

Departamento de Energética y Mecánica de Fluidos
Escuela Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla
Avenida de los Descubrimientos S/N
Sevilla

Proyecto Fin de Carrera:

ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO

CONTEXTO, ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

Clara Fdez-Bolaños Badía

Marzo 2005

Tutor del Proyecto:
D. Ramón Velázquez Vila

*A mis padres,
mi hermana
y Alejandro.*

“ Sin carbón no habría maquinaria, y sin maquinaria no habría vías del tren, ni locomotoras, ni fábricas, nada de lo que es indispensable en la civilización moderna.

¿Qué quemarán en lugar de carbón?

Agua — contestó Harding.

¿Agua?— exclamó Pencroft — ¿agua para calentar agua?

Sí, pero agua en sus elementos primitivos — respondió Harding — Creo que el agua será algún día utilizada como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizándolos juntos o por separado, proporcionarán una fuente inagotable de calor y luz.

Me gustaría verlo — observó el marinero.

Nacimos demasiado pronto,... ”

La Isla Misteriosa, Julio Verne, 1874.

ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO

CONTEXTO, ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

ÍNDICE DE CONTENIDO

Índice de Contenido.....	6
Índice de figuras.....	10
Índice de tablas.....	13
1 Introducción.....	15
1.1 Introducción general.....	16
1.2 Panorámica energética mundial.....	20
1.2.1 Demanda energética mundial.....	20
1.2.2 Factores determinantes de la demanda energética.....	26
1.2.3 Evolución de la demanda energética por regiones.....	28
1.2.3.1 Unión Europea.....	28
1.2.3.2 Norte América.....	29
1.2.3.3 Europa Central y Oriental y la Comunidad de Estados Independientes.....	29
1.2.3.4 Japón y el Pacífico.....	30
1.2.3.5 Asia.....	31
1.2.3.6 América Latina.....	31
1.2.3.7 Oriente Medio y África.....	31
1.2.4 Agotamiento de los combustibles fósiles.....	32
1.3 Problemática medioambiental.....	38
1.3.1 Cambios medioambientales.....	38
1.3.2 Posibles causas de los cambios climáticos.....	40
1.3.3 Emisiones de CO ₂	41
1.3.4 Relación entre el calentamiento terrestre y las emisiones de CO ₂	42
1.3.5 Efectos provocados por el aumento de temperatura según el IPCC	43
1.3.6 Respuesta internacional al problema del cambio climático.....	46
1.3.7 Papel de los bosques en la fijación del carbono.....	48

2	Análisis de la Alternativa Energética.....	51
2.1	Introducción.....	52
2.2	Energías primarias.....	54
2.2.1	Introducción.....	54
2.2.2	Energía Hidráulica.....	54
2.2.3	Energía Solar.....	55
2.2.4	Energía Eólica.....	57
2.2.5	La Biomasa.....	58
2.2.6	Energía Geotérmica.....	59
2.2.7	Energía Mareomotriz.....	61
2.2.8	Energía Nuclear por fisión.....	61
2.2.9	Energía Nuclear por fusión.....	62
2.2.10	Conclusión.....	63
2.3	Combustibles alternativos al hidrógeno.....	65
2.3.1	Introducción.....	65
2.3.2	Etanol.....	65
2.3.3	Biodiesel.....	66
2.3.4	Metanol.....	70
2.3.5	Derivados del Carbón.....	71
2.4	Propiedades del hidrógeno.....	73
2.4.1	Introducción.....	73
2.4.2	Propiedades del hidrógeno.....	73
2.4.3	Propiedades características del hidrógeno gaseoso.....	78
2.4.4	Propiedades características del hidrógeno líquido.....	80
2.5	Comparación entre las distintas alternativas.....	82
2.5.1	Introducción.....	82
2.5.2	Inagotabilidad.....	82
2.5.3	Eficiencia.....	82
2.5.4	Seguridad.....	84
2.5.5	Combustible para el transporte.....	85
2.5.6	Impacto ambiental.....	86
2.5.7	Viabilidad económica.....	87
2.5.8	Versatilidad.....	88

2.5.9	Otras consideraciones.....	89
2.5.10	Conclusiones.....	89
3	Sistema de Energía del Hidrógeno.....	91
3.1	Producción de hidrógeno.....	92
3.1.1	Introducción.....	92
3.1.2	Métodos de producción de hidrógeno.....	92
3.1.3	Electrolisis.....	94
3.1.4	Reformado de Vapor de Gas Natural.....	99
3.1.5	Gasificación del Carbón.....	101
3.1.6	Oxidación Parcial de Hidrocarburos.....	103
3.1.7	Biomasa.....	105
3.1.7.1	Gasificación.....	106
3.1.7.2	Pirólisis.....	107
3.1.7.3	Oxidación Parcial.....	107
3.1.7.4	Fermentación.....	108
3.1.8	Ciclos de Hidrólisis Termoquímica.....	110
3.1.8.1	Ciclo del Azufre-Yodo.....	111
3.1.8.2	Ciclo termoquímico UT-3.....	113
3.1.8.3	Proceso Zn/ZnO.....	114
3.1.9	Energía Solar.....	115
3.1.9.1	Electroquímica.....	115
3.1.9.2	Termoquímica.....	117
3.1.9.3	Fotoquímica.....	118
3.1.10	Producción fotobiológica del hidrógeno.....	122
3.1.11	Conclusiones.....	123
3.1.11.1	Comparación del análisis del ciclo de vida de los procesos de producción de hidrógeno.....	123
3.1.11.2	Comparación entre los distintos sistemas de producción.....	124
3.1.11.3	Posible evolución de los sistemas de producción...	126
3.2	Almacenamiento.....	127
3.2.1	Introducción.....	127
3.2.2	Hidrógeno comprimido.....	128

3.2.3	Hidrógeno líquido.....	130
3.2.4	Hidruros Metálicos.....	135
3.2.5	Hidruros Químicos.....	138
3.2.6	Nanoestructuras de Carbono.....	142
3.2.7	Almacenamiento subterráneo de hidrógeno gaseoso.....	145
3.2.8	Almacenamiento en gaseoductos.....	146
3.2.9	Conclusiones.....	146
3.3	Distribución.....	150
3.3.1	Introducción.....	150
3.3.2	Transporte como Gas Comprimido.....	151
3.3.3	Transporte como Hidrógeno Líquido.....	153
3.3.4	Transporte en Hidruros Metálicos.....	154
3.3.5	Consideraciones sobre los métodos de transporte.....	154
3.3.6	Generación Distribuida.....	156
3.3.7	Conclusiones.....	156
3.4	Células de combustible.....	158
3.4.1	Introducción.....	158
3.4.2	Funcionamiento de una célula de combustible.....	158
3.4.3	Tipos de células de combustible.....	161
3.4.3.1	Células de combustible poliméricas (PEMFC).....	161
3.4.3.2	Células de combustible alcalinas (AFC).....	163
3.4.3.3	Células de combustible de ácido fosfórico (PAFC).....	163
3.4.3.4	Células de combustible de carbonatos fundidos (MCFC).....	164
3.4.3.5	Células de combustible de óxidos sólidos (SOFC).....	166
3.4.3.6	Células de combustible de metanol directo (DMFC).....	167
3.4.4	Comparación entre distintas células de combustible.....	168
3.4.5	Ventajas de las células de combustible.....	170
3.4.6	Conclusión.....	170
3.5	Aplicaciones del hidrógeno.....	172
3.5.1	Introducción.....	172
3.5.2	Aplicaciones portátiles.....	174
3.5.3	Aplicaciones estacionarias.....	179

3.5.4	Aplicaciones en el transporte.....	184
3.5.5	Aplicaciones espaciales.....	191
3.5.6	Aplicaciones militares.....	192
4	Barreras para la introducción del hidrógeno.....	195
4.1	Seguridad.....	196
4.1.1	Introducción.....	196
4.1.2	Riesgos y Recomendaciones de las Instalaciones de Hidrógeno.....	196
4.1.3	Riesgos fisiológicos en presencia de hidrógeno.....	201
4.1.4	Propiedades del hidrógeno que lo hacen más seguro que otros combustibles.....	202
4.1.5	Normas básicas de seguridad.....	206
4.1.6	Selección de materiales.....	208
4.1.7	Conclusiones.....	209
4.2	Normativa.....	211
4.2.1	Introducción.....	211
4.2.2	La Estandarización. El Comité Técnico ISO/TC 197.....	212
4.2.3	Reglamentación sobre el hidrógeno.....	215
5	Resumen y Conclusiones.....	219
Anexos.....		235
A:	Bibliografía.....	236
B:	Páginas de internet visitadas.....	239

Índice de Figuras

Figura 1 – Distribución del consumo mundial de energía primaria	21
Figura 2 - Evolución del consumo energético mundial según la Comisión Europea.....	22
Figura 3 - Evolución de la Demanda Energética mundial según la Agencia Internacional de la Energía. (WEO2004)	24
Figura 4- División mundial en siete regiones.....	26
Figura 5 – Evolución de la población mundial por regiones.....	27
Figura 6 – Evolución del Producto Interior Bruto por regiones. ¹⁰	27
Figura 7 – Evolución del Consumo Energético en la Unión Europea. ¹¹	28
Figura 8 – Evolución del Consumo Energético en Norte América.	29

Figura 9 - Evolución del Consumo Energético en CIS y CEE.....	30
Figura 10 – Evolución del Consumo Energético en el Pacífico. ¹³	30
Figura 11 – Evolución del Consumo Energético en Asia.	31
Figura 12 - Previsión de Campbell y Lahemene sobre el agotamiento del petróleo.	33
Figura 13 - Reservas estimadas de gas natural en el mundo.	35
Figura 14 - Evolución de los precios del petróleo y de sus productos derivados.....	36
Figura 15 - Variación de la Temperatura Superficial del Hemisferio Norte.....	39
Figura 16 – Emisiones de CO ₂ por región y por sector.....	41
Figura 17 – Evolución de la Concentración de CO ₂ en la atmósfera.	42
Figura 18 – Variación de la temperatura y de la concentración atmosférica de CO ₂	43
Figura 19 – Proceso de Producción del Biodiesel	68
Figura 20 – Porcentaje de reducción de emisiones en una mezcla de diesel y biodiesel con respecto al diesel dependiendo del porcentaje de biodiesel.....	69
Figura 21 – Límites de Inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-oxígeno-nitrógeno.	75
Figura 22 – Límites de detonación de una mezcla de hidrógeno y aire dependiendo del tipo de confinamiento.	77
Figura 23 – Variación de la distancia a un fuego de hidrógeno par una exposición a una radiación térmica de 2cal/cm ² para un tiempo de exposición de 10s.	79
Figura 24 – Vías de producción de hidrógeno.....	92
Figura 25 – Clasificación del hidrógeno en hidrógeno limpio y sucio.....	93
Figura 26 – Entradas y salidas de un proceso de producción de hidrógeno.....	94
Figura 27 – Esquema de la Electrolisis.	95
Figura 28 – Reacciones de la Electrolisis.....	95
Figura 29 – Banco de ensayo de un Electrolizador . ⁴³	97
Figura 30 – Entradas y salidas del proceso de producción de hidrógeno mediante reformado de vapor.....	100
Figura 31 – Entalpías de reacción del proceso de reformado de vapor de metano.	100
Figura 32 – Diagrama de flujo del Reformado de Vapor de Gas Natural	101
Figura 33 – Planta Piloto de Gasificación de Carbón.....	102
Figura 34 – Diagrama de flujo de la producción de hidrógeno a partir de carbón.....	103
Figura 35 – Diagrama de flujo de la producción de hidrógeno mediante oxidación parcial de hidrocarburos.	104
Figura 36 – Esquema de la producción mediante oxidación parcial de hidrocarburos.	105
Figura 37- Distintas formas de producción de hidrógeno a partir de la biomasa.	106
Figura 38 – Diagrama de Flujo del sistema de oxidación parcial de biomasa con agua en estado supercrítico.	108
Figura 39 - Bioproceso de producción de hidrógeno a partir de la biomasa.....	109
Figura 40 – Esquema de un ciclo termoquímico de hidrólisis	110
Figura 41 – Reacciones del ciclo Azufre-Yodo.....	111
Figura 42 –Entradas y Salidas del ciclo Azufre-Yodo	111
Figura 43 – Ciclo de Azufre-Yodo.	112
Figura 44 – Reacciones del ciclo Azufre-Yodo.....	112
Figura 45 – Reacciones del ciclo Bowman-Westinghouse	113
Figura 46 – Reacciones del ciclo termoquímico UT-3.....	114
Figura 47 – Procesos solares termoquímicos de producción de hidrógeno.....	117
Figura 48 - Esquema de un Fotoelectrodo de estructura plana.....	121
Figura 49 – Esquema de la estructura de un Fotoelectrodo Híbrido.	121
Figura 50 – Alga verde <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	122

Figura 51 – Emisión neta de gases de efecto invernadero en la producción de hidrógeno.	123
Figura 52-Evolución de la implantación de los sistemas de producción de hidrógeno.	126
Figura 53 – Esquema de una barrera de hidrógeno.	129
Figura 54 – Esquema de un tanque de hidrógeno comprimido.	129
Figura 55 – Ciclo de Linde o de expansión de Joule-Thompson.	130
Figura 56 – Diagrama de Flujo de una Licuación con preenfriamiento.....	131
Figura 57 – Diagrama Temperatura-Entropía de una Licuación con preenfriamiento.	131
Figura 58 – Esquema de un contenedor de hidrógeno líquido.	133
Figura 59 – Planta de Licuación de hidrógeno.....	134
Figura 60 - Fotografía de un sistema de hidruro metálico.....	136
Figura 61 – Reacciones químicas y densidades gravimétricas de algunos hidruros químicos.	138
Figura 62 – Proceso de regeneración del Hidruro de Litio.	139
Figura 63 – Representación gráfica de la estructura del slurry de Hidruro de Litio. ...	140
Figura 64 – Slurry de Hidruro de Litio.....	141
Figura 65- Experimento de acercamiento de una llama a un slurry de LiH.....	141
Figura 66 – (a) Nanotubos de pared compuesta; (b)Nanotubos de pared simple.....	143
Figura 67 – Nanotubos de carbono dopados.	144
Figura 68 – Comparación de volúmenes de almacenamiento del hidrógeno a bordo..	149
Figura 69 – Gaseoducto de distribución de hidrógeno.	151
Figura 70 – Gaseoductos de hidrógeno en Europa propiedad de Air Liquide.	152
Figura 71 – Camión de transporte de cilindros de hidrógeno comprimido.	152
Figura 72 – Esquema de una pila de combustible.	159
Figura 73 – Estructura del Nafion.	162
Figura 74 – Pila de combustible tipo PEM.....	162
Figura 75 – Pila de Combustible de Ácido Fosfórico de 200kW.....	164
Figura 76 – Pila de Combustible tipo MCFC.....	165
Figura 77 – Aplicaciones nuevas y convencionales del hidrógeno.	172
Figura 78 – Producción y Aplicaciones del hidrógeno.....	173
Figura 79 – Esquema de un teléfono móvil con pila de combustible.....	176
Figura 80 – Ordenador portátil con una PEMFC.	177
Figura 81 – Generador de 1.2kW de PEMFC	178
Figura 82 - Pilas de combustible estacionarias.....	181
Figura 83 – Generación centralizada con pilas de combustible.	182
Figura 84 – Pila de Combustible tipo SOFC.....	182
Figura 85 – Evolución del uso de las pilas de combustible en aplicaciones estacionarias.	183
Figura 86 – Combustibles utilizados en las pilas de combustible estacionarias.	184
Figura 87 – Comparación en volumen y peso los distintos tipos de almacenamiento .	187
Figura 88 – Esquema de un vehículo de pila de combustible.	187
Figura 89 – Análisis de las emisiones y de las necesidades energéticas para vehículos dependiendo el combustible que utilicen. (Estudio Europeo).....	188
Figura 90– Análisis de las emisiones y de las necesidades energéticas para vehículos dependiendo el combustible que utilicen. (Estudio Norteamericano).....	189
Figura 91 – Esquema de un Space Shuttle.	191
Figura 92 – Lanzamiento de un Spac Shuttle.....	192
Figura 93 – Bombardero B-57.....	193

Figura 94 – (a) Relación entre la distancia y el peso del hidrógeno quemado para quemaduras de tercer grado por radiación térmica; (b) Intensidad de la radiación frente al tiempo de exposición para el umbral de valores dañinos..... 202
Figura 95 – Comparación entre una llama de hidrocarburo y una de hidrógeno. 205
Figura 96 – Zona de peligrosidad tras una fuga de hidrógeno, metano o propano. 206

Índice de Tablas

Tabla 1 - Previsiones de la Comisión Europea sobre la evolución de la demanda energética mundial..... 23
Tabla 2 - Previsiones de la Agencia Internacional de la Energía sobre la evolución de la demanda de energía mundial. 25
Tabla 3 - Reservas de petróleo en EEUU, Arabia Saudí y Rusia..... 34
Tabla 4 - Efectos previsibles dependiendo de la temperatura media global. 44
Tabla 5 – Comparación entre las propiedades de un Diesel y un Biodiesel..... 70
Tabla 6 – Energía mínima de la chispa para la ignición de una mezcla de hidrógeno-aire. 76
Tabla 7 – Factores de Eficiencia de utilización para distintas Aplicaciones..... 83
Tabla 8 – Comparación del Factor de Movilidad para distintos combustibles 86
Tabla 9 – Posibilidad de utilización de distintos procesos de conversión..... 88
Tabla 10 – Cantidad de Ecopuntos en el ACV de distintos sistemas de generación..... 98
Tabla 11 – Ventajas e inconvenientes de las principales tecnologías de producción de hidrógeno 124
Tabla 12 – Capacidades de almacenamiento medidas en diferentes nanoestructuras de carbono. 145
Tabla 13 – Ventajas e Inconvenientes de los distintos métodos de almacenamiento del hidrógeno. 148
Tabla 14 – Características de las células de combustible I..... 169
Tabla 15 – Características de las células de combustible..... 170
Tabla 16 – Síntomas dependiendo de la concentración de oxígeno en aire. 201
Tabla 17 – Compatibilidad de los distintos materiales en sus aplicaciones en sistemas de hidrógeno.¹¹³ 208

