



***TESIS DE GRADO
EN INGENIERIA INDUSTRIAL***

***WIRELESS REVOLUTION
“Cortando el último cable”***

Autor: Lucas Fernando Busso

Director de Tesis: Ingeniero Ricardo Gutierrez

2007

RESUMEN EJECUTIVO

La proliferación mundial de equipos electrónicos portátiles de los últimos años ha creado una gran y creciente demanda de *fuentes de energías compactas, livianas y potentes*. Notebooks, reproductores de música personales, videofilmadoras, teléfonos celulares, cámaras fotográficas digitales, PDAs (Personal Digital Assistant) entre otros dispositivos portátiles demandan cada vez más energía.

Si bien la tecnología existente de baterías recargables ha madurado mucho, ésta simplemente no logra satisfacer por completo las necesidades de los usuarios.

En los próximos años esta brecha se seguirá extendiendo, debido a que los equipos vendrán cada vez más completos y potentes.

Con respecto a la generación actual de baterías recargables de Ion-Litio, se esperan para los próximos años mejoras muy modestas de esta tecnología en cuanto a su capacidad (menos del 5% por año), con lo que peleará por satisfacer los siempre crecientes requerimientos de energía. Esto da lugar a la creación y desarrollo de nuevas tecnologías y productos en lo que respecta al almacenamiento de energía.

Al mismo tiempo, las personas se están volviendo más portátiles y móviles que nunca, ensanchando aún más la brecha energética. Las notebooks son el segmento de computadoras de más rápido crecimiento, y se espera que las ventas en Estados Unidos para el mercado externo crezcan en más de 60 millones de unidades en el próximo año¹.

En Argentina se ha registrado un aumento en las ventas de computadoras portátiles del 77% entre 2006 y 2005², y en el primer semestre de 2007 ya se registró un alza del 48% frente al mismo período de 2006³.

La inmensa disponibilidad de Wi-Fi ha permitido cortar “la correa” de la Ethernet, es decir se ya no se depende más de cables para poder estar conectado a las redes locales. Ahora los consumidores están buscando cortar finalmente la última correa – *el cable del cargador*.

¹ Worldwide Notebook Pc Forecast – 2007-2011 – www.researchandmarkets.com

² Ariel Ojman – 2005 – Pronóstico de venta de computadoras personales - Consultora IDC

³ Luciano Acosta, Analista Senior Consumer and Commercial Devices de IDC Cono Sur.

Muchas veces usuarios móviles deben tomar a decisiones no muy felices como ser acortar una sesión de trabajo o dejar de mandar un mail para conservar la poca duración de las baterías convencionales de sus dispositivos.

Para alcanzar este casi utópico deseo de total independencia de cables, científicos e investigadores están desarrollando varias alternativas.

Este documento presenta la tecnología de las *celdas de combustible de metanol directo*. Se trata de pequeñas celdas de combustible alimentadas por metanol de alta concentración. Luego de reaccionar electro-químicamente el metanol con el oxígeno del aire dentro de la celda, se obtiene la electricidad necesaria para cualquiera de los aparatos electrónicos que se esté abasteciendo. La ventaja de estas celdas de combustibles sobre una batería tradicional es que una celda de combustible de metanol directo puede ser recargada con más combustible, metanol en este caso, cada vez que la energía de ésta se agota, obteniendo así *inmediatamente* más energía en forma de electricidad.

Una *celda de combustible* es un sistema que produce energía mientras que una batería es un dispositivo que guarda o almacena energía. Las *celdas de combustible de metanol directo* solo requieren del agregado externo de combustible para funcionar. Mientras se provea de combustible y aire a las *DMFC*, se podrá contar con energía. No necesitan ser recargadas. Solo se debe contar con un cartucho extra de metanol o una botella de metanol, no más cables, ni transformadores cargadores. Además se estima que resultará mucho más barato contar con cartuchos extra de metanol que comprar baterías recargables de reserva adicionales.

Las *celdas de combustible de metanol directo* no poseen partes móviles, operan de manera silenciosa y relativamente a bajas temperaturas, y además ofrecen un tiempo de operación continuo mucho mayor que el de las baterías tradicionales, es decir las baterías recargables de Litio-Ion.

El *cartucho portátil de metanol* para celdas de combustible cambiará el comercio y las relaciones político-sociales de este nuevo siglo XXI. Así lo hicieron la máquina de vapor a carbón en el siglo XIX y el motor de combustión a petróleo en el XX.

EXECUTIVE BRIEF

The worldwide proliferation of portable electronic devices — including notebook and tablet computers, PDAs, camcorders, mobile phones and other power-hungry products — has created a large and growing demand for energy sources that are *compact, lightweight and powerful*. Existing rechargeable battery technology, which has greatly matured, simply doesn't meet the needs of users. This gap is expected to widen in the next few years, as devices become more powerful and full featured.

Similar power-gap conditions exist for other product categories as well, in addition to notebook computers. Current generation lithium-ion (Li-ion) rechargeable battery technology capacity improvements are expected to be modest in the coming years (<5% per year) and will struggle to meet ever-increasing power requirements. This creates an enormous opportunity for new power technologies and products.

At the same time, we're becoming more mobile than ever, widening the power gap. Notebook PCs are the fastest-growing computer segment, and shipments are expected to grow to more than 60 million units⁴ In Argentina an increase of the 77% has been identified on notebooks sales between 2005 and 2006.⁵ The first semester of 2007 registered a 48% increase regarding the same time of 2006.⁶

Widespread Wi-Fi availability has essentially cut the Ethernet tether. Users are looking to cut the last cord as well — our tether to ac power. Mobile users often create work-around solutions to conserve their battery power, such as cutting short a work or e-mail session.

To reach this utopia of a total wire independence scientists and researchers are working on the development of several alternatives.

This paper explores the sprouting of the *DMFC* technology. It consists on tiny fuel cells fed by highly concentrated methanol.

A *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)* works by creating thermodynamic potential out of the chemical reaction between methanol and air in a specific manner. Without the aid of moving parts, *Direct Methanol Fuel Cells* produce electricity through an electrochemical process, without combustion and without the need

⁴ Worldwide Notebook Pc Forecast – 2007-2011 – www.researchandmarkets.com

⁵ Ariel Ojman – 2005 – Pronóstico de venta de computadoras personales - Consultora IDC

⁶ Luciano Acosta, Analista Senior Consumer and Commercial Devices de IDC Cono Sur

to reform the fuel stock into hydrogen or expose hydrogen in a gaseous state to the *Proton Exchange Membrane (PEM)*.

The advantage of a *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)* over a tradition battery is that a *Direct Methanol Fuel Cell* can simply be refilled with more fuel when it runs out. A fuel cell is an energy- producing device while a battery is an energy- storing device. *Direct Methanol Fuel Cells* only require externally added fuel to run. As long as fuel and air are supplied to the DMFC, it will continue to produce power. It does not need to be recharged.

With a fuel cell, you simply carry one fuel-cell system and carry multiple cartridges to extend operating run-time. Instead of carrying three batteries, you can carry three cartridges, which are expected to be much lighter and significantly smaller than the equivalent battery package. Fuel cartridges are expected to be priced at a level similar to disposable alkaline batteries

Without the aid of moving parts the direct methanol fuel cells operate silently, at relatively low temperatures and offer much longer operating time than today's batteries. Unlike a battery, *DMFCs* do not need to be recharged. They can provide electricity and heat continuously to the consumer electronic devices as long as oxygen and fuel are supplied to the fuel cell.

It is expected that the *methanol mobile cartridge* for fuel cells will change commerce and political-social relations through this new XXI century. In the same way the steam machine fed by carbon has changed the world in the XIX century, as well petrol combustion motors did in XX.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Este trabajo propone el análisis de una tecnología disruptiva: las *celdas de combustible de metanol directo*. Para ello se evalúan las posibilidades de éxito de la misma mediante un estudio comparativo entre la generación actual de baterías recargables y esta tecnología emergente.

El objetivo es poder evaluar los problemas que quedan por resolver para que se pueda insertar esta tecnología a nivel global, proponiendo soluciones y mitigaciones a las barreras existentes.

A partir del análisis se concluye que para una exitosa transición hacia una economía de hidrógeno, el primer paso radica indefectiblemente en la introducción de las *celdas de combustible de metanol directo* en el mercado de los dispositivos electrónicos portátiles.

Palabras Clave: energía portátil, hidrógeno, metanol, celdas de combustible, inalámbrica, éxito, dispositivos electrónicos portátiles, tecnología, petróleo, contaminación, eficiencia, cartucho, batería

ABSTRACT

This paper describes the analysis of *Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)*, a disruptive technology. Success possibilities are evaluated through the comparative study between actual rechargeable battery generation and this sprouting technology.

The scope of the project involves the evaluation of the obstacles to be solved so that this technology can become a worldwide lifestyle, suggesting solutions and mitigations to existent barriers.

Through the analysis of the present information it can be concluded that the first step towards a successful transition to a hydrogen economy, lays inevitably on the introduction of *DMFC* to the portable electronics market.

Key words: portable energy, hydrogen, methanol, cell fuels, wireless, success, portable electronics, technology, petrol, pollution, efficiency, cartridge, battery

ÍNDICE

1	MARCO CONCEPTUAL	1
1.1	INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA	1
1.2	LA TERCERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL	2
1.3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3.1	Estancamiento de la tecnología de baterías convencionales	3
1.3.2	La sociedad consume cada vez más energía portátil	4
1.4	MOTIVACIÓN PARA ABORDAR EL PROBLEMA	4
2	ENERGÍA	5
2.1	ENERGÍA EN LA ACTUALIDAD	5
2.1.1	Impacto del uso de la energía en el medio ambiente	5
2.1.2	Una nueva alternativa	9
2.1.3	Producción de hidrógeno	10
2.1.4	Algunas consideraciones acerca del hidrógeno	16
2.1.4.1	Aplicaciones actuales del hidrógeno:	18
2.1.4.2	Nuevas aplicaciones:	19
2.2	ENERGÍA PORTÁTIL	20
2.2.1	Dispositivos electrónicos portátiles	22
2.2.2	Energía portátil en el ámbito militar	23
2.2.3	Mercado de baterías recargables	23
2.2.4	Evolución de los dispositivos electrónico portátiles en la Argentina	24
2.2.5	Tecnología de baterías	26
2.2.6	Economía del mercado energético	28
3	CELDA DE COMBUSTIBLE	29
3.1	HISTORIA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE	30
3.2	TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE	31
3.3	APLICACIONES HISTÓRICAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	32
3.4	PEMFC - CELDAS DE COMBUSTIBLE CON MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO	34
3.4.1	Aplicaciones	36
3.4.1.1	Transporte	36
3.4.1.2	Sustitución y reemplazo de baterías convencionales	39
3.4.1.3	Energía distribuida	40
3.5	DMFC - CELDAS DE COMBUSTIBLE DE METANOL DIRECTO	40
3.5.1	Subproductos de DMFC	42
3.5.2	Las ventajas de DMFC sobre otras celdas de combustible	42
3.5.3	Celdas de baja temperatura con combustible orgánico	44
3.5.4	Micro celdas de combustible de metanol directo	45
3.6	CELDA DE COMBUSTIBLE CON REFORMADO DE HIDRÓGENO	47
3.6.1	RMFC – Celdas de combustible de metanol reformado	47
4	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	49
4.1	ASPECTOS TERMODINÁMICOS DE LA CONVERSIÓN ELECTROQUÍMICA DE ENERGÍA	49
4.1.1	Conducción en una celda	51
4.1.2	Influencia de la corriente en la celda y parámetros de rendimiento operativo	54
4.1.2.1	Sobrepotencial	56
4.1.2.2	Polarización por concentración	56
4.1.2.3	Polarización cinética	58
4.2	PARÁMETROS OPERACIONALES	60
5	ANÁLISIS COMPARATIVO	65
5.1	CRITERIOS PARA LA COMPARACIÓN DE DISTINTOS CONVERTIDORES DE ENERGÍA	65
5.2	VENTAJAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE:	65
5.3	PROBLEMAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	65
5.3.1	Catalizador	65
5.3.2	Eficiencia	66
5.3.3	Pérdidas debidas a la producción, transporte y almacenaje	66
5.3.4	Gestión del agua en las celdas PEM	67
5.3.5	Problemas en la membrana	67

5.3.6	Gestión de la temperatura.....	67
5.3.7	Control de flujo	68
5.3.8	Durabilidad, vida útil, y requisitos especiales	68
5.3.9	Tolerancia limitada al CO (monóxido de carbono).....	68
5.3.10	Otras consideraciones constructivas.....	68
5.4	PROBLEMAS DEL HIDRÓGENO PURO.....	68
5.5	PILAS DE COMBUSTIBLE VS. COMBUSTIÓN INTERNA DE COMBUSTIBLES FÓSILES.....	69
5.6	PILAS DE COMBUSTIBLE VS. BATERÍAS CONVENCIONALES.....	70
5.7	DMFC VS. CELDAS DE COMBUSTIBLE DE H ₂ PURO Ó H ₂ REFORMADO.....	71
5.8	ESTADO DEL ARTE EN LA INVESTIGACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE LAS DMFC.....	72
5.8.1	Desarrollos de Toshiba.....	72
5.8.1.1	La necesidad de celdas de combustible	73
5.8.1.2	Celdas de combustible compactas Toshiba	74
5.8.1.3	Celdas de combustible Toshiba - Ventajas	74
5.8.1.4	Principios operativos	76
5.8.2	Desarrollos de electrodos	77
5.8.3	El desafío de las DMFC	77
5.8.4	Beneficios de las DMFC	77
5.9	METANOL.....	78
5.9.1	Problemas del hidrógeno puro para las pilas de combustible.....	80
6	OPORTUNIDADES LOCALES	81
6.1	NUEVOS NEGOCIOS	81
6.1.1	El mercado de los cartuchos recargables.....	81
6.2	OPORTUNIDADES PARA PAÍSES Y REGIONES	82
6.2.1	Energía distribuida y explotación de recursos renovables.....	82
6.2.2	Reservas de platino en Sudáfrica.....	82
6.2.3	Oportunidades locales	83
6.2.3.1	Metanol en la Argentina	83
6.2.3.2	Normas de aplicación voluntaria y legislación argentina	84
7	POSIBLES SUSTITUTOS	87
7.1	CARGADOR PORTÁTIL	87
7.2	BATERÍAS DE PAPEL.....	87
7.3	CARGADOR INÁLAMBRICO (EXPERIMENTAL).....	88
7.4	CARGADORES INALÁMBRICOS COMERCIALES	89
8	IMPACTO Y COMERCIALIZACIÓN	91
8.1	LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SU IMPORTANCIA EN LA SOCIEDAD	91
8.2	ALGUNOS IMPACTOS SOCIALES.....	91
8.3	LA VIDA CON LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	92
8.4	CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD	97
8.5	EFICIENCIA EN LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	98
8.6	OTRAS APLICACIONES	98
8.7	COOPERACIÓN INDUSTRIA-GOBIERNO	98
8.8	LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE Y LA EDUCACIÓN.....	99
8.9	HACÍA UNA ECONOMÍA DE HIDRÓGENO	99
9	CONCLUSIONES	103
9.1	EL PRIMER PASO HACÍA UNA ECONOMÍA DE HIDRÓGENO	103
9.2	CONCLUSIÓN GENERAL	104
10	BIBLIOGRAFÍA	107
11	ANEXOS	109
11.1	HISTORIA DE LAS BATERÍAS.....	109
11.2	TIPOS DE ACUMULADORES SEGÚN SU NATURALEZA INTERNA.....	109
11.3	PARÁMETROS DE UN ACUMULADOR	114
11.4	TABLA COMPARATIVA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ACUMULADOR.....	115
11.5	LAS BATERÍAS COMO CONTAMINANTES.....	115

WIRELESS REVOLUTION
La revolución inalámbrica
“Cortando el último cable”

1 MARCO CONCEPTUAL

1.1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA

"Las revoluciones grandes en historia tienen como detonante válido una convergencia de los nuevos conceptos de la **energía** y los nuevos conceptos de la **comunicación**. La primera revolución industrial fue accionada por la nueva tecnología que implicaba el carbón y el acero al mismo tiempo que emergió la prensa de la impresión, mientras que la segunda revolución industrial vino alrededor con el descubrimiento del petróleo y del teléfono".⁷

Continuando con la teoría previamente expuesta se aproxima una nueva gran revolución. En estos días se vive en la **era de la información** y de **Internet**. Cada uno de los habitantes de este planeta necesita cada vez más poder acceder continuamente desde cualquier lugar y en cualquier momento a la información. El mundo está realmente conectado y cada persona está comunicada. Pero para ello es imprescindible de la **energía portátil**.

La información está en todas partes, gracias al avance imparable de las redes inalámbricas WI-FI. Para poder avanzar hacia un estilo de vida cada vez más inalámbrico resulta necesario poder suplir la demanda de energía portátil.

La sociedad se ha vuelto cada vez más dependiente de los dispositivos electrónicos portátiles. El inmensurable crecimiento de las ventas de estos artefactos, que ya se han vuelto cotidianos en la vida de la mayoría de las personas de este planeta, conduce indefectiblemente hacia un desarrollo de mejores de *fuentes de energías, que sean compactas, livianas y potentes*.

La energía constituye la savia de la sociedad y de la economía actual. El trabajo, el ocio y el bienestar económico, social y físico dependen de que el abastecimiento de energía sea suficiente y no se interrumpa. La sociedad se torna cada vez más autónoma, con dispositivos portátiles cada vez más demandantes de energía portátil, sin embargo, las personas actúan como si ésta estuviera garantizada, y la demanda de energía continúa creciendo año tras año.

La reducida duración de carga que brindan las baterías tradicionales impide alcanzar definitivamente una vida completamente sin cables, sin límites.

Las fuentes de energía tradicionales basadas en combustibles fósiles tales como el petróleo son limitadas, y el creciente desfase entre una demanda en aumento y una oferta en retroceso tendrá que ser compensado, en un futuro no

⁷ Rifkin, The Hydrogen Economy

muy lejano, utilizando fuentes de energía primaria alternativas. La sociedad debe esforzarse para que éstas resulten más sostenibles y así conjurar los efectos negativos del cambio climático planetario, el riesgo creciente de perturbaciones del abastecimiento, la volatilidad de los precios y la contaminación de la atmósfera asociados a los sistemas energéticos actuales.

En este contexto, dos tecnologías están llamando la atención tanto del sector público como el privado: el hidrógeno, vector energético limpio que puede producirse a partir de cualquier fuente de energía primaria, y las **pilas de combustible**, dispositivos muy eficientes de conversión de energía. El hidrógeno y las pilas de combustible, al hacer posible la denominada energía del hidrógeno, prometen como ninguna otra tecnología disipar inquietudes en materia de seguridad del abastecimiento y cambio climático.

La conjunción de la **tecnología de la electrónica móvil** con la de las **celdas de combustible a hidrógeno** abre la puerta hacia una nueva era energética y la tercera revolución industrial, cuyo efecto multiplicador económico debería extenderse hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XXI y más allá.

1.2 LA TERCERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Se aproxima el comienzo de una nueva era de la energía comercial que va a cambiar el mundo. El precio del petróleo ronda los impensados 100 dólares por barril, y la economía mundial comienza a desacelerarse, mientras productores y consumidores se ajustan el cinturón previendo que el precio del petróleo estará aún más alto. Es evidente que se necesita encontrar una estrategia de salida de la era de los combustibles fósiles para asegurar el futuro de la civilización. Por todo esto, **bienvenidos al mundo del cartucho portátil** para celdas de combustible alimentadas a hidrógeno, o elementos que posean grandes proporciones de hidrógeno.

Esta nueva forma de almacenamiento de energía revolucionará la forma en que se concibe la energía, se organiza el comercio y se estructuran las relaciones políticas y sociales, tal como lo hicieron la máquina de vapor a carbón en el siglo XIX y el motor de combustión interna a petróleo en el XX.

Hitachi, Toshiba, Samsung, Canon, Sanyo, Sony, Panasonic, NEC, Mitsubishi, Fujitsu, Sharp y Olympus compiten entre sí para llegar velozmente al mercado con pequeñas microceldas de combustible alimentadas a metanol que reemplazarán a las baterías tradicionales y darán energía a laptops, teléfonos celulares, agendas electrónicas, reproductores de mp3, filmadoras, reproductores portátiles de DVD, computadoras de mano, video juegos y cámaras digitales.

Los astronautas propulsan sus naves espaciales con celdas de combustible a hidrógeno de alta tecnología desde hace treinta años. La gran ventaja de una celda de combustible a hidrógeno es que no contamina, el único residuo es agua pura y vapor. De hecho, los astronautas usan el agua potable emitida por sus celdas de combustible como fuente principal de agua.

Las celdas de combustible a metanol directo son la tecnología energética de avanzada que necesita una generación cada vez más conectada de usuarios de tecnología digital de comunicaciones para ser autónoma y extremadamente móvil.

La primera generación de cartuchos de celdas de combustible utiliza primordialmente metanol como reserva de combustible. Se extrae hidrógeno del metanol para alimentar la celda de combustible y generar electricidad. Aunque actualmente la mayor parte del metanol proviene del gas natural y el carbón, los nuevos avances tecnológicos están posibilitando que las fuentes renovables de metanol se conviertan en una alternativa económica viable.

El metanol renovable se extrae cada vez más del gas metano de las tierras de relleno sanitario, el estiércol de cerdo, la remolacha, la paja de arroz e incluso la madera flotante.

Los cartuchos portátiles de celdas de combustible podrán dar a un teléfono celular descargado otras veinte horas de conversación. Un reproductor musical portátil, tipo iPod, podría funcionar durante 80 horas con la electricidad generada por el hidrógeno del cartucho de celdas de combustible. La celda de combustible alimentada a hidrógeno tiene de 20 a 30 veces la capacidad de almacenamiento de energía de una batería.

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A continuación se describen las principales fuerzas impulsoras o driving forces que llevan a la industria y a las empresas que están a la vanguardia tecnológica a invertir y desarrollar alguna solución para resolver los problemas que presenta la energía portátil en estos días.

1.3.1 Estancamiento de la tecnología de baterías convencionales

La tecnología empleada actualmente para la fabricación de baterías está llegando al límite de la cantidad de energía que puede ser “empaquetada” por cada kilogramo de peso. De hecho, mediante el empleo de esta misma tecnología se está tendiendo a empaquetar y disminuir el tamaño de las mismas a base de comprimir más y más los componentes que generan la

reacción eléctrica, **convirtiéndolas en baterías de muy alta densidad pero a su vez, en verdaderas “bombas” a pequeña escala, al mantener tanto el “combustible” como la reacción en el mismo espacio.**

1.3.2 La sociedad consume cada vez más energía portátil

Al mismo tiempo se está produciendo una explosión en la demanda de sistemas móviles y portátiles, que cada vez realizan tareas más y más complejas de procesamiento de señal, y que a su vez exigen un mayor consumo de energía. Esto conduce a que las baterías tanto de portátiles como de los teléfonos móviles de nueva generación no sólo duren menos, sino que tengan una vida útil cada vez más corta. Por ejemplo, existen estadísticas que comparan como disminuye la duración de baterías en computadoras portátiles con Windows Vista en relación con las máquinas que utilizan Windows XP. El Windows Vista requiere mayor energía, ya que encripta todo lo que pasa por su núcleo y exige unas capacidades de proceso que prácticamente ningún ordenador adquirido hasta hace unos meses era capaz de soportar.

1.4 MOTIVACIÓN PARA ABORDAR EL PROBLEMA

Presentar a las celdas de combustible de metanol directo como el principal sucesor de la actual generación de baterías de dispositivos portátiles, es decir las baterías de Ion-Litio, es hablar de una tecnología disruptiva, de un problema interesante con mucha actualidad. Un desarrollo exitoso de esta tecnología y una fructuosa inserción de la misma en la sociedad significarán mejoras en la vida diaria de las personas y un cambio hacia un sistema menos contaminante para el ambiente. Se trata de una alternativa novedosa de energía limpia para las generaciones futuras.

2 ENERGÍA

2.1 ENERGÍA EN LA ACTUALIDAD

En la actualidad, el mayor porcentaje de energía eléctrica que se consume mundialmente proviene de la combustión térmica de combustibles fósiles. Este es un método indirecto e ineficiente, ya que implica una etapa intermedia de conversión de calor en trabajo mecánico con un límite de eficiencia intrínseco impuesto por el ciclo de Carnot. Además, durante la combustión se generan sustancias contaminantes del medio ambiente, entre otras, compuestos cancerígenos y formadores de “smog”. La combustión térmica convencional contribuye al aumento de la temperatura media terrestre originando desequilibrios ecológicos y, por otra parte, debido a la baja eficiencia de conversión del método, se desaprovechan las reservas limitadas de combustibles fósiles. De ahí el interés en desarrollar métodos de conversión directa de energía desde sus formas primarias a electricidad y que no produzcan la contaminación del medio ambiente. Uno de los métodos que ha alcanzado mayor grado de desarrollo de **conversión electroquímica de energía**.

El agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, la ineficiencia operacional de su utilización, y el aumento de la contaminación ambiental representan los principales ejes para encontrar una opción diferente para el futuro energético.

El uso de fuentes de energía basadas en recursos renovables ha sido ya ampliamente reconocido como la alternativa más viable para solucionar los problemas asociados a la creciente demanda de energía, la necesidad de proteger el medio ambiente y el requerimiento de una mejor calidad de vida.

2.1.1 Impacto del uso de la energía en el medio ambiente

Es imposible no alterar el ambiente cuando se trata de extraer energía de él, sin embargo es fundamental encontrar la alternativa que menos afecte al ecosistema, **mientras sea sustentable**. Se conocen ampliamente los terribles efectos que está padeciendo el planeta a partir del abuso de los recursos fósiles.

A continuación se introducen los efectos de las diferentes fuentes de energías sobre el medio ambiente:

La utilización de *combustibles fósiles* provoca efectos irreversibles, tales como el calentamiento global, la contaminación ambiental que incluye la degradación

del aire, la acidificación y daño de los bosques, la polución marina y costera y afecta al suelo también. Además del considerable agotamiento de las reservas, que no son infinitas.

Por otro lado la *energía nuclear* genera desechos radioactivos y presenta complicaciones al tratar de manejarla a gran escala. Sin mencionar los problemas que se ocasionarían si se produjera otro accidente como el de Chernobyl.

La *energía eólica* también tiene un elevado impacto visual y sonoro, y un discutido impacto medioambiental (como por ejemplo el desplazamiento de los recorridos de aves migratorias, a pesar de que se dejan corredores especiales para pájaros el impacto sobre la naturaleza es inevitable). Asimismo requiere de grandes extensiones de tierra por cada kilovatio producido, pero no es tan extensiva como la energía solar.

La *energía hidráulica* altera el comportamiento de los ríos afectando la biodiversidad de los mismos y provocando cambios en los ecosistemas. Se ven muchas veces también afectadas las poblaciones litorales, por ejemplo con las inundaciones y la alteración de los suelos. En la Argentina se la considera como energía renovable solo en instalaciones que generan hasta 30 MegaWatts, instalaciones más grandes requieren alterar el ecosistema demasiado, se deben inundar superficies muy grandes para construir la represa, etc.

La *energía solar*, que se presume como la energía más limpia y menos contaminante, requiere de grandísimas extensiones de tierra, provocando sombra y afectando la vida de los organismos del suelo que precisan de la luz.

Además se pueden mencionar la *energía mareomotriz* y la *geotérmica*, que también presentan consecuencias negativas sobre el ambiente.

En conclusión, se puede demostrar que todo tipo energía tiene consecuencias negativas sobre el ambiente, la decisión crucial es intentar decidir cual será la fuente a utilizar en el futuro inmediato que permita la mayor subsistencia de la vida humana sobre la Tierra.

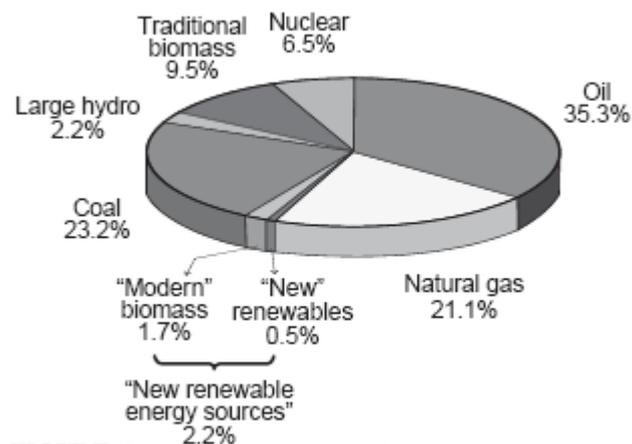


FIGURE 1 World consumption of primary energy and renewables, by energy type, 1998.

Figura 1⁸

Consumo mundial de energía primaria y renovables - 1998

En la *figura 1* se puede apreciar la distribución del consumo mundial de energía primaria según las diferentes fuentes para el año 1998. En el año 2004 la distribución continua siendo muy similar a la de 1998, sin embargo se destaca un marcado incremento en la participación de las nuevas fuentes renovables.

La energía solar es una fuente inagotable, esencialmente no contaminante pero intermitente y de baja intensidad, por lo que se requiere de la acumulación diaria (baterías convencionales) y de la acumulación estacional (generación de hidrógeno). Para su captación se puede optar tanto por la conversión fotovoltaica o la fototérmica.

La energía eólica y la hidráulica son en realidad una conversión indirecta de la energía solar, ya que dependen directamente de esta última.

El quemar combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) trastorna nuestro clima, emitiendo grandes cantidades de dióxido de carbono que retienen el calor del sol que llega a la Tierra produciendo el llamado efecto invernadero, una de las causas del calentamiento global. Muchas son las dificultades que se presentan, dado que la forma en que utilizamos los combustibles deteriora el paisaje, aumenta la probabilidad de que ocurran derrames de petróleo, contamina las aguas, causa lluvia ácida y contaminación urbana, lo que destruye los bosques, las ciudades y acorta la vida humana.

⁸ S. T. COELHO and J. GOLDEMBERG - Alternative Transportation Fuels: Contemporary Case Studies - Universidad de Sao Paulo - Brasil

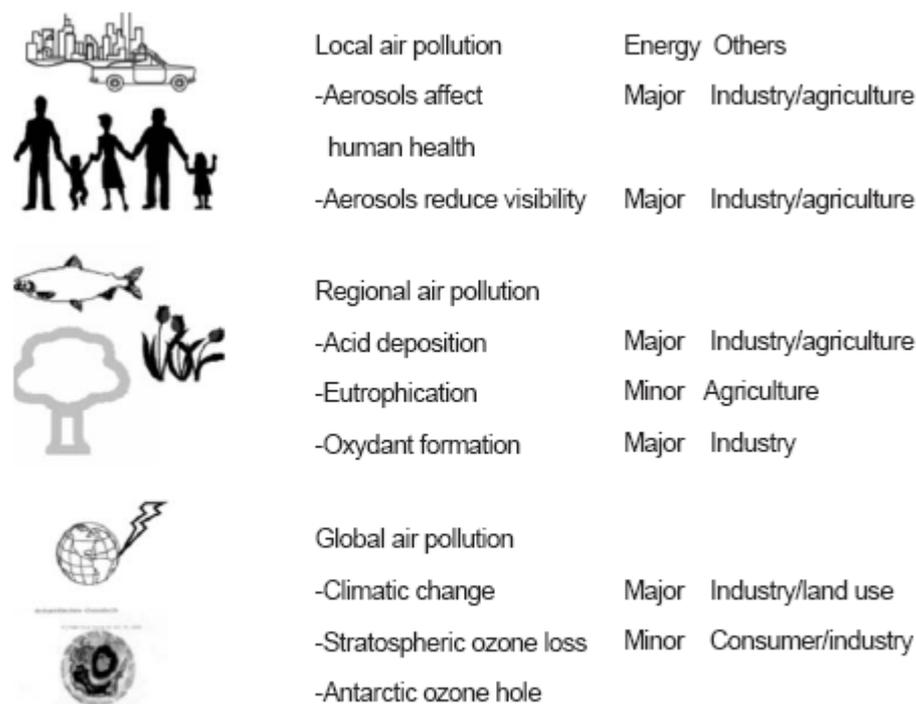


FIGURE 2 Impact of energy use on the environment.

Figura 2⁹

Impacto de l uso de la energía en el medio ambiente

Todos los reportes de contaminación de aire en el siglo XIX y los comienzos del siglo XX indicaban que el problema era local, en las cercanías de centros industriales y en las mayores ciudades. Hasta las famosas catástrofes medio ambientales en el área de Liege en 1930 y en Londres en 1950 fueron esencialmente un fenómeno local. En el episodio del smog londinense, el aire estancado acumuló de manera extrema grandes cantidades de dióxido de sulfuro y ácido sulfúrico en concentraciones de aproximadamente 1900 y 1600 mg/m³ respectivamente, unas 20 veces el actual límite para la salud, lo que resultó en la muerte de 4000 habitantes. Las principales causas fueron las emisiones de las estufas a carbón para calefaccionar y el hecho de que todas las emisiones quedaban atrapadas en una capa de aire probablemente a solo unos pocos de cientos de metros de altura, sin intercambio de aire dentro de la ciudad.

Durante la segunda mitad del siglo XX, los efectos de la polución del aire debidos al uso y producción de energía se comenzaron a detectar en escalas regionales (4500 km.), continentales y hasta globales.

⁹ J. SLANINA - Air Pollution from Energy Production and Use - Article Number: NRGY : 00387 - Netherlands Energy Research Foundation Petten, - The Netherlands

2.1.2 Una nueva alternativa

En sistemas para el aprovechamiento integral de fuentes primarias de energía renovables no contaminantes, tales como convertidores fotovoltaicos y turbinas eólicas (*ver Figura 5*), entre otros, surge el problema del almacenamiento y transporte de la energía, y a su vez la dificultad de su conversión de acuerdo a la demanda. En este escenario, aparece el hidrógeno como el combustible sintético ideal para reemplazar a los combustibles fósiles, ya que puede obtenerse fácilmente por electrólisis del agua usando energías primarias renovables y permitiendo, de este modo, su acumulación y transporte al centro de consumo. Puesto que el hidrógeno no se encuentra libre en la naturaleza, se debe gastar energía para producirlo, esto es, el hidrógeno no es una fuente energética sino un intermediario entre la fuente primaria y el dispositivo de conversión de energía donde se lo utilice. Por lo tanto, para una utilización masiva del hidrógeno se lo debe producir a bajo costo. La combustión del hidrógeno, además de liberar la energía acumulada, sólo produce agua, en un proceso compatible con el medio ambiente.

Las energías renovables se presentan dispersas y de predicción incierta. Es difícil lograr hacer coincidir oferta con demanda. Por ello se requiere de un sistema de acumulación para su adecuado aprovechamiento. Además las instalaciones de sistemas de energía renovable se sitúan generalmente en lugares remotos, que están sujetos a los castigo de la humedad y de las ásperas temperaturas. En este ámbito surge el hidrógeno como una nueva posibilidad.

Entre las energías renovables la conversión eolo-eléctrica es la que mayor desarrollo tecnológico ha alcanzado. A nivel mundial, la potencia instalada superaba los 74GW eléctricos en el 2006, lo que representó un incremento del 26% con respecto al 2005¹⁰. Favorecidos por legislaciones adecuadas, países como Alemania, España, Dinamarca y Estados Unidos concentran más del 80% de ese total. La mayoría de esas turbinas entrega la energía eléctrica generada a las redes de distribución.

El hidrógeno es el acumulador ideal para la energía eolo-eléctrica, ya que logra una eficiencia y rendimiento largamente superior al que se puede alcanzar con baterías convencionales. Sin embargo el H₂ requiere energía para su producción, pues si bien es el elemento más abundante, raras veces se lo encuentra libre, es decir en su forma gaseosa.

¹⁰ Asociación Empresarial Eólica de España - 2007

Esto se traduce en que el hidrógeno no es una fuente energética sino un intermediario entre la fuente primaria y el dispositivo de conversión de energía donde se lo utilice, un “portador de energía”. A partir de la electrólisis del agua se obtiene hidrógeno puro.

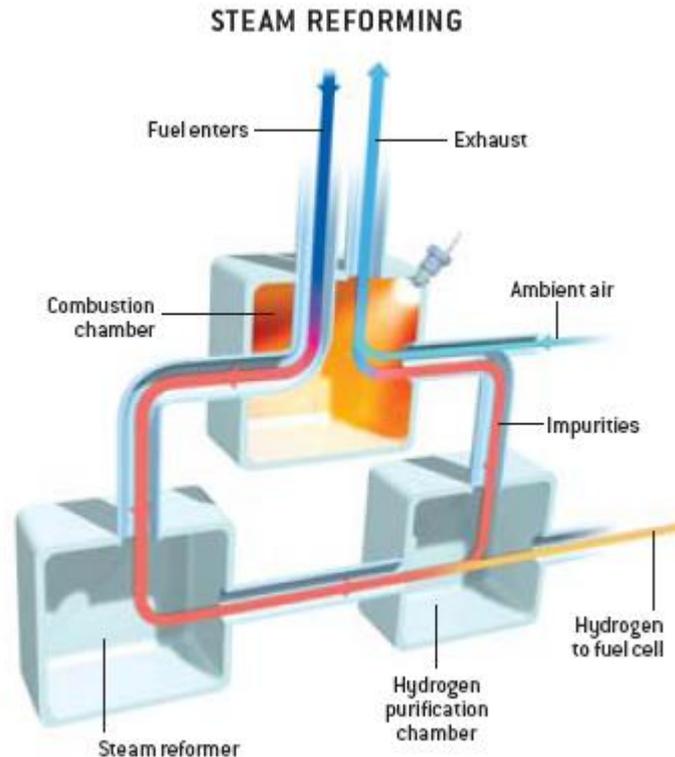
2.1.3 Producción de hidrógeno

Existen diversas fuentes de producción del gas hidrógeno (H₂). La electrólisis del agua, la gasificación de biomasa, el uso de tecnología de producción fotolítica como la fotobiológica o fotoelectrólisis, y la tecnología de producción termoquímica. Todos estos son los procesos que presentan más expectativas en la actualidad y también a largo plazo. Todo el Hidrógeno que se produce en Argentina en la actualidad es por reformado de gas natural, simplemente a causa de los bajos costos.

Actualmente, el 48% de la producción de hidrógeno es a partir del gas natural, el 30% del aceite, y el 18% del carbón; la electrólisis del agua representa solamente 4%.

El hidrógeno puede obtenerse de distintas maneras, pero las más económicas implican su extracción a partir de hidrocarburos. El hidrógeno comercial se produce generalmente mediante el **reformado con vapor del gas natural**. Este proceso consiste en la reacción de una corriente de vapor de agua con metano para originar monóxido de carbono e hidrógeno, a una temperatura de entre 700 °C y 1100 °C.



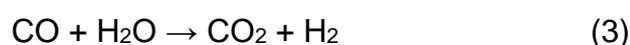
Figura 3¹¹

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



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

Puede recuperarse hidrógeno adicional en este proceso a partir del monóxido de carbono, mediante una reacción de desplazamiento del agua gaseosa, especialmente con un catalizador de óxido de hierro. Esta reacción también se emplea industrialmente como fuente de dióxido de carbono:



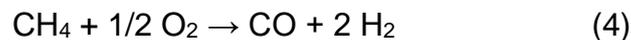
¹¹ Matthew L. Wald - Questions about a hydrogen economy - SCIENTIFIC AMERICAN - www.sciam.com - 2005

Según un informe del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy) en el cracking del gas natural para la producción de hidrógeno aproximadamente un 40% de la energía potencial original es perdida en la transferencia.¹²

En contraste, la extracción de un galón de petróleo del suelo, y su posterior traslado a una refinería para su conversión en gasolina y el traslado final de esa gasolina a una estación de servicio incurre en una pérdida de aproximadamente el 21% de la energía potencial.

Produciendo gas natural y comprimiéndolo en un tanque se genera una pérdida de tan solo el 15 %.

Otros métodos importantes para la producción de H₂ incluyen la **oxidación parcial de hidrocarburos**:



y la reacción del carbón, que puede servir como preludeo a la reacción de desplazamiento (3) mencionada anteriormente:



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

Como se ha mencionado anteriormente si la materia prima es un hidrocarburo, se producen óxidos de carbono: monóxido que es tóxico, y el dióxido que aumenta el efecto invernadero. Sin embargo ese gas de síntesis (hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono) tiene varias aplicaciones:

- Metanol
- Oxoalcoholes
- Isocianatos
- Ácido acético (vinagre)
- Acetatos
- Combustible sintético
- Siderurgia

¹² Matthew L. Wald - Questions about a hydrogen economy - SCIENTIFIC AMERICAN - www.sciam.com - 2005

- Industria del vidrio

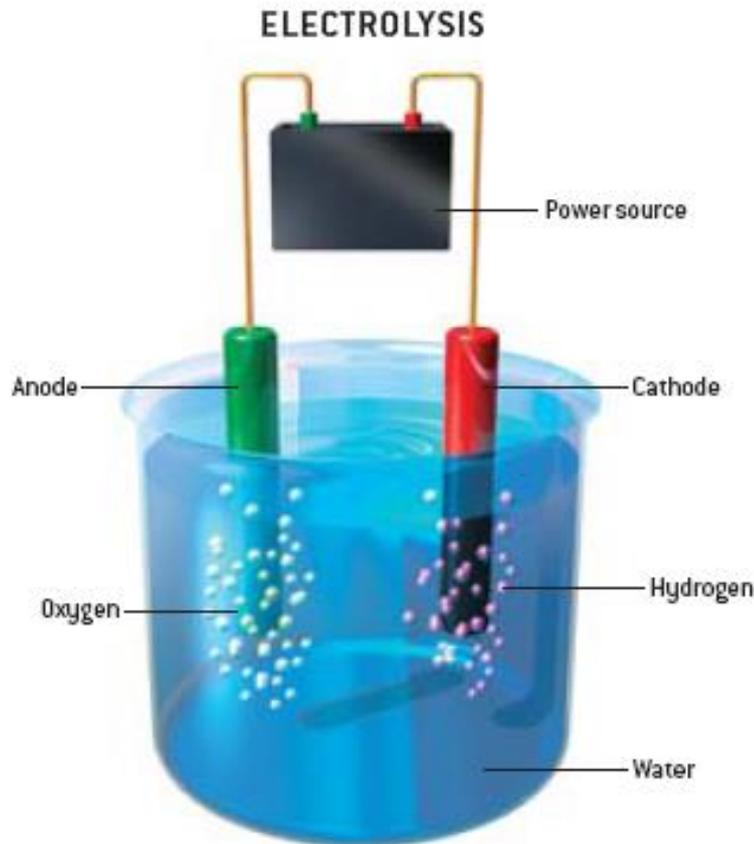
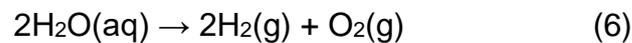
El hidrógeno también se produce en cantidades significativas como un subproducto en la mayoría de los procesos petroquímicos de cracking con vapor y reformado. La electrólisis de la salmuera para obtener cloro también genera hidrógeno como subproducto.

El hidrógeno es un producto de algunos tipos de metabolismo anaeróbico y es generado por muchos microorganismos, generalmente a través de reacciones catalizadas por enzimas que contienen hierro o níquel, llamadas hidrogenasas. Estas enzimas catalizan la reacción redox reversible entre el H_2 y sus dos protones y dos electrones. La evolución del hidrógeno gaseoso tiene lugar en la transferencia de equivalentes reductores (producidos durante el metabolismo del piruvato) al agua.

La separación del agua, en la que ésta se descompone en sus protones, electrones y oxígeno, tiene lugar en las reacciones de la fase luminosa del metabolismo de los organismos fotosintéticos. Algunos de esos organismos - incluyendo el alga *Chlamydomonas reinhardtii* y las cianobacterias- han evolucionado desarrollando un segundo paso en las reacciones de la fase oscura en el que los protones se reducen para formar H_2 gaseoso por la acción de hidrogenasas especializadas en los cloroplastos. Se han realizado esfuerzos para modificar genéticamente las hidrogenasas bacterianas para sintetizar H_2 gaseoso de manera eficiente incluso en presencia de oxígeno.

Existen otras rutas poco frecuentes, aunque mecanísticamente interesantes, para la producción de H_2 en la naturaleza. La nitrogenasa genera aproximadamente un equivalente de H_2 por cada equivalente de N_2 reducido a amoníaco. Algunas fosfatasa reducen fosfitos a H_2 .

La electrolisis del agua es un método simple de producir hidrógeno, aunque el gas resultante posee necesariamente menos energía de la requerida para producirlo. Una corriente de bajo voltaje atraviesa el agua, formándose oxígeno gaseoso en el ánodo e hidrógeno gaseoso en el cátodo. Generalmente, cuando se produce hidrógeno que va a ser almacenado se emplea un cátodo de platino o de algún otro metal inerte. Por el contrario, si el hidrógeno va a ser consumido in situ, es necesaria la presencia de oxígeno para que se produzca la combustión y se procura que ambos electrodos (tanto ánodo como cátodo) sean de metal inerte (si se empleara un metal no inerte, por ejemplo el hierro, éste se oxidaría y disminuiría la cantidad de oxígeno que se desprende). La máxima eficiencia teórica (electricidad empleada frente al valor energético del hidrógeno generado) es de entre un 80% y un 94%.

Figura 4¹³

La técnica de la gasificación de biomasa usa residuos agrícolas y basura, o biomasa creada específicamente para usos energéticos, para producir Hidrógeno. Una ventaja de este proceso es que existen otros subproductos, como resinas fenólicas de alto valor que pueden ayudar a cubrir los costos.

En cuanto a la tecnología de producción fotolítica; la producción fotobiológica se basa en la realización de un proceso tecnológico para la obtención de hidrógeno a partir de luz, agua, dióxido de carbono y algas. Se estima que será la mayor fuente biológica de energía renovable y sustentable, sin emisiones de gases con efecto invernadero ni contaminación medioambiental.

Hasta el año 1950 aproximadamente, la electrolisis del agua era el proceso más utilizado para la producción de hidrógeno mundial, pero actualmente solo se utiliza para la producción de pequeños volúmenes de gas con alta pureza. Sin embargo en los últimos años hay un renovado interés por los electrolizadores de agua, para ser usados en la producción de hidrógeno como

¹³ Matthew L. Wald - Questions about a hydrogen economy - SCIENTIFIC AMERICAN - www.sciam.com - 2005

combustible para propósitos automovilísticos. Al mismo tiempo, continúa el estudio en la integración de tecnología para la obtención de fuentes de energía intermitentes, como ser la eólica, con electrolizadores. De esta forma se podría almacenar la energía extraída del recurso renovable en hidrógeno.

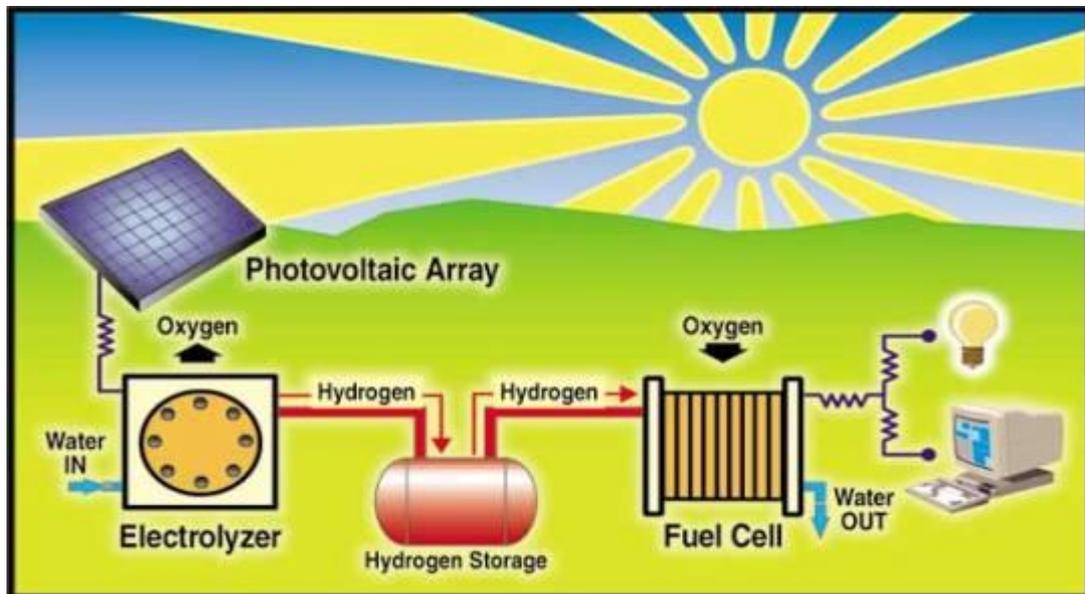


Figura 5¹⁴

Integración de recursos intermitentes con tecnología electrolizadora

Si se toma como fuente de energía la radiación solar mediante el uso de dispositivos fotovoltaicos será de mucha utilidad el desarrollo de sistemas de provisión de energía eléctrica fotovoltaica que generen y almacenen hidrógeno, para luego conseguir energía durante períodos sin radiación solar.

Se debe buscar el desarrollo de cadenas energéticas limpias.

"Llegará el día en que el agua nos sirva de combustible. El hidrógeno y el oxígeno, sus dos componentes, serán fuente inagotable de luz y calor, y desplegarán una fuerza muchísimo mayor de la que posee el carbón. Las bodegas de los buques y las carboneras de las locomotoras llevarán, en vez de carbón, estos dos gases condensados, que arderán en las calderas produciendo un calor enorme. Y en nuestras casas también nos calentaremos con agua cuando se agoten las minas de carbón. El agua es el carbón del futuro".

Ingeniero Cyrius Smith

Personaje de la novela "La Isla Misteriosa" de Julio VERNE – 1870

¹⁴ <http://cabierta.uchile.cl/revista/16/articulos/paper5/>

2.1.4 Algunas consideraciones acerca del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, suponiendo más del 75% en masa y más del 90% en número de átomos. Este elemento se encuentra en abundancia en las estrellas y los planetas gaseosos gigantes. Las nubes moleculares de H_2 están asociadas a la formación de las estrellas. El hidrógeno también juega un papel fundamental como combustible de las estrellas por medio de las reacciones de fusión nuclear entre protones.

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

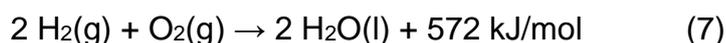
Bajo condiciones ordinarias en la Tierra, el hidrógeno existe como gas diatómico, H_2 . Sin embargo, el hidrógeno gaseoso es extremadamente poco abundante en la atmósfera de la Tierra (1 ppm en volumen), debido a su pequeña masa que le permite escapar al influjo de la gravedad terrestre más fácilmente que otros gases más pesados. Aunque los átomos de hidrógeno y las moléculas diatómicas de hidrógeno abundan en el espacio interestelar, son difíciles de generar, concentrar y purificar en la Tierra. El hidrógeno es el decimoquinto elemento más abundante en la superficie terrestre. La mayor parte del hidrógeno terrestre se encuentra formando parte de compuestos químicos tales como los hidrocarburos o el agua. El hidrógeno gaseoso es producido por algunas bacterias y algas, y es un componente natural de las flatulencias. El metano es una fuente de enorme importancia para la obtención del hidrógeno.

Las características de solubilidad y de adsorción del hidrógeno con varios metales son muy importantes en la metalurgia (algunos metales pueden sufrir debilitamiento por hidrógeno) y en el desarrollo de formas seguras de almacenamiento para su uso como combustible. El hidrógeno es muy soluble en muchos compuestos formados por metales de las tierras raras y metales de transición, y puede disolverse tanto en metales cristalinos como en metales amorfos. La solubilidad del hidrógeno en los metales está influenciada por las distorsiones locales y las impurezas de la red cristalina del metal.

Figura 6¹⁵

En la imagen se aprecia la diferencia entre la llama de hidrógeno (en los motores del shuttle, casi invisible) y las llamas de otros combustibles (en los cohetes propulsores laterales).

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



Cuando se mezcla con oxígeno en un amplio rango de proporciones el hidrógeno explota. En el aire, el hidrógeno arde violentamente. **Las llamas de oxígeno e hidrógeno puro son casi invisibles al ojo humano**, como se constata al ver lo tenues que son las llamas de los motores principales de los shuttles espaciales (en contraposición a lo fácilmente visibles que son las llamas de los cohetes impulsores de las lanzaderas o shuttle). Por este motivo, es difícil detectar visualmente si un escape de hidrógeno está ardiendo. Las llamas que pudieron apreciar durante la tragedia del dirigible Hindenburg son llamas de hidrógeno coloreadas por el material de la cubierta de la aeronave, que contenía carbono y polvo de aluminio pirofórico, así como otros materiales combustibles. (Independientemente de la causa de este incendio, es claro que se produjo la ignición del hidrógeno, ya que en ausencia de este gas la cubierta del dirigible habría tardado horas en quemarse). Otra característica de los fuegos alimentados por hidrógeno es que las llamas tienden a ascender rápidamente con el gas a través del aire, causando menos daños que los fuegos alimentados por hidrocarburos. Por ejemplo, en el caso de la tragedia del Hindenburg dos tercios de los pasajeros del dirigible sobrevivieron al incendio, y muchas de las muertes que se produjeron fueron por caídas al vacío y por la combustión de gasolina.

El H₂ reacciona directamente con otros elementos oxidantes. Puede producirse una reacción espontánea y violenta a temperatura ambiente en presencia de

¹⁵ Enciclopedia Encarta 2003

cloro o flúor, con la formación de los correspondientes halogenuros de hidrógeno: cloruro de hidrógeno y fluoruro de hidrógeno.

En la actualidad el hidrógeno no es utilizado como portador energético, sino que tiene importantes aplicaciones industriales.

2.1.4.1 Aplicaciones actuales del hidrógeno:

- Refinería de petróleo (hidrogenación de querosene para producir naftas para aviones)
- Industria alimenticia (hidrogenación de aceites/margarinas)
- Síntesis del amoníaco
- Industria farmacéutica
- Industria de química fina
- Industria electrónica
- Obtención de peróxido de H₂
- Aeroespacial

En la industria química y petroquímica se requieren grandes cantidades de H₂. La aplicación principal del H₂ es para el procesamiento (refinado) de combustibles fósiles, y en la síntesis de amoníaco. Los procesos fundamentales que consumen H₂ en una planta petroquímica son la hidrodessulfuración, la hidrodessulfurización y el hidrocracking. El H₂ posee otros muchos usos como agente hidrogenante, particularmente en el incremento de la saturación de grasas y aceites insaturados (que se encuentran en productos como la margarina), y en la producción de metanol. Es empleado también en la manufactura del ácido clorhídrico, y como agente reductor para minerales metálicos.

Además de sus usos como reactivo, el H₂ posee muchas aplicaciones en Física e Ingeniería. Se usa para el escudo de gas en métodos de soldadura tales como la soldadura con hidrógeno atómico. El H₂ se emplea como refrigerante en generadores eléctricos en las estaciones eléctricas, ya que es el gas con mayor conductividad térmica. El H₂ líquido se usa en la investigación criogénica, incluyendo el estudio de la superconductividad. Puesto que el H₂ es más ligero que el aire (posee una densidad poco mayor a la quinceava parte de la del aire) fue usado como gas de relleno para globos aerostáticos y aeronaves. Sin embargo, este uso fue abandonado tras el desastre del Hindenburg que evidenció la peligrosidad del hidrógeno cuando es usado para estos fines. No obstante, aún se sigue usando para inflar globos sonda meteorológicos.

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

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

Hoy hay dos principales aplicaciones para el hidrógeno. Casi la mitad se emplea para producir amoníaco (NH_3) mediante el proceso de Haber, el cual se utilizará sobre todo como fertilizante, directa o indirectamente. A causa de que la superpoblación mundial y la agricultura intensiva crecen, debido a esto la demanda del amoníaco (y por tanto de hidrógeno) está creciendo. La otra mitad de la producción actual del hidrógeno se utiliza para convertir cadenas largas de hidrocarburos (que son la mayoría en el petróleo sin refinar) en fracciones más ligeras, convenientes para su uso como combustibles. Este último proceso se conoce como hidrocracking. El hidrocracking representa un área incluso de mayor crecimiento que la del amoníaco, los incrementos en los precios del petróleo animan a las compañías petroleras a extraer un material más pobre, como pueden ser arenas de alquitrán y pizarra de petróleo.

2.1.4.2 Nuevas aplicaciones:

- Pilas de combustible
- Utilización directa como “carrier” y combustible

El hidrógeno no es una fuente de energía, excepto en el hipotético contexto de las plantas comerciales de fusión nuclear alimentadas por deuterio o tritio, una tecnología que actualmente se encuentra lejos de ser desarrollada. La energía del Sol proviene de la fusión nuclear del hidrógeno, sin embargo, es un proceso complicado de conseguir en la Tierra. El hidrógeno elemental obtenido de fuentes solares, biológicas o eléctricas cuesta mucha más energía para producirlo de la que se obtiene de su combustión. El hidrógeno puede generarse a partir de fuentes fósiles (como el metano) gastando menos energía

de la que se obtiene, pero se trata de fuentes no renovables que, además son fuentes energéticas por sí mismas.

2.2 ENERGÍA PORTÁTIL

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

Actualmente, la oscilación de la demanda energética se cubre mediante el encendido o apagado de generadores. Sin embargo, la electricidad es difícil de almacenar para usarla más adelante. El mejor sistema en lo que a eficiencia y coste se refiere y más extendido además para el almacenamiento de energía de una red a gran escala es el almacenamiento por bombeo, que consiste en bombear agua hasta una presa superior y generar la electricidad demandada mediante hidroelectricidad. A pesar de ser el método más utilizado, tiene una eficiencia muy baja. Sin embargo este método no sirve para aplicaciones móviles de almacenaje de energía. Existen alternativas más reducidas de almacenaje como condensadores pero tienen el problema de la baja densidad de energía. Las baterías tienen también baja densidad de energía y además tardan en cargarse y descargarse. El almacenamiento en una batería inercial es más eficiente que las baterías de tamaño similar, pero acarrea preocupaciones de seguridad debido a que puede romper explosivamente, a parte del efecto giroscópico que tiene.

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

Las actuales preocupaciones con respecto a la disponibilidad a largo plazo de los combustibles fósiles y por el calentamiento global debido a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) han dado lugar a una búsqueda de un combustible alternativo a los combustibles fósiles que no tenga estos problemas, y poder conseguir una **energía portátil más limpia y eficiente**.

Las celdas de combustible de hidrógeno se presumen como el equivalente a los viejos motores de combustión interna.

Los grandes generadores que produjesen hidrógeno de fuentes de energía fósiles generarían cantidades enormes de contaminación, pero centralizan las emisiones, así, los sistemas de control de emisión serían más fáciles de examinar, además que la quema de combustibles fósiles en centrales grandes es mucho más eficiente que en automóviles o pequeñas centrales. Haciendo el sistema, globalmente mejor. Hay que contar además que al estar las emisiones centralizadas las ciudades quedarían limpias de polución, ya que las emisiones se podrían realizar en zonas despobladas.

La proliferación mundial de **equipos electrónicos portátiles** de los últimos años ha creado una gran y creciente demanda de *fuentes de energías compactas, livianas y potentes*. Notebooks, reproductores de música en formato MP3, videofilmadoras, teléfonos celulares, cámaras fotográficas digitales, PDAs (Personal Digital Assistant) entre otros dispositivos portátiles demandan cada vez más energía.

Si bien la tecnología existente de baterías recargables ha madurado mucho, ésta simplemente no logra satisfacer por completo las necesidades de los usuarios.

En los próximos años esta brecha se seguirá extendiendo, debido a que los equipos vendrán cada vez más completos y potentes.

Con respecto a la generación actual de baterías recargables de Litio (Li-ion) se esperan para los próximos años mejoras muy modestas de esta tecnología en cuanto a su capacidad (menos del 5% por año), con lo que peleará por satisfacer los siempre crecientes requerimientos de energía.

Al mismo tiempo, las personas se están volviendo más portátiles y móviles que nunca, ensanchando aún más la brecha energética. Las notebooks son el segmento de computadoras de más rápido crecimiento, y se espera que las ventas en Estados Unidos para el mercado externo crezcan en más de 60 millones de unidades en el próximo año¹⁶.

En Argentina se ha registrado un aumento en las ventas de computadoras portátiles del 77% entre 2006 y 2005¹⁷, y en el primer semestre de 2007 ya se registró un alza del 48% frente al mismo período de 2006¹⁸.

¹⁶ Worldwide Notebook Pc Forecast – 2007-2011 – www.researchandmarkets.com

¹⁷ Ariel Ojman – 2005 – Pronóstico de venta de computadoras personales - Consultora IDC

La inmensa disponibilidad de Wi-Fi ha permitido cortar “la correa” de la Ethernet, es decir se ya no se depende más de cables para poder estar conectado a las redes locales. Ahora los consumidores están buscando cortar finalmente la última correa – *el cable del cargador*. Muchas veces usuarios móviles deben tomar a decisiones no muy felices como ser acortar una sesión de trabajo o dejar de mandar un mail para conservar la poca duración de las baterías convencionales de sus dispositivos.

Para alcanzar este casi utópico deseo de total independencia de cables, científicos e investigadores están desarrollando varias alternativas.

2.2.1 Dispositivos electrónicos portátiles

Toda la tecnología *wireless* de hoy en día tiene una misma cosa en común...

LOS CABLES



Figura 7

Cada vez más, los consumidores buscan fuentes compactas de energía de larga duración para su electrónica portátil. También comparten el deseo de librarse de la necesidad de recargar y buscar continuamente una toma de corriente. **Más allá del crecimiento dramático de la mal llamada tecnología wireless o sin cables, la mayor parte de los dispositivos involucrados siguen teniendo cables.** Cables para la recarga, cables para sincronización con las computadoras, cables para bajar información de la red, cables que limitan el uso y la movilidad.

¹⁸ Luciano Acosta, Analista Senior Consumer and Commercial Devices de IDC Cono Sur.

2.2.2 Energía portátil en el ámbito militar

La tecnología de las baterías convencionales de Litio está llegando al límite de la cantidad de energía que puede ser “empaquetada” por cada kilogramo de peso. Este problema, que no deja de ser un problema para los ciudadanos a pie, representa inconvenientes con los cuales se puede convivir, teniendo en cuenta que generalmente se puede encontrar una pared con una toma de red con la que se pueda recargar el equipo en cuestión, o bien un vehículo que suministre la energía necesaria.

En el ámbito militar, **unas baterías agotadas pueden significar la pérdida de vidas**, con lo cual el aspecto es bastante más crítico. Además, también se está produciendo una revolución en los sistemas de comunicaciones, con la necesidad de equipar a los soldados para las operaciones que exige el actual entorno bélico. En la actualidad resultan cada vez más habituales operaciones tales como: *infiltración, patrullajes, reconocimientos, emboscadas, combate nocturno y procedimientos de combate no convencionales*, **realizadas en su mayoría por soldados a pie que no pueden ni deben perder las comunicaciones con sus compañeros ni con las escalas superiores del mando.**

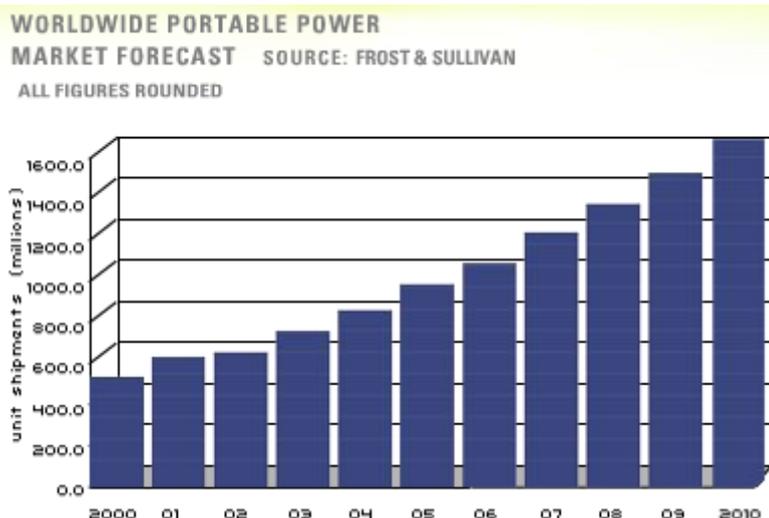
Esta revolución está conduciendo a soldados altamente equipados con sensores de todo tipo y con equipos de comunicaciones que integren en uno sólo diversos sistemas de comunicaciones. Es lo que se está dando a conocer como “Soldado del Futuro”, o “**Future Warrior**”.

Por ello, es una vez más el tan denostado I+D militar el que está colaborando con la llegada comercial de la tecnología de **pilas de combustible**.

2.2.3 Mercado de baterías recargables

El Mercado de baterías recargables es amplio, se encuentra bien establecido y en continuo crecimiento, con ventas de varios cientos de millones por año. El mercado que responde a la energía portátil, se estima en 15 mil millones de dólares para el 2010.

Las tendencias en electrónica portátil y los avances en la tecnología *wireless*, están originando una necesidad crítica para una nueva solución energética portable en el ámbito militar, industrial y de consumo masivo. El número de dispositivos electrónicos portátiles está incrementando al igual que su frecuencia de uso y necesidad de energía. Las baterías tradicionales no logran seguir el paso.

Figura 8¹⁹

Pronóstico de mercado para la energía portátil mundial

2.2.4 Evolución de los dispositivos electrónico portátiles en la Argentina

Hoy la vida se la puede percibir a través de tres pantallas: el televisor, la computadora y los celulares. El reciente debut en la Argentina de la red de Tercera Generación para telefonía móvil -conocida como 3G, que permite acceder a Internet por banda ancha- parece ir en ese sentido.

En Argentina hoy hay más de 34 millones de clientes (según el INDEC), casi un teléfono por habitante. El año pasado, ingresaron al país más de 13 millones de terminales, un nuevo récord. *Figura 10*

En el país se agiganta al compás el crecimiento en las ventas de las computadoras portátiles. Según datos de IDC, **en el primer trimestre de 2007 se colocaron 38.000 laptops en el mercado**, un 48% más comparado con el mismo período del año anterior.

¹⁹ Frost & Sullivan



Figura 9²⁰

En cambio, "los altos ejecutivos, que migran hacia las notebooks y las PDA, valoran de los celulares con acceso a la red 3G el acceso a Internet por banda ancha." Por ese motivo los fabricantes esperan colocar unas 50 mil unidades de acá a fin de año.

* LOS DATOS

Ranking de marcas

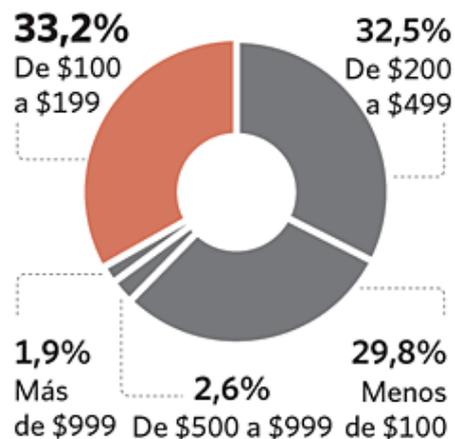
En millones de unidades

MARCA	UNIDADES
Nokia	3,96
Motorola	3,93
Samsung	1,39
Sony Ericsson	0,94
Alcatel	0,72
LG	0,68
Total	12,7

FUENTE SISTEMA MARIA DE LA ADUANA

Ranking por precio

Unidades vendidas en 2006



FUENTE DATOS DE LAS TELEFONICAS

Figura 10²¹

²⁰ Suplemento iEco Diario Clarín - 24/06/07

²¹ Suplemento iEco Diario Clarín - 24/06/07

2.2.5 Tecnología de baterías

Se le llama **batería eléctrica**, **acumulador eléctrico** o simplemente **acumulador**, al dispositivo que almacena energía eléctrica usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario, es decir, de un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga.

También se le suele denominar **batería** puesto que, muchas veces, se conectan varios de ellos en serie, para aumentar el voltaje suministrado. Así la batería de un automóvil está formada internamente por 6 elementos acumuladores del tipo plomo-ácido, cada uno de los cuales suministra electricidad con una tensión de unos 2 V, por lo que el conjunto entrega los habituales 12 V o por 12 elementos, con 24 V para los camiones.

El término **pila**, en castellano, denomina los generadores de electricidad no recargables. Tanto pila como batería son términos provenientes de los primeros tiempos de la electricidad, en los que se juntaban varios elementos o celdas — en el primer caso uno encima de otro, "apilados", y en el segundo adosados lateralmente, "en batería", como se sigue haciendo actualmente, para así aumentar la magnitud de los fenómenos eléctricos y poder estudiarlos sistemáticamente. De esta explicación se desprende que cualquiera de los dos nombres serviría para cualquier tipo, pero la costumbre ha fijado la distinción.

El funcionamiento de un acumulador está basado esencialmente en algún tipo de proceso reversible, es decir, un proceso cuyos componentes no resulten consumidos ni se pierdan, sino que meramente se transformen en otros, que a su vez puedan retornar al estado primero en las circunstancias adecuadas. Estas circunstancias son, en el caso de los acumuladores, el cierre del circuito externo, durante el proceso de descarga, y la aplicación de una corriente, igualmente externa, durante el de carga.

Resulta que procesos de este tipo son bastante comunes, por extraño que parezca, en las relaciones entre los elementos químicos y la electricidad durante el proceso denominado electrólisis y en los generadores voltaicos o pilas. Los investigadores del siglo XIX dedicaron numerosos esfuerzos a observar y a esclarecer este fenómeno, que recibió el nombre de polarización.

Un acumulador es así un dispositivo en el que la polarización se lleva a sus límites alcanzables y consta en general de dos electrodos, del mismo o de distinto material, sumergidos en un electrolito.

Tradicionalmente, la tecnología de las baterías no se ha caracterizado por ser algo glamoroso o dinámico. Luego de que el Conde Alessandro Volta inventara la primera batería, el mundo tuvo que esperar casi 200 años para el próximo descubrimiento: las baterías NiCd. Hace solo cinco décadas que se descubrieron estas baterías. De todas formas, son dos las fuerzas que están impulsando y acelerando el cambio de tecnología. Los activistas medioambientales están demandando un reemplazo para **evitar la polución del agua con el cadmio existente en las baterías NiCd** (así como lo hicieron para la eliminación del mercurio presente en las baterías alcalinas). Como resultado, se están consiguiendo esfuerzos legislativos para evitar el desecho irresponsable de baterías. Los fabricantes están respondiendo mediante la introducción de programas de reciclado y alternativas recargables.

Un segundo factor es la imparable demanda de productos portátiles por parte de los consumidores. Teléfonos celulares, computadoras personales portátiles, cámaras de foto y de video, entre otros, comprenden la tecnología que más se ha miniaturizado en los últimos años. Pero para los millones de personas que utilizan estos administrículos a diario, **lo más irritante es la necesidad de tener que recargar la batería**. Los fabricantes podrían mejorar aún más la duración de la carga de las baterías convencionales, pero deben sacrificar tamaño, costo y performance en el proceso, o utilizar componentes que son dañinos para el medio ambiente. A su vez, con la incesante demanda de electrónica portátil, los fabricantes compiten por ofrecer modelos de baterías más livianos que los de sus competidores. Los pesos de componentes tales como microprocesadores, memorias, y pantallas han disminuido drásticamente, dejando a las baterías como la carga pesada. **Hoy en día las baterías representan el 30% del peso de una notebook y el 50% de un teléfono móvil**, y representan el mayor impedimento para lograr mayores reducciones de peso en tales dispositivos.

Las baterías de Níquel-Cadmio (NiCd) con su uso establecido durante la década del 90 y su costo relativamente bajo han ocupado una posición dominante en el mercado de la electrónica portátil. Sin embargo han perdido muchísimo terreno frente a la tecnología de baterías de Níquel-metal y las baterías recargables de Litio. A pesar que los costos de las baterías de Níquel-metal (NiMH) son mayores que los de las baterías NiCd, éstas ofrecen mejoras significativas en cuanto al tiempo de operación que brindan, y a su vez no contienen cadmio que es tóxico. Las baterías recargables de Ion-Litio son también más caras que las NiCd, pero sin embargo ofrecen 3 veces la energía que puede dar una batería de Níquel-Cadmio, y pesan menos de la mitad.

En el año 1991 la compañía SONY introduce por primera vez en el Mercado una batería comercial de Ion-Litio, marcando el comienzo de una nueva era para la tecnología de las baterías recargables.

Las baterías Litio-Ion (Li-ion) utilizan un ánodo de Litio y un cátodo de Ion. Permite llegar a densidades del orden de 115 Wh/kg. Además, no sufren el efecto memoria, a diferencia de las de Ni-Cd, ni tiene tendencia a causar cortocircuitos internos como las batería de Metal-Litio (metallic lithium) que generan sobrecalentamiento.

Otra popular batería recargable de Litio, las baterías de Litio-polímero, también eliminan el riesgo de una reacción peligrosa ya que utilizan un electrolito de gel a base de polímero.

Está en juego un mercado mundial de baterías secundarias (baterías de repuesto) que excede los 7 mil millones de dólares y presenta una perspectiva de crecimiento explosivo mientras la electrónica portátil continúe arraigándose.

En el ANEXO se detalla más información acerca del funcionamiento y parámetros operacionales de las baterías que se utilizan en la actualidad.

2.2.6 Economía del mercado energético

El mercado mundial de combustibles ronda las 1100 millones de toneladas.²²

La producción del hidrógeno es un sector industrial considerable, y es cada vez mayor. En 2004 se produjeron unas 50 millones de toneladas métricas de hidrógeno, conteniendo 200 giga vatios de energía; la tasa de crecimiento es de alrededor de un 10% por año. Debido a que el almacenaje y transporte de hidrógeno es caro, la mayor parte del hidrógeno que se produce en la actualidad se hace localmente, y es utilizado inmediatamente, generalmente por la misma compañía productora. En 2005, el valor económico de todo el hidrógeno producido es de aproximadamente 135 mil millones de U\$D por año.

²² Emiliano Galli – Martes 30 de Mayo de 2006 - El Granero energético – Comercio exterior - Diario La Nación

3 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible trabaja de manera muy similar a una batería. Sin embargo, a diferencia de las baterías, la celda de combustible no se agota, es decir no se queda sin energía, ni necesita recargarse. Ésta producirá continuamente energía y calor mientras que sea alimentada con combustible. Una celda de combustible, consiste en dos electrodos inmersos en electrolito. El oxígeno reacciona sobre un electrodo y el hidrógeno sobre el otro, produciendo electricidad, calor y agua.

Se trata de un sistema de conversión de energía que combina un combustible con el aire para producir directamente energía eléctrica. Las celdas de combustible ofrecen la promesa de alta eficiencia y bajísimas emisiones cuando se las compara contra las tecnologías convencionales. Si se usa hidrógeno puro como combustible los únicos productos del proceso son electricidad, calor y agua.

La principal diferencia entre las celdas de combustible y las tecnologías convencionales radica en el número de etapas requeridas para convertir la energía química del combustible en potencia eléctrica utilizable.

A diferencia de las baterías, una celda de combustible no guarda ni acumula energía. En lugar de eso, las “fuel cells” convierten energía de una forma a otra (de forma similar a un motor). Sin embargo, a diferencia de los generadores a combustión interna, las celdas de combustible convierten energía química directamente en electricidad sin una conversión intermedia en energía mecánica.

Las celdas de combustible proveen energía limpia para la gente. Los beneficios de usar celdas de combustible son:

- Funcionamiento limpio, seguro y silencioso
- Alta eficiencia de energía
- Bajas emisiones
- Fácil operación

Las celdas de combustible proveen corriente continua que es apropiada no solo para motores eléctricos, sino también para iluminación y numerosos artefactos eléctricos domésticos desde cocinas hasta cepillos de dientes eléctricos.

Existen muchas aplicaciones para las celdas de combustibles, hoy en día todas las automotrices están trabajando para poder comercializar un auto con celdas de combustible. Las celdas de combustible están en los colectivos y buses,

botes y embarcaciones, trenes, aviones, motos y scooters y hasta en las bicicletas. También las hay alimentando máquinas expendedoras, aspiradoras domésticas, y señales electrónicas de tránsito. Micro celdas de combustible para teléfonos celulares, computadoras portátiles y otros dispositivos electrónicos portátiles tienen un sin fin de posibilidades.

3.1 HISTORIA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

El principio de funcionamiento de la celda de combustible fue descubierto por el científico Christian Friedrich Schönbein en Suiza en 1838 y publicado en la edición de enero de 1839 del "*Philosophical Magazine*". De acuerdo con este trabajo, la primera celda de combustible fue desarrollada por Sir William Grove, un científico galés amateur. El primer diseño es del año 1843. Para fabricar la celda de combustible utilizó materiales similares a los usados hoy en día para la célula de combustible de ácido fosfórico. No fue hasta 1959 cuando el ingeniero británico Francis Thomas Bacon desarrolló con éxito una célula estacionaria de combustible de 5 kilovatios.

En 1959, un equipo encabezado por Harry Ihrig construyó un tractor basado en una celda de combustible de 15 kilovatios para Allis-Chalmers que fue expuesto en EE.UU. en las ferias del estado. Este sistema utilizó hidróxido de potasio como electrolito e hidrógeno y oxígeno comprimidos como reactivos.

Más adelante, en 1959, Bacon y sus colegas fabricaron una unidad de 5 kW capaz de accionar una máquina de soldadura, que condujo, en los años 60 a que las patentes de Bacon licenciadas por Pratt y Whitney en los Estados Unidos (al menos la idea original) fuesen utilizadas en el programa espacial de Estados Unidos para proveer a los astronautas de electricidad y de agua potable a partir del hidrógeno y oxígeno disponibles en los tanques de la nave espacial.

Paralelamente a Pratt & Whitney Aircraft, General Electric desarrolló la primera celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFCs) para las misiones espaciales Gemini de la NASA. La primera misión que utilizó PEMFCs fue la Gemini V. Sin embargo, las misiones del Apolo y las misiones subsecuentes Apolo-Soyuz, del Skylab, y del trasbordador utilizaban celdas de combustible basadas en el diseño de Bacon, desarrollado por Pratt & Whitney Aircraft.

UTX, subsidiaria de UTC Power fue la primera compañía en fabricar y comercializar un sistema de celdas de combustible estacionario a gran escala, para su uso como central eléctrica de cogeneración en hospitales, universidades, y grandes edificios de oficinas. UTC Power continúa

comercializando esta celda de combustible bajo el nombre de PureCell 200, un sistema de 200 kilovatios, y sigue siendo el único proveedor de celdas de combustible para la NASA para su uso en vehículos espaciales, proveyendo actualmente al trasbordador espacial. Además está desarrollando celdas de combustible para automóviles, autobuses, y antenas de telefonía móvil. En el mercado de automoción, UTC Power fabricó la primera celda de combustible capaz de arrancar a bajas temperaturas: la célula de membrana de intercambio de protones (PEM).

Los materiales utilizados eran extremadamente caros y las celdas de combustible requerían hidrógeno y oxígeno muy puros. Las primeras celdas de combustible solían requerir temperaturas muy elevadas que eran un problema en muchos usos. Sin embargo, se siguió investigando en celdas de combustible debido a las grandes cantidades de combustible disponibles (hidrógeno y oxígeno).

A pesar de su éxito en programas espaciales, los sistemas con celdas de combustible se limitaron a aplicaciones especiales, donde el coste no es un problema. No fue hasta el final de los años 80 y principios de los 90 que las celdas de combustible se convirtieron en una opción real para uso más amplio. Varias innovaciones, catalizador con menos platino y electrodos de película fina bajaron el coste de las celdas de combustible, haciendo que el desarrollo de sistemas PEMFC comenzara a ser un poco más realista.

Gerhard Ertl, ganador del Premio Nobel de Química en 2007, fue el descubridor del funcionamiento de las pilas de combustible.

3.2 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Existen diferentes tipos de celdas de combustible que se definen a partir del tipo de electrolito utilizado:

- Membrana de intercambio protónico (PEM)
- Alcalino (NaOH-KOH)
- Ácido fosfórico
- Carbonato fundido (Molten Carbonate)
- Óxido sólido (SOFC)

3.3 APLICACIONES HISTÓRICAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Aplicaciones de cogeneración (uso combinado de calor y electricidad) para viviendas, edificios de oficinas y fábricas. Este tipo de sistema genera energía eléctrica de manera constante (vendiendo el exceso de energía a la red cuando no se consume), y al mismo tiempo produce aire y agua caliente gracias al calor que desprende. Las celdas de combustible de Ácido fosfórico (PAFC *Phosphoric-Acid Fuel Cells*) abarcan el segmento más grande de aplicaciones de cogeneración en todo el mundo y pueden proporcionar eficiencias combinadas cercanas al 80% (45-50% eléctrico + el resto como térmica).

También se utilizan celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC *Molten Carbonate Fuel Cell*) con fines idénticos, y existen prototipos de celdas de óxido sólido (SOFC *Solid-Oxide Fuel Cell*).

En "usos combinados de calor y de energía" (cogeneración), para aplicaciones donde también se requiere energía calorífica, se acepta una eficacia más baja de la conversión de combustible a electricidad (típicamente 15-20%), porque la mayoría de la energía no convertida en electricidad se utiliza como calor. Se pierde algo de calor con los gases que salen de la celda como ocurre en cualquier caldera convencional, por lo que con esta producción combinada de energía térmica y de energía eléctrica la eficacia sigue siendo más baja de 100%, normalmente alrededor del 80%. En términos de exergía sin embargo, el proceso es ineficaz, y se obtendrían mejores resultados exergéticos maximizando la electricidad generada y después usando la electricidad para hacer funcionar una bomba de calor.

Las aplicaciones históricas más importantes de las celdas de combustible son las siguientes:

Fuentes de potencia auxiliar en naves espaciales

La alta eficiencia de conversión de las celdas de combustible permite un aprovechamiento máximo de la energía química del combustible y, consiguientemente, se minimiza el peso del combustible que se debe transportar. Se han empleado celdas de combustible de hidrógeno / oxígeno como fuentes de potencia auxiliar en los proyectos espaciales Apolo y Géminis.

Fuentes de potencia para áreas aisladas y para comunicaciones

Se han desarrollado sistemas de metanol/aire y de formiato/aire con electrólito alcalino que se han aplicado a radiofaros y a estaciones repetidoras de televisión remotas. Presentan la ventaja de una vida útil relativamente larga por simple renovación del electrolito agotado.

Fuentes convencionales de energía

Se han desarrollado sistemas que utilizan hidrógeno proveniente del reformado del gas natural o de cortes livianos de petróleo que es enviado a través de redes de distribución a viviendas, establecimientos comerciales y pequeñas industrias, dotadas de celdas de combustible del tipo hidrógeno/aire, para la producción local de electricidad. La reducción los costos que resultaría de un mayor aprovechamiento del combustible y de la utilización de la red de distribución de gas natural hace sumamente atractivo este enfoque, limitado sin embargo, por el alto costo inicial de las celdas.

Fuentes para generación de potencia en gran escala

Recientemente, en los Estados Unidos de Norteamérica se han desarrollado sistemas para generación de potencia en gran escala, en el orden de los 25MW, que utilizan celdas de combustible con ácido fosfórico y carbonatos fundidos como electrólitos.

Fuentes de almacenaje y producción de electricidad

Algunos tipos de celdas de combustible, tales como las de hidrógeno / oxígeno, pueden utilizarse en combinación con reactores nucleares. Durante los períodos de menor consumo, parte de la energía producida en la reacción nuclear se utiliza para electrolizar soluciones acuosas produciendo hidrógeno y oxígeno que pueden alimentar a celdas de combustible durante los períodos de mayor consumo. De forma similar se pueden integrar las celdas de combustible a los sistemas de generación de energía a partir de fuentes renovables como ser la energía eólica, solar o mareomotriz.

Fuentes de potencia para la producción de vehículos

En este campo, los sistemas electroquímicos de producción de electricidad (celdas de combustible y baterías) han alcanzado gran desarrollo. Se han fabricado vehículos accionados por baterías de celdas alimentadas con hidrógeno y oxígeno de depósitos criogénicos, alcanzando potencias de 30-50 kW y velocidades máximas del orden de 100 km h⁻¹ con una autonomía de 250

km. Se han construido también otros prototipos accionados por sistemas hídricos de celdas de combustible y baterías de plomo y ácido para satisfacer las demandas transitorias de potencia, tales como las requeridas en el arranque y en la aceleración.

3.4 PEMFC - CELDAS DE COMBUSTIBLE CON MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO

Las pilas de combustible son dispositivos electromecánicos que combinan oxígeno con un combustible (como el hidrógeno o algún compuesto del mismo) para producir electricidad. Si el combustible es hidrógeno puro, los únicos resultados de la reacción son electricidad, agua y calor. No en vano, esta tecnología es la que se ha usado durante años por la NASA para producir electricidad y agua en sus sistemas espaciales, y actualmente se encuentran bajo investigación para la propulsión de trenes, tanto en EEUU como en Dinamarca.

Las celdas de combustible tipo PEM (Membrana de intercambio protónico) cubren una amplia gama de aplicaciones en diferentes industrias y segmentos de mercados, brindando una compacta, limpia y más eficiente fuente de energía. Empresas globales como 3M y DuPont han desarrollado celdas que han alcanzado el nivel de comercialización, superando varios años de experimentación.

Recientemente las celdas de combustible con Membrana de Intercambio Protónico (Celdas PEM) se han convertido en la mejor opción costo-beneficio para muchísimas aplicaciones. Existen tres principales tipos de celdas PEM, según el tipo de combustible utilizado:

- ❖ Hidrógeno (puro)
- ❖ Reformado de hidrógeno
- ❖ Metanol directo (DMFC)

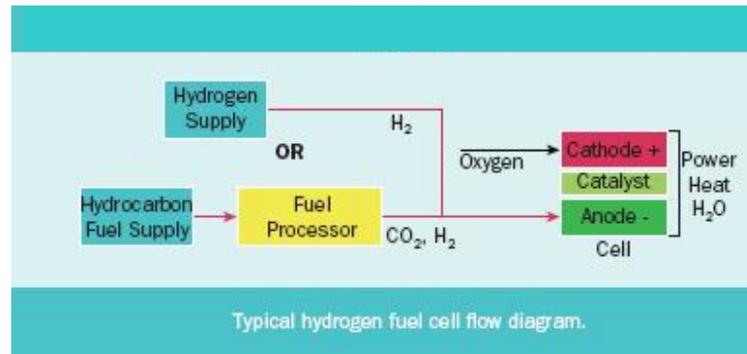


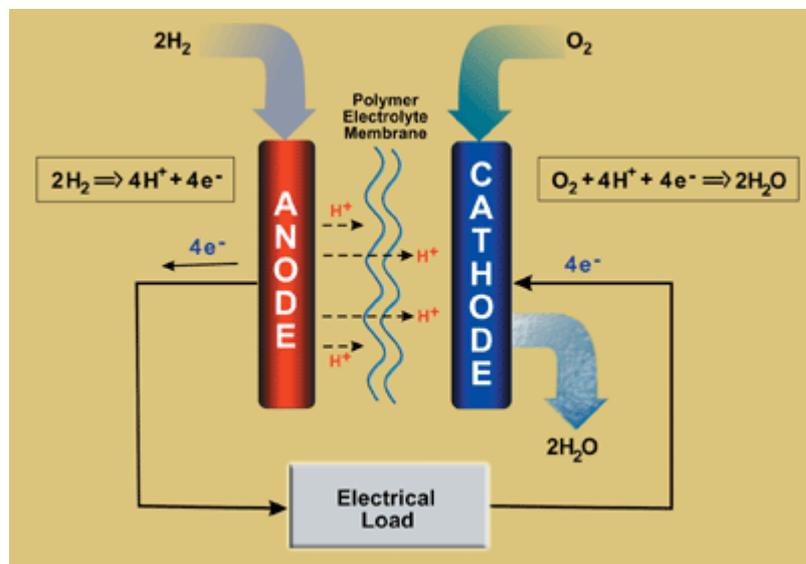
Figura 11

Diagrama de flujo de una celda de combustible

La diferencia entre estos tres tipos reside en como se obtiene el hidrógeno necesario para la reacción.

El hidrógeno utilizado en sistemas de “**reformado de hidrógeno**” es obtenido a partir del metanol o de algún hidrocarburo (metano o propano). Se llama “reformado de hidrógeno” porque el metanol o el hidrocarburo es procesado para producir hidrógeno en un dispositivo conocido como “reformador” que se encuentra inmediatamente antes de la celda de combustible PEM.

En una celda de combustible de metanol directo el metanol se convierte directamente en hidrógeno sin el uso de un reformador.

Figura 12²³

Esquema de una celda de combustible PEM

Esta membrana particular de las celdas PEM, constituye el electrolito de la pila de combustible, y es permeable para los protones, que se pueden mover libremente, pero no para el combustible o para los electrones, quedando estos

²³ HVSS Frankfurt

últimos atrapados de tal forma que al circular del ánodo al cátodo externamente, producen la electricidad deseada.

3.4.1 Aplicaciones

3.4.1.1 Transporte

Para producir hidrógeno desde combustibles fósiles de una manera que no se desprenda dióxido de carbono de tal forma de no aumentar los cambios climáticos, se debe capturar antes de que llegue a la atmósfera. Se presume que resultará mucho más sencillo poder capturar el dióxido de carbono todo junto en las plantas de producción de hidrógeno, que tratar de capturarlo de millones de caños de escape de los autos.

La promesa de la tecnología de las celdas de combustibles para el futuro de los sistemas de transporte dependerá de desarrollos en cuanto a la calidad, precios competitivos y componentes amigables a los usuarios.

Se destacan las siguientes características y beneficios:

Se están alcanzando desempeños muy próximos a los logrados con motores de combustión interna.

Cambiando los combustibles tradicionales se generarán menos agentes contaminantes que los que resultan de los procesos de combustión, lo que significa una mayor responsabilidad social y por el medio ambiente.

Trenes

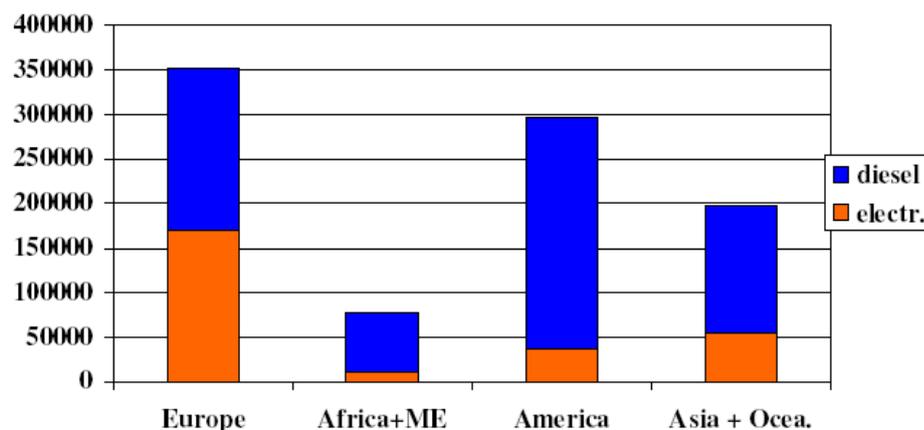
Primer tren europeo a hidrógeno

El *tren a hidrógeno* es un ideal conducido por los enormes potenciales que el hidrógeno y la tecnología de celdas de combustible albergan para la energía del futuro.

La visión es que la energía renovable sea utilizada para producir hidrógeno a través de la separación del agua. Luego, el hidrógeno sería almacenado a bordo del tren para después ser convertido en energía nuevamente en una celda de combustible, con agua como único factor residual.

De esta forma, la producción de hidrógeno sostenible, implicaría **una alternativa al combustible fósil diesel para trenes en locaciones remotas donde el tendido eléctrico es costoso.**

En los ferrocarriles, hasta ahora se ha mostrado poco interés por el hidrógeno. Una de las razones puede ser que actualmente se utiliza una tecnología conocida y muy probada, también basada en energías no fósiles. La electrificación de los trenes es una solución viable, donde la red eléctrica proveniente de diferentes recursos energéticos, puede ser transmitida a las ruedas con un alto grado de eficiencia energética. En varios países del continente europeo, más de la mitad de las líneas ferroviarias se encuentran electrificadas. En Suiza, el grado de electrificación es del 100%, dados los vastos recursos hidráulicos.



Kilometers of railway lines dependent on diesel fuel and electrified lines in various parts of the world (From the International Union of Railways (UIC) statistics 2003. Data from some countries are missing) Only in Europe a considerable part of the railways (around 50 %) are electrified.

Figura 13

Kilómetros de vías ferroviarias dependientes de combustible diesel y líneas eléctricas en diversas partes del mundo.

Vehículos de pasajeros

Todas las automotrices del mundo están desarrollando desde hace varios años prototipos de autos híbridos, eléctricos y autos propulsados a hidrógeno, siempre tratando de alcanzar el objetivo de tener autos con emisión cero. El uso de celdas de combustible es la alternativa elegida para alcanzar la meta de vehículos sin emisiones. Los países más desarrollados como el caso de Inglaterra están adoptando metas para alcanzar en un futuro el ideal de utilizar autos con cero emisión. Como contribución a reducir el calentamiento global el Reino Unido adoptará como meta una reducción de las emisiones de los coches nuevos a una media de 100 gramos por kilómetro. El promedio actual de los vehículos nuevos es aproximadamente 167 gramos por kilómetro.²⁴

²⁴ Staff and agencies Guardian unlimited



Figura 14



Figura 15

Buses y colectivos

En todo el mundo ya se están haciendo experiencias con transporte público propulsado a hidrógeno.



Figura 16

Aviones

El transporte aéreo, que hoy depende enteramente de la combustión de querosene, tendría que emprender una transformación ingente para utilizar otros combustibles, tal vez hidrógeno.

3.4.1.2 Sustitución y reemplazo de baterías convencionales

Energía portátil



Figura 17

- Grupos electrógenos y generadores transportables
- Energía de respaldo o resguardo (Backup energy)
- Dispositivos electrónicos de consumo masivo (computadoras, video cámaras, telefonía móvil, juegos electrónicos)
- Aplicaciones de potencia y herramientas de potencia
- Vehículos personales pequeños (bicicleta motorizada)
- Señalización de carreteras y tráfico
- Antenas de telefonía móvil y otros tipos de antenas

“Cuando uno ya está en camino, la duración de la carga y la confiabilidad puede marcar la diferencia entre el éxito y el fracaso.” La energía portátil en fuentes compactas, livianas y potentes brindará más independencia y libertad.

Características y beneficios:

- Más energía con menor peso, es decir **fuentes de energía más compactas.**
- **Tiempos de operación extremadamente mayores.**
- **No requiere carga** (mientras haya combustible, habrá energía disponible)

Aplicaciones industriales:

- Lector electrónico de identificaciones portátil a radio frecuencia
- Lectores portátiles de códigos de barras

- Autoelevadores y utilitarios de transporte para la logística propulsados por celdas de combustible en lugar de baterías tradicionales.

3.4.1.3 Energía distribuida

Confiable, limpia, eficiente y competitiva son algunos de los requerimientos más exigentes del mercado de las potenciales celdas de combustible vinculadas a la distribución de energía.

Estas aplicaciones son para aquellos clientes que no tienen acceso a la red de transmisión eléctrica. Más allá que las celdas de combustible sean para mantener energía ininterrumpida o bien para proveer energía a locaciones remotas de la red, un flujo uniforme de generación energética es esencial.

- Casas y pequeños comercios (torres de telecomunicación, edificios fuera de red – que no tengan acceso a la red de transmisión eléctrica, etc.)
- Grupos electrógenos (hospitales, centros de computación, etc.)
- Energía Premium (data centers)

Características y beneficios

- Suministros de energía de alta calidad con un nivel de energía confiable y consistente.
- Energía in-situ, dedicada, donde se necesite, sin las interrupciones y apagones que ocurren cuando se extrae energía de red.
- Alternativa eficiente para mantener y mejorar o cambiar líneas de distribución/transmisión congestionadas y sobre usadas.
- Carga base, eliminando altos precios de carga en los picos
- Ahorro energético (dependiente de la variación del costo de combustible en el área)
- Energía de respaldo conveniente y confiable

3.5 DMFC - CELDAS DE COMBUSTIBLE DE METANOL DIRECTO

Las celdas de combustible de metanol directo (DMFC) trabajan creando un potencial termodinámico de la reacción química entre el metanol y el aire. Sin la ayuda de partes móviles, las pilas de combustible de metanol directo producen electricidad mediante un proceso electroquímico, sin combustión y sin falta de reformar el combustible de reserva a hidrógeno para exponer el hidrógeno en

forma gaseosa al intercambio de protones en la membrana (PEM). La ventaja de las celdas de combustible de metanol directo sobre una pila tradicional es que la DMFC simplemente puede ser rellenada con más combustible cuando se acabe. Una celda de combustible es un aparato que **produce** energía mientras una batería es un dispositivo que **guarda** energía. Las celdas de combustible de metanol directo solo requieren del agregado externo de combustible para funcionar. Mientras sean provistos el combustible y el aire a las DMFC se podrá contar con energía. Este sistema no necesita ser recargado.

El potencial termodinámico es creado mediante el uso de una membrana de un polímero electrolito que deja pasar solo algunas especies de químicos. Del otro lado de la membrana, la mezcla de metanol diluido en agua en contacto con el ánodo catalizador se separa en átomos de hidrógeno y dióxido de carbono. Después a los átomos de hidrógeno se les quitan todos los electrones y se trasladan a través de la membrana hasta llegar al cátodo. En el cátodo catalizador, los protones (átomos de hidrógeno sin electrones) reaccionan con el oxígeno del aire para formar agua sin los electrones. Conectando un alambre conductor que una el ánodo con el cátodo, los electrones que salen de los átomos de hidrógeno en el lado del ánodo, viajarán al cátodo para combinarse con la especie que no tiene electrón.

Desde el punto de vista de la termodinámica, los electrones "quieren" viajar al lado de los cátodos en una específica "cantidad," que puede ser cuantificada a circuito de voltaje abierto. El circuito abierto es medido con un voltímetro a través de la celda programada a una resistencia muy alta. La termodinámica favorece la reacción del metanol con O_2 a dióxido de carbono y agua, forzando una diferencia de potencial en la membrana hasta que el sistema alcanza el equilibrio. Cuando se alcanza este nivel, los componentes dejan de reaccionar, y no se puede extraer más energía del sistema.

Se podrá extraer energía mientras no se baje el voltaje en la membrana por debajo del valor del equilibrio. Esto se hace poniendo un alambre resistente conectando los dos lados débilmente para que la corriente pueda correr. Cuanto más pequeña que sea la diferencia de voltaje que se acumula en la celda de combustible de esta manera, mayor será la corriente que será producida, hasta que el límite de protones transportados sea alcanzado, después de tal punto deja de producirse energía.

La reacción total que ocurre en la DMFC es la misma que es se utiliza para la combustión de metanol:



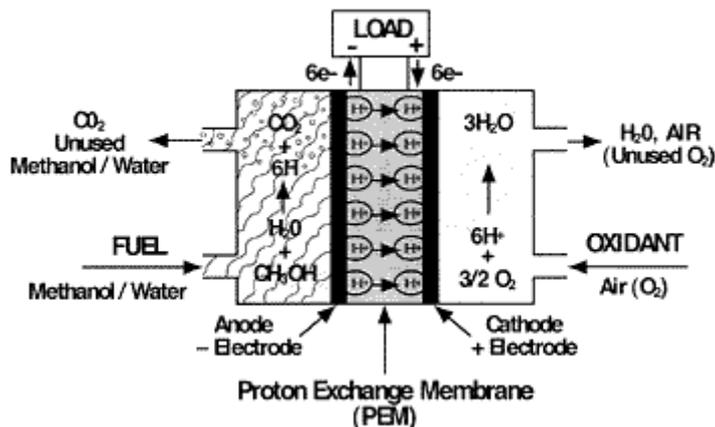


Figura 18

Diagrama esquemático de las principales operaciones de las DMFC

Cuando se está extrayendo corriente eléctrica, el metanol se oxida electroquímicamente en el electrodo negativo (ánodo catalizador) para producir electrones que viajen a través del circuito eléctrico, hasta llegar al cátodo catalizador donde se consumen junto con el oxígeno en una reacción reductora. El circuito se mantiene dentro de la celda por la conducción de protones a través del electrolito.

3.5.1 Subproductos de DMFC

El trabajo de las celdas de combustibles es convertir la energía química de un combustible directamente en corriente eléctrica sin quemar el combustible. A diferencia de los motores de combustión interna, acá no hay proceso de combustión; por lo tanto no se generarán agentes contaminantes del aire. El único subproducto de este intercambio es el agua pura y un poco de dióxido de carbono (CO_2). La tecnología de DMFC no produce, a diferencia de otras tecnologías de celdas de combustible, ningún monóxido de carbono u otras partículas tales como óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos del sulfuro (SO_x) o gases orgánicos reactivos (ROG). **La cantidad total de dióxido de carbono generada por una celda de combustible de metanol directo es aproximadamente la mitad de la que se genera actualmente por los motores de combustión interna.** Por lo tanto la utilización de DMFC para producir energía tendría un efecto muy profundo en el cuidado del planeta.

3.5.2 Las ventajas de DMFC sobre otras celdas de combustible

En los términos de la cantidad de electricidad generada, una sola celda de combustible de metanol directo puede generar actualmente 300-500 mV/cm². Aumentando el tamaño de la celda se puede aumentar la energía generada. La modularidad de estos sistemas permite agrupar varias DMFC individuales

formando un "stack" o apilado de celdas, consiguiendo de esta forma un rango de voltajes de generación que va desde unos pocos milivatios hasta varios kilovatios, pudiendo abastecer automotores, artefactos portátiles y aplicaciones estacionarias.

El diseño del combustible líquido de DMFC posee numerosas ventajas a nivel sistema con respecto a otros sistemas que utilizan combustibles gaseosos como el RMFC. Una celda de combustible de metanol directo:

- Elimina el vaporizador del combustible o el "reformador"
- Elimina altas presiones y temperaturas. DMFC funcionan con eficacia en la temperatura ambiente y presiones menores de 20 psi.
- Elimina la complejidad que presenta el agua y los sistemas de control térmico que son necesarios mantener el equilibrio de la temperatura y de presiones en las celdas con reformador de combustible.

Por lo tanto,

- Elimina la necesidad de la calefacción interna y de placas para refrigeración.
- Elimina el proceso de humectación de la tecnología del reformador sin el cual las membranas se secan para arriba y se quiebran. El estado líquido de las DMFC proporciona un baño constante para las membranas.
- Baja perceptiblemente el tamaño y el peso del sistema, debidos en gran parte a la eliminación del reformador, algo muy costoso y complejo.
- DMFC usa BI-PLACAS que se pueden hacer fuera de los materiales ligeros, flexibles, o de materiales que no son metales que son perceptiblemente más bajos en costo.

Las celdas de combustible de metanol serán el reemplazo de las baterías tradicionales, y se espera que ganen rápidamente una participación mercado sustancial porque ofrecen mayor tiempo de operación en comparación con las actuales baterías de Ion-Litio, y además se podrán recargar instantáneamente simplemente cambiando el cartucho descartable de metanol.

Compañías como Samsung en Korea, Toshiba, NEC, Hitachi y Sanyo Japón están desarrollando productos con celdas de combustible de metanol directo. Se esperan ventas miles de millones de dólares en los próximos años.

La celda de combustible de metanol directo fue inventada y desarrollada en el "Laboratorio de Propulsión de Jets de Caltech/NASA" y la "Universidad de

Carolina del Sur” (USC). Hay más de 56 patentes publicadas y 62 pendientes acerca de esta tecnología a nivel mundial.²⁵

Las DMFCs son dispositivos electroquímicos que convierten un combustible con alta densidad de energía (el metanol líquido) **directamente** en electricidad. Estas operan relativamente a bajas temperaturas y ofrecen tiempos de operación muchos mayores a los que ofrecen las actuales baterías convencionales. A diferencia de una batería tradicional, las DMFCs no necesitan ser recargadas. Estas pueden proveer electricidad de manera continua al dispositivo electrónico que estén alimentando, mientras se cuente con oxígeno y combustible. Para lograr este trabajo continuo solo es necesario intercambiar el cartucho de metanol, obteniendo así una recarga instantánea.

La introducción de esta tecnología en la vida cotidiana elimina la necesidad de los consumidores de acarrear cargadores, adaptadores y cables.

El metanol puro o una solución de agua y metanol son las opciones elegidas como el combustible a utilizar por la industria de las celdas de combustible. Debido a que es líquido, es fácil de almacenar y transportar. El metanol es barato y ya se encuentra disponible. Además posee alta densidad de energía, lo que significa un mayor tiempo de operación.

El corazón de una celda de combustible consiste en el catalizador para la reacción electroquímica y una pieza especial de plástico que puede conducir protones. En términos técnicos la pieza especial de plástico es una membrana de polímero que actúa como electrolito (PEM). Dupont es la compañía que produce las membranas PEM más utilizadas por las celdas de combustible, se trata de el Nafion™. Por otro lado el catalizador mayormente utilizado para el ánodo es PtRu alloy, una aleación de Platino y Rutenio, que es un metal del grupo del Platino, y para el cátodo se utiliza el Platino.

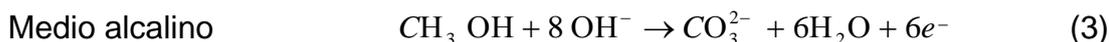
En las celdas de combustible, el combustible no es quemado mediante un proceso de combustión, sino que se convierte en electricidad a través de un proceso electroquímico que divide al metanol en protones, electrones y dióxido de carbono en el ánodo y luego combina esos protones y electrones con oxígeno en el cátodo para producir agua. Es un concepto muy simple.

3.5.3 Celdas de baja temperatura con combustible orgánico

Desde el punto de vista del contenido energético, de la facilidad de almacenamiento y de transporte, las sustancias orgánicas líquidas son

²⁵ DMFC Corporation

combustibles ideales para las celdas de combustible. Sin embargo, la baja actividad electrocatalítica de estos combustibles orgánicos constituye un obstáculo para su desarrollo. Pese a ello se han construido celdas que utilizan alcoholes y otros compuestos orgánicos que contienen oxígeno. Las reacciones que corresponden a una oxidación completa del metanol en soluciones ácidas o alcalinas son las siguientes:



El alto contenido energético del combustible se explica por la producción de seis electrones por cada molécula de metanol oxidada. La oxidación se lleva a cabo a mayor velocidad en medio alcalino que en medio ácido, lo cual permite utilizar menor cantidad de platino como catalizador. Bajo ciertas condiciones es posible emplear catalizadores de níquel de Raney en lugar de los metales nobles.

La eliminación continua de los productos de reacción (carbonatos) de las celdas alcalinas presenta considerables dificultades. Por ello son diseñadas para cumplir un solo ciclo operativo o como celdas recargables, mediante el reemplazo periódico de la mezcla combustible-álcali.

3.5.4 Micro celdas de combustible de metanol directo

Se trata de pequeñas celdas de combustible alimentadas por metanol de alta concentración. Luego de reaccionar electro-químicamente el metanol con el oxígeno del aire dentro de la celda, se obtiene la electricidad necesaria para cualquiera de los aparatos electrónicos que se esté abasteciendo

No necesitan ser recargadas. Solo se debe contar con un cartucho extra de metanol o una botella de metanol, no más cables, ni transformadores cargadores. Además se estima que resultará mucho más barato contar con cartuchos extra de metanol que comprar baterías recargables de reserva adicionales.

Las celdas de combustible de metanol directo no poseen partes móviles, operan de manera silenciosa y relativamente a bajas temperaturas, y además ofrecen un tiempo de operación continuo mucho mayor que el de las baterías tradicionales, es decir las baterías recargables de Ion-Litio.

Mejores, más pequeñas, menos costosas, no contaminantes y mucho más eficiente es la tecnología patentada de Microceldas basadas en metanol que

lograrán mantener un teléfono celular en stand-by durante 6 meses a diferencia de las 2 semanas que se logran con baterías de Ion-Litio. Además las Microceldas de combustible podrán proveer 1 semana de tiempo de llamado en lugar de las 5 horas que ofrecen los teléfonos celulares con baterías de Ion-Litio. Pero todavía falta terminar de desarrollar esta tecnología.

3.6 CELDAS DE COMBUSTIBLE CON REFORMADO DE HIDRÓGENO

3.6.1 RMFC – Celdas de combustible de metanol reformado

Estas pilas de combustible, como su nombre indica, **emplean metanol como combustible para la obtención del hidrógeno**. El metanol es el hidrocarburo más simple, se produce naturalmente en la naturaleza, es biodegradable y de elevada densidad tanto energética como de hidrógeno. **Las pilas de combustible de metanol reformado (“Reformed Methanol Fuel Cell”, RMFC)** son una variante de las **pilas de combustible de metanol directo (“Direct Methanol Fuel Cell”, DMFC)**, donde se utiliza el metanol directamente sin necesidad de extraer anteriormente el hidrógeno (se extrae directamente en la reacción) pero que para ello necesitan el empleo de electrocatalizadores basados en el platino, que elevan mucho su precio.

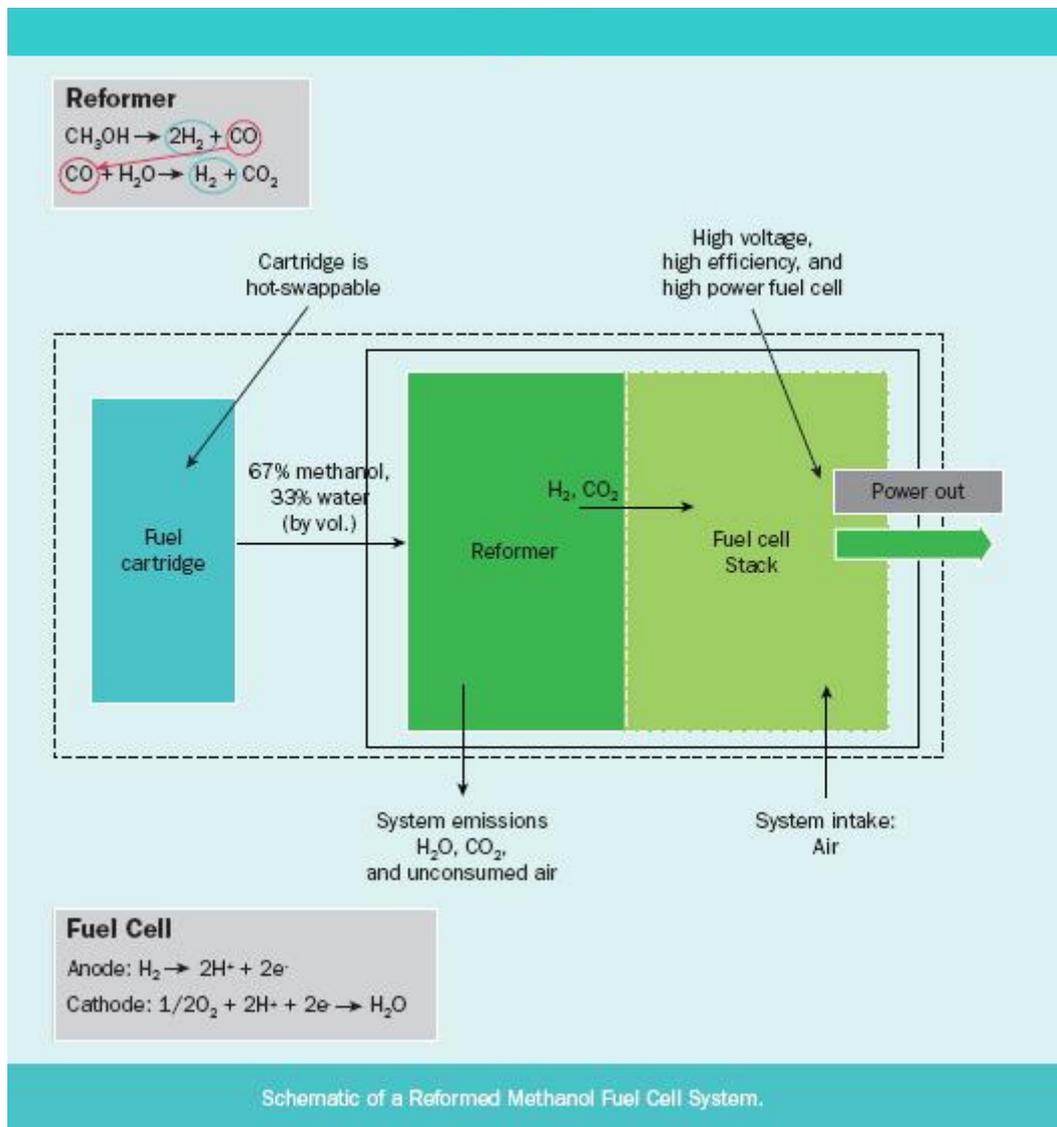


Figura 19

Y empleando la tecnología **RMFC** las pilas de combustible han dado el salto de los laboratorios al mercado. La empresa norteamericana UltraCell comercializa el modelo XX25:



Figura 20

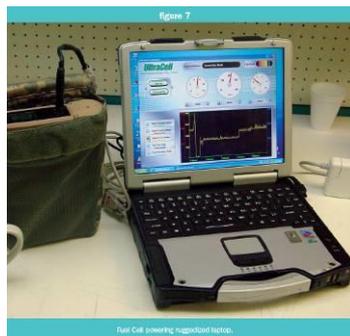


Figura 21

Debido a su costo, por el momento las aplicaciones serán meramente militares. Pero Intel ya ha desarrollado un estándar para la comunicación entre las pilas de combustible y las PCs portátiles. Y ocurrirá como con todo: cuando se depure su producción, se disminuyan los costes, y las pilas de combustible sean más eficientes, pequeñas y ligeras, podrán empezar a emplearse masivamente en el ámbito civil. Así pues, **este será un nuevo ejemplo de cómo la investigación militar ha devenido en una mejora considerable del desarrollo tecnológico civil, de la evolución de la tecnología aplicada al avance del nivel de vida de los ciudadanos, y, en consecuencia, a un aumento de la libertad de todos los ciudadanos, que dejaremos de estar “atados” a la red de distribución eléctrica.**

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 ASPECTOS TERMODINÁMICOS DE LA CONVERSIÓN ELECTROQUÍMICA DE ENERGÍA

La conversión electroquímica de la energía química en eléctrica se realiza en reactores denominados celdas de combustible. En estos dispositivos, el cambio de energía libre de una reacción química se **convierte directamente en electricidad** con un alto grado de eficiencia no limitado por la restricción de Carnot. Muchas celdas galvánicas desarrolladas en el siglo pasado, tales como la celda de agua y la celda de carbono/oxígeno, constituyen casos típicos de las hoy llamadas celdas de combustible. La relación entre el cambio de energía libre de una reacción química, ΔG , y el potencial reversible termodinámico, E_r , de la celda donde ocurre la reacción está dada por:

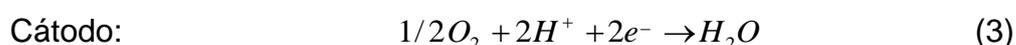
$$\Delta G = -n F E_r \quad (1)$$

donde n es el número de electrones puestos en juego en la reacción total y F es la constante de Faraday.

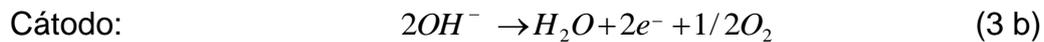
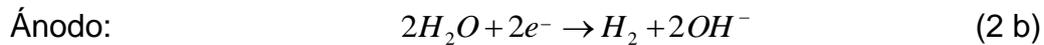
Una celda electroquímica de corriente continua consta de dos conductores eléctricos llamados electrodos, cada uno sumergido en una disolución adecuada de electrolito. Para que circule una corriente en una celda es necesario:

- Que los electrodos se conecten externamente mediante un conductor metálico.
- Que las dos disoluciones de electrolito estén en contacto para permitir el movimiento de iones de una a otra.
- Que pueda tener lugar una reacción de transferencia de electrones en cada uno de los dos electrodos.

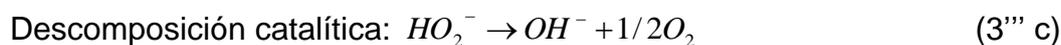
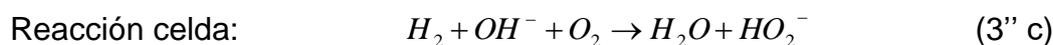
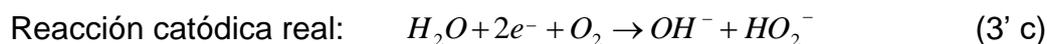
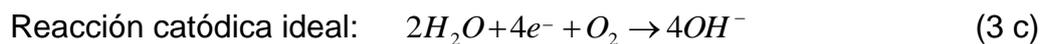
En una celda de combustible, los reactivos (generalmente gaseosos) son aportados a los correspondientes electrodos, constituidos por materiales porosos, que se encuentran en un electrolito adecuado estableciéndose una diferencia de potencial que mantiene un flujo de electrones a través de un conductor externo (Fig. 1). Así, en la celda de combustible de hidrógeno/oxígeno con electrolito *ácido* ocurren las siguientes reacciones:



Por definición, el cátodo de una celda electroquímica es el electrodo en el que tiene lugar la reducción, mientras que el ánodo es el electrodo en el que tiene lugar la oxidación. A continuación se describen las reacciones en la celda de combustible hidrógeno/oxígeno con electrólito *básico* (*electrólisis del agua*):



En medio alcalino, utilizando hidróxido de potasio o hidróxido de sodio concentrado como electrolito, la celda puede funcionar en un amplio rango de temperatura presión, aunque a los fines prácticos opera a 200-240° C y a altas presiones. Las reacciones que ocurren en la celda se pueden escribir, globalmente, como:



La suma de las reacciones (2) y (3), como también la suma de (3''c) y (3'''c) corresponden a la reacción total de combustión:



De este modo, el hidrógeno y el oxígeno se consumen de modo uniforme para producir agua, mientras el flujo de electrones en el circuito externo puede efectuar trabajo útil. El cambio de energía libre normal de la reacción (4) a 25° C es $-56,69 \text{ kcal mol}^{-1}$ y el potencial reversible termodinámico de la celda es 1,23 V.

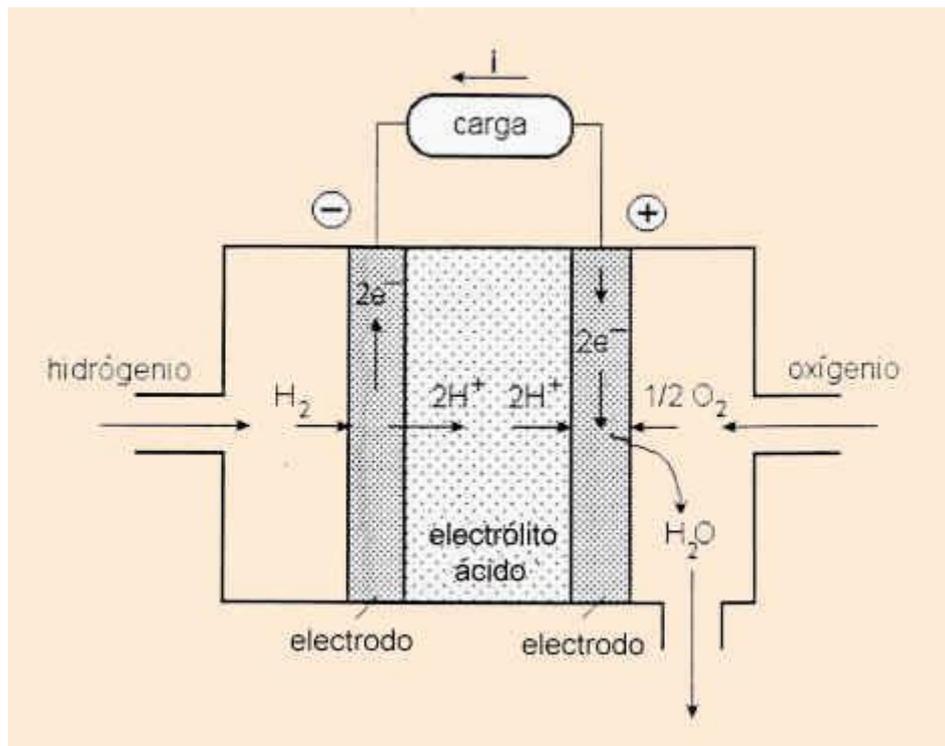


Figura 22

Representación esquemática de una celda de combustible

4.1.1 Conducción en una celda

La carga es conducida por tres procesos diferentes en las distintas partes de la celda:

- En los electrodos de metal, así como en el conductor externo, los electrones sirven de portadores, moviéndose desde un electrodo, a través de un conductor, hasta el otro electrodo.
- En las disoluciones en flujo de electricidad implica la migración tanto de cationes como de aniones.
- En las superficies de los dos electrodos tiene lugar un tercer proceso. En este caso, una reacción de oxidación o una de reducción proporcionan un mecanismo mediante el cual la conducción iónica de la disolución se acopla con la conducción electrónica del electrodo para proporcionar un circuito completo para el flujo de carga.

La eficiencia máxima intrínseca de conversión de una celda de combustible ideal, ϵ_1 , está dada por la relación entre el cambio de entalpía, ΔH , de la reacción, esto es:

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (5)$$

o, de acuerdo con la ecuación (1):

$$\epsilon_1 = - \frac{nFE_r}{\Delta H} \quad (6)$$

Por otra parte, puesto que:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (7)$$

Se obtiene

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta H - T \Delta S}{\Delta H} \quad (8)$$

ΔS es el cambio de entropía de la reacción y T la temperatura absoluta. La ecuación (8) muestra que no se puede evitar la pérdida de energía relacionada con el cambio entrópico de la reacción, que se libera como calor ($T \Delta S$). Generalmente, el valor numérico de ΔG es muy próximo al de ΔH y, consiguientemente, la eficiencia máxima intrínseca de una celda que opera reversiblemente es muy cercana a la unidad (Tabla 1). En algunos casos, por ejemplo, en la electroxidación del carbono a monóxido de carbono, el valor numérico de ΔG excede al de ΔH lo cual significa que la eficiencia máxima intrínseca excede la unidad. **Para la celda de combustible de hidrógeno/oxígeno, la eficiencia máxima intrínseca es de 0,91 a 150° C, esto es, el 91 % de la energía total se puede convertir en electricidad a esa temperatura. Como dato comparativo, la eficiencia de una máquina térmica ideal que opera entre 350° C y 1000° C es de sólo 40 %. Las eficiencias prácticas observadas en las máquinas térmicas están entre un 20 y un 25%.**

Además de una alta eficiencia de conversión, las celdas de combustible carecen de partes móviles, por lo que funcionan silenciosamente y sin desgaste mecánico. La producción de electricidad es continua mientras el combustible y el comburente sean aportados a los correspondientes electrodos. Los productos de reacción son generalmente sustancias gaseosas no contaminantes y en algunos casos son los constituyentes del propio electrolito.

Con 1 litro de H₂O y 2393 Ah (Amper hora) se pueden obtener teóricamente 1Nm³ H₂ a partir de la electrólisis del agua.

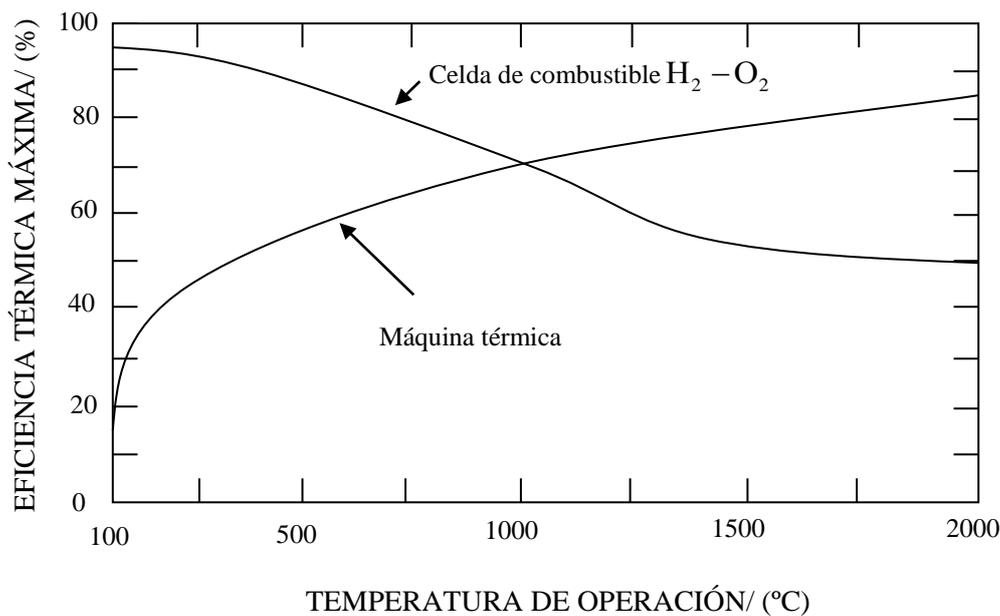


Figura 23²⁶
Eficiencias máximas intrínsecas en función de la temperatura para una celda de combustible y para una máquina térmica.

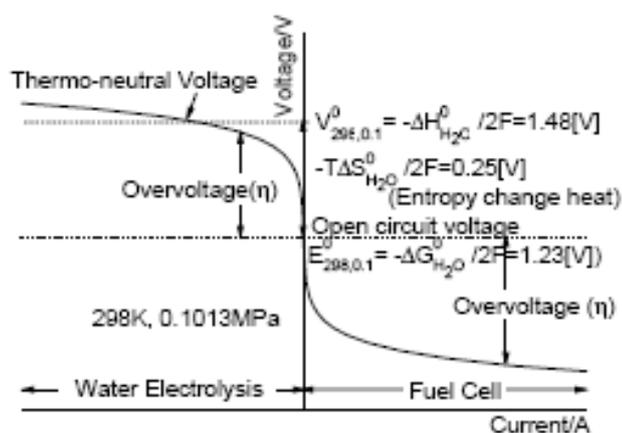


Figura 24²⁷
Prediction of production power for high-pressure hydrogen by high-pressure water electrolysis

²⁶ W. E. Triaca y C. E. Mayer - CONVERSIÓN ELECTROQUÍMICA DE ENERGÍA

²⁷ K. Onda et al. / Journal of Power Sources 132 (2004) 64-70 - Elsevier

DATOS TERMODINÁMICOS A 25° C PARA REACCIONES DE INTERÉS EN LA CONVERSIÓN ELECTROQUÍMICA DE ENERGÍA

Reacción	ΔG /kcal mol ⁻¹	ΔH /kcal mol ⁻¹	E^0_r /V	n	Ei
$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	- 56,69	- 68,32	1,23	2	0,83
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	- 195,50	- 212,80	1,06	8	0,92
$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	- 503,93	- 530,61	1,09	20	0,95
$C_{10}H_{22} + 31/2O_2 \rightarrow 10CO_2 + 11H_2O$	- 1574,4	- 1632,3	1,10	62	0,97
$CH_3OH + 3/2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	- 167,91	- 173,67	1,21	6	0,97
$N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$	- 143,83	-148,69	1,56	4	0,97
$C + 1/2O_2 \rightarrow CO$	- 32,81	-26,42	0,71	2	1,24
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	- 94,26	-94,05	1,02	4	1,00
$C + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$	- 61,45	-67,63	1,33	2	0,91

Tabla 1²⁸

4.1.2 Influencia de la corriente en la celda y parámetros de rendimiento operativo

Voltajes aplicados y caídas de potencial:

Las celdas electroquímicas, al igual que los conductores metálicos, se oponen al paso de corriente. La corriente a través de la celda ocasiona una caída de potencial de $-IR$ Voltios, conocida como potencial óhmico o caída IR, donde R es la resistencia del electrolito, que depende de los tipos y las concentraciones de los iones en la disolución. En otras palabras, el voltaje aplicado, responsable del movimiento de los iones, debe ser mayor que el potencial teórico de la celda. El efecto neto de la caída IR es aumentar el potencial requerido para operar una celda electrolítica.

$$E_{cel} = E_{cátodo} - E_{ánodo} - IR$$

Esta ecuación predice que a potencial de electrodo constantes, debería existir una relación lineal entre el potencial de celda y la intensidad de corriente. De hecho, se encuentran con frecuencia desviaciones de la linealidad; en estas circunstancias, se dice que la celda está polarizada, y el grado de polarización viene dado por un sobrevoltaje. Estos pueden ser sobrepotencial de transferencia de carga o polarización cinética, sobrepotencial de reacción y de difusión, o de cristalización.

²⁸ W. E. Triaca y C. E. Mayer - CONVERSIÓN ELECTROQUÍMICA DE ENERGÍA

Cuando se produce polarización en una celda electrolítica, se requiere un potencial mayor para conseguir una corriente dada.

La polarización es un fenómeno electroquímico que puede afectar a uno o a los dos electrodos y depende de los siguientes factores:

- Tamaño, forma y composición del electrodo
- Composición de la disolución del electrolito
- Temperatura y velocidad de agitación
- Nivel de corriente
- Estado físico de las especies que intervienen en la reacción de la celda

Para que un electrodo no sea fácilmente polarizable debe tener un gran área y estar basado en una reacción de semi-celda rápida y reversible.

Hay tres regiones de una semi-celda donde puede tener lugar la polarización. Estas regiones incluyen el propio electrodo, una capa superficial de disolución inmediatamente adyacente al electrodo, y el seno de la disolución. Para la siguiente semi-celda, la reacción electrónica global es

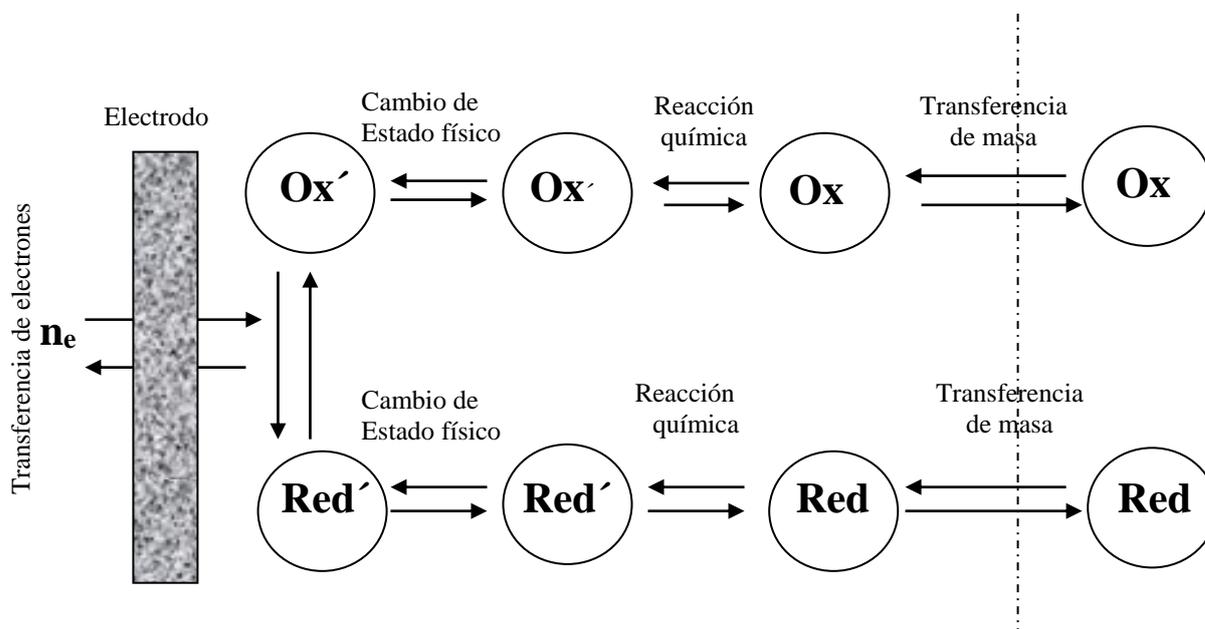


Figura 25

Cualquiera de las etapas intermedias mostradas en la figura pueden, sin embargo, limitar la velocidad a la cual transcurre esta reacción global y, por lo

tanto, la magnitud de la corriente. Una de estas etapas en la reacción, denominada *transferencia de masa*, implica el movimiento de la forma Ox. desde el seno de la disolución a la capa superficial. Cuando esta etapa (o la transferencia de masa inversa de la forma Red al seno de la disolución) limita la velocidad de la reacción global y por tanto la intensidad de corriente, se dice que existe *polarización de concentración*. Algunas semirreacciones provienen de una reacción química intermedia en la cual se forman las especies tales como Ox' o Red'; este producto intermedio es entonces el participante real en el proceso de transferencia electrónica. Si la velocidad de formación o descomposición de tales productos intermedios limita la intensidad de corriente, se dice que está presente una *polarización de reacción*. Esta última se suele evitar mediante el agregado de catalizadores. En algunos casos, la velocidad de un proceso físico tal como la adsorción, la desorción o la cristalización es lo que limita la intensidad de corriente. Aquí está teniendo lugar una *polarización de adsorción, de desorción, o de cristalización*. Finalmente se encuentra la *polarización de transferencia de carga*, en la que la limitación de corriente se origina por la lenta velocidad de transferencia de electrones desde el electrodo a las especies oxidadas en la capa superficial o desde las especies reducidas al electrodo. Es muy posible encontrar que se estén produciendo simultáneamente varios tipos de polarización.

4.1.2.1 Sobrepotencial

El grado de polarización de un electrodo se mide por el *sobrevoltaje* o *sobrepotencial* η , que es la diferencia entre el potencial real del electrodo E y el potencial de equilibrio E_{eq} . Esto es:

$$\eta = E - E_{eq}$$

donde $E < E_{eq}$. Es importante darse cuenta que la polarización siempre reduce el potencial de electrodo del sistema (η es siempre negativo).

4.1.2.2 Polarización por concentración

La transferencia de electrones entre una especie activa de la disolución y un electrodo sólo puede tener lugar a través de una fina película de disolución, localizada en las inmediaciones de la superficie del electrodo; esta película solamente tiene unos pocos Ångstrom de espesor y contiene un número limitado de átomos y moléculas activas. Para que se produzca una corriente

constante en la celda, esta película debe volverse a reponer continuamente con el reactivo procedente del seno de la disolución.

Es decir, a medida que los iones o moléculas del reactivo se transforman por reacción electroquímica, deben transportarse a la película superficial sobre el electrodo a una velocidad suficiente para mantener la corriente. (Análogamente, los iones deben eliminarse de la película superficial del ánodo a la misma velocidad)

Variables experimentales que influyen en el grado de polarización de concentración:

- **Concentración de reactivo**, siendo la polarización más probable a concentraciones bajas
- **Concentración de electrolito**, siendo la polarización más probable a concentraciones elevadas
- **Agitación mecánica**, disminuyendo la polarización en soluciones bien agitadas
- **Tamaño de electrodo**, disminuyendo los efectos de polarización a medida que la superficie del electrodo aumenta

La polarización por concentración tiene lugar cuando las especies activas no llegan a la superficie del cátodo, o las superficies del producto no dejan las superficies del ánodo, a una velocidad suficientemente grande para mantener las corrientes deseadas. Al iniciarse la polarización de concentración, se desarrolla un sobrepotencial de difusión. Cuando esto ocurre se produce una caída de potencial, consecuentemente se necesitará entregar mayor energía a la celda para obtener la misma cantidad de producto.

El transporte de reactivos hasta la superficie del electrodo tiene lugar por tres mecanismos: **Difusión, Migración y Convección.**

- **La difusión** es un proceso por el cual los iones y moléculas se mueven de una parte más concentrada de la solución a una más diluida. En la electrólisis del agua en solución alcalina los iones H^+ se reducen en la superficie del electrodo por ende la concentración de ellos se hace muy pequeña cerca del cátodo. Luego los iones se difunden desde el seno de la disolución hasta la superficie debido al gradiente de concentración. A medida que aumenta el potencial aplicado la velocidad de difusión aumenta y la corriente aumenta correspondientemente. La velocidad de difusión es directamente proporcional a la diferencia de concentración.

- **La convección** es el transporte mecánico de iones o moléculas a través de una disolución como consecuencia de la agitación o vibración, o gradientes de temperatura y/o densidad. La convección forzada (agitación o vibración) tenderá a disminuir el grosor de la capa de difusión en la superficie del electrodo, y de ese modo disminuirá la polarización por concentración. La convección natural que resulta de diferencias de temperatura o densidad también contribuye al transporte de especies hacia y desde un electrodo.

- **La migración** es el movimiento de iones a través de la disolución debido a las atracciones electrostáticas entre los iones y los electrodos. Es la causa primaria de la transferencia de masa en el seno de la disolución en la celda electrolítica. En general, la velocidad a la que migran los iones desde o hacia la superficie del electrodo aumenta a medida que aumenta el potencial del electrodo. Este movimiento de cargas bajo la influencia de un campo eléctrico constituye una corriente, que también aumenta con el potencial. Cuanto mayor es el número de especies diferentes de iones en una disolución dada, menor es la fracción de la carga total que es transportada por una especie en particular. Por ejemplo, si una disolución contiene sólo iones cadmio (y sus correspondientes contraiones) la corriente total de la disolución es transportada por estos iones. Si se añade a la disolución una segunda sal, como cloruro sódico, la fracción de la corriente total llevada por los iones cadmio disminuye. Cuando la concentración de los iones sodio supera a la de los iones cadmio en un factor de 50 a 100, la fracción de la corriente total transportada por el cadmio se aproxima a cero. De ahí resulta, que la velocidad de migración del cadmio hacia el electrodo se hace esencialmente independiente del potencial aplicado.

4.1.2.3 Polarización cinética

La polarización por transferencia de carga surge cuando la velocidad de oxidación o de reducción en uno o en ambos electrodos no es suficientemente rápida para producir corrientes de la intensidad demandada por la teoría..

En la polarización cinética la magnitud de la corriente esta determinada por la velocidad de las reacciones en uno o en los dos electrodos, es decir la velocidad de transferencia electrónica entre los reactivos y los electrodos. Para compensar la polarización cinética se requiere un sobrevoltaje para superar la barrera de energía de la semirreacción.

La polarización cinética es pronunciada sobre todo en procesos de electrodos que originan productos gaseosos, y con frecuencia es despreciable cuando el proceso consiste en la disposición o disolución de un metal. **Los efectos cinéticos disminuyen al aumentar la temperatura y al disminuir las densidades de corriente.** Estos efectos también dependen de la composición del electrodo y son especialmente pronunciados en el caso de metales blandos, como el plomo, cinc y sobre todo el mercurio. La magnitud de los efectos del sobrevoltaje no se pueden predecir a partir de las teorías establecidas, y solamente se puede estimar a partir de información empírica bibliográfica.

Los sobrevoltajes correspondientes a la formación de hidrógeno y oxígeno llegan a valer a menudo 1 V o más. De particular interés es el gran sobrevoltaje del hidrógeno en metales como el cobre, cinc y mercurio. Por consiguiente estos metales y algunos otros pueden depositarse sin interferencia debida al desprendimiento de hidrógeno. En teoría, no es posible depositar cinc a partir de una disolución acuosa, porque se forma hidrógeno a un potencial considerablemente menor que el que se requiere para depositar cinc. De hecho, el metal puede depositarse sobre un electrodo de cobre sin formación significativa de hidrógeno, porque la velocidad a la que se forma gas sobre el cinc o el cobre es despreciable, como se muestra por el gran sobrevoltaje de hidrógeno que presentan estos metales.

Para la mayoría de las reacciones electroquímicas de interés en la conversión electroquímica de energía a temperaturas bajas e intermedias, los mejores catalizadores son metales nobles, principalmente platino. De ahí que se realicen esfuerzos para encontrar sustitutos adecuados de estos materiales menos costosos.

Para lograr poder utilizar más eficazmente a los metales nobles se los busca preparar en formas que presenten una mayor actividad catalítica.

La estructura del electrodo juega también un papel fundamental en la optimización del proceso de producción de electricidad. A este respecto, se han desarrollado electrodos porosos que permiten aumentar notablemente la velocidad del proceso de transporte de materia en las celdas de combustible que emplean reactivos gaseosos al disminuir el espesor de la película de difusión.

4.2 PARÁMETROS OPERACIONALES

Los siguientes parámetros operacionales fueron obtenidos a partir de los electrolizadores de agua industriales de baja presión para generación de hidrógeno y oxígeno que se comercializan actualmente

Existen electrolizadores industriales a baja presión que utilizan electrodos de tamaños inmensos para producir cantidades de hidrógeno y oxígeno considerables. El voltaje de descomposición del agua es independiente del PH de la misma, de esta manera se pueden usar tanto soluciones ácidas como alcalinas para producir la electrólisis. De todas formas, en la industria de la electrólisis a baja presión, sólo son utilizadas soluciones alcalinas como electrolito ya que las soluciones ácidas traen dificultades de diseño y de selección de materiales.

La conductividad eléctrica de las soluciones alcalinas depende de la concentración y crece con aumentos de la temperatura. Pero ya que los elementos metálicos y no metálicos utilizados en la electrólisis se corroen seriamente con una alta concentración de soluciones alcalinas en altas temperaturas, la electrólisis se realiza dentro de un rango dentro de los 50 y 80° C.

El recipiente del electrolizador esta construido con acero al carbono laminado y contiene otros materiales no metálicos que resisten a la corrosión como asbestos, cauchos y gomas sintéticas. Se utiliza un diafragma de asbestos fibrosos que posee una baja resistencia eléctrica ya que solo se requiere para la separación de las burbujas de hidrógeno y oxígeno. El cátodo esta hecho de acero inoxidable, que resiste la corrosión de la solución alcalina utilizada. Así también, el sobrepotencial del hidrógeno sobre el acero es relativamente bajo, probablemente el mejor nivel dentro de los materiales prácticos. Ya que el acero y el hierro se disuelven parcialmente en soluciones alcalinas cuando son polarizados anódicamente, electrodos de acero niquelados por electrodeposición son utilizados como ánodo.

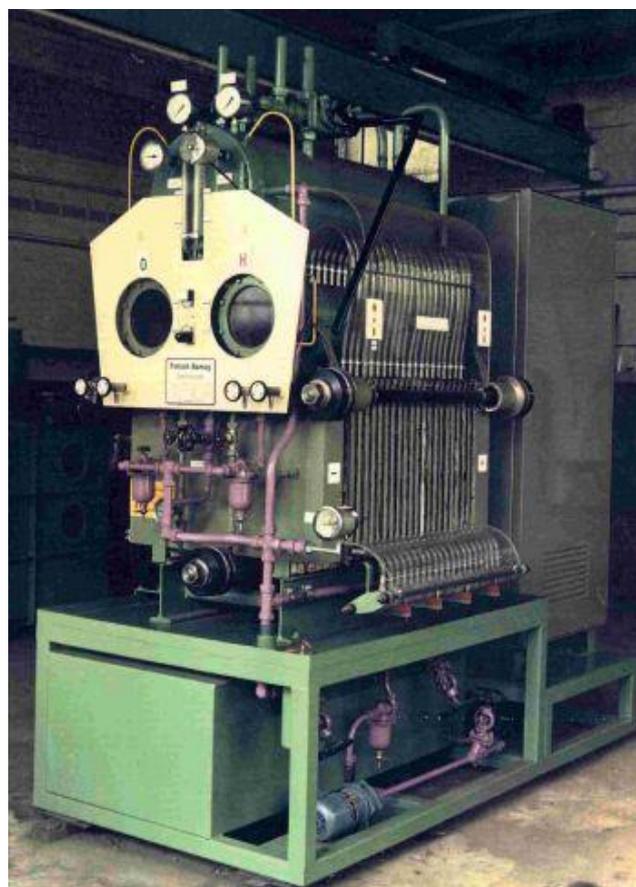


Figura 26 - Foto de un electrolizador a altas presiones basado en el sistema BAMAG®.

Burbujas gaseosas de hidrógeno y oxígeno cubren ciertas zonas de la superficie de los respectivos electrodos, y la solución electrolita es desplazada por estos gases. Un gran esfuerzo en el diseño de la celda ha sido designado a resolver este problema del drenado de las burbujas.

La solución utilizada en estos electrolizadores de agua consiste en 20% NaOH o en 30% KOH para conductividad máxima a las temperaturas de operación que como ya se dijo consiste entre 50 y 80 ° C.

Datos de funcionamiento normal:

- Electrolito: 20 % NaOH
- Temperatura: 80 ° C
- Densidad de corriente: 5 A/ dm²
- Distancia entre Ánodo y Cátodo: 23 mm
- Ancho del diafragma: 3 mm

$$V_t = E_d + \eta_A + (-\eta_c) + \sum iR$$

Aquí el último término corresponde a la suma de las caídas de voltaje óhmico. El voltaje de descomposición es de 1.146 V bajo las condiciones dadas mostradas. Los sobrepotenciales de hidrógeno η_h y oxígeno η_o aumentan con la densidad de corriente para una concentración y una temperatura dada. Por ejemplo η_h que es el sobrepotencial de cátodo es $-0.47V$ y η_o $+0.35V$ (sobrepotencial del ánodo) para 2,5 N de NaOH y 80°C. Ya que la conductividad del NaOH al 20% es de 1,02 mho/cm, la caída óhmica de voltaje de la solución se calcula de la siguiente manera:

Siendo l la distancia entre electrodos:

$$IR(sol) = i\rho l = \frac{il}{\kappa} = \frac{0,05 \times 2}{1,02} = 0.098 \quad V$$

Lista de voltajes que aparecen en el electrolizador:

Voltaje de descomposición	$E_d=$	1,146 V
Sobrepotencial Oxígeno	$n_o=$	0,35 V
Sobrepotencial Hidrógeno	$-n_H=$	0,47 V
Caída Ohmica de Solución	$IR (sol)=$	0,098 V
Caída Ohmica del Diafragma	$IR (diaf.)=$	0,017 V
Efecto de las burbujas	$IR(buró.)=$	0,1 V
Caída de la armadura	$IR(metal)=$	0.03 V
VOLTAJE DE LA TERMINAL		2.21 V

Esta claro que tanto el sobrepotencial del hidrógeno como el del oxígeno son los factores de más peso en la determinación del voltaje total de la celda. Para reducir el voltaje o la energía consumida, fueron realizadas muchas investigaciones tratando de desarrollar materiales con bajo sobrepotencial. Reducir el voltaje de la celda ofrece otra gran ventaja; una gran parte del voltaje de la celda, 0.8 V, que corresponde a $V_t - E_d$, se convierte en energía térmica y calienta la celda. Aproximadamente el 25 % de la potencia es derrochada. Reducir el voltaje de la celda puede ocasionar una disminución de las pérdidas de calor, ya que el balance de voltaje del electrolizador esta altamente ligado al balance de calor. La temperatura de trabajo podría mantenerse alta por medio del aislamiento térmico.

Balance energético de la electrólisis del agua		
	kcal/mol	%
Calor que entra		
Corriente eléctrica a 2,1 V	96.86	99.20
Calor sensible del agua de alimentación	0.78	0.80
	97.64	100.00
Calor que sale		
	68.52	70.18
Calor sensible del H ₂ , O ₂ , y vapor de H ₂ O	1.01	1.03
Calor latente de vaporización	4.93	5.05
Pérdida de calor	23.18	23.74
	97.64	100.00

Pasando a esta misma electrólisis pero a alta presión, el voltaje de descomposición varía muy poco, alrededor de un 10% para 200 atmósferas, comparada con la celda operando en condiciones normales de presión. Los sobrevoltajes, tanto del ánodo como del cátodo, son casi independientes de la presión. El efecto de las burbujas es reducido ya que el volumen de gas se reduce a altas presiones.

5 ANÁLISIS COMPARATIVO

5.1 CRITERIOS PARA LA COMPARACIÓN DE DISTINTOS CONVERTIDORES DE ENERGÍA

La elección de un dispositivo para la conversión de energía depende de la potencia requerida, de la energía disponible por peso unitario y del tiempo de operación sin necesidad de recarga o de reaprovisionamiento. Así, en aplicaciones donde se requiere una potencia inferior a 100 kW y el tiempo de operación es inferior a un mes (por ejemplo, fuentes de potencia para su empleo en vehículos), las celdas de combustible y las baterías son los dispositivos que proporcionan mayor energía por peso unitario (los reactores atómicos, por ejemplo, requieren un gran peso mínimo de blindaje para una masa crítica mínima). Para tiempos de operación más largos son más adecuados los convertidores solares y cuando la potencia requerida es superior a 100 kW los reactores atómicos son los dispositivos más ventajosos.

5.2 VENTAJAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE:

- Alta eficiencia de conversión de energía química en electricidad
- No contaminan el medio ambiente
- Operan silenciosamente
- No tienen partes móviles (No hay desgaste ni pérdidas de energía por fricción)
- Rápida entrada en servicio
- Flexibilidad respecto al tipo de combustible (hidrógeno, metanol, gas natural, gasificación de carbón, alcohol, etc.)
- Modularidad (puedo generar desde mW a MW)
- Mínimo mantenimiento (no hay desgaste mecánico)
- Capacidad de cogeneración electricidad/calor (mejora de la eficiencia)

5.3 PROBLEMAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

5.3.1 Catalizador

Las pilas de combustible hoy en día están **sobredimensionadas de catalizador**, para compensar su propio deterioro. La limitación en las reservas minerales de platino ha provocado la búsqueda de otras soluciones, por ejemplo la síntesis de un complejo inorgánico muy similar a la base catalítica del hierro-sulfuro de las bacterias hidrogenasas. Las reservas mundiales de platino serían insuficientes, es decir solo se cuenta con una cuarta parte del platino necesario para alcanzar una conversión total de los vehículos de combustión interna a celdas de combustible: una introducción significativa de

vehículos con la actual tecnología, por lo tanto, provocaría un gran incremento del precio del platino y un descenso significativo de sus reservas.

Sudáfrica es el productor mundial de platino por excelencia, y posee el 85% de las reservas mundiales de platino.

La dependencia del platino como catalizador es el principal problema a superar por la tecnología de las DMFC. En las celdas de combustible de metanol directo el platino utilizado como catalizador permite alcanzar las exigencias de densidad de corriente, es decir se logran los altos niveles de corriente que hacen eficiente al sistema y que son requeridos por los dispositivos alimentados por las DMFC.

5.3.2 Eficiencia

Una celda de combustible y un electrolizador devuelve menos del 50 por ciento de la energía de entrada (esto se conoce como eficacia del proceso reversible), mientras que una batería de plomo y ácido mucho más barata puede devolver cerca de 90 por ciento. Estas son las eficiencias mínimas, pero hay que destacar que no se trata de procesos reversibles. **La diferencia principal entre las dos tecnologías está en la cantidad de energía que puede almacenarse en cada forma.**

Para almacenar más energía en baterías hay que aumentar la cantidad de baterías, que son realmente muy costosas, con el hidrógeno o metanol en cambio solo es necesario disponer de mayor cantidad de tanques o poder distribuirlo por tubería, etc. Además las baterías presentan dificultades ya que no son fácilmente transportables, el hidrógeno puede ser más manejable, y el metanol resulta aún mucho más transportable. Un tanque o una tubería tienen una vida útil más larga que una batería.

5.3.3 Pérdidas debidas a la producción, transporte y almacenaje

Hay que considerar también las pérdidas debidas a la producción, al transporte y al almacenaje. Los vehículos con celdas de combustible que funcionan con hidrógeno comprimido tienen una eficiencia del 22% si el hidrógeno se almacena como gas a alta presión, y del 17% si se almacena como hidrógeno líquido.

Las celdas de combustible no pueden almacenar energía como una batería, sino que en algunos usos, como centrales eléctricas independientes basadas en fuentes "discontinuas" (solares, energía del viento), se combinan con electrolizadores y sistemas de almacenaje para formar un conjunto para

almacenar esta energía. La eficacia del proceso reversible (de electricidad al hidrógeno y de nuevo a electricidad) de tales plantas se encuentra entre el 30 y el 40%.

5.3.4 Gestión del agua en las celdas PEM

En este tipo de celdas de combustible, **la membrana debe hidratarse**, requiriendo evaporar el agua exactamente en la misma medida en que ésta es producida. Si el agua se evapora demasiado rápido, la membrana se seca, la resistencia a través de ella aumenta, y se agrietará, creando un "corto circuito" de gas donde el hidrógeno y el oxígeno se combinan directamente, generando calor que dañará la celda de combustible. Si el agua se evapora demasiado lentamente, los electrodos se inundarán, evitando que los reactivos puedan alcanzar el catalizador y se parará la reacción. Uno de los objetivos más importantes en la investigación sobre células de combustible es la adecuada gestión del agua.

Esto es un problema que no lo tienen las celdas de combustible que utilizan combustible líquido directamente, por ejemplo las DMFC. Al utilizarse una solución altamente concentrada de metanol como combustible, no existirá este tipo de problemas de agrietamiento por falta de humedad de las membranas de polímeros.

5.3.5 Problemas en la membrana

El segundo gran inconveniente a resolver para que las celdas de combustible de metanol directo puedan alcanzar un estado de desarrollo comercial tiene que ver con poder eliminar completamente el traspaso de metanol a través de la membrana. Este traspaso de combustible desde la parte del ánodo de la celda hasta el cátodo, disminuye el rendimiento de la reacción del oxígeno del aire en el cátodo y a su vez representa una pérdida de combustible, ya que se pierde metanol.

5.3.6 Gestión de la temperatura

Se debe mantener **la misma temperatura en toda la celda** para evitar la destrucción de la celda por **fatiga térmica**.

Este problema disminuye notablemente en las celdas de combustible de metanol directo.

5.3.7 Control de flujo

Al igual que en un motor de combustión, hay que **mantener una relación constante entre el reactivo y el oxígeno** para que la celda funcione eficientemente.

5.3.8 Durabilidad, vida útil, y requisitos especiales

Para ciertos tipos de celdas existen algunos requisitos especiales en cuanto a la durabilidad y la vida útil de las mismas.

Los usos estacionarios requieren normalmente más de 40.000 horas operativas fiables a una temperatura de -35 °C a 40 °C, mientras que las celdas de combustible para automoción requieren al menos de 5.000 horas (el equivalente a unos 200.000 kilómetros) bajo temperaturas extremas. Las aplicaciones para automoción deben además permitir el arranque en frío hasta -30 °C y poseer una alta potencia por unidad de volumen (típicamente 2.5 kW por litro).

5.3.9 Tolerancia limitada al CO (monóxido de carbono)

Las celdas de combustible tipo PEM presentan tolerancia limitada al monóxido de carbono, ya que se produce un envenenamiento de los electrodos. Este problema tampoco se presenta para las DMFC, ya que no generan CO, sino solo CO₂.

5.3.10 Otras consideraciones constructivas

Las placas del electrodo/bipolar se hacen generalmente de nanotubos de metal, de níquel o de carbón, y están cubiertas por un catalizador (como el platino o el paladio) para conseguir una eficacia más alta. El electrolito puede ser de cerámica o bien una membrana.

5.4 PROBLEMAS DEL HIDRÓGENO PURO

Un combustible es algo hallado en la naturaleza, como el carbón, o un refinado de un producto natural, como el combustible diesel del petróleo, que luego será quemado para llevar a cabo un trabajo.

El hidrógeno es un combustible complicado, difícil de transportar y almacenar, altamente inflamable (recordad la catástrofe del Hidenburg) y altamente repudiado por los ecologistas de todo el planeta porque, ante una producción a escala, con las fugas que se producirían en su empleo y su transporte, **se acabaría “licuando” literalmente la capa de ozono.**

La distribución y almacenamiento de hidrógeno, el gas menos denso del universo, presentan algunas dificultades tecnológicas y de infraestructura:

Sin importar como llegue a destino el hidrógeno, las dificultades para manipular este gas tan escurridizo no cesarán. Entre las desventajas vinculadas al hidrógeno, se encuentra el bajo punto de ignición. Todos los combustibles gaseosos cuentan con una concentración mínima y una máxima a la que arderán. El espectro del hidrógeno a diferencia de aquél del gas natural (5-15), es inusualmente amplio, desde 2 a 75 por ciento. Si una fuga de gas natural es peligrosa, una de hidrógeno es mucho peor ya que este último encenderá a un mayor rango de concentraciones. La energía mínima necesaria para encender hidrógeno es también mucho menor que aquella requerida para encender gas natural.

Aún peor resulta el hecho de que cuando el hidrógeno se quema, lo hace de forma invisible. La NASA, publicó un manual de seguridad que recomienda chequear los fuegos de hidrógeno sosteniendo una escoba y verificando si la paja de su punta se enciende. “Da miedo, no se puede ver la llama” dice Michael D. Amiridis, jefe del departamento de ingeniería química de la Universidad de South Carolina, la cual lleva a cabo varias investigaciones de celdas de combustible para distintas empresas. Un auto a celdas de combustible exitoso dice Michael, tendría “estándares de seguridad minimamente similares a los que uso yo en el laboratorio”. Una de las mayores partes en el desarrollo de una cadena de abastecimiento de combustible hidrógeno, sería dedicada a la creación de instrumentos de seguridad que puedan detectar con certeza el gas hidrógeno.

Por ello, la tendencia ha sido la de utilizar hidrocarburos (compuestos del hidrógeno como el **metanol**, el butano, el propano o incluso la gasolina) que permitan un manejo sencillo del combustible, eliminando los problemas que presenta el hidrógeno puro. Para ello, a la reacción del hidrógeno con el oxígeno hay que añadir la de extracción del hidrógeno del hidrocarburo utilizado (mediante un reformador de combustible), que produce como resultado adicional dióxido de carbono y disminuye la eficiencia teórica del procesamiento directo de hidrógeno. En este caso se estaría usando una celda del tipo RMFC, por ejemplo.

5.5 PILAS DE COMBUSTIBLE VS. COMBUSTIÓN INTERNA DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Un kilo de hidrógeno contiene aproximadamente la misma energía que un galón de nafta sin plomo. Esto significa que si ambos son quemados, darían aproximadamente la misma cantidad de calor. Sin embargo, el motor de

combustión interna y la celda de combustible, difieren en su habilidad para extraer trabajo de esa energía. En el motor, la mayor parte de la energía sale por el caño de escape como calor, y una energía adicional se pierde por la fricción dentro motor. En números redondos, abogados y detractores concuerdan que **una celda de combustible puede sacar hasta dos veces más trabajo de un kilo de hidrógeno que lo que un motor saca de un galón de nafta**. (En una aplicación estacionaria, como podría serlo una instalación un sótano que toma el hidrógeno del gas natural y lo convierte en electricidad para abastecer la casa, la eficiencia puede ser aún superior, dado que el calor proveniente del proceso de la celda, puede ser aprovechado para por ejemplo el calentamiento del agua de la casa).

5.6 PILAS DE COMBUSTIBLE VS. BATERÍAS CONVENCIONALES

Aunque presentan numerosas ventajas, las pilas de combustible también presentan algunos inconvenientes respecto a sus antecesoras, lo que conduce que se acaben empleando soluciones “mixtas”. A continuación se establece una pequeña comparación entre ambas:

1. **Mayor energía por kilogramo:** mientras que la densidad de energía de las actuales baterías de Ion-Litio pueden llegar hasta los 220W/kg, las pilas de combustible, como las basadas en metanol, pueden llegar al máximo teórico de 5.536W/kg de densidad energética. La baja eficiencia de los sistemas bajo investigación actuales reduce esta cifra hasta los 500W/kg, lo cual, como mínimo, duplica el de las baterías de litio, y es susceptible de ser mejorado en el futuro.
2. **Las pilas de combustible “respiran” aire:** uno de los motivos por los que las pilas de combustible (como las de metanol) son más eficientes energéticamente es porque uno de los elementos necesarios para la reacción, el oxígeno, no necesita ser transportado, ya que lo encuentra directamente en la atmósfera. Esto limita su uso a la superficie terrestre (no pueden emplearse ni en el espacio ni en aplicaciones submarinas a no ser que se transporte también el oxígeno).
3. **Pueden recargarse “instantáneamente”:** sólo hay que cambiar el cartucho que contiene el combustible, ya sea hidrógeno, metanol u otro hidrocarburo.
4. **Actualmente necesitan una batería para “arrancar”:** para que una pila de combustible comience la reacción, necesita alcanzar una temperatura de funcionamiento que depende mucho de la tecnología desarrollada y los componentes empleados. Por ello es necesario una

batería adicional que active la reacción, batería que automáticamente se recarga cuando el proceso químico comienza a realizarse.

5. **Consumen combustible incluso en “stand-by”:** esto se deriva del punto anterior, ya que para evitar tener que arrancar de nuevo la batería, se debe destinar una parte del combustible a mantener la temperatura de funcionamiento incluso aunque no se utilice. Es muy similar al funcionamiento al “ralentí” de los vehículos actuales.
6. **Están limitadas en potencia:** las pilas de combustible no son capaces con la tecnología desarrollada hasta la actualidad de responder ante un pico de demanda de energía, motivo por el cual se suele incluir también una batería tradicional en su composición. Esta batería además actúa de rectificador y limitador de corriente.

Por qué no simplemente llevar varias baterías Ion-Litio si se necesita un mayor tiempo de funcionamiento. De hecho esta es una práctica habitual entre muchos profesionales y ejecutivos. Aproximadamente un 30% de los usuarios de notebook tienen una batería adicional. Esto resulta inconveniente, dado que además del peso extra en el portafolio representa un alto costo. En las baterías recargables existe una relación lineal entre la duración de la carga y la relación volumen/peso. Si se desea el doble de tiempo de servicio, se debe contar con dos baterías, que implica cargar con el doble del volumen y el doble del peso.

Con las celdas de combustible, solo se deben llevar varios cartuchos para extender el tiempo de operación. En lugar de llevar tres baterías, uno llevaría tres cartuchos, que serán por lo menos un 50% más livianos y significativamente más pequeños que su equivalente paquete de baterías tradicionales.

Las baterías Ion-Litio adicionales para laptops se venden típicamente por no menos de 150 dólares americanos. Por otro lado se espera que esta clase de cartuchos de metanol tenga precios similares a los de las pilas alcalinas tradicionales, quizás entre 1 a 3 dólares americanos por unidad. De esta manera, habrá también beneficios significativos en los costos.

5.7 DMFC VS. CELDAS DE COMBUSTIBLE DE H₂ PURO Ó H₂ REFORMADO

De la misma forma que en las celdas de Membrana de Intercambio Protónico (PEM) que funcionan directamente con hidrógeno o con hidrógeno reformado (gas rico en hidrógeno producido por el reformado de combustibles líquidos), en las DMFCs el oxígeno del aire que rodea al cátodo es reducido, pero en el ánodo se oxida directamente metanol líquido en lugar de hidrógeno. Por eso el sistema DMFC no requiere de un tanque de almacenamiento de hidrógeno o de

un reformador, lo que hace que la alternativa de las celdas de combustibles de metanol directo sea mucho más atractiva.

5.8 ESTADO DEL ARTE EN LA INVESTIGACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE LAS DMFC

Desde hace ya varios años, diferentes empresas globales están luchando por lograr un modelo de celda de combustible de metanol directo que pueda comercializarse.

5.8.1 Desarrollos de Toshiba

Micro celda de combustible de metanol directo:

Esta DMFC de tan solo 8,5 gramos es lo suficientemente pequeña para poder integrarse a un teléfono celular, o mismo a un *headset* inalámbrico para teléfonos celulares. Pero logra ser tan eficiente como para alimentar un reproductor MP3 por 20 horas continuas con solo 2 cc de metanol altamente concentrado. Esta mini celda de combustible de metanol directo brinda 100 milliwatts de potencia continuamente, siempre y cuando se mantenga lleno el tanque de combustible que trae integrado. El proceso de carga de combustible es tan simple como seguro.



Figura 27

Notebook:

La celda de combustible de metanol directo trabaja con una mezcla de combustible de metanol y oxígeno, y genera y abastece de potencia directamente a la laptop. Con una densidad de energía hasta cinco veces mayor que la de una típica batería de Ion-Litio, esta DMFC permite una operación continua mucho más larga. Esta celda entrega energía instantáneamente, y consigue avances significativos en cuanto a la duración del tiempo de operación con los cartuchos reemplazables de metanol.



Figura 28

Reproductores de música en formato MP3:



Figura 29

Esta DMFC puede alimentar el reproductor de videos flash por aproximadamente 35 horas con una única carga de 3,5 ml de metanol de alta concentración, el combustible que consigue la electricidad produciendo una reacción química dentro de la celda de combustible.

5.8.1.1 La necesidad de celdas de combustible

El progreso en la tecnología de las redes inalámbricas permite el uso a la intemperie de una gran variedad de dispositivos móviles incluyendo PCs, teléfonos celulares, reproductores de música y consolas de juego portátiles.

Este tipo de dispositivos móviles proporcionan una ventaja importante en cuanto a funcionalidad y performance ya que pueden ser utilizados en cualquier momento, sin tener que preocuparse por recargarlos, incrementando por ende, la necesidad de tener fuentes de energía más pequeñas y poderosas.

Las celdas de combustible se han vuelto el centro de atención como el candidato preferido para fuente de energía portátil. Muchas compañías están compitiendo para desarrollar un tipo de celdas de combustible a base de metanol, conocidas como Celdas de Combustible de Metanol Directo. Estas celdas se convertirían en una fuente de energía compacta para dispositivos electrónicos.

5.8.1.2 Celdas de combustible compactas Toshiba

- Se puede usar metanol de alta viscosidad.
- Cartuchos de combustible más pequeños.
- Simpleza en la estructura, no hay necesidad de dispositivos auxiliares (bombas, ventiladores, etc.) para generar electricidad.
- Celdas de combustible más pequeñas.
- Este método es denominado “pasivo”, cuando la celda requiere de dispositivos auxiliares se lo denomina “activo”.
- La celda de combustible puede ser fácilmente llenada con combustible en cualquier momento y lugar, utilizando un cartucho de combustible.
- Económico. Un cartucho puede ser usado una y otra vez.

5.8.1.3 Celdas de combustible Toshiba - Ventajas

No se requiere tiempo de recarga

Las baterías convencionales, como las de Ion-Litio, requieren un tiempo de recarga. Las celdas de combustible por otro lado, pueden proveer combustible de forma continua, sin importar el tiempo o lugar, mientras sean alimentadas simplemente con combustible. Este proceso toma unos segundos, volcando un poco de combustible en el dispositivo o cambiando el cartucho. Si se está usando un dispositivo alimentado por celdas de combustible y este último se está agotando, se podrá recargar combustible sin la necesidad de apagar el equipo. En pocas palabras, ya no se tendrá la necesidad de acarrear baterías pesadas o buscar una toma de corriente.

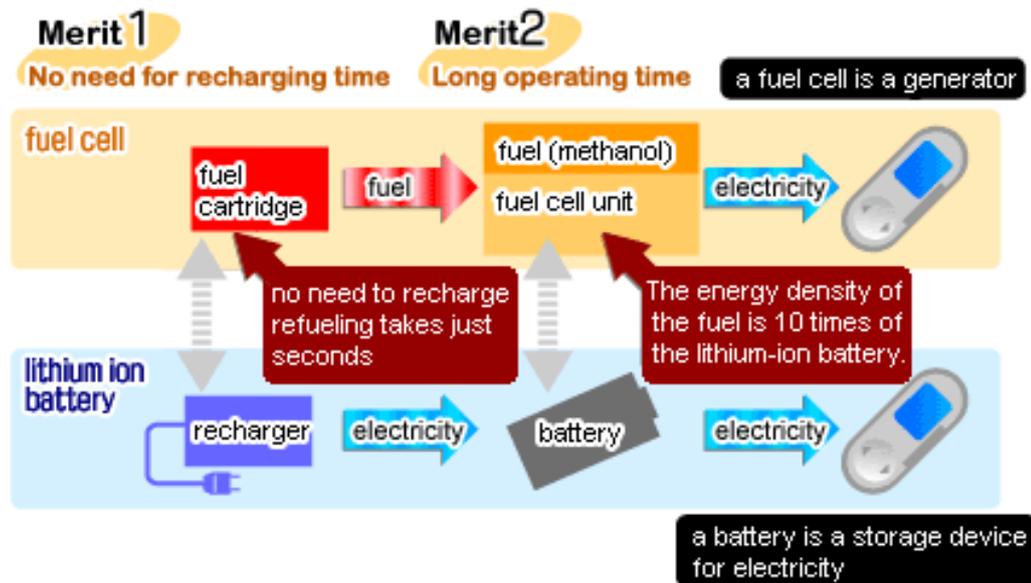


Figura 30

Mayor tiempo operativo

Teóricamente, la densidad de energía de una celda de combustible de metanol es aproximadamente diez veces superior a aquella correspondiente a una batería cilíndrica de litio de alta capacidad. La generación de electricidad a partir del combustible, requiere de la celda de combustible, además de un tanque de combustible. Es por esto que se estima que una celda de combustible proveerá en general entre 2 y 3 veces la densidad energética de una batería de litio. Aún así, las celdas de combustible deberían poder alimentar dispositivos móviles por largos períodos de tiempo, muy superiores a los que pueden alimentar las baterías convencionales.

Bajo impacto ambiental

Junto con electricidad, las celdas de combustible producen agua y dióxido de carbono. Aún así, este tipo de tecnología produce menos productos residuales que cualquier otro método de generación eléctrica.

A diferencia de los generadores que están alimentados por motores, las celdas de combustible no emiten materiales peligrosos como ser los óxidos de nitrógeno o sulfuro. A diferencia de otra clase de generadores, las celdas de combustible no producen ruidos ni vibraciones en la generación de electricidad, ya que esto se da como resultado de un proceso electroquímico.

5.8.1.4 Principios operativos

Una celda de combustible a metanol (DMFC), genera electricidad mediante la repetición del ciclo de cuatro pasos presentado a continuación:

- **Abastecer combustible**

Agregar la solución del combustible metanol al lado del ánodo (lado del combustible)

- **Separación en protones y electrones**

La solución de metanol se separa en protones (H^+) y electrones (e^-), junto con dióxido de carbono (CO_2).

- **Generación de energía**

Los electrones (e^-), son guiados fuera de la celda, formando una corriente eléctrica. Esta corriente puede ser utilizada para encender una bombita de luz, activar dispositivos móviles, etc. La corriente regresa al cátodo de la celda de combustible (lado del aire).

- **Formación de agua**

Los protones (H^+) y los electrones (e^-), reaccionan con el aire del cátodo para formar agua, la cual es agotada o drenada del sistema.

5.8.2 Desarrollos de electrodos

Desarrollos de electrodos que mejoren la performance de las pilas de oxidación directa de metanol

El funcionamiento de las celdas de combustible depende en gran medida del carácter catalítico de los electrodos utilizados como ánodos. En esta exposición, se presenta el comportamiento de electrodos metálicos de naturaleza amorfa de composiciones de platino frente al proceso de electrooxidación del metanol, como vía para elucidar la viabilidad de estos materiales como ánodos, en celdas de combustible de metanol directo DMFC. La actividad electrocatalítica de las aleaciones amorfas de composiciones de platino mejora considerablemente, tanto por el cambio en su composición, como por el grado de rugosidad que presenta la superficie catalítica. Se produce un aumento de la tolerancia a especies adsorbidas y la mayor resistencia al envenenamiento de sus centros catalíticos. La presencia de estaño en las aleaciones amorfas, mostró la existencia de un efecto sinérgico en el mecanismo de electrooxidación de metanol, que se traduce en un descenso en 20 mV vs Ag/AgCl (Plata y Cloruro de Plata) del potencial de onset, y unos 200 mV en el potencial de pico máximo.²⁹

5.8.3 El desafío de las DMFC

Las celdas de combustible de metanol directo pueden ser una fuente viable de energía en muchísimas aplicaciones, si se logran incrementos en la densidad de potencia, la eficiencia en la conversión de energía, y la eficiencia de utilización de combustible, sin que estas mejoras signifiquen un costo aún mayor del producto final. Para realizar estas mejoras hay que resolver dos desafíos críticos: en primer lugar hay que poder bajar la cantidad requerida, o "carga", de catalizador de platino para lograr altas densidades de corriente (densidad de potencia), y en segundo lugar hay que eliminar el traspaso de metanol a través de la membrana, un proceso que reduce la performance del aire en el cátodo y desaprovecha combustible.

5.8.4 Beneficios de las DMFC

Las celdas de combustible de metanol directo ofrecen numerosas ventajas frente a las celdas de hidrógeno puro y las de "reformado de hidrógeno" (las que utilizan combustibles gaseosos -gas natural- y las RMFC que utilizan metanol líquido).

²⁹ Prof. Dr. Angel Rodríguez Pierna - "APLICACIÓN DE ALEACIONES METÁLICAS AMORFAS DE Ni₅₉Nb₄₀Pt_(1-x)X_x (X=Sn,Ru,Sb) COMO ANODOS EN PILAS DE OXIDACIÓN DIRECTA DE METANOL" - Dpto. Ingeniería Química y del Medio Ambiente - Universidad del País Vasco

- Usan combustible líquido
- Tiene un simple diseño del sistema, lo que representa un gran potencial para alcanzar un paquete de volumen reducido y poco peso.
- Elimina la necesidad de un reformador de combustible y del almacenamiento de hidrógeno onboard.
- Clasifican como sistema de energía con emisión cero (“zero-emission power system”).

5.9 METANOL

El metanol o alcohol metílico es el más sencillo de los alcoholes. Es un líquido ligero, incoloro, inflamable y tóxico que se emplea como anticongelante, disolvente y combustible.

El metanol es de lejos el más simple y el más barato combustible producido por síntesis. Es fabricado en enormes cantidades, empleando generalmente gas natural. También puede ser obtenido en conocidos procesos de carbón mineral, leña, desperdicios agrícolas y forestales, como residuos municipales. A su vez se puede obtener metanol a partir del bagazo (el resto de la caña de azúcar).

El metanol o alcohol metílico, es un alcohol (CH_3OH) que ha sido utilizado en los Estados Unidos como combustible alternativo en vehículos que funcionan en base a M85 (una mezcla de 85% metanol y 15% gasolina). Sin embargo, el uso del metanol en los automóviles no es común hoy en día, dado que los fabricantes de autos ya no hacen vehículos adaptados que puedan ser alimentados por metanol. El metanol combinado con isobutileno, también puede ser usado para hacer metil-tetra-butil-éter (MTBE), un aditivo u oxigenante que se combina con la gasolina para incrementar el octanaje y reducir las emisiones contaminantes. EL MTBE es un líquido inflamable de olor característico desagradable y se ha usado desde los 1980s como aditivo de la gasolina sin plomo. El MTBE se usa también para disolver cálculos biliares. En estos pacientes, el MTBE se hace llegar directamente a los cálculos a través de tubos especiales insertados por medio de cirugía.

Sin embargo, la producción de MTBE se vio disminuida dada su naturaleza como contaminante del agua subterránea. En un futuro no muy lejano, el metanol podría convertirse en una alternativa interesante como combustible además del etanol, ya que permitiría producir el hidrógeno necesario para alimentar las celdas de combustible de vehículos y otras aplicaciones.

El metanol es mayormente producido por la reforma del vapor de gas natural, creando “gas de síntesis”, que luego se introduce en un reactor con la presencia de un catalizador que permite la obtención de metanol y vapor de

agua. Si bien para obtener metanol se pueden utilizar una variedad de sustancias distintas al gas natural, este último es el recurso preferido por razones económicas. El “gas de síntesis” se refiere a combinaciones de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂). De forma similar a los vehículos propulsados por etanol, aquellos alimentados por metanol, emiten mucho menos cantidad de contaminantes, como ser hidrocarburos, partículas, y NOx, que los vehículos con propulsión a nafta. **De todas maneras, el manipuleo del metanol es mucho más peligroso que el del etanol debido a su impacto negativo en la salud.**

La demanda mundial de metanol es de aproximadamente 32 millones de toneladas por año, con un incremento del 2-3% anual pero con cambios significativos en el perfil de la industria. Desde los años 1980s, plantas cada vez más grandes con tecnología más eficiente de producción a baja presión han ido reemplazando a las pequeñas instalaciones menos eficientes. Los patrones de demanda cambiaron en Europa, el metanol que se utilizó alguna vez mezclado con la gasolina, dejó de usarse de esa forma ya que sus precios no resultaban competitivos frente a los del petróleo. Para contrarrestar esto, se hizo obligatorio en los países desarrollados el uso de gasolina reformulada en lugar de la que contiene plomo. Los Estados Unidos promovió el uso de MTBE derivado del metanol. **EEUU produce cerca de un cuarto del metanol del mundo, pero en el mundo existe un excedente significativo de este recurso.** La *figura 31*, muestra el abastecimiento de metanol del mundo, indicando la capacidad excedente.

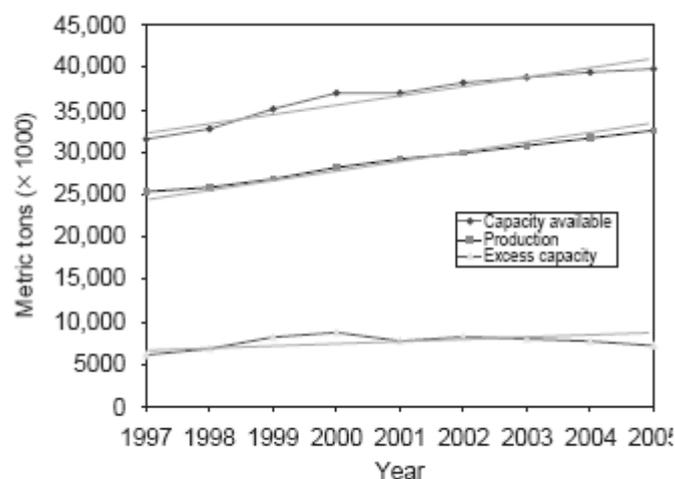


FIGURE 2 World methanol supply. Data from the Methanol Institute (www.methanol.org).

Figura 31

El mayor mercado para el metanol en los Estados Unidos es el destinado a la producción de MTBE, hay cerca de 50 plantas dedicadas a esto. Se estima que 3,3 mil millones de galones de MTBE fueron utilizados en 1996 para la mezcla en gasolina limpia (gasolina sin plomo), abasteciendo al 30% del mercado americano de este combustible. El MTBE sustituye 10 veces más gasolina que cualquier otra alternativa de combinación de combustibles.

Los precios del metanol en Estados Unidos variaron significativamente desde 1989, se duplicaron en 1994 y luego volvieron a los niveles de 1993 hacia el 1996. En el 2002, los precios del metanol llegaron a 64 centavos/galón, ligeramente más elevados que los precios europeos (61.7 centavos /galón) y los precios asiáticos (55.9 centavos/galón)

5.9.1 Problemas del hidrógeno puro para las pilas de combustible

Para poder utilizar el hidrógeno se deben salvar varios serios inconvenientes, entre ellos **el hecho de que su volumen específico (aún reducido a estado líquido) es doce veces mayor que el del querosene y por supuesto el hecho de que la energía neta del hidrógeno (la energía obtenida de su uso en relación con la energía utilizada para obtenerlo) es escandalosamente negativa.** El resultado, en cualquier caso, será un enorme encarecimiento de los costes de transporte hasta el punto de forzar el regreso a la dependencia en la producción local de bienes y mercancías, en una especie de “globalización inversa” para la que hay poca preparación, ya que las infraestructuras de las economías de abastecimiento local han sido desmanteladas en la expansión de la economía global.

6 OPORTUNIDADES LOCALES

A partir de la introducción de las celdas de combustible en el mercado energético se abre un sinnúmero de oportunidades, tanto para grandes compañías productoras de energía, como también para compañías dedicadas a aplicaciones mucho más dirigidas.

6.1 NUEVOS NEGOCIOS

Por ejemplo las celdas de combustible le darán la oportunidad a productores y distribuidores de gas natural de convertirse en proveedores de energía eléctrica.

Compañías tradicionales de generación eléctrica podrían evitar los altos costos de transmisión y distribución y poder finalmente migrar hacia un eficiente modelo de energía distribuida.

Otras compañías podrían encontrar otros nichos donde competir con la introducción de esta tecnología disruptiva. Por ejemplo, productores de baterías y compañías que proveen de energía de respaldo, o grupos electrógenos para locaciones remotas, o sistemas de respaldo de energía para emergencias, como ser los generadores a combustible diesel, podrían comenzar utilizar las celdas de combustible como una alternativa más eficiente y más ecológica.

Al mismo tiempo las celdas de combustible permitirán energizar los sistemas de próxima generación para aplicaciones militares en áreas remotas.

Las celdas de combustible encontrarán muchísimas aplicaciones y lograrán extender su uso ampliamente, lo que creará un nuevo mercado para los proveedores de materiales para la construcción de celdas de combustible, los fabricantes de equipo, e incluso para compañías de software para la simulación y el control de procesos. Fabricantes de membranas, compañías dedicadas al desarrollo y producción de catalizadores, proveedores especializados de componentes electrónicos son algunos de los negocios emergentes que se dan a partir de la llegada de esta nueva tecnología.

6.1.1 El mercado de los cartuchos recargables

Existen dos alternativas en cuanto al manejo del metanol en las celdas de combustibles para aplicaciones portátiles: la utilización de cartuchos desechables o la de cartuchos recargables. Las dos opciones abrirán negocios muy interesantes. Para el caso de los cartuchos intercambiables se creará un negocio similar al de los cartuchos de tinta de las impresoras. Para los

dispositivos que cuenten con un tanque o reservorio de metanol incorporado que se deba recargar cada vez, será necesario comenzar a producir pequeñas botellas o recipientes de metanol que hagan práctica la carga y sean cómodos para transportar. Habrá que solucionar los inconvenientes de la actualidad para transportar tales líquidos inflamables en los aviones.

6.2 OPORTUNIDADES PARA PAÍSES Y REGIONES

La tecnología de las celdas de combustible abrirá oportunidades para diferentes países y regiones del mundo, asegurando un mejor aprovechamiento de los recursos de cada país.

6.2.1 Energía distribuida y explotación de recursos renovables

Los países que no son autosuficientes en cuanto a sus reservas de petróleo podrían dejar de depender de las importaciones de petróleo de Medio Oriente y Venezuela, para comenzar a explotar **eficazmente** sus propios recursos renovables de energía, como ser los vientos, el sol o la fuerza mareomotriz. La utilización de electrolizadores de agua para la generación de hidrógeno resuelve el problema que presentan las energías renovables antes mencionadas, en cuanto al almacenamiento y transporte de la energía, y a su vez la dificultad de su conversión de acuerdo a la demanda.

La migración hacia modelos de energía distribuida eliminará los altos costos y bajas eficiencias del transporte y distribución de energía eléctrica. Es aquí donde ocuparán un papel fundamental las celdas de combustible. Logrando así abastecer de energía hasta las zonas más alejadas y olvidadas de cada país, como ser el Norte y el Sur Argentino.

6.2.2 Reservas de platino en Sudáfrica

El platino es un metal noble blanco, blando y dúctil. Se encuentra ampliamente distribuido sobre la tierra junto con otros metales del grupo del platino (paladio, iridio, rodio, osmio y rutenio), pero su dilución extrema (aproximadamente 5 ppb) imposibilita su recuperación, excepto en circunstancias especiales, por lo que se lo considera más precioso que el oro.

Debido a su actividad catalítica y su baja reactividad el platino es empleado actualmente en la industria química y petroquímica en las reacciones de hidrogenación, deshidrogenación, isomerización, ciclización, deshidratación, deshalogenación y oxidación. Se lo utiliza en convertidores catalíticos, iniciadores de air bags, **fuel cells**, bujías especiales, refinado de naftas,

componentes electrónicos del ABS y sistemas de gerenciamiento de combustibles, entre otros.

El platino es utilizado como catalizador para lograr una alta eficacia de las celdas de combustibles de metanol directo, permitiendo disminuir el tamaño de los electrodos.

Basta recordar que en el mundo se producen unas 197 toneladas anuales de platino y que de ellas más de 160 son producidas por Sudáfrica, para poder cuantificar la oportunidad que se presenta para este país con el desarrollo de las celdas de combustible.

El precio del platino a Junio de 2007 es de 1320 U\$D la onza.³⁰

6.2.3 Oportunidades locales

Actualmente, la economía Argentina se encuentra en crecimiento impulsada por la pequeña y mediana empresa que logró sobrellevar la crisis por su alto grado de flexibilidad a los cambios.

Luego de explorar las posibilidades de nuevos negocios que se podrían generar, se puede concluir que existe una oportunidad única en la Argentina para PyMES y para grandes empresas. Oportunidad para los emprendedores ambiciosos y grandes empresas especuladoras que quieran adelantarse al futuro, para ser los primeros en llegar, y poder acompañar la introducción de esta tecnología a nivel mundial. También se generan oportunidades a nivel regional (MERCOSUR).

6.2.3.1 Metanol en la Argentina

En lo que respecta al metanol, Argentina produce 450 mil toneladas anuales, se consumen sólo 110 toneladas, que representan el 20 por ciento, quedando un saldo exportable de 340 toneladas.³¹

En los ingenios azucareros de la Argentina no se utilizan el bagazo (el resto de la caña de azúcar) para la producción de alcoholes (metanol y etanol). En cambio se lo utiliza para la producción de energía eléctrica, quemándolo directamente en una caldera como sustituto de combustible fósiles.

³⁰

³¹Ingeniero Agrónomo Andrés Leone – Año 2007 - Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (SAGPyA)

6.2.3.2 Normas de aplicación voluntaria y legislación argentina

En el caso de la Argentina, las acciones orientadas, en el campo de las Energías Renovables, se han definido en el contexto de la Ley 26.190, que establece una meta del OCHO POR CIENTO (8%) de Energías Renovables en el consumo del sector eléctrico al año 2016.

Desde el punto de vista regulatorio, el tipo de apoyo que se ha diseñado para impulsar las fuentes de energías renovables han sido los siguientes:

La Ley 25.019 promulgada en el año 1999 está destinada a la promoción de la energía eólica y solar mediante el otorgamiento de un adicional de PESOS DIEZ MEGAWATT HORA (\$10 MWh), a la energía volcada al servicio público o transada en el Mercado Eléctrico Mayorista (Subsidio a la inversión, Capital Subsidies) y otorga beneficios de diferimiento impositivo (Crédito Fiscal ó Investment Tax Credits).

La reciente promulgación de la Ley 26.190 propicia una meta en Energías Renovables para el abastecimiento en el Mercado Eléctrico Mayorista y/o de los Servicios Públicos de Electricidad, es una regulación por objetivos (RET - Renewable Energy Target), que amplía los alcances de la citada Ley 25.019, a todas las energías renovables, para la producción de Energía Eléctrica y fija un valor de hasta 15\$ por MWh más un Coeficiente de Actualización Trimestral, para las energías renovables que sean volcadas a la Red Eléctrica y/o al Servicio Público de Electricidad.

En el régimen de promoción que establece la Ley 25924, el inversor puede optar por un beneficio de fiscal que consiste en devolución anticipada del IVA o amortización acelerada.

Durante el primer semestre de 2007 el Comité de Tecnologías del Hidrógeno de IRAM (Instituto Argentino de Normalización y Certificación) procedió a la votación de los siguientes documentos:

Fuel Cell Technologies	Part 3-3: Stationary Fuel Cell Power Systems: Installation
Fuel Cell Technologies	Part 6-2: Micro Fuel Cell Power Systems: Performance
ISO/CD 26142:	Hydrogen detection apparatus
Fuel Cell Technologies	Part 6-3: Micro Fuel Cell Power Systems: Interchangeability

ISO FDIS 16110-1 Hydrogen generators using fuel processing technologies: Part 1: Safety

Además se realizó una revisión sistemática de la norma ISO 14687:1999/Cor.2001 Hydrogen fuel – Product specification.

A continuación se describen todas las publicaciones del TC 197 de ISO:

ISO 13984:1999 Liquid hydrogen – Land vehicle fuelling system interface

ISO 13985:2006 Liquid hydrogen – Land vehicle tanks

ISO 14687:1999/Cor 1:2001 Hydrogen fuel – Product specification

IRAM/ISO 14687 Combustible hidrógeno – Especificaciones de producto

ISO/PAS 15594:2004 Airport hydrogen fuelling facility operations

ISO/TR 15916:2004 Basic considerations for the safety of hydrogen systems

ISO 16110-1:2007 Hydrogen generators using fuel processing technologies Part 1: Safety

ISO/TS 16111:2006 Transportable gas storage devices – Hydrogen absorbed in reversible metal hydride

ISO 17268:2006 Compressed hydrogen surface vehicle refuelling connection devices

IRAM/ISO 15916:2007 Seguridad en sistemas de hidrógeno

7 POSIBLES SUSTITUTOS

La irritable necesidad de tener que recargar en cada momento las baterías tradicionales de Ion-Litio que alimentan de energía la mayoría de los dispositivos electrónicos portátiles de hoy en día, conlleva a la búsqueda de nuevas alternativas para poder suplir las baterías convencionales.

A continuación se describen y analizan los desarrollos más interesantes al respecto:

7.1 CARGADOR PORTÁTIL

Se trata de un cargador universal sin enchufes, desarrollado por la empresa española Winx. Es un dispositivo autónomo, ya disponible en el mercado, capaz de recargar las baterías de diferentes dispositivos electrónicos.

Una vez cargado el Winx Portable Energy no es necesario tener un enchufe a mano para poder recargar un equipo de bolsillo. Con una única carga completa de este modelo, por ejemplo, se puede recargar una PDA hasta cuatro veces distintas³².

Análisis: Esta tecnología no permite independizarse totalmente de la toma de corriente, sino que lo que se logra es extender el tiempo de duración de las baterías convencionales al contar con un soporte que brinda algunas recargas. Pero con este sistema se sigue dependiendo de cargar una batería con la corriente de la pared, luego esa batería permite cargar cada una de las baterías de los diferentes dispositivos electrónicos.

7.2 BATERÍAS DE PAPEL

Investigadores de Rensselaer Polytechnic Institute en Nueva York acaban de publicar el desarrollo una batería diminuta, muy ligera y flexible. Su soporte son simples hojas de papel a las que el carbono incrustado da un color negro.

Estas baterías producen energía de igual manera que las de Ion-Litio que se utilizan habitualmente en los dispositivos electrónicos. La diferencia es que éstas tienen su soporte en hojas de papel, están compuestas por aproximadamente un 90 por ciento de celulosa, según el estudio publicado en Proceedings of the National Academy of Sciences.

“Los componentes están molecularmente unidos entre sí. Se imprime el nanotubo de carbono sobre el papel, y el conjunto se empapa de electrolitos.”

³² [11-05-2007] - http://www.winxelectronica.com/Portable%20Energy_D15.htm

explica Robert Linhardt profesor de biología y química del Rensselaer Polytechnic Institute y uno de los responsables del proyecto. “el resultado final es un dispositivo que se ve, se siente y pesa como el papel”

Por ahora, la investigación ha llegado a unir diez láminas de papel que generan 2,5 voltios, suficientes para alimentar un ventilador pequeño o iluminar una bombilla. Sin embargo, en teoría no hay nada que impida unir muchas más hojas que generen electricidad suficiente para alimentar mayores dispositivos eléctricos.

Además de amontonarse para conseguir mayor energía, las hojas pueden doblarse y cortarse sin que se pierdan sus propiedades. Esto ofrece innumerables posibilidades de diseño y además, al ser tan maleables caben en casi cualquier espacio.

La batería funciona desde los 148° grados Celsius hasta los 73° bajo cero, lo que junto a su reducido peso lo convierte en un componente perfecto de la industria automovilística.

Ahora queda por desarrollar un sistema de producción en serie suficientemente económico como para empezar a comercializarlas. Todo apunta a que se utilice un sistema parecido a la rotativa de un periódico.³³

Análisis: Falta bastante desarrollo para que se puedan comercializar.

7.3 CARGADOR INÁLMBRICO (EXPERIMENTAL)

Según algunas investigaciones del MIT; recargar los gadgets con solo dejarlos encima de una mesa en una determinada habitación de la casa es posible pero no se ha desarrollado lo suficiente.

Han afirmando que la ciencia que estudian no impide que los aparatos electrónicos puedan recargarse a distancia, sin cables, de la misma forma en que ya se pueden comunicar.

Su hipótesis, basada en teorías que se conocen de hace mucho tiempo, consistiría en un transmisor de energía que llenaría el espacio de alrededor con un campo electromagnético no radiante. La energía sería captada únicamente por los dispositivos diseñados para “resonar” con el campo y el resto de energía sería reabsorbida por el emisor. Si se colocasen aparatos de potencia en todas las habitaciones de la casa, prácticamente en cualquier lugar donde se dejase por ejemplo un iPod o un dispositivo portátil se

³³ [14-08-2007] - Olivia del Olmo

produciría su **recarga automática**, sin tener que depender de buscar cargador respectivo y colocarlo cerca de un enchufe.

7.4 CARGADORES INALÁMBRICOS COMERCIALES



Figura 32

Cuando se comenzó a usar Internet, los chirridos del módem al conectarse asustaban a las mascotas. Los datos viajaban a la velocidad de una tortuga renga y apenas se podían mandar mails: nada de imágenes o videos.

Pasado el tiempo, resulta habitual la banda ancha móvil, la tecnología Wi-Fi que rebota por las paredes de toda la ciudad dando acceso a la red de forma gratuita y veloz. La telefonía celular se comprime cada vez más, las computadoras portátiles también. Sin embargo, con el paso del tiempo, no todo se simplifica. Los transformadores y adaptadores siguen siendo una molestia, sobre todo cuando los guardamos en un mismo cajón, donde se entreveran en un gran romance de cable negro.

¿Podría cortarse para siempre la soga a la pared?

La transmisión inalámbrica de electricidad es una realidad que a partir de este año podría empezar a llegar a los hogares. La compañía norteamericana Wild Charge comenzó la producción en serie de los primeros pads de alimentación eléctrica para dispositivos portátiles.

Estos pads son similares a los que se usan para apoyar el *Mouse* y se conectan a los transformadores originales de nuestros dispositivos. Una vez enchufado el pad, sólo hay que apoyar sobre el mismo teléfono celular o el reproductor de MP3 para que la energía se transmita de uno a otro, sin necesidad de enchufar y desenchufar.

Claro que las baterías de los dispositivos portátiles deberían ser especiales, pero los fabricantes ya están haciendo todos los preparativos para que esta tecnología se masifique. Ya hay pads para el tablero del auto o para los escritorios de oficina. Hay quienes aventuran que esta nueva tecnología significará la condena a muerte de las pilas recargables.



Figura 33³⁴

Análisis: No es un dispositivo inalámbrico, ya que el pad debe estar conectado a un tomacorriente de la pared. Sigue dependiendo de la red eléctrica. Trabajan por contacto.

Funcionamiento

El cargador de la compañía WildCharger es un pad chato y finito con una superficie que permite la conducción. Una vez que un teléfono celular u otro dispositivo electrónico esté correctamente adaptado a la tecnología de este pad, para cargar la batería solo hace falta apoyarlo en el pad –en cualquier parte del pad y con cualquier orientación- y se comenzará a cargar instantáneamente con la misma velocidad de carga que si se conectara a un cargador de pared.

³⁴ www.wildcharge.com

8 IMPACTO Y COMERCIALIZACIÓN

8.1 LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SU IMPORTANCIA EN LA SOCIEDAD

Para muchas personas las celdas de combustible parecen una fantasía de ciencia ficción, teniendo en cuenta que son una fuente de energía eficiente, no contaminante, silenciosa y sin partes móviles. Sin embargo las celdas de combustibles de hecho existen y han tenido un rol clave en la provisión de electricidad de naves espaciales desde 1960. Actualmente se está desarrollando y adaptando esta tecnología para su uso práctico en automóviles con emisión cero, para plantas de generación eléctrica y dispositivos portátiles.

8.2 ALGUNOS IMPACTOS SOCIALES

Cómo impactarán las celdas de combustible en la sociedad, la economía y el medio ambiente?

Las celdas de combustibles utilizadas en los automóviles lograrán una reducción de polución y desacelerarán el agotamiento de los combustibles fósiles. El subproducto de calor y agua puede utilizarse para múltiples aplicaciones para el beneficio de la gente.

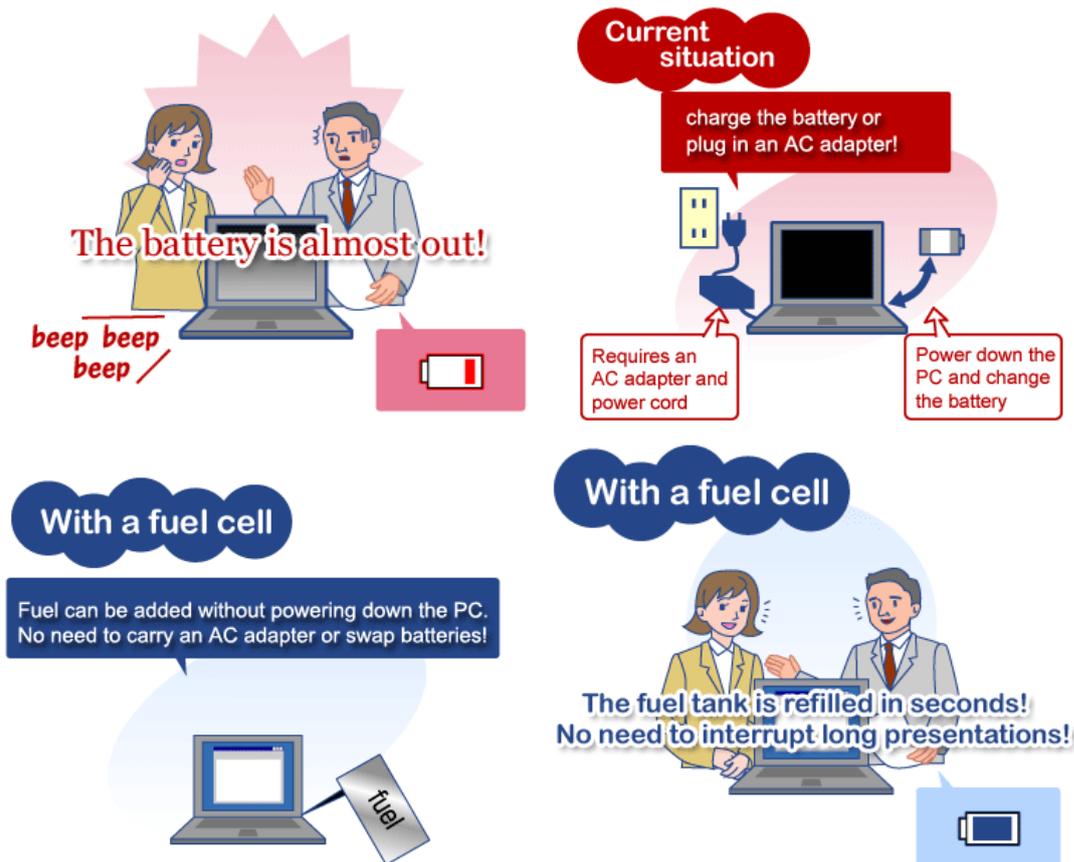
Las celdas de combustibles también crearán nuevos mercados y nuevos negocio, creando necesidad de mano de obra altamente calificada. Además los países que importan petróleo y dependen de Medio Oriente, podrán reducir su déficit comercial.

Las celdas de combustible son una tecnología relativamente nueva y actualmente muy costosa. La producción en escala ayudará a reducir los costos. En otras palabras, cuanto más se desarrolle y refine esta tecnología, más accesible y económica será.

8.3 LA VIDA CON LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

La utilización de celdas de combustible resuelve una serie de problemas que están dando vueltas desde hace tiempo:

Escenario 1: Una persona haciendo una presentación a clientes. Se queda sin batería en su computadora portátil y debe interrumpir la presentación.³⁵



³⁵ Toshiba Corporation

Escenario 2: Una mujer caminando por la ciudad, hablando por su teléfono celular. Se queda sin batería en su teléfono y debe interrumpir su llamada.³⁶



³⁶ Toshiba Corporation

Escenario 3: Un estudiante escuchando música camino al colegio. Se queda sin batería en su reproductor y debe interrumpir su diversión.³⁷



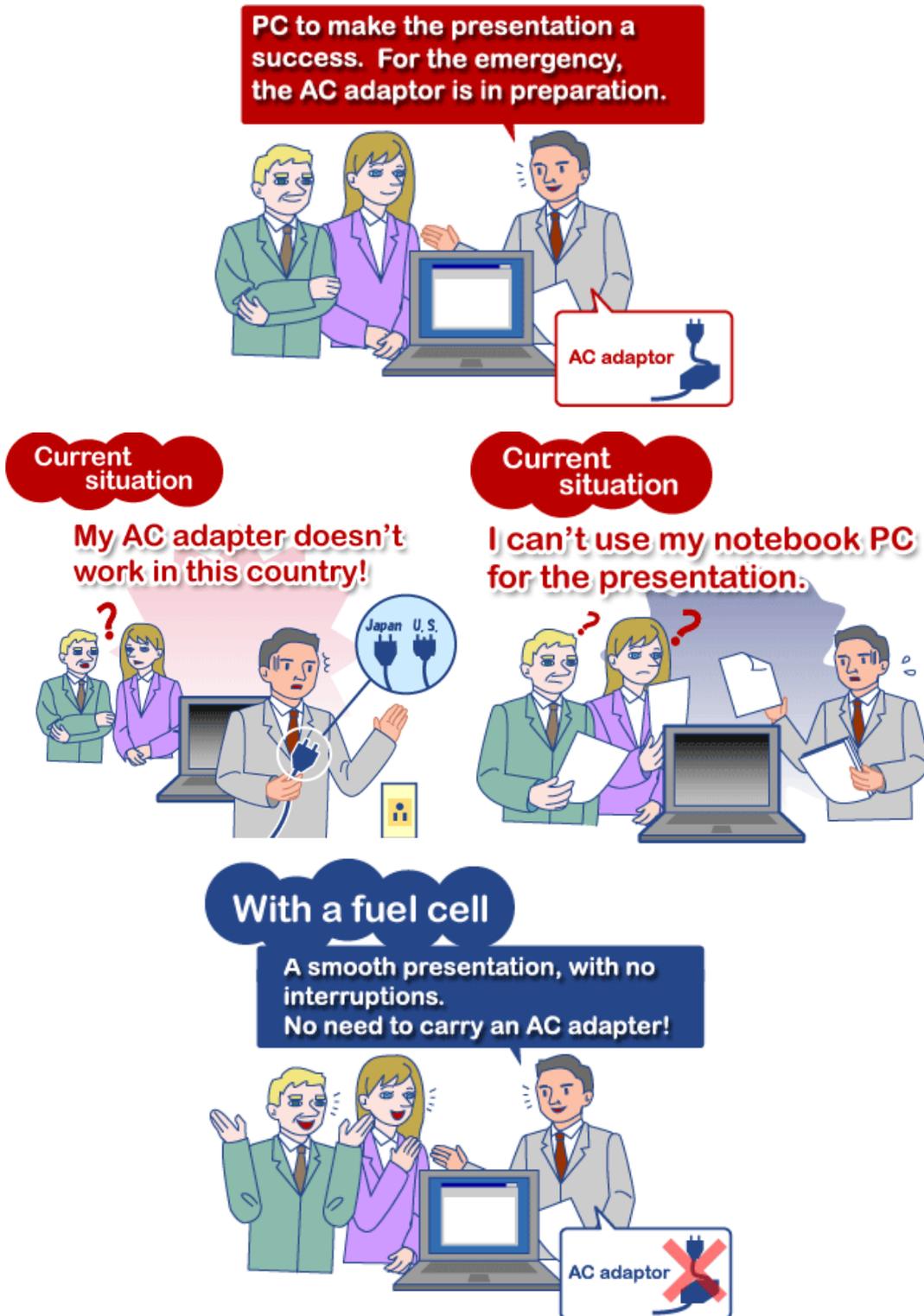
³⁷ Toshiba Corporation

Escenario 4: Un persona preparada para viajar al extranjero. Necesita espacio en la valija, pero tiene que llevar un cargador diferente para cada artefacto electrónico.³⁸



³⁸ Toshiba Corporation

Escenario 5: Un hombre de negocios asistiendo a una reunión en el extranjero con su computadora portátil. Nuevamente se queda sin batería en su laptop, y no consigue poder enchufar el cargador, finalmente pierde oportunidades únicas.³⁹



³⁹ Toshiba Corporation

8.4 CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD

Un estudio realizado en los Estados Unidos para el Departamento de Energía, por Ford Motor Company, encontró que las celdas de combustible que están siendo desarrolladas para el almacenamiento de hidrógeno, son más seguras que los dispositivos de almacenamiento de gasolina. Ante la posibilidad de ruptura de un tanque de combustible, Ford probó cada tanque a 1,5 veces la capacidad establecida y algunos de ellos hasta la rotura. Cada tanque, fue calificado a 2,25 veces de su presión de operación normal. Los tanques fueron también sujetos a tiros de armas de fuego y no explotaron sino que simplemente hubo una fuga de hidrógeno a través del orificio producido por la bala.⁴⁰

¿Son las celdas de combustible realmente mejores?

Los fabricantes de automotores llevan gastados cerca de dos mil millones de dólares para desarrollar autos eléctricos propulsados por celdas de combustible. Esta tecnología que utiliza hidrógeno para generar electricidad, promete la posibilidad de autos aún más ecológicos y eficientes, que utilicen energía limpia.

Se espera que en las dos próximas décadas, los autos híbridos con motores de combustión interna y electricidad, tengan menores emisiones y consumo de combustible. Sin embargo, las celdas de combustible serían mucho más competitivas si las estaciones de servicio vendieran hidrógeno en lugar o además de gasolina.

El problema es que el hidrógeno debe ser extraído primero de otros combustibles existentes. Muchos autores sostienen que es más sencillo desarrollar nuevas tecnologías a partir de tecnologías existentes que crear una nueva tecnología desde el principio. Un estudio de simulación hecho por computadora, simuló varias combinaciones de combustibles y motores e incluyó los costos de construcción de estos motores y producción del combustible. Los resultados revelaron que hacia el 2020, los motores de combustión interna/híbridos, utilizarían tan sólo un 55% aproximadamente, de la energía utilizada por un motor de gasolina. Se estimó que los vehículos a celdas de combustible consumirían cerca del 72%.⁴¹

⁴⁰ Spowers, R. (2001) Valenti. M. (2001). New avenues for electrochemistry. *Mechanical Engineering* 123(2), 46.

⁴¹ Iovine, J. (2001). Fuel cells. *Poptronics*. 2(2),49.

8.5 EFICIENCIA EN LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible para autos ofrecen ciertas ventajas frente a las baterías tradicionales. Estas pueden ser recargadas rápidamente y soportar grandes distancias antes de requerir una nueva carga, además, no producen emisiones y son más eficientes⁴².

Los modelos muestran que los vehículos a celdas de combustible tendrán 2,5 veces mejor economía de combustible que aquellos a motor de combustión interna.

Cambios en el diseño del vehículo y los materiales, mejorarán esta economía de combustible reduciendo el peso y la resistencia aerodinámica. Está estimado que un vehículo del tamaño de un Ford Taurus a celda de combustible, con un diseño mejorado, alcanzará las 80 millas por galón, incrementando enormemente la rentabilidad de la tecnología de las celdas de combustible.

8.6 OTRAS APLICACIONES

Las celdas de combustible son utilizadas actualmente en plantas, colegios, hospitales, oficinas y terminales de aeropuerto. Operan de manera silenciosa, reduciendo el ruido y la polución.

La autonomía asociada a las celdas de combustible, hace de ellas una excelente elección para las áreas rurales, donde las redes eléctricas son muchas veces inaccesibles. El calor excedente de las celdas, puede ser usado para calentar tanto el aire como el agua.

8.7 COOPERACIÓN INDUSTRIA-GOBIERNO

Muchos líderes están extremadamente preocupados por la dependencia que tiene la sociedad de los combustibles fósiles.

Diez mil vehículos a hidrógeno, reducirían el consumo de petróleo en siete millones de galones por año. Un millón y medio de barriles de petróleo pueden dejar de ser importados a Estados Unidos si tan sólo el 20% de los vehículos americanos fueran alimentados por celdas de combustible. Se debe recordar también que las emisiones de estos vehículos son únicamente vapor de agua y calor.

⁴² Crittenden, 2001 - Fuel cells. *Technology Review*. 104(20). 32.

Las celdas de combustible pueden ayudar a que las naciones alcancen sus objetivos proveyendo ventajas económicas, ambientales y de independencia. El desarrollo de tecnologías energéticas siempre se llevó a cabo en conjunto con el gobierno y el sector privado. Muchas tecnologías recibieron en el pasado un apoyo considerable por parte del gobierno estadounidense, como ser las perforaciones de gas natural, la turbina a gas y la energía solar⁴³. La tecnología de las celdas de combustible tiene un futuro prometedor, en particular si consigue el respaldo del gobierno y la industria.

En los próximos años, se debería estar evidenciando el desarrollo de vehículos a celdas de combustible diseñados por las mayores automotrices y otras aplicaciones que afecten la vida cotidiana.

8.8 LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE Y LA EDUCACIÓN

La tecnología de las celdas de combustible es un concepto innovador para proveer de energía al parque automotor, los hogares, las industrias y los aparatos electrónicos portátiles.

Esta tecnología esta ganando reconocimiento e importancia también en el entorno educativo. El departamento de energía de los Estados Unidos (DOE) ha establecido metas para la educación de las celdas de combustible para facilitar la aceptación del mercado y promover este tipo de tecnologías.⁴⁴

Se debe comenzar a enseñar e informar a la gente acerca de la posibilidad de vehículos con muy bajas o cero emisiones en las autopistas.

El uso de combustibles fósiles afecta el medio ambiente y amenaza la seguridad económica de los países. Es importante dar a conocer a los estudiantes y a las nuevas generaciones la promesa de la tecnología de las celdas de combustible.

8.9 HACÍA UNA ECONOMÍA DE HIDRÓGENO

Las preocupaciones por la contaminación atmosférica urbana, la seguridad de la energía, y el cambio climático han impulsado que la noción de una "economía del hidrógeno" deje de pertenecer solamente al entorno de científicos y de ingenieros. La "economía de hidrógeno" cada vez más forma parte del léxico de los líderes políticos y líderes de negocio del mundo moderno. El interés en el hidrógeno, el elemento más simple y abundante del

⁴³ Spowers, 2001 - Dream machines. *Geographical Magazine*. 173(2). 56.

⁴⁴ Glenn A. Hudak is an automotive technology teacher, Coolidge High School, Gilbert, AZ. - vvhudak@aol.com

universo, está creciendo también debido a los avances técnicos en las celdas de combustible - sucesoras potenciales de la actual generación de baterías para la electrónica portátil, de las centrales eléctricas, y del motor de combustión interna. ¿Pero de dónde se obtendrá el hidrógeno? Tanto los gobiernos como las industrias, siguen manteniendo un pie en la economía de los combustibles fósiles, pero sin embargo están persiguiendo una ruta incremental hacia la economía del hidrógeno, usando gasolina o metanol como la fuente del hidrógeno para vehículos con reformador de combustible a bordo. El camino más limpio, extrayendo el hidrógeno del gas natural y de las energías renovables y usándolo como combustible (H₂ puro) directamente a bordo de los vehículos, ha recibido perceptiblemente menos apoyo, en parte porque el costo de construir una infraestructura para el hidrógeno se ve todavía como algo prohibitivo. Numerosos estudios recientes sugieren que el traspaso al uso directo del hidrógeno puede ser mucho más limpio y largamente menos costoso de lo que se creía. **Al igual que los gobiernos de los países desarrollados desempeñaron un papel catalítico (acelerador) en la creación del Internet, ahora también tendrán estos un papel esencial en la construcción de una economía del hidrógeno.** La investigación y desarrollo, los incentivos y regulaciones, y asociaciones con la industria tienen iniciativas aisladas chispeantes, pero no suficientes como para impulsar el cambio. Políticas públicas más fuertes y esfuerzos educativos son necesarios para acelerar el proceso. Las decisiones ejecutadas hoy determinarán probablemente qué países y cuales compañías obtendrán el enorme poder político y los premios económicos asociados a la era del hidrógeno que está naciendo.⁴⁵

Si se pretende introducir cambios en la sociedad, en sus formas de generar y distribuir energía o en el modo de transportarse, los mismos deben acompañarse con estudios, acciones y normas que permitan promover el acceso a un producto de calidad reconocida y certificada para todos los usuarios, asegurar el almacenaje y la distribución en forma segura y también garantizar el uso seguro de las diferentes tecnologías asociadas, tanto en el sector público como en el uso privado.

Ideas creativas pueden hacer rentable la incorporación de las energías limpias a la matriz energética mundial. Por ejemplo, ofrecer la opción a los ciudadanos de pagar voluntariamente un precio extra en sus facturas de consumo de electricidad para colaborar con el desarrollo de las energías limpias. Es decir, las familias que quieren apoyar este cambio, colaborarían de manera voluntaria, se podrían hacer publicidades que digan cosas así como “por un

⁴⁵ Elsevier – Hydrogen Economy

mundo más limpio y mejor”, cada uno pagaría un poquito más, y toda la sociedad tendría una concientización favorable.

9 CONCLUSIONES

El incremento del consumo de energía de los dispositivos electrónicos portátiles resulta el principal problema a solucionar mediante la incorporación de esta nueva tecnología de celdas de combustible de metanol directo.

Energía limpia, energía portátil, un mundo cada vez más móvil y portátil, y una tecnología de baterías estancada son las principales fuerzas impulsoras o driving forces que llevan a la industria y a las empresas que están a la vanguardia tecnológica a invertir y desarrollar las celdas de combustible de metanol directo.

Trasladar esta tecnología que permitirá un mundo más libre aún y globalizado.

La introducción de esta tecnología en la vida cotidiana elimina la necesidad de los consumidores de acarrear cargadores, adaptadores y cables.

Esta tecnología revolucionaria aportará cambios trascendentes en la vida diaria de las personas.

9.1 EL PRIMER PASO HACÍA UNA ECONOMÍA DE HIDRÓGENO

El uso del Hidrógeno como vector de energía contribuirá a la matriz energética de cualquier nación durante el siglo XXI. Se lo utilizará principalmente para la generación de energía eléctrica y como combustible. Sin embargo, la “transición a una economía del Hidrógeno” está sujeta a los adecuados avances científicos y tecnológicos que permitan establecer su uso masivo bajo apropiadas condiciones de seguridad y de demostrada factibilidad técnica y económica. A su vez, la sociedad debe alcanzar un cambio cultural que permita acompañar las innovaciones tecnológicas y establecer a través de sus canales legislativos leyes que brinden condiciones de regulación apropiadas que reglamenten la actividad.

El marco de análisis de una economía del hidrógeno, en términos de costos respectivos, debe considerar la cadena completa de energía. Esto es, desde la fuente primaria de energía utilizada para obtener hidrógeno libre, las tecnologías de producción posibles, los sistemas de almacenamiento, transporte y distribución, hasta el tipo de conversor y modalidad de uso final del servicio energético que mediante el hidrógeno se atienda.

Por lo tanto para hacer factible la implementación de tales tecnologías es importante poder sortear algunas restricciones utilizando la creatividad y el

ingenio. En este momento las principales trabas no son las técnicas sino más que nada las económicas. Por ejemplo; la búsqueda de aplicaciones originales y masivas que permitan hacer esta tecnología más accesible desde el punto de vista económico.

*A pesar de los obstáculos tecnológicos y de infraestructura, una economía de hidrógeno está próxima. De ser así, en un principio ésta se asemejaría a la **economía del perfume**, un mercado donde las cantidades son tan pequeñas que el precio no resulta significativo. Comenzará por los teléfonos celulares y las computadoras portátiles, donde los consumidores no se molestarían por pagar 10 dólares el kilowatt-hora por contar con electricidad provista por celdas de combustible.*

Las celdas de combustible de metanol directo son el primer paso hacia una economía de hidrógeno, una descarbonización de la energía. Un paso hacia una energía más limpia y más eficiente. Representa la solución para abastecer de energía a un mercado de dispositivos electrónicos portátiles que supera los miles de millones de dólares.

9.2 CONCLUSIÓN GENERAL

Lámparas, carbón de quemar, aceite y gas, alumbraron los livings de muchas familias durante los años 1900's. Sin embargo, cuando las bombitas eléctricas reemplazaron esas humeantes y olorosas fuentes de iluminación, las casas se transformaron en ambientes brillantes, limpios y más seguros.

En un principio tan sólo aquellas personas de alto poder adquisitivo tenían acceso a la iluminación eléctrica. A medida que la demanda incrementó, el costo se redujo, y más y más gente consiguió comprar las lámparas eléctricas, aún habiendo carbón suficiente para continuar alumbrando los edificios de la manera tradicional. Al final, la mejor tecnología ganó.

Tal como sucedió hace 100 años con la comercialización de las bombitas de luz, las compañías hoy, están siendo dirigidas por fuerzas técnicas, económicas y sociales tales como características de alta performance, durabilidad, confiabilidad, bajo costo y beneficios medioambientales.

A lo largo de este documento se presentaron y evaluaron las diferentes alternativas que compiten para ser los sucesores de la generación de baterías actuales. Asimismo se introdujo la tecnología de las celdas de combustible y se desarrollo su teoría de funcionamiento. Se enumeraron los principales problemas técnicos a resolver para alcanzar una exitosa inserción comercial de la tecnología de las celdas de combustible de metanol directo.

Finalmente se realizó un estudio de las oportunidades tanto nivel global como local y se ensayaron diferentes hipótesis de los cambios y beneficios que podría provocar la incorporación de esta tecnología a la vida cotidiana de las personas.

La introducción de esta tecnología impactará sobre todas las personas de este planeta. Bienvenidos al “mundo portátil”, un mundo inalámbrico pero “sin cables”.

10 BIBLIOGRAFÍA

Worldwide Notebook Pc Forecast – 2007-2011 – www.researchandmarkets.com

Ariel Ojman – 2005 – Pronóstico de venta de computadoras personales - Consultora IDC

J. SLANINA - Air Pollution from Energy Production and Use - Article Number: NRGY : 00387 - Netherlands Energy Research Foundation Petten, - The Netherlands

Asociación Empresarial Eólica de España – 2007

Matthew L. Wald - Questions about a hydrogen economy - SCIENTIFIC AMERICAN - www.sciam.com - 2005

<http://cabierta.uchile.cl/revista/16/articulos/paper5/>

Enciclopedia Encarta 2003

Frost & Sullivan

Suplemento iEco Diario Clarín - 24/06/07

Emiliano Galli – Martes 30 de Mayo de 2006 - El Granero energético – Comercio exterior - Diario La Nación

HVSS Frankfurt

Staff and agencies Guardian unlimited

DMFC Corporation

K. Onda et al. / Journal of Power Sources 132 (2004) 64–70 - Elsevier

Prof. Dr. Angel Rodríguez Pierna - "APLICACIÓN DE ALEACIONES METÁLICAS AMORFAS DE Ni₅₉Nb₄₀Pt_(1-x)X_x (X=Sn,Ru,Sb) COMO ANODOS EN PILAS DE OXIDACIÓN DIRECTA DE METANOL" - Dpto. Ingeniería Química y del Medio Ambiente - Universidad del País Vasco

Ingeniero Agrónomo Andrés Leone – Año 2007 - Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (SAGPyA)

11-05-2007 - http://www.winselectronica.com/Portable%20Energy_D15.htm

14-08-2007 - Olivia del Olmo

www.wildcharge.com

Crittenden, 2001 - Fuel cells. *Technology Review*. 104(20). 32.

Spowers, 2001 - Dream machines. *Geographical Magazine*. 173(2). 56.

Iovine, J. (2001). Fuel cells. *Poptronics*. 2(2),49.

Glenn A. Hudak is an automotive technology teacher, Coolidge High School, Gilbert, AZ. - vwhudak@aol.com

Spowers, R. (2001)Valenti. M. (2001). New avenues for electrochemistry. *Mechanical Engineering* 123(2), 46.

Consultora IDC – Entrevista a Luciano Acosta, Analista Senior Consumer and Commercial Devices de IDC Cono Sur.

Little, A. (1993). The role of fuel cell technology. *Benefits of Fuel Cells Webpage*.

DTI Energy Inc. - <http://www.dtienergy.com>

PolyFuel Breakthrough Technology - <http://www.polyfuel.com>

Jeremy Rifkin - La economía del hidrógeno - La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la tierra. Barcelona - Editorial Paidós, 2002

Fraunhofer Insitut Solare Energisysteme - <http://www.ise.fhg.de>

S. T. COELHO and J. GOLDEMBERG - Alternative Transportation Fuels: Contemporary Case Studies - University of Saõ Paulo, Article Number: NRGY : 00177

W. E. Triaca y C. E. Mayer - CONVERSIÓN ELECTROQUÍMICA DE ENERGÍA

José García Huidobro y Lucas Busso - Proyecto de Generación de Hidrógeno a partir de la electrólisis del agua a alta presión - Concurso de Investigación y Desarrollo ITBA - Año 2004 – Tutor Ricardo Lauretta

HYFUSEN 2005 - San Carlos de Bariloche, Junio de 2005

Jose Luis Aprea – Secretario Técnico ISO/TC 197 Argentina

MTI Micro www.mti.com

Tecnología energética e impacto ambiental. Editorial Mc Graw Hill

Apuntes de Reunión “Hidrógeno y la energía del futuro” el 23 y 24 de marzo del 2004 en el Centro Argentino de Ingenieros organizado por la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ANCEFN).

Dicks, Andrew; Kormine, James. Fuel Cells Systems Explained. Estados Unidos, Editorial Wiley, 1984.

Toshiba Corporation - <http://www3.toshiba.co.jp>

11 ANEXOS

11.1 HISTORIA DE LAS BATERÍAS

Alessandro Volta comunica su descubrimiento de la pila a la Royal London Society, el 20 de marzo de 1800.

Johann Wilhelm Ritter construyó su acumulador eléctrico en 1803. Como muchos otros que le siguieron, era un prototipo teórico y experimental, sin posible aplicación práctica.

En 1860 Gaston Planté construyó el primer modelo de acumulador de plomo-ácido con pretensiones de ser un aparato utilizable, lo que no era más que muy relativamente, por lo que no tuvo éxito. A finales del siglo XIX sin embargo la electricidad se iba convirtiendo rápidamente en artículo cotidiano y cuando Planté volvió a explicar públicamente las características de su acumulador en 1879 tuvo una acogida mucho mejor, de modo que comenzó a ser fabricado y utilizado casi inmediatamente, iniciándose un intenso y continuado proceso de desarrollo para perfeccionarlo y soslayar sus deficiencias, proceso que dura hasta nuestros días.

Thomas Alva Edison inventó en 1900 otro tipo de acumulador con electrodos de hierro y níquel, cuyo electrolito es la potasa cáustica (KOH). Empezaron a comercializarse en 1908 y son la base de los actuales modelos alcalinos, ya sean recargables o no.

También hacia 1900 Junger y Berg descubrieron en Suecia el acumulador Ni-Cd, que utiliza ánodos de cadmio en vez de hierro, siendo muy parecido al de ferróníquel en las restantes características.

11.2 TIPOS DE ACUMULADORES SEGÚN SU NATURALEZA INTERNA

Acumulador de plomo

Está constituido por dos electrodos de plomo que, cuando el aparato está descargado, se encuentra en forma de sulfato de plomo (PbSO_4) incrustado en una matriz de plomo metálico (Pb); el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico. Este tipo de acumulador se sigue usando aún en muchas aplicaciones, entre ellas en los automóviles. Su funcionamiento es el siguiente:

- Durante el proceso de carga inicial el sulfato de plomo es reducido a plomo metal en el polo negativo, mientras que en el ánodo se forma óxido de plomo (PbO_2). Por lo tanto se trata de un proceso de

dismutación. No se libera hidrógeno, ya que la reducción de los protones a hidrógeno elemental está cinéticamente impedida en una superficie de plomo, característica favorable que se refuerza incorporando a los electrodos pequeñas cantidades de plata. El desprendimiento de hidrógeno provocaría la lenta degradación del electrodo, ayudando a que se desmoronasen mecánicamente partes del mismo, alteraciones irreversibles que acortan la duración del acumulador.

- Durante la descarga se invierten los procesos de la carga. El óxido de plomo es reducido a sulfato de plomo mientras que el plomo elemental es oxidado para dar igualmente sulfato de plomo. Los electrones intercambiados se aprovechan en forma de corriente eléctrica por un circuito externo. Se trata por lo tanto de una conmutación. Los procesos elementales que trascurren son los siguientes:



En la descarga baja la concentración del ácido sulfúrico porque se crea sulfato de plomo y aumenta la cantidad de agua liberada en la reacción. Como el ácido sulfúrico concentrado tiene una densidad superior al ácido sulfúrico diluido, la densidad del ácido puede servir de indicador para el estado de carga del dispositivo.

No obstante, este proceso no se puede repetir indefinidamente porque, cuando el sulfato de plomo forma cristales muy grandes, ya no responden bien a los procesos indicados, con lo que se pierde la característica esencial de la reversibilidad. Se dice entonces que el acumulador se ha *sulfatado* y es necesario sustituirlo por otro nuevo.

Los acumuladores de este tipo que se venden actualmente utilizan un electrolito en pasta, que no se evapora y hace mucho más segura y cómoda su utilización.

Batería alcalina

También denominada de ferroníquel; sus electrodos son láminas de acero en forma de rejilla con panales rellenos de óxido níqueloso (NiO), que constituyen el electrodo positivo, y de óxido ferroso (FeO) el negativo, estando formado el electrolito por una disolución de potasa cáustica (KOH). Durante la carga se produce un proceso de oxidación anódica y otro de reducción catódica, transformándose el óxido níqueloso en níquelico y el óxido ferroso en hierro metálico. Esta reacción se produce en sentido inverso durante la descarga.

En 1866 George Leclanché, inventa en Francia la “pila seca” (Zinc-Dióxido de Manganeso); sistema que aún domina el mercado mundial de las baterías primarias. Las pilas alcalinas (de “alta potencia” o “larga vida”) son similares a las de Leclanché pero, en vez de cloruro de amonio, llevan cloruro de sodio o de potasio. Duran más porque el zinc no está expuesto a un ambiente ácido como el que provocan los iones amonio en la pila convencional. Como los iones se mueven más fácilmente a través del electrolito, produce más potencia y una corriente más estable.

Su mayor costo se deriva de la dificultad de sellar las pilas contra las fugas de hidróxido. Casi todas vienen blindadas, lo que impide el derramamiento de los constituyentes. Sin embargo, este blindaje no tiene duración ilimitada. Las celdas secas alcalinas son similares a las celdas secas comunes, con excepción de que:

1. el electrolito es básico (alcalino), porque contiene KOH
2. la superficie interior del recipiente de Zn es áspera; esto proporciona un área de contacto mayor.

Las baterías alcalinas tiene una vida media mayor que la de las celdas secas comunes y resisten mejor el uso constante.

El voltaje de una pila alcalina es cercano a 1,5 v. Durante la descarga, las reacciones en la celda seca alcalina son:

- $\text{Zn(OH)}_2(\text{s}) + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Ánodo: Zn(S)} + 2 \text{OH}^- (\text{ac})$
- $2\text{MnO(OH)} (\text{s}) + 2 \text{OH}^-(\text{ac}) \rightarrow \text{Cátodo: } 2 \text{MnO}_2 (\text{S}) + 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + 2 \text{e}^-$
- $\text{Zn(OH)}_2 (\text{ac}) + 2\text{MnO} (\text{OH}) (\text{s}) \rightarrow \text{Global: Zn(s)} + 2 \text{MnO}_2 (\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$

El ánodo está compuesto de una pasta de zinc amalgamado con mercurio (total 1%), carbono o grafito.

Se utilizan para aparatos complejos y de elevado consumo energético. En sus versiones de 1,5 voltios, 6 voltios y 12 voltios se emplean, por ejemplo, en mandos a distancia (control remoto) y alarmas.

Baterías alcalinas de manganeso

Con un contenido de mercurio que ronda el 0,1% de su peso total. Es una versión mejorada de la pila anterior en la que se ha sustituido el conductor iónico cloruro de amonio por hidróxido potásico (de ahí su nombre de alcalina). El recipiente de la pila es de acero y la disposición del zinc y del óxido de manganeso es la contraria, situándose el zinc, ahora en polvo, en el centro. La

cantidad de mercurio empleada para regularizar la descarga es mayor. Esto le confiere mayor duración, más constancia en el tiempo y mejor rendimiento. Por el contrario su precio es más elevado. También suministra una fuerza electromotriz de 1,5 V. Se utiliza en aparatos de mayor consumo como: grabadoras portátiles, juguetes con motor, flashes electrónicos.

El ánodo es de zinc amalgamado y el cátodo es un material polarizador que es en base a dióxido de manganeso, óxido mercúrico mezclado íntimamente con grafito, y en casos extraños óxido de plata Ag_2O (estos dos últimos son de uso muy costoso, peligrosos y tóxicos) a fin de reducir su resistividad eléctrica. El electrolito es una solución de hidróxido potásico (KOH), el cual presenta una resistencia interna bajísima, lo que permite que no se tengan descargas internas y la energía pueda ser acumulada durante mucho tiempo. Este electrolito en las pilas comerciales es endurecido con gelatinas o derivados de la celulosa.

Este tipo de pila se fabrica en dos formas. En una, el ánodo consta de una tira de zinc corrugada devanada en espiral de 0.051 a 0.13 mm de espesor que se amalgama después de armarla. Hay dos tiras de papel absorbente resistente a los álcalis ínter devanadas con la tira de papel de zinc, de modo que el zinc sobresalga por la parte superior y el papel por la parte inferior. El ánodo está aislado de la caja metálica con un manguito de poliestireno. La parte superior de la pila es de cobre y hace contacto con la tira de zinc para formar la Terminal negativa de la pila. La pila está sellada con un ojillo o anillo aislante hecho de neopreno. La envoltura de la pila es químicamente inerte a los ingredientes y forma el electrodo positivo.

Alcalinas

- Zinc 14% (ánodo) Juguetes, tocacintas, cámaras fotográficas, grabadoras
- Dióxido de Manganeso 22% (cátodo)
- Carbón: 2%
- Mercurio: 0.5 a 1% (ánodo)
- Hidróxido de Potasio (electrolito)
- Plástico y lámina 42%

Contiene un compuesto alcalino, llamado Hidróxido de Potasio. Su duración es seis veces mayor que las de zinc-carbono. Está compuesta por Dióxido de Manganeso, Hidróxido de Potasio, pasta de Zinc amalgamada con Mercurio (en total 1%), Carbón o Grafito. Según la Directiva Europea del 18 de marzo de 1991, este tipo de pilas no pueden superar la cantidad de 0.025% de mercurio.

Este tipo de baterías presenta algunos puntos en contra:

- Una pila alcalina puede contaminar 175.000 litros de agua, que llega a ser el consumo promedio de agua de toda la vida de seis personas.
- Una pila común, también llamadas de zinc-carbono puede contaminar 3.000 litros de agua.
- Perforaciones del tabique nasal.
- Zinc, Manganeso, Bismuto, Cobre y Plata: Son sustancias tóxicas, que producen diversas alteraciones en la salud humana. El Zinc, Manganeso y Cobre son esenciales para la vida, en cantidades mínimas, tóxico en altas dosis. El Bismuto y la Plata no son esenciales para la vida.

Baterías Níquel-Hidruro (Ni-H)

Utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de metal-hidruro. Cada célula de Ni-H puede proporcionar un voltaje de 1,2 V y una capacidad entre 0,8 y 2,3 Ah. Su densidad de energía llega a los 80 Wh/kg. Este tipo de baterías se encuentran afectadas por el llamado *efecto memoria*: en el que en cada recarga se limita el voltaje o la capacidad (a causa de un tiempo largo, una alta temperatura, o una corriente elevada), imposibilitando el uso de toda su energía.

Baterías Níquel-Cadmio (Ni-Cd)

Utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio. Esta configuración de materiales permite recargar la batería una vez está agotada para su reutilización. Cada célula de NiCd puede proporcionar un voltaje de 1,2 V y una capacidad entre 0,5 y 2,3 Ah. Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo 50 Wh/kg, lo que hace que tengan que ser recargadas cada poco tiempo. También se ven afectadas por el efecto memoria.

Baterías Litio-Ion (Li-ion)

Las baterías Litio-Ion (Li-ion) utilizan un ánodo de Litio y un cátodo de Ion. Su desarrollo es más reciente, y permite llegar a densidades del orden de 115 Wh/kg. Además, no sufren el efecto memoria, a diferencia de las de Ni-Cd.

Baterías Polímero de Litio (Li-poli)

Son una variación de las baterías Litio-Ion (Li-ion). Sus características son muy similares pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior.

11.3 PARÁMETROS DE UN ACUMULADOR

- La tensión o potencial (en voltios) es el primer parámetro a considerar, pues es el que suele determinar si el acumulador conviene al uso a que se le destina. Viene fijado por el potencial de reducción del par redox utilizado; suele estar entre 1 V y 4 V por elemento.
- La corriente que puede suministrar el elemento, medida en ampere (A), es el segundo factor a considerar. Especial importancia tiene en algunos casos la corriente máxima obtenible; por ejemplo, los motores de arranque de los automóviles exigen esfuerzos brutales de la batería cuando se ponen en funcionamiento (decenas de A), por lo que deben actuar durante poco tiempo.
- La capacidad eléctrica se mide en la práctica por referencia a los tiempos de carga y de descarga en Ah. La unidad SI es el coulomb (C).

$$1 \text{ Ah} = 1000 \text{ mAh} = 3600 \text{ C}; 1 \text{ C} = 1 \text{ Ah}/3600 = 0,278 \text{ mAh}.$$

Téngase en cuenta sin embargo que, cuando a veces le den indicaciones en el cuerpo de las baterías o en sus envases como *Cárguese a C/10 durante 12 horas*, la letra C no se refiere al coulomb, sino a la carga máxima que puede recibir el acumulador, de modo que en el caso anterior, si la capacidad del acumulador fuesen 1200 mAh, se le debería aplicar una corriente de carga de $1200/10 = 120 \text{ mA}$ durante el número de horas indicado.

- La energía almacenada se mide habitualmente en Wh (watt-hora); la unidad SI es el joule (unidad).

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J} = 3,6 \text{ kJ}; 1 \text{ J} = 0,278 \text{ mWh}$$

- La resistencia de los acumuladores es muy inferior a la de las pilas, lo que les permite suministrar cargas mucho más intensas que las de éstas, sobre todo de forma transitoria. Por ejemplo, la resistencia interna de un acumulador de plomo-ácido es de 0,006 ohm y la de otro de Ni-Cd de 0,009 ohm.
- En fin, otra de las características importantes de un acumulador es su masa, es decir, lo que pesa, y la relación entre ella y la capacidad eléctrica (Ah/kg) o la energía (Wh/kg) que puede restituir. En algunos casos puede ser también importante el volumen que ocupe (en m³ o en litro).
- El rendimiento es la relación porcentual entre la energía eléctrica recibida en el proceso de carga y la que el acumulador entrega durante la descarga. El acumulador de plomo-ácido tiene un rendimiento de más del 90%.

11.4 TABLA COMPARATIVA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ACUMULADOR

Tipo	Energía / peso	Tensión por elemento (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga	Auto-descarga por mes (% del total)
Plomo	30-50 Wh/kg	2 V	200-300	8-16h	5 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	1500	1h	20%
Ni-H	60-120 Wh/kg	1,25 V	300-500	2h-4h	30 %
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,6 V	500-1000	2h-4h	10 %
Li-Po	100-130 Wh/kg	3,6 V	300-500 (tres años de vida)	1h-1.5h	10 %

11.5 LAS BATERÍAS COMO CONTAMINANTES

Como se ha visto, las baterías contienen metal pesado y compuestos químicos, muchos de ellos perjudiciales para el medio ambiente. Es muy importante no tirarlas a la basura (en la mayoría de los países eso no está permitido), y llevarlas a un centro de reciclado. Actualmente, la mayoría de los proveedores y tiendas especializadas también se hacen cargo de las baterías gastadas.

En México la liberación del mercurio contenido en pilas ha ocurrido a consecuencia del uso de tres tipos de pilas: las de óxido de mercurio, las de C-Zn y las alcalinas. En el primer tipo, el contenido de dicho metal es del 33% y se usaron tanto en su presentación de botón como en otros tamaños a partir de 1955. Teóricamente, se dejaron de producir en 1995, aunque hay fuentes de información que indican que dicho proceso continúa en Asia y se distribuyen en el mercado internacional. Para el segundo y tercer tipo de pilas, se sabe que durante varias décadas, antes de 1990, se les agregaba mercurio (entre 0,5 a 1,2%) para optimizar su funcionamiento, siendo las alcalinas las de mayor contenido; también el carbón que contienen algunas veces está contaminado con este metal de manera natural. En 1999, el INE solicitó un análisis de muestras de tres diferentes marcas de pilas del tipo AA de consumo normal en México, de las cuales dos eran de procedencia asiática (de C-Zn) y una alcalina de procedencia europea. Los resultados fueron los siguientes: para las de procedencia asiática, los valores obtenidos fueron de 0,18 mg/kg y de 6,42 mg/kg; en cuanto a la de procedencia europea el resultado fue de 0,66 mg/kg; dichas cantidades, equivalentes a partes por millón, no rebasan los límites de 0,025% establecidos en el Protocolo sobre metales pesados adoptado en 1998 en Aarhus, Dinamarca, por los países miembros de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE). El muestreo anterior fue un hecho aislado y sería conveniente en un futuro seguir analizando el contenido

de mercurio en el mayor número de marcas posibles. Según los cálculos se estima que se han liberado 1,232 toneladas durante los últimos 43 años. En México, otras fuentes de mercurio la constituyen la industria de cloro/sosa que lo utiliza en su proceso; también productos como termómetros, varios tipos de interruptores y lámparas fluorescentes. Según información oficial ya no se extrae mercurio en México, aunque se dispone de datos sobre importación por un monto de 130 toneladas en los últimos tres años. El mercurio es un contaminante local y global por excelencia, la química ambiental correspondiente a este metal tóxico es muy compleja, dadas sus propiedades; se evapora a temperatura ambiente y sus átomos viajan lejos; al ser depositado en los cuerpos de agua se transforma en mercurio orgánico (metil-mercurio) por mecanismos aeróbicos o anaeróbicos, es así como se contaminan, entre otros, los pescados y mariscos. Otra forma de ingreso de mercurio es por inhalación de los vapores emitidos por el mercurio en su forma metálica en ambientes cerrados. El metil-mercurio puede atravesar la placenta, acumularse y provocar daño en el cerebro y en los tejidos de los neonatos, quienes son especialmente sensibles a esta sustancia. También puede existir exposición al mercurio a través de la leche materna; en este caso, los efectos pueden provocar problemas de desarrollo, retrasos en el andar, en el habla o mental, falta de coordinación, ceguera y convulsiones. En adultos, la exposición constante a través de la ingesta de alimentos contaminados, pescados por lo general, puede provocar cambios de personalidad, pérdida de visión, memoria o coordinación, sordera o problemas en los riñones y pulmones. La Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) de la Organización Mundial de la Salud (OMS), considera al metil-mercurio y sus compuestos como posiblemente carcinogénico en seres humanos (Grupo 2B). El metil-mercurio, que es la forma más tóxica, se acumula en los tejidos de peces; las especies de mayor tamaño y de mayor edad tienden a concentrar niveles de mercurio más altos.

Manganeso: dado que el mayor volumen consumido de pilas son alcalinas y C-Zn (aproximadamente el 76% del consumo total de pilas y baterías), el óxido de manganeso contenido en ellas es el contaminante que en mayor volumen se ha liberado al medio ambiente en las últimas cuatro décadas, lo que representa aproximadamente 145,917 toneladas. Respecto de los efectos adversos ocasionados en la salud humana por esta sustancia, diversos estudios sugieren efectos neurológicos serios por exposición oral al manganeso. Por ejemplo, un estudio hecho por la OMS reporta que en 1981 se notificó una intoxicación en una comunidad de Japón debido a que cerca de un pozo de agua se enterraron aproximadamente 400 piezas de pilas a una distancia aproximada de dos metros, lo cual provocó 16 casos de envenenamiento, tres fueron fatales (incluyendo un suicidio); los niveles de manganeso detectados en el agua de

ese pozo fueron de 14 miligramos por litro, mientras que en otros dos pozos los niveles alcanzaron 8 y 11 miligramos por litro. Los sujetos de la comunidad exhibieron desórdenes de tipo psicológico y neurológico asociados a la intoxicación.