

ELECTROQUIMIENERGÍA Y COMPUESTOS MONOCARBONADOS: Una Revisión

ELECTROCHEMENERGY AND MONOCARBON COMPOUNDS: A Review

**Olga P. Márquez¹, Yris Martínez¹, Yanpiero Balladores³, Keyla Márquez²,
Elkis Weinhold¹, Jairo Márquez P.¹**

Universidad de Los Andes, ¹Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Laboratorio de Electroquímica, ²Facultad de Ingeniería, Núcleo Universitario Alberto Adriani. Mérida-5145-Venezuela.

³Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Laboratorio de Materiales para Tecnologías Emergentes (LaMTE). Centro de Investigación y Tecnología de Materiales (CITcMa).

San Antonio de Los Altos -1020A- Venezuela
olgamq@gmail.com

Recibido: 05-08-2021

Aceptado: 24-10-2021

Resumen

Es importante la actividad que se desarrolla actualmente en Celdas de Combustible, con variadas contribuciones y desarrollos adicionales por realizar, en relación al control climático. Se resalta en particular las celdas, protónica de membrana polimérica (PMFC) y La celda de combustible de metanol directo (DMFC), por producción de hidrógeno, suministro de energía y contribución al transporte vehicular. Son variadas las vías de producción de hidrógeno y electricidad por vía electroquímica (EQ), algunas de ellas son tratadas en este trabajo y se discute sobre la posibilidad de utilización de compuestos monocarbonados y sus ciclos de regeneración, como fuentes relativamente muy poco contaminantes, en procesos de suministro de energía para uso social.

Palabras clave: Electroquimienergía, compuestos monocarbonados, producción de energía, almacenaje de energía, celdas de combustible, energía limpia

Abstract

The activity currently being developed in Fuel Cells is important, regarding several contributions and additional developments to be carried out, related to climate control. The polymeric membrane proton fuel cells (PMFC) and the direct methanol fuel cell (DMFC) stand out in particular, for hydrogen production, energy supply and contribution to vehicular transport. There are several ways of hydrogen and electricity production via electrochemistry (EQ), some of them are discussed in this work, as well as the possibility of using monocarbon compounds and their regeneration cycles, as relatively low polluting sources, in energy supply processes for social.

Key words: Electrochemenergy, monocarbon compounds, energy production, energy storage, fuel cells, clean energy.

Olga P Márquez: PhD. en Electroquímica (Universidad de Southampton, Inglaterra); Licenciatura en Química Universidad de Los Andes ULA, email: olgamq@gmail.com. **Yris Martínez:** Doctora. en Química Aplicada, opción Electroquímica ULA. Licenciatura en Química ULA, email: ymartin62@gmail.com. **Yanpiero Balladores:** Doctor en Electroquímica Fundamental y Aplicada ULA. Licenciado en Química ULA. Investigador en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC, Caracas, Venezuela), email: yanpiero@gmail.com. **Keyla Márquez:** MSc. En Electroquímica Fundamental y Aplicada ULA. Ingeniero Industrial IUP Santiago Mariño, email: keylaenator@gmail.com. **Elkis Weinhold:** Doctora. en Química Aplicada, opción Electroquímica ULA. Licenciatura en Química ULA, email: elkisweinhold@gmail.com. **Jairo Márquez P:** PhD. en Electroquímica (Universidad de Southampton Inglaterra), Licenciatura en Química ULA, email: jokkmarquez82@gmail.com

Introducción

Sistemas de suministro de energía con pequeño porcentaje de carbono (pocas emisiones) reducen relativa y sustancialmente la contaminación general, más aún, si se ha logrado la eliminación y/o el almacenamiento, de productos carbonados, así como la regeneración de los materiales de partida. Para el sector esencial de la energía, la mitigación y concentración de gases de efecto invernadero y su control, se caracterizan por la incorporación de tecnologías eficientes para el uso y suministro de energía, con poco o ningún carbono. Las opciones tecnológicas no permiten por sí solas lograr las reducciones de emisión necesarias y se trata de lograr condiciones óptimas para un control perdurable, de emisiones de gases de efecto invernadero y control climático.

Para cubrir las necesidades energéticas de la vida moderna, se utiliza la quema de combustibles fósiles, la agricultura, el uso de la tierra y otras actividades que provocan el cambio climático¹. El cambio climático, no sólo conlleva un aumento de las temperaturas, sino también fenómenos meteorológicos extremos, la elevación del nivel del mar y cambios en las poblaciones y los hábitats de flora y fauna silvestres, entre otros efectos. Existe consenso de que el calentamiento global es mayoritariamente causado por el ser humano (Grupo Intergubernamental para el Cambio Climático, IPCC^{2,3}). Factores determinantes son, la quema de combustibles fósiles — carbón, gas y petróleo— que ha aumentado la concentración de gases de efecto invernadero en nuestra atmósfera, sumado a otras actividades como la tala con fines agrícolas, el sector industrial y las deforestaciones.

En este artículo trataremos en particular, el papel actual que corresponde a los compuestos monocarbonados, en las actuales condiciones, y ello, que implica en cuanto a su manejo y procesamiento, en el campo de la electroquimienergía^{4,5}.

Contribuciones de la electroquimienergía (EQ.E):

La EQ.E se encuentra en las ciencias naturales, de la salud, ingenierías, educación, militar, y en tecnología^{6,7}. El cambio climático en proceso, nos obliga a tomar medidas urgentes que puedan contribuir favorablemente a una sana estabilización del sistema y, en ese sentido, en el área tecno-científica, se plantea una actividad más abundante y avanzada en investigación, desarrollos, diseños, modificaciones, construcción, escalados, mejoras, etc. En ese sentido, se señalan algunos tópicos de requerida atención, dentro de la problemática señalada:

1-Reducción electroquímica del dióxido de carbono a metanol y químicos livianos. Incorporación en procesos cíclicos de obtención de energía.

2-Reacción redox del par CH₄-CO₂ para producción de metanol y uso en celda de combustible, con posterior regeneración de reactivos (proceso cíclico).

3-Celdas de combustible para vehículos eléctricos (PMFC, DMFC). Sistemas regenerativos.

4-Electrólisis fotoelectroquímica en celdas Tandem sensibilizadas y optimizadas para producción de hidrógeno.

5-Preparación de materiales nanoestructurados con propiedades ópticas, magnéticas y catalíticas.

Ciclo redox de monocarbonados

La figura 1 muestra el ciclo redox de compuestos monocarbonados y un par de ejemplos de eficiencia de conversión a CO₂, con producción de energía^{8,9}. En lo que resta del artículo se tratará particularmente los compuestos CO₂, CH₃OH y CH₄, y el papel de los mismos en suministro de energía (eléctrica y H₂) para consumo social.

La tabla 1 muestra el factor de impacto ambiental del hidrógeno y combustibles fósiles, ello muestra la relación contenido de hidrógeno/carbono vs impacto ambiental:

$$\left(\frac{\text{menor contenido de carbono}}{\text{mayor contenido de hidrógeno}} \Rightarrow \text{Menor contaminación} \right)$$



Figura 1.- Ciclo redox de compuestos monocarbonados

Fuentes y oxidación del metano (CH₄)

El metano es un hidrocarburo, componente mayoritario del gas natural, es también un poderoso agente de efecto invernadero. Gran cantidad de metano es emitido permanentemente a la atmósfera. Alrededor del 60 por ciento de las emisiones mundiales de metano proceden de fuentes antropogénicas (generadas por el hombre): vertederos, minas, industria, operaciones con gas y petróleo y la agricultura. El resto (figura 2) proviene de fuentes naturales, mayormente tierras pantanosas, hidratos de gas (sólidos cristalinos formados por moléculas de metano, cada una de ellas rodeada de moléculas de agua). El gas natural es una mezcla de metano (95%), etano (2%) y una pequeña cantidad de propano, dióxido de carbono y otros gases.

Tabla1.- Factor de contenido de hidrógeno (HCF), Factor de descontaminación (FD), Factor de impacto ambiental (FIA) de hidrógeno y otros combustibles fósiles¹⁰.

Combustible	Carbón	Petróleo	Gas Natural	Hidrógeno
HFC o FD	0	0,1	0,38	1,0
FIA	3,35	3,2	2,5	0,0

En la oxidación selectiva de metano a metanol, la eficiencia del proceso es afectada por el tipo de reactor, la temperatura, concentración de alimentación del oxígeno y el flujo de gas¹². También hay que tener en cuenta, la dificultad en activar el metano, aparición de reacciones competitivas, evitar la posterior oxidación del metanol. En cuanto a la incorporación de electrocatalizadores, podemos mencionar el MoO₃-SiO₂ a 600°C y 1 atm, en ese caso la selectividad a metanol fue

del 46,8% en mol, con una conversión de CH₄ de 16,4% en moles¹³. Se evaluaron mezclas gaseosas que contenían CH₄, N₂O, H₂O(v), He, en proporción molar 1,0/2,0/4,7/2,3 con catalizador V₂O₅-SiO₂ a temperaturas de 450, 500 y 550 °C; los valores de selectividad a metanol fueron 0,0%, 39,8% y 85,6% en mol, con conversiones de metano de 0,5%, 1,6% y 11,2% en mol, respectivamente. Con el catalizador MoO₃-SiO₂ y con mezcla de gases CH₄, N₂O, H₂O(v) y He, en relaciones 1,0/2,0/1,67/5,33 a 550°C y 1 atm, la selectividad a metanol fue de 79,6% en mol con una conversión a CH₄ de 26,7%.

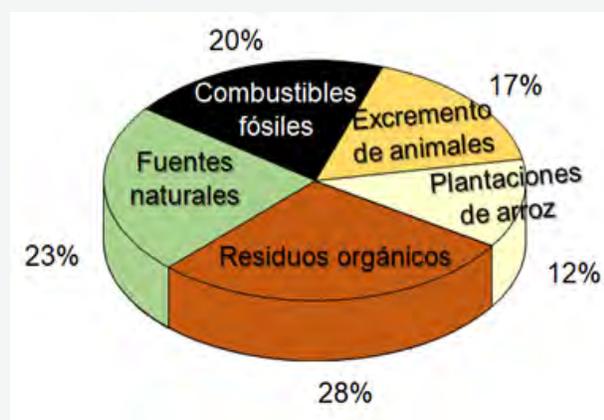


Figura 2.- Algunas fuentes de producción de metano¹¹

En otra investigación se empleó gas natural y metano puro, con 5,0% v/v de oxígeno en la mezcla de reacción a 450°C y 50 atm; la selectividad a metanol fue del 85% en moles, con una conversión en gas natural de 10,0% en mol y 80,0% de selectividad a metanol cuando se empleó metano puro, con nivel de conversión del 10%. Se destaca como mayor valor de conversión del metano de 47,1%¹⁴ en moles y como mayor valor de selectividad a metanol de 88,4%.

Se estudiaron propiedades fotocatalíticas de estructuras de óxidos de vanadio para la oxidación parcial de metano a metanol. Se prepararon tamices moleculares mesoporosos contentivos de vanadio bajo condiciones ácidas y básicas, empleando el método de impregnación. Los resultados más relevantes muestran selectividad para el metanol de 87,6% en mol con una conversión de metano del 6,0% y 88,4% en moles, a metanol con conversión de metano de 7,1% en moles¹⁵.

En el proceso de oxidación selectiva de metano a metanol¹¹ se debe considerar, para la síntesis de material catalítico:

- El tipo de soporte
- El componente activo (metal, óxido metálico)
- La Energía de enlace entre los componentes del Electrocatalizador, reactivos y productos
- La Cantidad de carga del componente activo
- El tiempo de envejecimiento
- La temperatura de calcinación

Para el proceso de obtención del alcohol de manera directa se debe considerar las siguientes variables:

- La proporción de los gases de alimentación
- El material del reactor
- La velocidad espacial horaria
- La temperatura de reacción
- La presión de trabajo.

Las tablas 2 y 3 presentan resultados de la oxidación de metano a metanol y el efecto de la temperatura y naturaleza de electrodos, en cuanto a selectividad y rendimiento.

Tabla 2.- oxidación del metano, con modificaciones¹⁶ (distintos electrodos y temperatura)

$CH_4 + H_2O(g) \xrightarrow{1000^\circ C} C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6 + \text{subproductos}$	
$CH_4(g) + H_2O(g) \xrightarrow{Ni, \Delta} CO(g) + 3H_2(g)$	49,3 Kcal/mol
$CO(g) + 2H_2(g) \xrightarrow{Zeolita, \Delta} CH_3OH(g)$	-21,7 Kcal/mol
$nCO(g) + (2n + 1)H_2(g) \xrightarrow{Fe, \Delta} C_nH_{2n+2} + nH_2O(g)$	-50 Kcal/mol
$CH_4 + O_2 + N_2 (90:3:7) \xrightarrow{430^\circ C} MeOH(51\%) + CH_2O(4,1\%) + \text{subproductos}$	
$CH_4 + \frac{1}{2}O_2 (20:1) \xrightarrow{450^\circ C, 50 \text{ atm}} CH_3OH (81\%)$	

Tabla 3.- oxidación del metano, con modificaciones (sobre Fe Y Pd)¹⁷

$CH_4 \xrightarrow{Fe_2(SO_4)_3, pH < 3, \tau_{amb}} CH_3OH \quad (92\% \text{ de selectividad}) + P$
$CH_4 \xrightarrow{Pd, Pd/Ag, C, P, (30-60) \text{ atm}} CH_3OH \quad (92\% \text{ de selectividad})$
$CH_4 + 6OH^- \xrightarrow{APd/H^+} CH_3OH + 5H_2O + 6e^-$
$2CO \xrightarrow{6Pd/H^+, -H_2O} CH_3CH=O \xrightarrow{2Pd/H^+} CH_3CH_2OH$
$2CH_4 + 13OH^- \xrightarrow{9Pd/H^+} CH_3CH_2OH + 12H_2O + 13e^-$

Fuentes y reducción del dióxido de carbono (CO₂)

Las principales fuentes de producción del dióxido de carbono son:

- Respiración
- Degradación de Biomasa
- Emisiones Naturales
- Actividad humana (combustión de carbón, petróleo, Gas natural)
- Tala y Quema de bosques
- Producción Industrial (amoníaco, óxido de etileno, cemento, plantas de energía, entre otros).

Por otra parte, hay un alto consumo de CO₂ en:

- Fotosíntesis
- Industria de alimentos y bebidas
- Refrigeración
- Extintores de incendios
- Gas propulsor
- Gas inerte
- Tratamiento de agua,
- Síntesis y transformaciones química (ej. reducción EQ a otros monocarbonados, síntesis de alcoholes, hidrocarburos, formamidas, etc.).

La tabla IV presenta potenciales estándar de reducción para el dióxido de carbono en medio ácido, a diferentes productos.

Tabla 4.- Potenciales estándar de reacción para el dióxido de carbono en medio ácido¹⁸

Reacción	$\epsilon^0(V) \text{ vs ERH}$
$CO_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow HCOOH(ac)$	-0,199
$CO_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow CO + H_2O$	-0,106
$2CO_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow C_2H_2O_4$	-0,475
$CO_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow HCHO + H_2O$	-0,166
$CO_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow CH_3OH + H_2O$	0,066
$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow CH_{4(g)} + 2H_2O$	0,169

La electroreducción del CO₂ presenta las siguientes características:

- ▶ Es generalmente llevada a cabo a temperatura ambiente
- ▶ Control en el consumo de reactivos y reutilización en algunos casos
- ▶ Permite la utilización de energías renovables
- ▶ La reacción puede ser específica en la generación del producto deseado por selección de parámetros (ej. electrocatalizador, electrolito, potencial aplicado, etc.)
- ▶ Las celdas electroquímicas utilizadas suelen ser compactas y modulares, de fácil manejo y uso.

Es posible también realizar electroreducción a altas presiones, en soluciones no acuosas, sobre distintos electrodos (metálicos, semiconductores, modificados, presencia de electrocatalizadores)¹⁸.

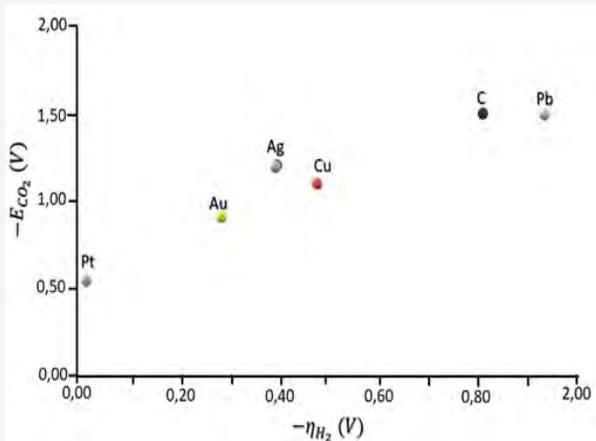


Figura 3.- Efecto de la naturaleza del material del electrodo en Potenciales de reducción del CO₂¹⁹

Las tablas V, presenta la formación de productos sobre electrodos de cobre y condiciones varias de reducción y la tabla VI nos presenta la eficiencia Faradáica, en porcentaje, sobre platino policristalino; los resultados en metano, metanol y etanol son relativamente altos.

Otros trabajos presentan resultados sobre la oxidación del CO₂ usando otros electrodos²³⁻²⁵.

La figura 4 ilustra el denominado ciclo del

dióxido de carbono, que se resume así: el CO₂ presente en la naturaleza es utilizado en el proceso de fotosíntesis para producción de biomasa, que en el denominado ciclo biosférico restituye el CO₂, o termina formando materiales fósiles. La biomasa es también productora de diversos compuestos químicos y a ello se suma la producción antropogénica de productos químicos. Estos productos químicos, sumado al acceso a materiales fósiles, son utilizados en producción de energía para satisfacción de requerimientos sociales y CO₂ es regenerado para un nuevo inicio del ciclo. El problema aparece cuando el contenido de CO₂ presente en el ambiente, supera la capacidad de este por su consumo, o hay una creciente producción de otros contaminantes a partir del dióxido de carbono, y en consecuencia se presentan problemas de creciente acumulación de contaminantes.

Tabla 5.- Formación de Productos, por Reducción Electroquímica del CO₂, sobre electrodos de cobre y condiciones diferentes^{20,21}

<i>Cu/Sn, Cu/Zn</i> → <i>HCOOH, CO, CH₃OH</i>
<i>Bi/Carbón vítreo (CV)</i> → <i>HCOOH</i>
<i>Cu/Nafion 117</i> → <i>C₂H₄</i>
<i>Cu/Selemion AMV</i> → <i>HCOOH</i>
<i>CV⁺ (activación anódica)</i> → <i>H_yC_x, CO, CH₃OH</i>
<i>Cu⁺ (pulsos)</i> → <i>H_yC_x</i>
<i>Cu⁺/Acero (pulsos)</i> → <i>H_yC_x, CH₃OH</i>
<i>Cu⁺/Cu (pulsos)</i> → <i>H_yC_x, CH₃OH</i>

Fuente: *Laboratorio de Electroquímica - ULA

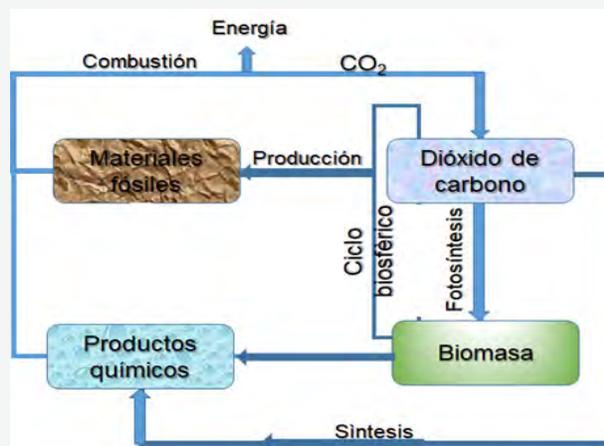


Figura 4.- Ciclo del dióxido de carbono

Tabla 6.- Eficiencia Faradáica (%) para reducción de CO₂ sobre Pt policristalino y distintos medios electrolíticos²²

Eficiencia Faradáica (%) para reducción de CO₂ sobre Pt policristalino

Productos \ Electrolito	CH ₄	C ₂ H ₆	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₃ H ₆ O	HCO	HCOOH	H ₂	CO	η_{org}	η_{total}
LiCO ₄	32,14		18,56	10,67		1,36	0,05	11,55	21,39	84,27	95,82
(NH ₄ COO) ₂	9,97	33,54	7,95	15,56			0,02	6,38	4,13	71,17	77,55
KHCO ₃	65,96							2,93	32,39	98,25	101,10
KOH	1,25		11,33	20,77	5,18	0,22	0,03	2,35	47,09	90,87	93,22

Fuentes y oxido-reducción del metanol (CH₃OH)

El metanol presenta las siguientes características en su utilización en la DMFC:

- ▶ Fácil de manipular
- ▶ Fácil de transportar
- ▶ Fácil de almacenar
- ▶ De relativamente baja toxicidad
- ▶ Buen almacenador de hidrógeno
- ▶ Buen almacenador de energía
- ▶ Alta densidad de energía (orden de 1kWh/ Kg)

La DMFC (Direct methanol fuel cell) - Utiliza el mismo esquema de construcción que la PEMFC.

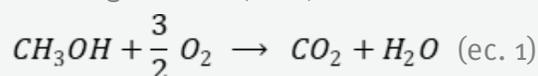
Tiene la ventaja de:

- ▶ El combustible líquido (metanol) es fácil de almacenar y transportar
- ▶ No hay necesidad de reformar el combustible a gas hidrógeno

▶ Se desarrolla para usar en aparatos electrónicos portátiles

▶ Necesita más cantidad de catalizador (Pt-Ru) que las celdas PEMFC.

La reacción global es (ec. 1):



El metanol se forma también del gas de síntesis (ec. 2):



Son variados los trabajos científicos en preparación de catalizadores para la oxidación del metanol e incrementar su eficiencia, algunos son reportados en²⁶. Los valores máximos de corriente y mínimo potencial de oxidación se obtienen sobre el electrodo PtRuRh.

En el ánodo de una celda de combustible, además de tener lugar la oxidación de hidrógeno, puede ocurrir la oxidación

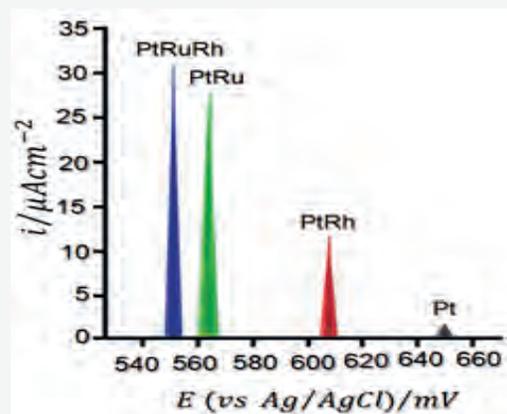
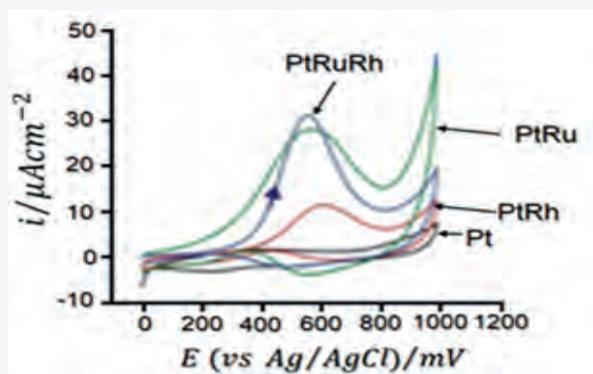
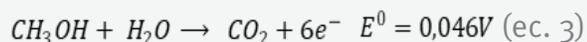


Figura 5.- Oxidación de metanol sobre electrodos de platino modificados⁴

del metanol. Hay pocos materiales para electrodos que sean capaces de adsorber el metanol y oxidarlo en medio ácido a potenciales bajos. Los materiales basados en platino tienen alta estabilidad y actividad catalítica.

La reacción de oxidación del metanol es la siguiente (ec. 3):



La tabla 7 muestra las reacciones involucradas en celdas de combustible, con sus correspondientes potenciales y eficiencias experimentales.

Tabla 7.- Potencial y eficiencia en energía para algunas reacciones en celdas de combustible

Reacción	E(V)	E _{eff} (%)
$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	1,229	83
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	1,060	92
$\text{CH}_3\text{OH} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	1,222	93
$\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	1,333	91

Hidrógeno reactivo y combustible

El hidrógeno usado en las celdas de combustible puede ser producido a través del reformado de gas natural o la electrólisis del agua a partir de energía obtenida de fuentes no renovables. El reto actual es hacer rentable su obtención a partir de fuentes renovables como la energía eólica o la solar fotovoltaica o térmica²⁷. Su implantación a gran escala, si se consiguen reducir los costos, podría ayudar a reducir la dependencia de la sociedad actual de los combustibles fósiles²⁸.

El hidrógeno es un combustible mundialmente utilizado en la industria (química y petroquímica) y como fuente energética en sectores variados (motores, turbinas a gas, celdas de combustible, etc.). Actualmente tiene un gran protagonismo como alternativa energética al uso de

energías fósiles, pues su origen puede provenir de energías renovables y sus perspectivas de uso²⁹. El hidrógeno, como gas renovable, no contaminante, almacenable y transportable, y el metano renovable, constituyen clara alternativa, en la actual transición energética deseada y en progreso.

El hidrógeno puede alimentar vehículos, como carros, autobuses, trenes y aviones, ya sea a través de las celdas de combustible o mediante quema directa^{30,31}. La quema de hidrógeno también puede generar calor libre de carbono para su uso en fábricas de acero, plantas de cemento y otras industrias. Y el hidrógeno “verde” puede sustituir a sus homólogos, siendo utilizado como materia prima en casi todo, desde las refinerías hasta las plantas de fertilizantes, reduciendo las emisiones de CO₂. Algunos entornos industriales, como las fábricas de acero y plantas químicas, también pueden utilizar el oxígeno generado como subproducto. El hidrógeno también se puede utilizar para almacenar energía de las centrales renovables, que luego se puede convertir de nuevo en electricidad y alimentar a la red si el viento amaina, si aparecen nubes o si aumenta la demanda.

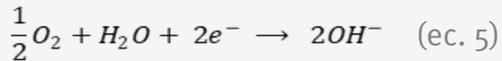
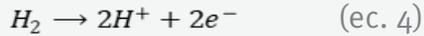
Actividad Electroquímica en hidrógeno

Entre las principales actividades se pueden destacar:

- Generación de hidrógeno en celda fotoelectroquímica de alto rendimiento en condiciones no contaminantes
- Fotólisis del agua sobre electrodos semiconductores, sintetizados vía electroquímica y de alto rendimiento
- Actividad en celdas Tandem sensibilizadas para electrólisis de agua por luz visible.
- Actividad en nanoelectroquímica y nanoelectrocatalisis y su incorporación en procesos electroquimi-energéticos.

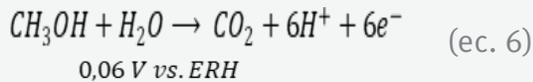
Algunos ejemplos de celdas de combustible son expresados por las reacciones electródicas (ecs. 4-7):

(a) Celda de combustible con membrana de intercambio protónico



Con una eficiencia práctica en energía, de 40% para una batería de 4,8 MW.

(b) Celda de combustible de metanol directo



Con una eficiencia práctica en energía, de 97% para una batería de 6,1 MW.

Ciclo con monocarbonados-procesos regenerativos con energías no renovables en celdas de combustible

La celda de Combustible de Metanol (DMFC):

Utiliza una membrana polimérica como electrolito. El ánodo catalizador extrae el hidrógeno del metanol líquido, eliminando la necesidad de un reformador de combustible.

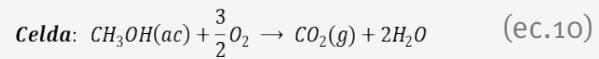
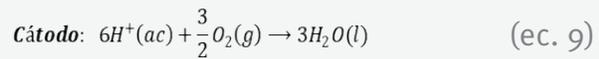
La eficiencia es del orden del 40% y típicamente opera entre 50 y 100°C. La celda es atractiva para aplicaciones pequeñas y medianas, celulares, laptops, etc. Con el incremento en la temperatura se obtiene eficiencias más altas (ecs. 8- 10).

Conclusiones

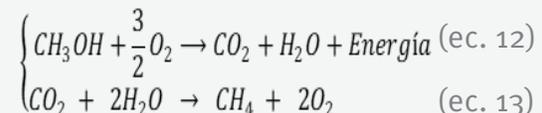
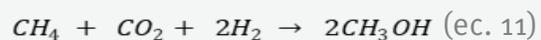
La alta eficiencia de conversión (> 50%) de las celdas de combustible permite un aprovechamiento máximo de la energía química contenida en los combustibles (hidrógeno, CH₄, CH₃OH, gas natural, biocombustibles, etc.), asegurando de este modo el uso racional de los recursos. Hay condiciones de reacción que estudiar y que cumplir (ej. diseño, montaje, seguridad, temperatura de trabajo, pureza de materiales, catalizadores, almacenamiento, etc.).

Lograr el abastecimiento permanente de energía, con poca o ninguna contaminación, con acceso fácil y garantizado, exige dedicación, infraestructura, investigación, ingeniería para obtener resultados exitosos, de hecho, son muchos los ya existentes, otros en desarrollo y las perspectivas de éxito futuro se perciben.

Agradecimientos: Al CDCHTA, al FONACIT, al convenio BID-CONICIT-ULA, por su soporte económico a lo largo de la actividad académica de los autores. A la Facultad de Ciencias de la ULA por hacer posible el desarrollo de esas actividades académicas en su seno.



La figura 6 resume, el mecanismo de suministro de energía de una celda de combustible de metanol, producido in situ por reacción redox CH₄ – CO₂, en un proceso cíclico regenerativo. Parte del CO₂ producido, es reutilizado como reactivo y el resto regenera el CH₄ reactivo para ser también reutilizado (ecs. 11-14).



Luego

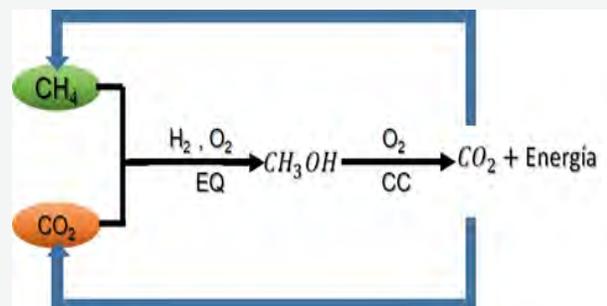
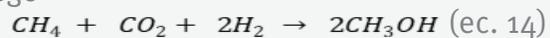


Figura 6.- Obtención de Energía desde un ciclo monocarbonado

Referencias

- 1.- Martens WJM, Slooff R, Jackson EK. (1998). El cambio climático, la salud humana y el desarrollo sostenible. *Rev Panam Salud Publica/Pan Am J Public Health* 4(2)100-105.
- 2.- Díaz Cordero G. (2012). El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad*, vol. XXXVII, (2) 227-240.
- 3.- Informe IPCC. Cambio Climático (2021). Bases Físicas.
- 4.- Márquez OP, Salazar E, Márquez J, Martínez Y, Manfredy L. (2016). Evaluación de nanopartículas de Pt/Rh/Ru depositadas sobre carbón vítreo como catalizador para la electrooxidación de metanol. *Equilibrium* 1:39-63.
- 5.- Márquez OP, Mubita T, Márquez J. (2012). Preparación de electrocatalizadores Ru/Pd/Mo para La oxidación de moléculas orgánicas pequeñas. Editorial Académica Española. Alemania.
- 6.- Márquez J, Márquez OP. (2018). Electroquimienergía. *Revista de Ingeniería y Tecnología Educativa (RITE)*. ULA-Mérida. Venezuela. 1(2)9-26. <http://erevistas.saber.ula.ve/rite>.
- 7.- Márquez OP, Márquez J. (2018). Solid Catalysts for Renewable Energy production. Chapter 11 in *Synthesis of electrocatalysts for electrochemistry in energy*. IGI-global, (S González & F Imbert, Eds.), PA, USA.
- 8.- Sathrum AJ. (2011). PhD thesis: Solar Energy Storage through the Homogeneous Electrocatalytic Reduction of Carbon Dioxide: Photoelectrochemical and Photovoltaic Approaches. University of California, USA.
- 9.- Casadevall C, Call A, Codolá Z, Acuna-Pares F, Lloret-Fillol J. (2016). Catalizadores para la conversión de energía solar en enlaces químicos. *An. Quím.* 112(3), 133-141.
- 10.- Dincer I, Acar C. (2015). Review and Evaluation of Hydrogen Production Methods for Better Sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40,11094-11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>.
- 11.- Cortés-Ortiz WG, Guerrero-Fajardo CA. (2018). oxidación catalítica selectiva para la conversión de metano a metanol: una revisión. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 28 (1), 45-71.
- 12.- Da Silva MJ. (2016). "Synthesis of methanol from methane : Challenges and advances on the multi-step (syngas) and one-step routes (DMTM)," *Fuel Processing Technology Journal*, 145, 42-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.01.023>.
- 13.- Liu RS, Iwamoto M, Lunsford JH. (1982). "Partial oxidation of methane by nitrous oxide over molybdenum oxide supported on silica," *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*.1-78. DOI: <https://doi.org/10.1039/c39820000078>.
- 14.- Geisz J, France R, Schulte K, Steiner M, Norman A, Guthrey H, Young M, Song T, Moriarty T. (2020). Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 suns concentration. *Nature Energy* (5) 326-335.
- 15.- Hu Y, Anpo M, Wei C. (2013) "Effect of the local structures of V-oxides in MCM-41 on the photocatalytic properties for the partial oxidation of methane to methanol," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 264, 48-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.05.011>.

org/10.1016/j.jphoto-chem.2013.05.005.

- 16.- Crabtree RH .(1995). Aspects of Methane chemistry. Chem. Rev., 95(4) 987-1007.
- 17.- Yepez OJ. (1995). Estudios sobre la oxidación electroquímica de especies de un carbono. Tesis de Doctorado. Universidad Simón Bolívar, Caracas – Venezuela.
- 18.- Reyes Pérez EM. (2018). Conversión de dióxido de carbono (CO₂) a productos químicos de valor agregado mediante reducción electroquímica. Tesis de grado, Toluca, Mejioco.
- 19.- Ortíz R, Márquez OP, Márquez J, Gutiérrez C. (1995). FTIR spectroscopy study of the Electrochemical Reduction of CO₂ on Various Metal Electrodes in Methanol. J. Electroanal. Chem., 390, 99-107.
- 20.- Martínez Y, Hernández R, Borrás C, Márquez OP, Reynaldo O, Choy M, Márquez J. (2001). Reducción Electroquímica del dióxido de carbono sobre electrodos modificados con partículas metálicas. Universidad, Ciencia y Tecnología, 5(18), 59-64.
- 21.- Pérez B, Márquez J, Choy M, Márquez OP, Ortíz R. (2000). Estudios de deposición de cobre sobre acero para la reducción electroquímica de CO₂. CIENCIA, 8 (2), 226.
- 22.- Brisar GM, Camargo APM, Nart FC, Iwasita T. (2001). On Line mass spectrometry investigation of the reduction of carbon dioxide in acidic media on polycrystalline Pt. Electrochemistry communications. 3:603-607.
- 23.- Hernández RM, Márquez J, Márquez OP, Choy M, Ovalles C, García JJ, Scharifker B. (1999). Reduction of Carbon Dioxide on Modified Glassy Carbon Electrodes. Journal of The Electrochemical Society, 146 (11) 4131-4136.
- 24.- Cabrera W, Márquez J, Márquez OP, Choy M, Garnica JM, Ovalles C, García JJ, Scharifker B. (1995). Reducción Electroquímica de CO₂ sobre electrodo de acero, Ed. Sociedad Venezolana de Electroquímica, INTEVEP, 3, 41 52.
- 25.- Matheus P, Márquez J, Márquez OP, Choy M, Garnica JM, Ovalles C, García JJ, Scharifker B. (1995). Reducción de Dióxido de Carbono sobre Platino a bajos sobrepotenciales., Ed. Sociedad Venezolana de Electroquímica, INTEVEP, 3, 53-60.
- 26.- Mubita T, Márquez OP, Márquez J, Martínez Y, Mora AE. (2014). Síntesis Electroquímica y Evaluación Micrográfica de Electrocatalizadores Ru/Pd/Mo/CV. Rev. Univ. Sci. Tech. 18(71) 1-8.
- 27.- Dincer I. (2012). Green methods for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. 37, 1954-1971.
- 28.- Márquez OP, Márquez J. (2020). Hidrógeno vía Electroquímica, Cap 16. Una Educación Universitaria de Calidad (Tomo II). Publicación Vicerrectorado Académico ULA. ISBN 978-980-11-1858-9. ULA-Mérida-Venezuela.
- 29.- Márquez J, Márquez OP, Weinhold E, Márquez K. 2021. Hidrógeno desde la energía Solar (con Electroquímica). Una revisión. Revista de Ingeniería y Tecnología Educativa (RITE). Revista de Ingeniería y Tecnología Educativa (RITE). 4(1)11-27. <http://erevistas.saber.ula.ve/rite>
- 30.- Peter Fairley. 2021. TR10: Hidrógeno verde capaz de competir con los combustibles

fósiles. MIT Technology Review.

- 31.- Barreras F, Lozano A. (2012). Hidrógeno: Pilas de Combustible de tipo PEM. Universidad de Zaragoza, España. www.energia.es.