and Sustainable Energy Reviews, ISSN: 1364-0321”, con publicaciones que van de 20 a 82 artículos. Todas las revistas trabajan en temas relacionados con fuentes de energía y electroquímica [48].

Por otra parte, en la Figura 4.10, también se encuentran otras revistas con publicaciones que van de 1 a 14 artículos, entre ellas se encuentran “Computers & Chemical Engineering (ISSN: 0098-1354)” y “Applied Energy (ISSN: 0306-2619)”. La razón de la menor publicación, es el amplio rango y alcance de temas que manejan (abarca otros campos de la ciencia) y no sólo lo referente temas relacionados con electrólisis del agua. Algunas revistas sólo publican los nuevos desarrollos tecnológicos en un amplio espectro de temas o su campo de acción es muy extenso, según información proporcionada por Elsevier [48].

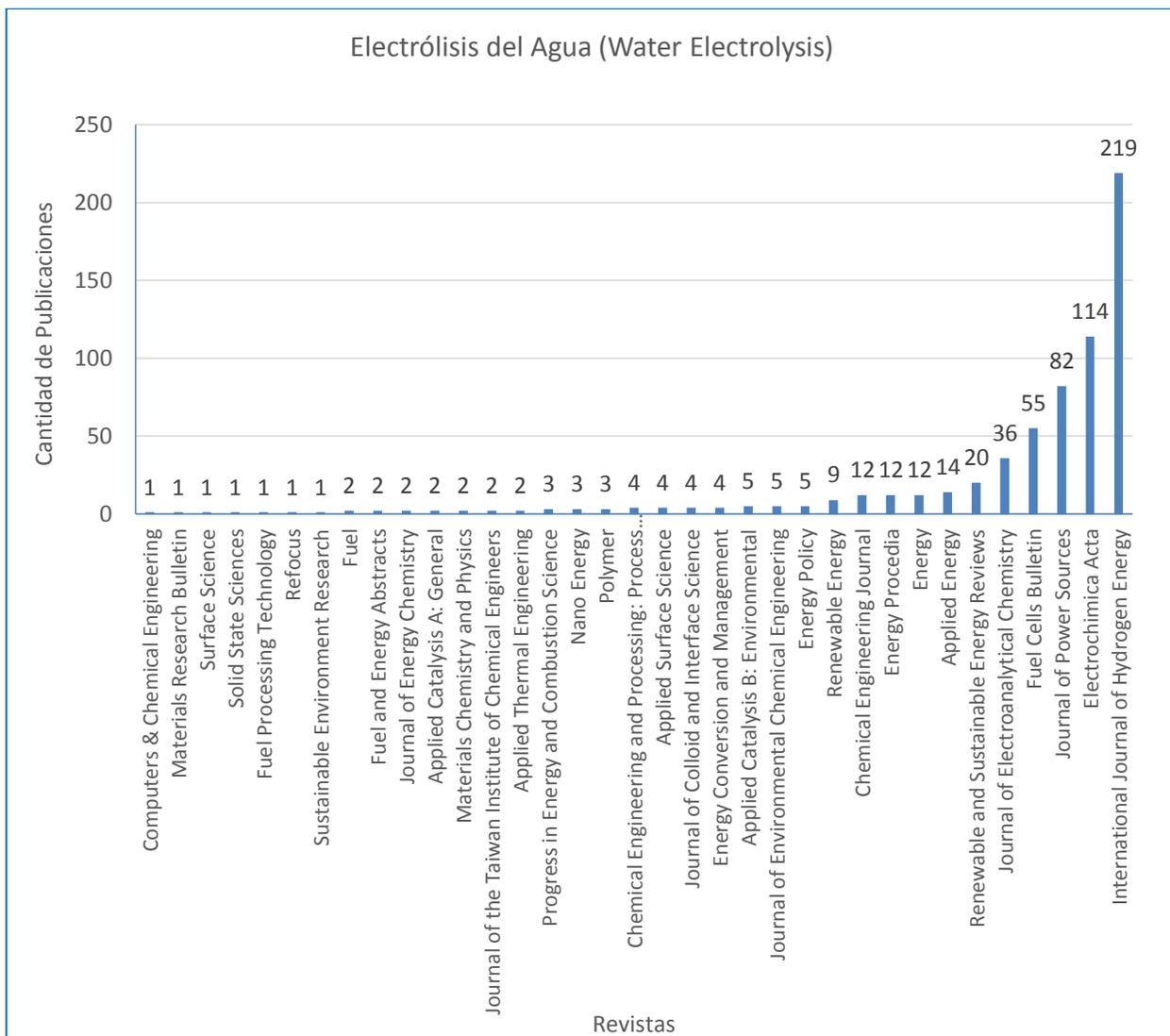


Figura 4. 10. Cantidad de publicaciones por revista, en el tema Electrólisis del Agua (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

A continuación, se exponen las gráficas que presentan la cantidad de publicaciones por año en cada tema de investigación, iniciando con el tema Electrolizadores PEM y termina con el tema Electrólisis del Agua.

El interés en la investigación en Electrolizadores PEM ha estado en crecimiento. En la Figura 4.11, se observa el aumento de la investigación en este tema, del 2002 al 2017. Aunque en el 2010 y 2013 se dio una disminución en el número de publicaciones, sin embargo, la tendencia al alza continuó.

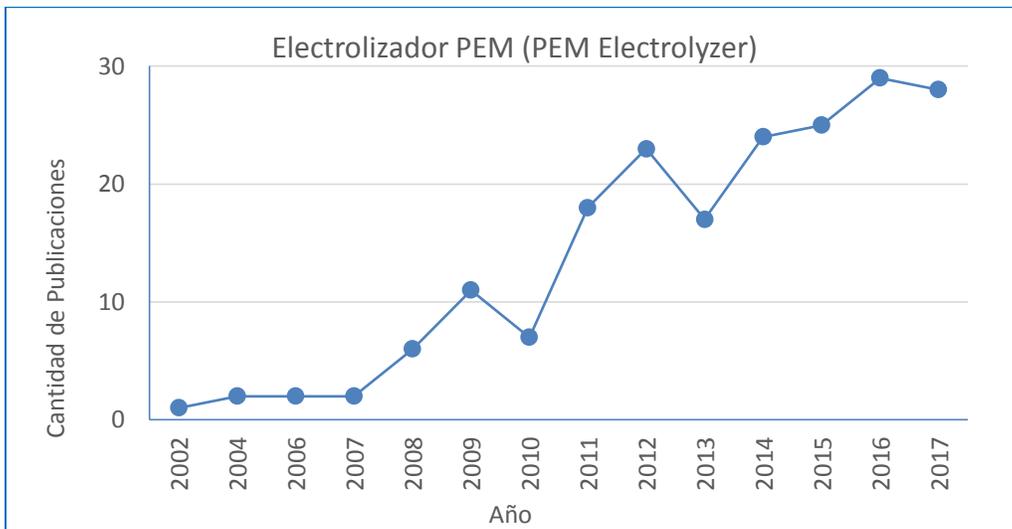


Figura 4. 11. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Electrolizador PEM (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

En la Figura 4.12, se muestra el número de artículos publicados del 2009 al 2017, en el tema de Electrolizadores Alcalinos. En ella se observa que el año de mayor publicación fue el 2013 y a partir de ahí la tendencia es a la baja, la razón muy probable es la disminución en la necesidad e interés en la investigación en este tema. Se destaca la caída en las publicaciones del 2014.

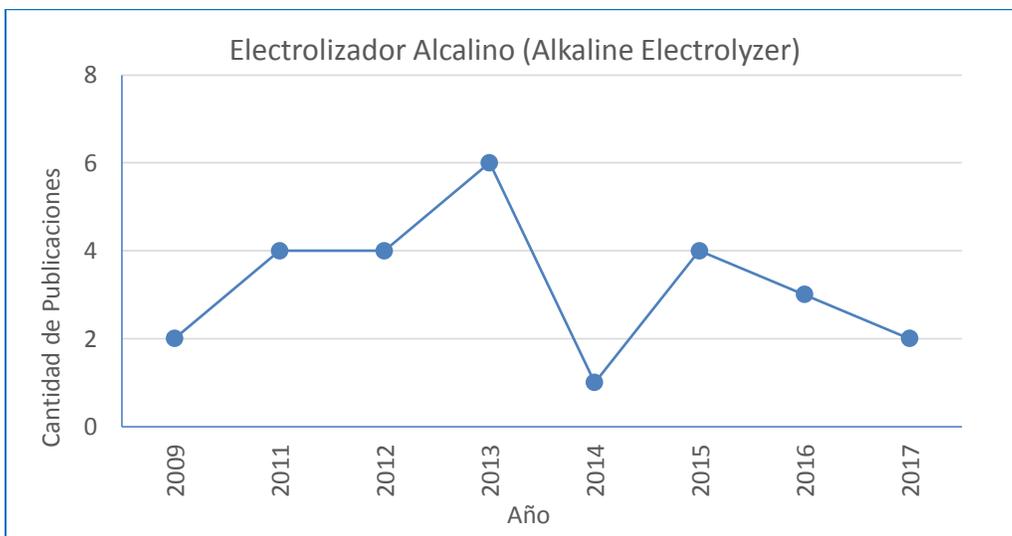


Figura 4. 12. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Electrolizador Alcalino (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

En cuanto al tema de Electrolizadores de Óxido Sólido, en la Figura 4.13, se observa un incremento suave en la cantidad de artículos publicados del 2008 al 2017. Esto está en función de las necesidades de investigación en este tema.

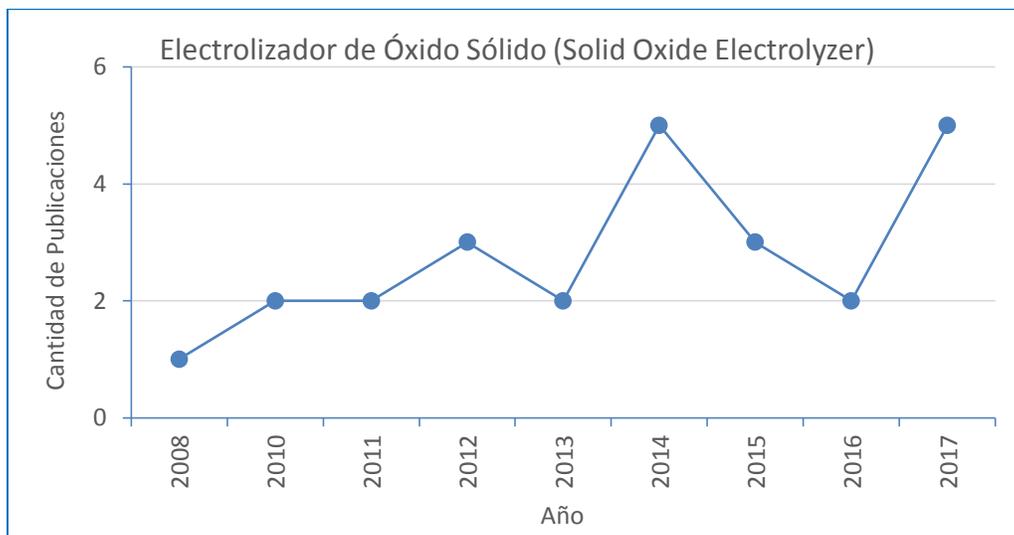


Figura 4. 13. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Electrolizador de Óxido Sólido (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

En el tema de hidrógeno, en la Figura 4.14, se muestra crecimiento en la investigación, aunque muy reciente, pues sólo en el 2016 y 2017 ha habido publicaciones es este tema, de los 18 años investigados. Por ello se puede afirmar que hay un nuevo interés en la investigación de este tema.

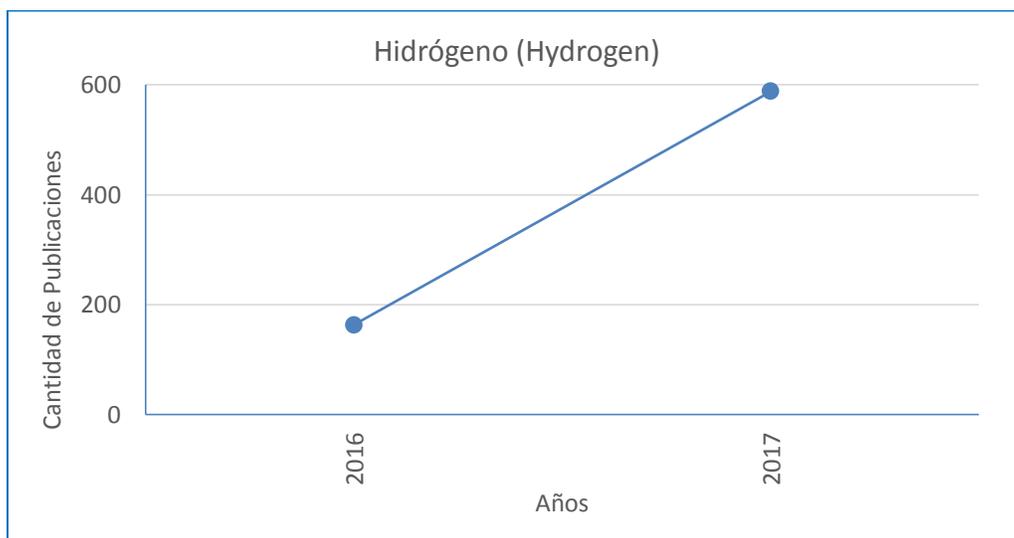


Figura 4. 14. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

En la Figura 4.15, se muestra el número de artículos publicados del 2000 al 2017, en el tema de Energía de hidrógeno. Se observa que el año de mayor publicación fue el 2004, y en el resto de los años se tiene una ligera tendencia a aumentar. Este comportamiento está ligado al interés y necesidad de investigación.

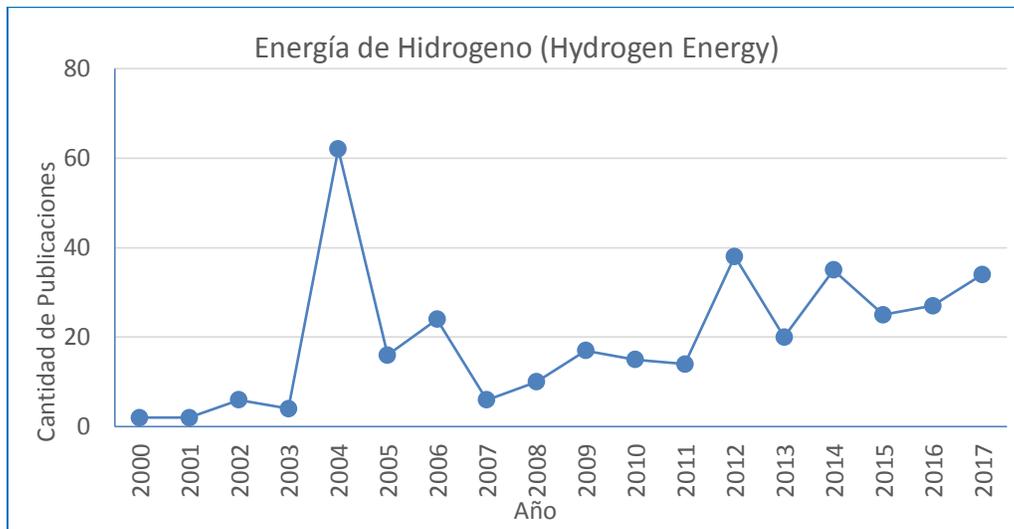


Figura 4. 15. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Energía de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

La investigación en almacenamiento de hidrógeno también presenta un interés creciente. La Figura 4.16, muestra el aumento de la investigación en este tema, del 2000 al 2017. Aunque en el 2008 y 2010 se dio una disminución en el número de publicaciones, sin embargo, se puede observar claramente la tendencia al alza.

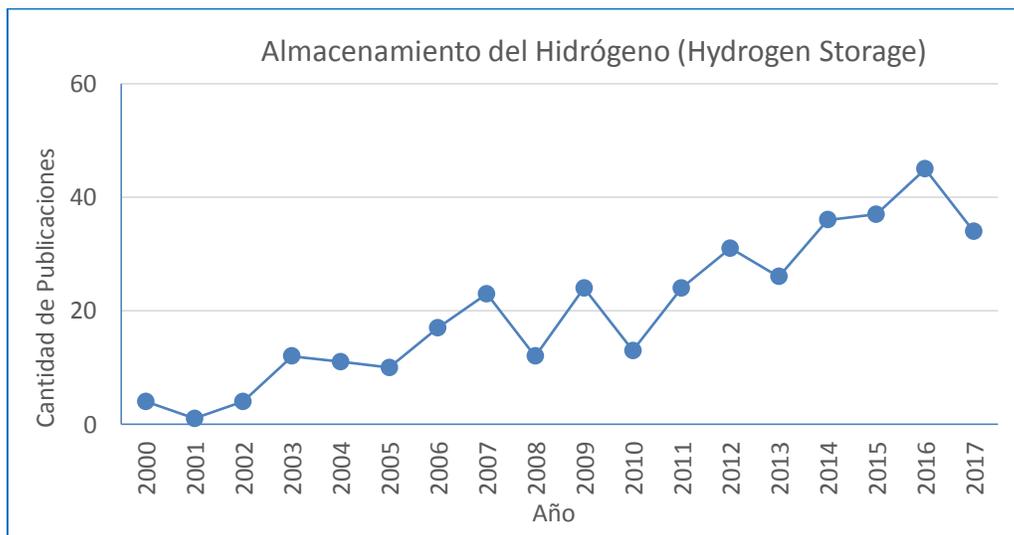


Figura 4. 16. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Almacenamiento de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

En el tema producción de hidrógeno, la Figura 4.17, muestra un crecimiento en la investigación, desde el 2000 al 2017. En los años que van del 2013 al 2016, se dio una disminución en las publicaciones, sin embargo, la tendencia creciente continuó. Se puede afirmar que sea renovado el interés en la investigación.

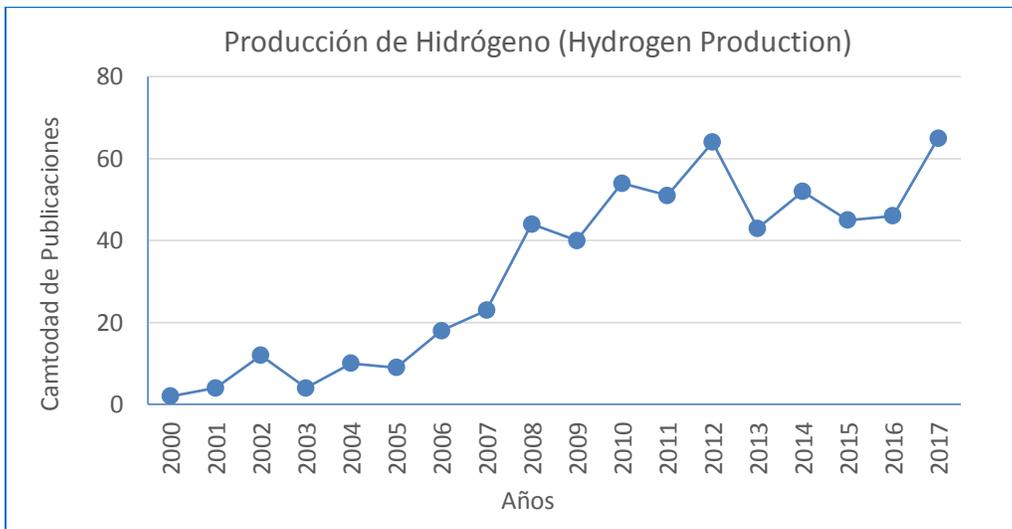


Figura 4. 17. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Producción de Hidrógeno (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

En cuanto al tema electrólisis del agua, la Figura 4.18, presenta un crecimiento constante en la investigación del 2000 al 2017. Destaca la caída que se presenta en el 2003 y la disminución que se da del 2005 al 2008 en la publicación. No obstante, el interés y necesidad de investigación, se muestra con una tendencia creciente.

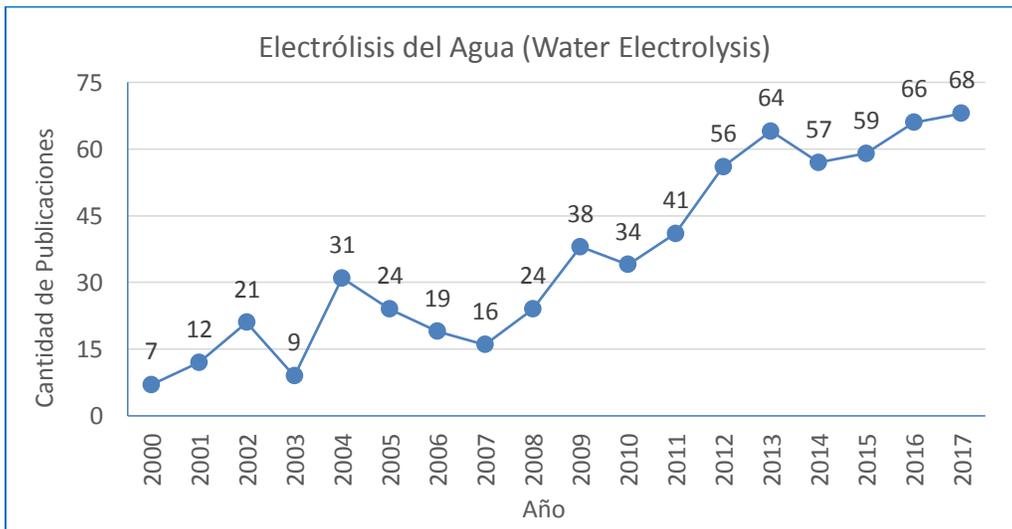


Figura 4. 18. Cantidad de publicaciones por año, en el tema Electrólisis del Agua (Elaboración propia con datos de Science Direct [47]).

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Las energías renovables cada día toman mayor relevancia como fuentes primarias de energía en el mundo y México. El hidrógeno como tal, juega un papel importante en esta área. Por ello en este trabajo se ha hecho una descripción de las diferentes fuentes de energías renovables disponibles, poniendo énfasis en todo lo tocante a hidrógeno.

El hidrógeno como fuente de energía tiene un gran potencial de aplicación para beneficio de la humanidad, eso se puede ver en sus características químicas y físicas, de las que destaca su gran poder energético y su nula contaminación ambiental. Además, se tiene un gran avance en investigación y desarrollo tecnológico en la producción de hidrógeno.

Sin embargo, se tienen cuestiones pendientes, como el almacenamiento de hidrógeno, que aun presenta algunos inconvenientes técnicos, pues el hidrógeno presenta gran inestabilidad.

El hidrogeno empezó a tomar un gran avance en el sector energético como se observó en las gráficas anteriores, las publicaciones acerca del hidrogeno tuvieron una pendiente positiva en los últimos 17 años, por lo tal se considera como una fuente de energía viable dentro de unos años debido a su bajo costo de producción y su gran contenido energético.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Alatorre Frenk, .2009. Energía renovables para el desarrollo sustentable de México. Secretaria de Energía.[Publicación en línea]. Consultado el 3 de septiembre del 2013 en: http://www.sener.gob.mx/res/0/ER_para_Desarrollo_Sustentable_Mx_2009.pdf.
- [2] I. U. Quiñones Tzec, Estimación de la producción de hidrogeno en base a energía renovables. El caso de Chetumal y Cancún, Universidad de Quintana Roo, 2010.
- [3] A. Sanchez y H. Castaño, Libro Interactivo Sobre Energía Solar y Sus Aplicaciones, 2011.
- [4] IEA (International Energy Agency), «Trends 2015 in Photovoltaic Applications,» Photovoltaic Power Systems Programme, Suecia, 2015.
- [5] Greenpeace, Publicación en línea. Consultada el 6 de febrero de 2014 en: <http://www.greenpeace.org/raw/content/argentina/cambio-climatico/revolucion-energetica/energ-as-limpias/energia-solar/energ-a-solar-revoluci-n-ene.pdf>, 2008.
- [6] G. Gil Garcia, Energías del siglo XXI: de las energías fósiles a las alternativas., España: Mundi-prensa, 2008, p. 193.
- [7] E. Mireles Ornelas, La energía eólica., vol. I, Argentina: El cid Editor , 2009, p. 4.
- [8] Instituto Tecnológico de Canarias. S.A., Energías Renovables y Eficiencia Energética. ISBN: 978-84-89093-86-3, 2008, p. 97.
- [9] S. d. E. SENER, Balance Nacional de Energía 2015, Ciudad de México, 2016, p. 23.
- [10] PEMEX (Petróleos Mexicanos), Reservas de hidrocarburos de México al 1 de enero de 2015, 2015. Consultado en: <http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/ReservasHidrocarburos.aspx>, p. 4.
- [11] SENER (Secretaría de Energía), 2012. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2012-2026.pdf. [Último acceso: 15 Octubre 2017].
- [12] M. E. Sánchez Aguilar, Quintana Roo y el sector energético: análisis actual y propuesta de una estrategia hacia un futuro sustentable, Chetumal, Quintana Roo: Universidad de Quintana Roo, 2017, p. 25 y 26.

- [13] Futuro. Revista Trimestral Latino Americana y Caribeña de Desarrollo Ustentable, «Energías Alternativas: el hidrógeno, las mareas y las olas,» *Revista Trimestral Latino American y Caribeña de Desarrollo Sustentable*, nº 15, 2006.
- [14] A. Terán Contreras, Viabilidad Técnico-Económica de la implementación de la tecnología del hidrógeno en el sector transporte público urbano en la zona metropolitana de Mérida, Yucatán, 2013.
- [15] J. Martínez Molina, J. Medellín Rosas y J. García Serrano, Producción de energía eléctrica a partir de energía renovables e hidrógeno, DF: UNAM, 2006.
- [16] J. Cruz Arguello, Desempeño a altas presiones de generación de un electrolizador del tipo ESP, Chetumal, Quintana Roo, 2007, pp. 3,10.
- [17] Asociación Española del Hidrógeno, [En línea]. Available: http://www.aeh2.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=41&lang=en. [Último acceso: 2 Octubre 2017].
- [18] C. A. Ruiz, La seguridad Energética de América Latina y el Caribe en el contexto Mundial., Santiago de Chile, ISBN: 978-92-1-323-137-1, 2007.
- [19] U. Bossel, «Does a Hydrogen Economy Make Sense?,» *Proceeding of the IEEE*, vol. 94, nº 10, pp. 1826-1837, 2006.
- [20] United State Department of Energy, «National Hydrogen Energy Roadmap,» November 2002. [En línea]. Available: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/national_h2_roadmap.pdf. [Último acceso: 2 Octubre 2017].
- [21] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), Biomasa: Gasificación, Madrid, España, ISBN: 978-84-96680-20-3, 2007.
- [22] R. Duhalt Vázquez, «Producción Fotobiológica de Hidrógeno,» de *Memorias del XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería, del 18-23 de septiembre*, Merida, Yucatán, 2005.
- [23] J. Botas, J. Calles, J. Dufour y G. San Miguel, «La economía del hidrógeno. Una visión global sobre la revolución energética del siglo XXI. 1. Producción y almacenamiento de hidrógeno,» *Acta Científica y Tecnológica*, nº 9, pp. 33-36, 2005.

- [24] J. Dufour, «Grandes avances en el campo de la pila de hidrógeno, en BLOGS madri+d,» 23 Marzo 2007. [En línea]. Available: <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2007/03/23/62133>. [Último acceso: 20 Octubre 2017].
- [25] Asociación Argentina del Hidrógeno, [Publicación en línea]. Consultado el 21 de febrero del 2014 en: <http://www.aah2.org.ar/almacenamiento.htm>.
- [26] I. Herraiz Cardona, «Capítulo 2. Electrolisis del Agua,» de *Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua. (Tesis Doctoral) Universitat Politècnica de València.*, Valencia, 2012, pp. 29-65.
- [27] W. Kreuter y H. Hofmann, «Electrolysis: the important energy transformer in a world of sustainable energy,» *International Journal of Hydrogen Energy* 23, pp. 661-666, 1998.
- [28] K. Zeng y D. Zhang, «Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications,» *Progress in Energy and Combustion Science* 36, pp. 307 - 326, 2010.
- [29] S. Dutta, «Technology assessment of advanced electrolytic hydrogen production,» *International Journal of Hydrogen Energy* 15, pp. 379-386, 1990.
- [30] J. Divisek, Water electrolysis in a low and medium temperature regime, en *Electrochemical hydrogen technologies - Electrochemical production and combustion of hydrogen*, New York: Ed. H. Wendt. Elsevier, 1990, pp. 137-212.
- [31] H. Wendt y G. Imarisio, «Nine years of research and development on advanced water electrolysis. A review of research program of the commission of the European communities,» pp. 1-14, 1988.
- [32] V. M. Rosa, M. F. Santos y E. P. da Silva, «New materials for water electrolysis diaphragms,» *International Journal of Hydrogen Energy*, nº 20, pp. 697-700, 1995.
- [33] O. Ulleberg, «Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach,» *International Journal of Hydrogen Energy* 28, pp. 21 - 33, 2003.
- [34] R. LeRoy, «Industrial water electrolysis: Present and future,» *International Journal of Hydrogen Energy* 8, pp. 401-417, 1983.
- [35] F. Barbir, «PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources,» *Solar Energy*, nº 8, pp. 661-669, 2005.
- [36] [En línea]. Available: <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/pem/pemmain.htm>.

- [37] [En línea]. Available: http://www.chemsoc.org/chembytes/ezine/2000/kington_jun00.htm.
- [38] S. D. Han, K. B. Park, R. Rana y K. C. Singh, «Developments of water electrolysis technology by solid polymer electrolyte,» *Indian Journal of Chemistry*, nº 41A, pp. 245-253, 2002.
- [39] T. Hijikata, «Research and development of international clean energy network using hydrogen energy (WE-NET),» *International Journal of Hydrogen Energy*, nº 27, pp. 115-129, 2002.
- [40] S. J. Paddison, «Proton conduction mechanism at low degrees of hydration in sulfonic acid-based polymer electrolyte membranes,» *Annual Review of Material Research*, nº 33, pp. 289-319, 2003.
- [41] W. Donitz, E. Erdle y R. Streicher, «High temperature electrochemical technology for hydrogen production and power generation, en Electrochemical hydrogen technologies - Electrochemical production and combustion of hydrogen,» *Ed. H. Wend. Elsevier*, pp. 213-259, 1990.
- [42] J. Herring, J. Brien, C. Stoots, G. Hawkes, J. Hartvigse y M. Shagnam, «Progress in high temperature electrolysis for hydrogen production using planar SOFC technology,» *International Journal of Hydrogen Energy* 32, pp. 400-450, 2007.
- [43] R. Hino, K. Haga, H. Aita y K. Sekita, «R&D on hydrogen production by high temperature electrolysis of steam,» *Nuclear Engineering and Design* 233, pp. 363-375, 2004.
- [44] V. Kharton, F. Marques y A. Atkinson, «Transport properties of solid oxide electrolyte ceramics: a brief review.,» *Solid State Ionics* 174, pp. 135-149, 2004.
- [45] H. Hong, U. Chae, S. Choo y K. Lee, «Microstructure and electrical conductivity of Ni/YSZ and NiO/YSZ composites for high temperature electrolysis prepared by mechanical alloying,» *Journal of Power Sources* 149, pp. 84-89, 2006.
- [46] V. Utgikar y T. Thiesen, «Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy,» *International Journal of Hydrogen Energy* 31, pp. 939-944, 2006.
- [47] «ScienceDirect,» [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/>. [Último acceso: 15 ABRIL 2018].

- [48] Elsevier, «International Journal of Hydrogen Energy.,» [En línea]. Available: [https://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-hydrogen-energy/..](https://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-hydrogen-energy/) [Último acceso: 2018 Abril 20].