

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5075

Celda de combustible SOFC: uso de biogás de rellenos sanitarios para la generación de energía eléctrica

José Juan Alvarado Flores

jjalvarado@umich.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5756-0960>

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, Michoacán, México

María Liliana Ávalos Rodríguez

lrodriguez@ciga.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8580-5873>

Centro de Investigación en Geografía Ambiental
Universidad Nacional Autónoma de México
Morelia, Michoacán, México

Jorge Víctor Alcaraz Vera

jorge.alcaraz@umich.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9115-5694>

Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, Michoacán, México

Santiago José Guevara Martínez

sj.guemtz.89@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5629-2864>

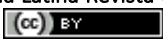
Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías
Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco, México

Correspondencia: jjalvarado@umich.mx

Artículo recibido 25 enero 2023 Aceptado para publicación: 25 febrero 2023

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar: Alvarado Flores, J. J., Ávalos Rodríguez, M. L., Alcaraz Vera, J. V., & Guevara Martínez, S. J. (2023). Celda de combustible SOFC: uso de biogás de rellenos sanitarios para la generación de energía eléctrica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9516-9535. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5075

RESUMEN

En este estudio, se analizó como afecta el grave problema de la contaminación actual en agua, aire y suelo debido a actividades antropogénicas de la ciudad de Morelia, Michoacán. Se ha realizado un análisis del estado actual de la tecnología de celdas de combustible, identificándose a la celda de combustible de óxido sólido (SOFC), como un excelente candidato. Esto permitiría determinar la posibilidad de utilizar una celda SOFC como generador de energía eléctrica a partir de biogás compuesto principalmente de metano y bióxido de carbono como combustible. Al generar energía eléctrica a partir de estos gases que provienen de rellenos sanitarios, se pretende establecer un proceso de optimización energética y sustentable.

Palabras clave: *desarrollo energético sustentable; biogás; celda de combustible.*

SOFC fuel cell: use of landfill biogas for electricity generation in Morelia, Michoacán

ABSTRACT

In this study, it was analyzed how it affects the serious problem of current pollution in water, air and soil due to anthropogenic activities in the city of Morelia, Michoacán. An analysis of the current state of fuel cell technology has been carried out, identifying the solid oxide fuel cell (SOFC) as an excellent candidate. This would allow determining the possibility of using a SOFC as a generator of electric energy from biogas composed mainly of methane and carbon dioxide as fuel. By generating electricity from these gases that come from landfills, it is intended to establish an energy optimization and sustainable process.

Keywords: *sustainable energy development; biogas; fuel cell.*

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire, agua y suelo contribuye a la generación de enfermedades cardiovasculares y cáncer de pulmón (Künzli et al 2000, Pope III, 2000, Šrám et al 2005 y Schwela, 2000). Hasta 2007, el relleno sanitario de la ciudad de Morelia se mantenía como un tiradero a cielo abierto, a partir de diciembre de ese año entró en operación el Relleno Sanitario de Morelia, en el cual se contienen hasta el momento cerca de once millones de toneladas, sólo en una primera celda de doce que se planean realizar en el lugar. El relleno sanitario de Morelia es uno de los cinco que a nivel nacional cuentan con la certificación Internacional ISO 14001-2004, otorgada por la Operación del Servicio Público de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial, Regulación del Sitio Actual de Disposición Final, expedido por Tuv Rheinland of North America, Inc. El procedimiento que se lleva a cabo en el lugar consiste en excavar un pozo e instalar una geomembrana para evitar los lixiviados, que son las filtraciones por agua de lluvia de materiales solubles al subsuelo, para posteriormente depositar y compactar la basura dentro de este depósito; y al llenarse, aplican nuevamente tierra y una nueva geomembrana. A este relleno sanitario ingresan cerca de 1050 (mil 50) toneladas diarias de basura; por cada tonelada que ingresa, el gobierno municipal hace un pago a la concesionaria de 160 pesos, es decir, cada día se gasta alrededor de 168 mil pesos para la remoción de los desechos generados por los morelianos. Del total, el 60% de los desperdicios son orgánicos, el relleno sanitario procesa la basura suficiente con potencial de iniciar producción de biogás (formado principalmente de metano y bióxido de carbono).

Con el uso de la tecnología adecuada, como las celdas de combustible, para generar electricidad a partir de biogás, Morelia, estaría en condiciones de iluminar hasta 40 mil viviendas, en armonía con el medio ambiente (Cambio de Michoacán, 2016). El biogás, es uno de los más importantes recursos energéticos que se pueden obtener en rubros como la agricultura, ganadería, en la actividad rural y en vertederos de residuos sólidos urbanos por medio de la materia orgánica en general, utilizando el gas proveniente de los tubos de venteo (vertederos) o biodigestores. Este biogás debe ser tratado de forma adecuada para su correspondiente utilización según el tipo de celda de combustible que se decida utilizar para la generación de energía eléctrica.

2. CONTAMINACIÓN DEL SUELO EN MORELIA, MICHOACÁN

En los albores del siglo XXI, el país encara el reto derivado del alto grado de utilización de productos generados por las necesidades del mercado y la sociedad; la población urbana crece y se concentra más, al mismo tiempo que los hábitos de consumo tienden a generar más residuos. En el estado de Michoacán, se enfrentan a diario problemas de manejo y disposición final de residuos sólidos, utilizando los municipios para su manejo gran parte de sus recursos técnicos y económicos, mientras que para la disposición final no se otorga en la gran mayoría de los casos la atención debida, recurriéndose a tiraderos a cielo abierto con los consiguientes problemas de contaminación en la superficie.

Los efectos de una mala disposición de residuos no solo se reflejan en la contaminación del sustrato edáfico (suelo) donde se depositan, sino que llegan a afectar los acuíferos, muchos de los cuales representan las fuentes de abastecimiento de centros de población, lo que da lugar a graves problemas hacia la salud pública. Los contaminantes ambientales que entran en cuerpos de agua municipales, agrícolas e industriales pueden permanecer suspendidos en la columna de agua, ser absorbidos por la biodiversidad acuática, asentarse en la parte inferior e incorporarse a los sedimentos (Beg et al., 2001).

Entre los principales contaminantes, los metales pesados como el hierro, zinc y arsénico, han sido motivo de gran preocupación debido a su elevada toxicidad, persistencia y subsecuente acumulación en los suelos. Por lo tanto, es importante la evaluación de metales pesados en la superficie (Green y Páez, 2003).

Un ejemplo de la alta contaminación en Michoacán, es la cuenca de Cuitzeo, donde habitan más de un millón de personas, en la zona de mayor desarrollo industrial del estado y la agricultura en escala menor. No obstante, debido a los bajos recursos económicos, la generación de residuos rebasa la capacidad del ayuntamiento de Morelia para depositar de forma adecuada los residuos sólidos (Buenrostro y Israde, 2003). En febrero del 2008, se detectaron más de 150 vertederos clandestinos en las cercanías de tenencias y caminos rurales (Quadratín, 2015). Una de las principales limitantes en esta cuenca para ubicar sitios aptos para rellenos sanitarios es la geología del lugar, por el hecho que se encuentran rocas volcánicas fracturadas, depósitos fluvio-lacustres y aluviales, que constituyen factores negativos para ello. El acuífero superficial que pudiera ser afectado por los residuos está constituido por facies granulares o bien por andesitas

fracturadas en un esquema de fallas que configuran la morfología de las riveras del Lago de Cuitzeo, así como sus manantiales asociados.

Por otro lado, existe el desconocimiento respecto a las investigaciones y estudios previos necesarios para elegir un sitio que pueda ser destinado a la disposición final de los residuos sólidos en Morelia. Estos son entre otros factores, el contexto de las principales debilidades y carencias del municipio, lo cual da como resultado la existencia de tiraderos de desechos en alcantarillas, drenajes, cañadas, ríos y cuerpos de agua por mencionar algunos sitios utilizados para la eliminación de basuras, trayendo como consecuencia el enorme problema de contaminación ambiental en la ciudad y sus alrededores (León, 2008). Adicionalmente, se derivan varios efectos contaminantes de una gestión inadecuada de los residuos como fomentar la presencia de aceites, grasas y ácidos; con lo que se alteran las propiedades físicas, químicas y de fertilidad de los suelos.

Cabe mencionar que, en los tiraderos de basura, se tienen estratégicamente ubicados algunos pozos de ventilación para que no se formen bolsas de biogás que está formado principalmente por metano (CH_4). Con este sistema, el biogás es expulsado y se elimina el riesgo de incendios por las concentraciones gaseosas que tantos problemas de contaminación ocasionan. Sin embargo, este gas producido, puede ser una ventaja al reutilizarlo y dirigirlo adecuadamente a través de una celda de combustible (Kondaveeti et al., 2019).

2.1. CONSECUENCIAS EN LA SALUD DEBIDO A LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

Muchos productos, materiales tóxicos y actividades contaminan, en menor o mayor medida, a los suelos. Y este tipo de contaminación produce distintas consecuencias y efectos adversos sobre las personas y la naturaleza. Los mayores responsables de la contaminación del suelo son los plaguicidas, germicidas, fertilizantes, los desechos industriales, la lluvia ácida y las actividades mineras y metalúrgicas. Lo anterior provoca condiciones idóneas para la reducción de la fertilidad del suelo, aumento de la erosión del suelo, aumento de la pérdida de suelo y nutrientes, acumulación y deposición de sedimentos en los tanques de agua y embalses, así como la reducción gradual en el rendimiento del cultivo. Sin embargo, todavía se presenta un problema mayor. Estos contaminantes, ya sean orgánicos o inorgánicos, permanecen activos y enaltecen la contaminación propiciando graves problemas en la salud de la sociedad (Chávez y Castro 2000). Los principales efectos de la contaminación del suelo en la salud humana

(malformaciones neuronales, intestinales y cardíacas) se deben a la presencia de agroquímicos y metales pesados como arsénico, cadmio, plomo, mercurio y cianuro (Cevik et al, 2009). Hoy en día, se han propuesto diversos métodos para simular y cuantificar la reactividad de los metales pesados, así como sus las propiedades fisicoquímicas. Uno de los métodos más importantes, es la extracción química por medio de diversos agentes, resultando en fracciones de metales específicos que se definen operacionalmente (Gu et al, 2016).

3. USO DEL BIOGÁS EN CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA

Actualmente el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU), se realiza mediante rellenos sanitarios. En su mayoría, a través de la descomposición anaeróbica se transforman los RSU. La contaminación del medio ambiente, la escasez del agua potable, la depuración de los residuos de nuestras ciudades que hoy contaminan ríos y mares, son evidentes, por lo que la energía producida de fuentes renovables, limpia y privada de agentes contaminantes, son desafíos que no se pueden prorrogar más. Para responder a estos problemas de contaminación del medio ambiente, se necesita la contribución de todos y también volver la mirada hacia la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Se necesita energía producida de fuentes renovables, limpia y en la medida de lo posible, sin la producción de agentes contaminantes. Aunado a lo anterior, se debe tomar en cuenta que los efectos del cambio climático pueden observarse de diversas formas, aparte de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera; la contaminación de los sistemas acuíferos; la ruptura del ciclo del CO₂ que no es recuperado o aprovechado en procesos energéticamente viables donde puede ser consumido; el uso común de dispositivos de generación de energía de baja eficiencia, sin considerar tecnologías emergentes que presentan eficiencias más altas y que no contaminan el ambiente. Éstos son desafíos inaplazables. Con estos objetivos se ha desarrollado la tecnología de las Celdas de Combustible (Fuel Cells) con especial interés en las celdas de combustible de óxidos sólidos (Tu et al., 2020).

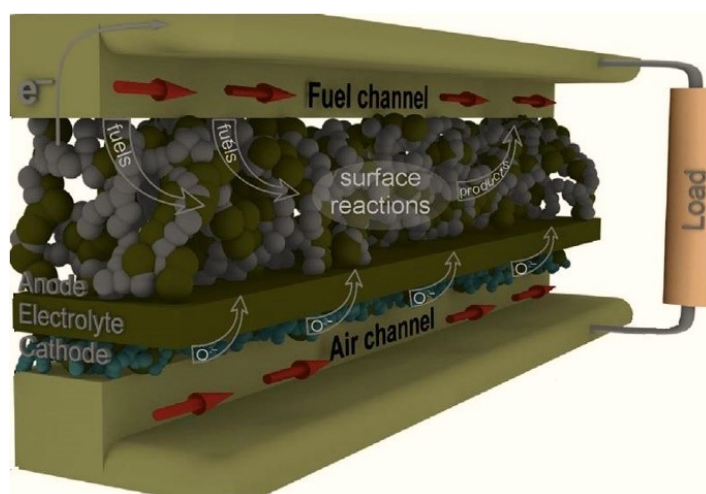
En este sentido, se han realizado grandes esfuerzos por disminuir el impacto de la actividad humana en el medio ambiente y reducir la cantidad de contaminantes a la atmósfera. Los esfuerzos han cubierto varios aspectos científicos y tecnológicos, incluyendo el desarrollo de nuevos sistemas generadores de energía, que no constituyen un riesgo para el medio ambiente. Estos sistemas deben cumplir con las exigencias de

cero –o muy baja- emisión de desechos contaminantes a la atmósfera y presentar altas eficiencias de conversión. Una de las tecnologías alternativas más estudiadas y con mayor avance tecnológico es el de las celdas de combustible (Cullen et al., 2021). Los aspectos innovadores que las convierten en una tecnología competitiva para la generación de electricidad, son entre otros: bajo impacto ambiental, carácter modular, flexibilidad de operación, y alto rendimiento mayor al 50%.

3.1. CELDAS DE COMBUSTIBLE: ESTADO DEL ARTE Y SU IMPORTANCIA

Una celda de combustible (figura 1), es un generador electroquímico integrada por dos electrodos (ánodo y cátodo) y un electrolito que produce energía eléctrica a partir de una reacción electroquímica entre un combustible (hidrógeno) y el oxígeno del aire.

Figura 1. Celda de combustible de óxidos sólidos, Alvarado (2015).



Existen diversos tipos de celdas de combustible que se destacan por su avance tecnológico, un claro ejemplo es la celda de óxidos sólidos o SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) y la celda de combustible de electrolito polimérico sólido o PEM (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC). Las celdas PEM, se clasifican de acuerdo al combustible utilizado, y aquellas alimentadas con combustibles líquidos se conocen generalmente como celdas de consumo directo de alcohol (DAFC, Direct Alcohol Fuel Cell) o celdas de combustible de consumo directo de moléculas orgánicas (DOFC, Direct Oxidation Fuel Cells) (Dhimish y Zhao, 2023). Recientemente, un concepto novedoso de celdas ha sido desarrollado, conocido como celdas de combustible microbianas o MFC (Microbial Fuel Cell).

Actualmente, ha sido aceptado que el uso de las celdas de combustible como sistema de producción de energía en diversas aplicaciones estacionarias y portátiles, puede contribuir a resolver los graves problemas de contaminación. El hidrógeno y la tecnología de las celdas de combustible, son un prometedor sustituto de los combustibles fósiles para reducir las emisiones relacionadas con el transporte al emplear motores eléctricos acoplados a una celda (Olabi et al, 2021). La celda PEM es la más adaptada para este tipo de aplicación debido a su gran densidad de potencia, capacidad de arranque rápido y simplicidad de construcción. Por otro lado, las celdas de combustibles de óxido sólido, SOFC, que operan a temperaturas entre 700 y 1000°C, pueden ser alimentadas tanto con hidrógeno –puro o con impurezas- como con combustibles carbonosos, sin que esto afecte su desempeño (Alvarado y Rodríguez, 2013).

Si el hidrógeno, se obtiene a partir de material fósil (carbón, petróleo, gas natural), se generan emisiones de CO₂. A este hidrógeno se le denomina hidrógeno sucio, porque su uso ha implicado la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Wickham et al., 2022).

3.2. BIOGÁS EN CELDAS DE COMBUSTIBLE

En la actualidad, el 87 % de la energía generada en el mundo procede de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural, etc.). La creciente demanda energética derivada del desarrollo económico e industrial conlleva una disminución progresiva de las reservas de estos recursos, lo que repercute en el encarecimiento de los mismos. Por otro lado, el uso de la combustión de los combustibles fósiles para la generación de electricidad y calor, conduce a la emisión atmosférica de elevadas concentraciones de CO₂, uno de los principales gases responsables del efecto invernadero. En este sentido, la legislación de los diferentes países va siendo cada vez más restrictiva. Este marco económico y medioambiental justifica la necesidad de buscar nuevas fuentes alternativas de energía más respetuosas con el medioambiente, como las de carácter renovable, así como el desarrollo de nuevas tecnologías de generación eléctrica de mayor eficiencia.

La utilización de biogás en celdas de combustible satisface ambos propósitos, al combinar una tecnología de generación prometedora de elevada eficiencia y bajo impacto medioambiental con el uso de un combustible de buena calidad y atractivo económico. Actualmente, en la mayoría de las instalaciones donde se origina el biogás como en las estaciones depuradoras de aguas residuales, rellenos sanitarios, granjas, lodos de

estaciones depuradoras de aguas residuales (ver tabla 1), se considerada al biogás como un subproducto que contiene elevadas concentraciones de gases de efecto invernadero (CH_4 y CO_2), que se genera en grandes cantidades y que, tras un mínimo tratamiento, se libera a la atmósfera o se quema en antorchas, con las consiguientes repercusiones medioambientales que esto conlleva (Plant et al., 2022).

Por ello, su utilización en celdas de combustible se contempla como una alternativa de gran interés en su lugar de origen al conllevar el beneficio doble de la reducción de las emisiones contaminantes de efecto invernadero y el aprovechamiento energético de un recurso valioso que puede permitir la generación propia y combinada de calor y electricidad (co-generación) de un modo eficiente. Ambas líneas de desarrollo (biogás y celdas de combustible) gozan de un extraordinario apoyo a nivel mundial, existiendo numerosos programas en los que se tratan como temas de carácter prioritario. En este sentido, Japón y EE.UU. son los pioneros.

Tabla 1. Composición del biogás según el origen del substrato utilizado

	Residuos agrícolas y ganaderos	Lodos EDAR	Residuos industriales	Vertederos de RSU
CH_4	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
CO_2	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
N_2	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
O_2	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
H_2	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
CO	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Ácido (H_2S)	100-7000 ppm	0-1%	0-8%	0.5-100 ppm
Amoniaco (NH_3)	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación
Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas

FUENTE: Campos, 2001.

Las aplicaciones energéticas del biogás pueden ser térmicas o eléctricas, en función de su grado de pureza. El biogás más impuro se emplea como combustible en equipos comerciales diseñados para gas natural o propano, como cocinas de gas, calentadores, lámparas, estufas, refrigeradores, etc., y éste ha sido el uso que tradicionalmente se le ha dado. No obstante, no cabe duda de que el uso más interesante que tiene el biogás en estos momentos es para la generación de electricidad y la co-generación que es la producción conjunta de calor y electricidad. El biogás con un grado medio de pureza, se puede utilizar en motores de combustión interna (motores a gasolina-diésel) y turbinas

de gas. En la Tabla 2 se detallan los valores promedio del poder calorífico de diferentes combustibles y su equivalente referido al biogás (Oocities, 2016).

Tabla 2. Valores promedio del poder calorífico de diversos combustibles y su equivalente referido al biogás.			
Combustible	kcal/m ³	kcal/kg	Cantidad equivalente a 1000 m ³ de biogás
Biogás	5335	-	1000 m ³
Gas Natural	9185	-	851 m ³
Metano	8847	-	603 m ³
Propano	22052	-	242 m ³
Butano	28588	-	187 m ³
Electricidad	860 kcal/Kw.h	-	6203 Kw.h
Carbón	-	6870	776 kg
Petróleo	-	11357	470 kg

Fuente: Instituto Virtual Ingefor, 2016.

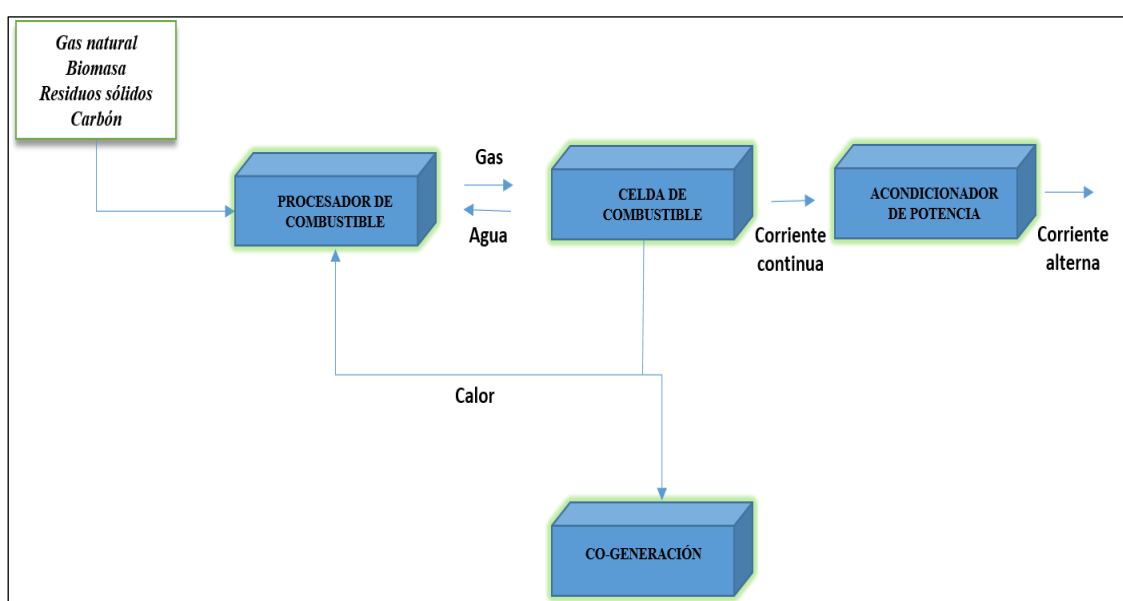
En la actualidad, las celdas de combustible son una tecnología prometedora para la producción de energía eléctrica y co-generación a partir de biogás debido su bajo impacto ambiental, su menor consumo y el elevado rendimiento que presentan. Precisan de un biogás con un grado de pureza de medio a alto, en función del tipo de dispositivo de que se trate. A medio plazo, los sistemas más prometedores (alimentados con biogás) y potencialmente competitivos en términos de costo y de eficiencia, posiblemente sean los híbridos de Celda de Combustible de Óxido sólido (SOFC) y microturbina de gas (Aguilar et al, 2021).

Por otro lado, cabe señalar que, en lo que se refiere a la producción del biogás, según datos publicados en 2007 por el observatorio de energías renovables, EuroObserv'ER, durante el 2006 se generaron en la Unión Europea un total de 5346.7 ktep (*ktep*, miles de toneladas equivalentes al petróleo), lo que supondría un crecimiento del 13.6 % respecto al año anterior. Alemania y Reino Unido, con 1923.2 y 1696.0 ktep, respectivamente, son los países líderes, contribuyendo al 67.7 % de la producción. A continuación, les sigue Italia (535.8 ktep) y España (334.3 ktep). De mantenerse el ritmo de crecimiento de los últimos tres años, la producción bruta de biogás alcanzará los 8.6 Mtep (*Mtep*, millones de toneladas equivalentes al petróleo) en 2010. Para lograr el objetivo establecido, el sector necesitaría un mayor número de instalaciones de metanización (producción de metano) y mejorar la tasa bruta de valorización energética del biogás producido, que, actualmente, es de alrededor del 50 %. El potencial de

producción de biogás en 2020 se estima en 18 Mtep, concentrándose la mayor parte en Francia, Alemania y Reino Unido.

Por último, cabe mencionar que las celdas de combustible son elementos eficientes en instalaciones de generación distribuida y combinada de calor y electricidad (co-generación). El sistema completo de generación de energía a partir de la celda de combustible está constituido por un procesador de combustible, la celda de combustible (unidad de potencia) y un inversor/acondicionador de potencia, tal y como se muestra a continuación.

Figura 2. *Generación de energía basado en celdas de combustible, Aguadero (2006).*



En la ciudad de Morelia, Michoacán y a partir de investigaciones recientes, se ha dado a conocer el volumen y composición del biogás de un relleno clausurado (Razo y Delgado, 2012). Durante la clausura, se instalaron 49 tubos de venteo para los gases producidos (CH_4 y CO_2) a una profundidad de tres metros con una abertura del tubo de salida de cuatro pulgadas, de los cuales no se lleva a cabo ninguna actividad de medición y control para la prevención de emisiones a la atmósfera o aprovechamiento de gases para producción de energía. En este caso se reportó la emisión de hasta 45.6% de metano y 32.4% de bióxido de carbono (combustibles ideales para una celda de combustible de óxidos sólidos, SOFC). Considerando que solo la emisión de metano, a tres metros de profundidad, fue de 285.76 m^3/hr y de 2,503,270 $\text{m}^3/\text{año}$, sería posible producir suficiente energía eléctrica durante un año para abastecer a una gran parte de la población en Morelia través de una celda SOFC.

Es importante mencionar que, en 1 m³ de biogás se tiene aproximadamente 60% de metano, lo cual equivale a 0.71 litros de gasolina. En el caso del relleno sanitario clausurado de Morelia se tendría el equivalente de metano de 1,501,962 m³/año, lo cual equivale a 1,066,393.02 litros de gasolina.

Las elevadas temperaturas de operación de las SOFC, las convierten en candidatas idóneas para su utilización, pensando en el reformado interno que se hace del metano (CH₄), así como del monóxido de carbono (CO) y cuya presencia produce el envenenamiento de ciertas celdas de combustible de baja temperatura (PEM, AFC); en este caso, el CO es un combustible adicional para las de alta temperatura (SOFC), y son más tolerantes a las impurezas (Peng et al., 2020).

En la tabla 3 se muestran distintas características importantes cuando se aplica 100% biogás proveniente de rellenos sanitarios en una celda SOFC (Deublein y Steinhauser, 2008; Al Seadi et al., 2008; Manure, 2001).

Tabla 3. celdas de combustible SOFC de alta temperatura		
Combustible		100% Biogás
Tamaño (MW)	Baja temperatura	1 kW-200 kW
	Alta temperatura	1 kW-10 MW
Eficiencia (%)		30-50
Emisiones (kg/MWh)	CO ₂	360-630
	NO _x	<0.023
	SO ₂	0
	CO	0.005-0.055
Disponibilidad (%)		Superior al 95
Tiempo de arranque		3-48 h
Superficie (m ² /kW)		0.06-0.11

FUENTE: Deublein y Steinhauser, 2008.

Si éste combustible (biogás) renovable se utiliza para la generación de energía eléctrica se aprovecha el avance tecnológico en ésta materia, y se consiguen beneficios económicos. Se recomienda ampliamente el uso de celdas de combustible de alta temperatura por diversas razones:

1. El reformado es interno, por lo que pueden alimentarse directamente de biogás.
2. Son altamente tolerantes al CO y CO₂.
3. El calor residual puede ser usado para cogeneración, es decir, en la producción de energía eléctrica y térmica (aire acondicionado).

Un aspecto favorable en este tipo de proyectos radica en que si bien mientras más grande sea la instalación más electricidad demanda y con el aumento de los residuos se tiene un aumento en la cantidad de combustible, por lo que, la producción de electricidad también se amplía, y teniendo grandes volúmenes de biogás es posible alimentar de forma continua una planta para cubrir la demanda de energía.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En las zonas urbanas de Michoacán y del país, la contaminación del suelo y de los mantos acuíferos por residuos sólidos municipales, es sin duda uno de los principales problemas ambientales. Se estima que el 80 % de la generación de residuos sólidos municipales es dispuesta en sitios clandestinos, barrancas, cuencas, ríos, embalse y baldíos, cuestión que nos permite apreciar la magnitud del problema. La gestión integral de los rellenos sanitarios ha sido aplazada entre otros factores, por el desconocimiento que tienen las autoridades locales sobre los estudios a realizarse, aspectos administrativos y consideraciones legales. Es indispensable establecer controles estrictos, para evitar que el cuerpo receptor de descargas sobrepase su capacidad de asimilación o dilución y la carga contaminante que estos puedan recibir de: las descargas derivadas de actividades agropecuarias, la aplicación de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, en general todo tipo de infiltración que se pretenda hacer, así como el vertido de residuos sólidos, materiales peligrosos y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, en cuerpos y corrientes de agua, logrando evitar la contaminación de cuerpos receptores.

El uso de biogás (metano y bióxido de carbono) para obtener hidrógeno (co-generación) y aplicado en celdas de combustible, especialmente formando parte de sistemas híbridos de celda de combustible y turbina de gas o vapor, se contempla como una vía prometedora de generación combinada de calor y electricidad de elevada eficiencia y bajo impacto ambiental. Estos sistemas, previsiblemente, podrían llegar a sustituir a la tecnología convencional. A medio plazo, los sistemas potencialmente competitivos en términos de costos y de eficiencia son los híbridos de celda de combustible de óxido sólido (SOFC) y microturbina de gas. El par biogás-celda de combustible goza de un extraordinario apoyo desde las administraciones a nivel mundial, existiendo numerosos programas en los que se tratan como temas de carácter prioritario. Japón y EE.UU. son los pioneros en este ámbito.

El uso del hidrógeno en la llamada “economía del hidrógeno” posibilita una enorme redistribución del poder económico, consecuencias trascendentales para la sociedad. El actual flujo de energía, controlado por las empresas petrolíferas y las empresas de servicios, quedará obsoleto. En la nueva era, todo ser humano podrá convertirse en productor además de consumidor de su propia energía, es decir la denominada “generación distribuida”. Cuando millones de usuarios finales conecten sus celdas de combustible a Redes de Energía de Hidrógeno locales, regionales y nacionales, utilizando los mismos principios de diseño y tecnologías inteligentes que han hecho posible la Red Mundial (World Wide Web, *www*), podrán comenzar a compartir energía -entre iguales- creando una nueva forma descentralizada de su uso. En la economía del hidrógeno, hasta el automóvil será una “central eléctrica con ruedas”, con una capacidad generadora de 20 kilovatios. Dado que el coche medio está estacionado la mayor parte del tiempo, se podrá enchufar, durante el tiempo que no se utilice, a la casa, a la oficina o a la principal red interactiva de electricidad, y proporcionar electricidad extra a la red. Con que sólo el 25% de los conductores utilicen sus coches como centrales eléctricas para devolver energía a la red, se podrían eliminar todas las centrales eléctricas del país. El hidrógeno tiene el potencial de poner fin a la dependencia que el mundo tiene del petróleo importado y sus trágicas consecuencias. Además, dado que es tan abundante y existe en todas las partes del mundo, todos los seres humanos dispondrían de energía, convirtiéndose en el primer sistema energético verdaderamente democrático de la historia.

REFERENCIAS

- Adame R. y Salín P. (1977). Contaminación Ambiental. 3ª reimpresión. Editorial Trillas. México, D.F. 65 p.
- Aguiar, P. L. D., Diniz, P. H. S., Costa, L. R. D., Rattes, R. A., Lopes, A. T., Leitão, R. C., & Barcellos, W. M. (2021). Performance evaluation of biogas fueled generator set. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(9), 409.
- Albert, L. A. (2004). *Toxicología ambiental* (No. 615.9/A333). México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

- Alonso, E., & Martinez, L. (2003). The role of environmental sulfur on degradation of ignimbrites of the Cathedral in Morelia, Mexico. *Building and environment*, 38(6), 861-867.
- Alvarado-Flores, J., & Ávalos-Rodríguez, L. (2013). Materiales para ánodos, cátodos y electrolitos utilizados en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC). *Revista mexicana de física*, 59(1), 66-87.
- Anon, (2016). [online] Disponible en: (<http://www.geocities.com/institutoingefor2/cursos/curso01/biogas1.html#1.2>) [Accessed 16 Jun. 2016].
- Anon, (2016). [online] Disponible en: <http://www.centromariomolina.org/publicaciones.html> [Accessed 24 Feb. 2016].
- Atiempo.mx, (2015). Inauguran Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en La Piedad. [online] Available at: <http://www.atiempo.mx/estado/inauguran-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-la-piedad/> [Accessed 24 Feb. 2016].
- Beg, M. U., Al-Muzaini, S., Saeed, T., Jacob, P. G., Beg, K. R., Al-Bahloul, M., & Kurian, A. (2001). Chemical contamination and toxicity of sediment from a coastal area receiving industrial effluents in Kuwait. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 41(3), 289-297.
- Buenrostro, O., & Israde, I. (2003). La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del Lago de Cuitzeo, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 19(4), 161-169.
- Cambio de Michoacán. (2016). *El relleno sanitario de Morelia, uno de los que cuentan con certificación Internacional ISO 14001-2004*. [online] Available at: <http://www.cambiodemichoacan.com.mx/nota-214570> [Accessed 14 Jun. 2016].
- Campos, E., Bonmatí, A., Teira, M. R., & Flotats, X. (2001). Aprovechamiento energético de lodos residuales y purines. Producción de biogás. *Jornades tècniques sobre energia. Barcelona*.
- Çevik, F., Göksu, M. Z. L., Derici, O. B., & Findik, Ö. (2009). An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor,

- geoaccumulation index and statistical analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 152(1-4), 309-317.
- Chávez Cárdenas, J., & Castro Guzmán, O. (2000). Residuos sólidos municipales; principal fuente de contaminación de los mantos acuíferos. *Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente: memorias técnicas* (pp. 1-8). FEMISCA.
- CONAGUA (2008). Interrelaciones agua y salud pública en México. Informe omm/premia no. 064.
- Fernández-Bolaños, C. (2005). Energética del hidrógeno. *Contexto, Estado actual y Perspectivas de Futuro. Universidad de Sevilla. PFC*.
- Dhimish, M., & Zhao, X. (2023). Enhancing reliability and lifespan of PEM fuel cells through neural network-based fault detection and classification. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Freedman, B. (1995). *Environmental ecology: the ecological effects of pollution, disturbance, and other stresses*. Academic Press.
- Fundación Ecología y Desarrollo, (2013). Calidad del aire y salud, Madrid: ECODES.
- Godínez R. (2007). Evaluación socioeconómica del saneamiento de aguas residuales de Morelia, Michoacán. *Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia*.
- Garín, A. A. (2006). Materiales con estructura tipo K₂NiF₄ como cátodos para pilas de combustible de óxido sólido de temperatura intermedia (Doctoral disertación, Universidad Autónoma de Madrid).
- Green-Ruiz, C., & Páez-Osuna, F. (2003). Heavy metal distribution in surface sediments from a subtropical coastal lagoon system associated with an agricultural basin. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 71(1), 52-59.
- Gu, Y. G., Gao, Y. P., & Lin, Q. (2016). Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city, Guangzhou. *Applied Geochemistry*, 67, 52-58.
- INEGI (2011). Panorama Sociodemográfico de Michoacán de Ocampo.

- INEM, (2006). Inventario nacional de emisiones de México, 1999. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT y Western Governors' Association. México, D.F.
- Kondaveeti, S., Mohanakrishna, G., Lee, J. K., & Kalia, V. C. (2019). Methane as a substrate for energy generation using microbial fuel cells. *Indian journal of microbiology*, 59, 121-124.
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment international*, 75, 199-205.
- Künzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P. & Schneider, J. (2000). Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *The Lancet*, 356 (9232), 795-801.
- Leet, D. L., y Judson, S. (2000). Fundamentos de Geología Física. Decimonovena Reimpresión. Editorial Limusa, 55-84.
- León, G., (2008). Se han detectado más de 150 tiraderos clandestinos de basura en Morelia- La Jornada, Michoacán, [online] Disponible en: <http://www.lajornadamichoacan.com.mx/2008/02/27>. [Accessed 24 Feb. 2016].
- Livshits, V., Philosoph, M., & Peled, E. (2008). Direct ethylene glycol fuel-cell stack—Study of oxidation intermediate products. *Journal of Power Sources*, 178(2), 687-691.
- Manure, F. D. (2001). Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook.
- Meybeck, M., Kimstach, V., & Helmer, R. (1996). Strategies for water quality assessment. *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. 2nd edition, Chapman & Hall, London, 23-57.
- Molina, L. T. (2004). *La calidad del aire en la megaciudad de México: un enfoque integral*. Fondo de Cultura Económica.
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Abdelkareem, M. A. (2021). Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. *Energy*, 214, 118955.
- OMS, (2016). Calidad del aire (exterior) y salud. [online] Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>. [Accessed 24 Feb. 2016].

- Oocities.org, (2016). Instituto Virtual Ingefor - Curso de Biogas. [online] Disponible en: <http://www.oocities.org/institutoingefor2/cursos/curso01/biogas3.html> [Accessed 25 Feb. 2016].
- Organización Panamericana de la Salud, (2000). La salud y el ambiente en el desarrollo sostenible. Washington, D.C.: OPS.
- Ortiz R. (1996). *Glosario geohidrológico*, Facultad de Ingeniería, UASLP/Editorial Universitaria Potosina, San Luís Potosi.
- Peng, J., Huang, J., Wu, X. L., Xu, Y. W., Chen, H., & Li, X. (2021). Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: A review. *Journal of Power Sources*, 505, 230058.
- Pérez-Rodríguez, J. L., Maqueda, C., De Haro, M. J., & Rodríguez-Rubio, P. (1998). Effect of pollution on polychromed ceramic statues. *Atmospheric Environment*, 32(6), 993-998.
- Plant, G., Kort, E. A., Brandt, A. R., Chen, Y., Fordice, G., Gorchov Negron, A. M., & Zavala-Araiza, D. (2022). Inefficient and unlit natural gas flares both emit large quantities of methane. *Science*, 377(6614), 1566-1571.
- Pope III, C. A. (2000). Review: epidemiological basis for particulate air pollution health standards. *Aerosol Science & Technology*, 32(1), 4-14.
- Quadratín, (2015). Trabaja Conagua en aumentar saneamiento de aguas residuales - Quadratín. [online] Available at: <https://www.quadratin.com.mx/sucesos/Trabaja-Conagua-en-aumentar-saneamiento-de-aguas-residuales/> [Accessed 24 Feb. 2016].
- Quadratín, (2015). Trabaja Conagua en aumentar saneamiento de aguas residuales - Quadratín. [online] Available at: <https://www.quadratin.com.mx/sucesos/Trabaja-Conagua-en-aumentar-saneamiento-de-aguas-residuales/> [Accessed 24 Feb. 2016].
- Rao, N. V., Rajasekhar, M., & Rao, D. G. C. (2014). Detrimental effect of air pollution, corrosion on building materials and historical structures. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 3(3), 359-364.
- Razo, C. A. G., & Delgado, O. B. (2012). Composición de residuos sólidos urbanos en dos sitios de disposición final. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28, 13-18.

- Reyes, B. A., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Contreras, J. J. M., Battu, J., Owen, P. Q., & Carvallo, C. (2013). Rock-magnetic properties of topsoils and urban dust from Morelia (> 800,000 inhabitants), Mexico: Implications for anthropogenic pollution monitoring in Mexico's medium size cities. *Geofísica Internacional*, 52(2), 121-133.
- Rodriguez Varela, F. J. (2004). *Pile à combustible à électrolyte polymère solide à consommation directe de gaz propane*.
- Rosales-Castillo, J. A., Torres-Meza, V. M., Olaiz-Fernández, G., & Borja-Aburto, V. H. (2001). Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos. *Salud pública de México*, 43(6), 544-555.
- Schwela, D. (2000). Air pollution and health in urban areas. *Reviews on environmental health*, 15(1-2), 13-42.
- Šrám, R. J., Binková, B., Dejmek, J., & Bobak, M. (2005). Ambient air pollution and pregnancy outcomes: a review of the literature. *Environmental health perspectives*, 375-382.
- Teodorita A., Dominik R., Heinz P., Michael K., Tobias F., Silke V., y Rainer J. (2008), "Biogas Handbook", Dinamarca.
- Tu, B., Wen, H., Yin, Y., Zhang, F., Su, X., Cui, D., & Cheng, M. (2020). Thermodynamic analysis and experimental study of electrode reactions and open circuit voltages for methane-fuelled SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 34069-34079.
- Wickham, D., Hawkes, A., & Jalil-Vega, F. (2022). Hydrogen supply chain optimisation for the transport sector—Focus on hydrogen purity and purification requirements. *Applied Energy*, 305, 117740.
- World Health Organisation. Ambient (outdoor) air quality and health. WHO Media Centre, Fact sheet 313. (2014).
- Zuk, M., Cervantes, M. G. T., & Bracho, L. R. (2007). Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas. Instituto Nacional de Ecología.