



## **Generación de bioelectricidad usando bacterias**

Jimena Álvarez-Chávez<sup>1\*</sup>, Valeria Arellano-Lobato<sup>1</sup>, Andrés Luna-Serratos<sup>1</sup>, Andrea Ramírez-Alfaro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Microbiología, Departamento de Bioingeniería, Tecnológico de Monterrey, Campus Toluca, Eduardo Monroy Cárdenas, núm. 2000, San Antonio Buenavista, Toluca 50110, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia: [A01363822@itesm.mx](mailto:A01363822@itesm.mx)

Recibido 17 de agosto de 2020; aceptado 25 de septiembre de 2020

### **RESUMEN**

Debido al crecimiento exponencial de la población, la demanda de fuentes de energía se ha incrementado en gran cantidad. Por ello, la producción de energía a través de bacterias es una muy buena fuente de energía renovable, ya que puede obtenerse de lagos, ríos y otros cuerpos de agua. En estas áreas específicas, la concentración de bacterias es mayor debido al exceso de sedimentos (materia orgánica) y la falta de movimiento en el área.

El trabajo muestra la generación de bioelectricidad mediante un sistema microbiano y vegetal de 3 diferentes sedimentos acuosos en Toluca, Estado de México, en conjunto con el uso de e-coli. Se presenta la metodología usada para lograr la producción de bioelectricidad en una planta piloto, con resultados que muestran un análisis de las condiciones de control fisicoquímicas y de ingeniería para el mejor rendimiento del sistema.

Al desarrollar este procedimiento a mayor escala, se puede cambiar la forma en que el ser humano obtiene energía eléctrica para los diferentes usos que se le da. Los resultados obtenidos en este trabajo logran demostrar que la bioelectricidad es una opción sustentable para producir energía, aprovechando áreas que aparentemente no traen ningún beneficio para el ser humano, pero que pueden ser una fuente de energías más limpia y sustentable

para el planeta.

**PALABRAS CLAVE:** Bioelectricidad, bacterias, lagos, voltaje.

### **ABSTRACT**

Due to the exponential growth of the population, the demand for energy sources has increased greatly. So, the production of energy through bacteria is a very good source of renewable energy, obtained from lakes, rivers and other bodies of water. In these specific areas, the concentration of bacteria is higher due to excess sediment (organic matter) and lack of movement in the area.

The work shows the generation of bioelectricity through a microbial and plant system of 3 different aqueous sediments in Toluca, State of Mexico, in addition to the use of e-coli. The methodology used to achieve the production of bioelectricity in a pilot plant is presented, with results that shows an analysis of the engineering and physicochemical control conditions for the best performance of the system.

By developing this procedure on a larger scale, it's possible to change the way in which the human being obtains electrical energy for the different uses that it is given. The results obtained in this work manage to show that bioelectricity is a sustainable option to produce energy, taking advantage of areas that apparently don't bring any benefit to humans, but in the long term, they can be a cleaner and more sustainable source of energy for the planet.

**KEY WORDS:** Bioelectricity, bacteria, lakes, voltage.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la demanda de fuentes de energía se ha incrementado en gran cantidad debido al crecimiento exponencial de la población que se ha visto durante los últimos años, así como por el crecimiento industrial y la globalización. Esta excesiva demanda de energía genera problemas ambientales dado que las principales fuentes de producción de energía provienen de combustibles fósiles como petróleo, gas, entre otros. Teniendo en cuenta este problema, en los últimos años se han desarrollado fuentes de energía alternativas que reducen el impacto de GEI (gases de efecto invernadero) a nivel mundial; los ejemplos más populares de este tipo de energía son la solar fotovoltaica, la eólica y la geotérmica, pero en los últimos años se han iniciado estudios sobre la producción de energía en zonas que pocos habían observado, como la producción de energía a través de bacterias, donde los científicos observan el proceso de acumulación de residuos orgánicos que causa la proliferación de algas, proceso al que se le llama eutrofización en lagos, ríos y otros cuerpos de agua. Los científicos se dieron cuenta de que la concentración de bacterias es mayor en estas áreas específicas debido al exceso de sedimentos (materia

orgánica) y a la falta de movimiento en ellas. Dentro de estas áreas, se encontró un tipo particular de bacteria: la *geobacter*.

El descubrimiento de las *geobacter* es vital ya que tienen propiedades que les permiten conducir la electricidad, como se menciona en el artículo de Mejía et al. (2012) “Bacterias, una fuente de energía para el futuro”. La bacteria de género *geobacter* tiene la capacidad de transferir electrones a moléculas como Fe (III), Mn (IV) y óxidos de nitrógeno, sustancias de alto peso molecular formado por la degradación química y biológica de restos vegetales y animales.

(MFC).

En las bacterias, como lo es *escherichia coli*, se espera que con la presencia de carbohidratos haya una producción de energía eléctrica, a través de la MFC como una opción de producción de energía sin la necesidad de involucrar combustibles, y lograr la producción de energía libre de emisiones. (Strik et al., 2008)

Un MFC funciona como un reactor bioelectroquímico, que tiene la capacidad de transformar la energía química en energía eléctrica en condiciones anóxicas, pero con la presencia de sulfatos o nitratos como agentes oxidantes cuando la materia orgánica se descompone. Consta de

dos compartimentos, un ánodo y un cátodo, de los cuales se debe conservar el ánodo en condiciones anaeróbicas, lo que genera una biopelícula de *geobacter* superpuesta al ánodo para oxidar la materia orgánica y producir CO<sub>2</sub>, protones y electrones; los protones se transfieren al cátodo mediante una resistencia de la que es posible extraer energía.

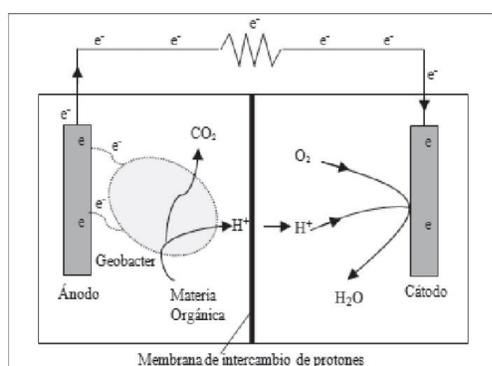


Figura 1. Diagrama MFC.

Reacción anódica



Reacción catódica



Las bacterias *geobacter*, como se explicó anteriormente, tienen la capacidad de transformar la energía química que ellas mismas producen en energía eléctrica, transfiriendo los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos a electrodos, construyendo así una pila de combustible microbiana

que lo que se espera de este trabajo es la búsqueda de la generación de bioelectricidad por medio de un sistema microbiano y vegetal, así como realizar un análisis de las condiciones de control físico-químicas y de ingeniería para un mejor rendimiento del sistema.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Recolección de muestra

Se recolectaron 3 muestras de diferentes lagos para obtener las bacterias necesarias en la producción de electricidad. Primero se tomó la muestra del lago del Tecnológico de Monterrey, Campus Toluca (muestra 1), que consistió en lodo y agua de ese lago (anexo A); también se agregó ánodo y acetato de Sodio 1M. Como puente, se utilizaron diferentes soluciones salinas, una de Arabinosa (medio 1), el segundo solo contenía e-coli (medio 2) y el último e-coli y acetato de sodio 1M (medio 3), medios que cumplen la función de ánodo. Al igual que con la pila de combustible microbiano, se alternaron los conductores, las soluciones en los cátodos y el puente, todo esto con el fin de encontrar la combinación para optimizar el voltaje generado, el cual

fue medido con un multímetro.

Posteriormente, se realizó un muestreo en una rama del primer lago del parque Alameda 2000 en Toluca, Estado de México (muestra 2). La última muestra fue tomada del segundo lago del parque Alameda 2000 en Toluca, Estado de México (muestra 3); cabe aclarar que el agua de este lago estaba estancada.

### **Pila de combustible microbiana con muestras de lago**

Para realizar la celda de combustible microbiana, fue necesario realizar soluciones de cloruro de litio 1M y cloruro de sodio 1M, mismas que tienen la función de cátodo. Se utilizaron diferentes muestras de lodo como Para los conductores, se utilizó cable de cobre con calibre 24, cable de cobre con calibre 14 y grafito. Se alternaron, de manera controlada, las soluciones en el cátodo, los lodos en el ánodo, además de los conductores y puentes para identificar la combinación con las condiciones con mayor voltaje. El voltaje generado se midió con la ayuda de un multímetro.

### **Pila de combustible microbiana con E-Coli y GFP**

Se preparó medio de cultivo LB (10 gr/l triptona,

cloruro de litio 1M y otra de cloruro de sodio 2M en diferentes concentraciones, así como cable de cobre calibre 24 como puente.

### **Pila de combustible microbiana con muestras de lago más e-coli y GFP**

Para obtener la mayor cantidad de electricidad, se combinaron todas las muestras de los diferentes lagos, los medios y las soluciones salinas con diferentes puentes y conductores. Asimismo, se hizo un arreglo en serie para medir el voltaje generado con la ayuda de un multímetro.

## **RESULTADOS**

Los resultados se obtuvieron al combinar las tres muestras recolectadas y con ayuda de un multímetro, como se muestra en el anexo B (figura 1). El voltaje se midió en milivoltios, las variables controladas se fueron cambiando (solución iónica, puente, ánodo y cátodo) para encontrar la combinación que arrojará el mayor voltaje.

Para las muestras 1 y 3, los voltajes obtenidos, así como las variables consideradas, se muestran en sus respectivas tablas (tabla 1 y 2). En cuanto a la muestra 2, se usaron las mismas variables: cloruro de sodio 1M,

cloruro de litio 1M y cable de cobre calibre 14 en el ánodo y el cátodo, pero al obtener resultados similares sin variación alguna (los resultados arrojaron 101, 119 y 108), no se reconoció la muestra 2 como relevante, y después se siguió con los experimentos. 5 gr/l de extracto de levadura, 5 gr/l de cloruro de sodio); el medio fue inoculado con una modificación de e-coli, que contuvo GFP (proteína verde fluorescente), se dejó crecer toda la noche, y al día siguiente se iniciaron los ensayos. Se realizaron tres combinaciones al inocular el medio LB, uno contenía e-coli.

**Tabla 1.** Medición de voltaje con la combinación de 50 ml de muestra 1 (ánodo), 50 ml de ácido acético 1M y variables definidas para optimizar el voltaje.

Solución Iónica (cátodo)	Puente	Ánodo	Cátodo	Voltaje [mV]
Cloruro de litio 1M	Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	160.4
Cloruro de sodio 1M	Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	147
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	470
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	179
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24 (2)	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	281

**Tabla 2.** Medición de voltaje con la combinación de 50 ml de muestra 3 (ánodo) con 50 ml de ácido acético 1M y variables definidas para optimizar el voltaje.

Solución Iónica (cátodo)	Puente	Ánodo	Cátodo	Voltaje [mV]
Cloruro de litio 1M	Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	115
Cloruro de sodio 1M	Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	101
Cloruro de sodio 1M	Cloruro de sodio 1M	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	106
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	336
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24 (pelado)	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 14	121

**Tabla 3.** Medición de voltaje con la combinación de 50 ml de medio 1 (ánodo) con 50 ml de ácido acético 1M y variables definidas para optimizar el voltaje.

Solución Iónica (cátodo)	Puente	Ánodo	Cátodo	Voltaje [mV]
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 24	300
Cloruro de sodio 2M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 24	180
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 24	516
Cloruro de sodio 2M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 24	656
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Grafito rodeado con cable de cobre calibre 24	Grafito	240
Cloruro de sodio 2M	Cable de cobre calibre 24	Grafito rodeado con cable de cobre calibre 24	Grafito	130
Yoduro de potasio 0.5M	Cable de cobre calibre 24	Grafito rodeado con cable de cobre calibre 24	Grafito	320

**Tabla 4.** Medición de voltaje con la combinación de 50 ml de medio 2 (ánodo) con 50 ml de ácido acético 1M y variables definidas para optimizar el voltaje.

Solución Iónica (cátodo)	Puente	Ánodo	Cátodo	Voltaje [mV]
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 24	618
Cloruro de sodio 2M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 24	700
Cloruro de sodio 2M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Grafito	508
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Grafito	116
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24 (pelado)	Grafito rodeado con cable de cobre calibre 24	Grafito	554
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Grafito	Grafito	700
Cloruro de sodio 2M	Cable de cobre calibre 24	Grafito	Grafito	470

Posteriormente, se midió el voltaje con tres medios de cultivo diferentes, considerando variaciones controladas en solución iónica, puente, ánodo y cátodo. Los resultados de la tensión medida para el medio 1, 2 y 3, así como las características consideradas, se muestran en la tabla 3, 4 y 5, respectivamente.

**Tabla 5.** Medición de voltaje con la combinación de 50 ml de medio 3 (ánodo) con 50 ml de ácido acético 1M y variables definidas para optimizar el voltaje.

Solución Iónica (cátodo)	Puente	Ánodo	Cátodo	Voltaje [mV]
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 24	300
Cloruro de sodio 2M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 24	180
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 24	516
Cloruro de sodio 2M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Cable de cobre calibre 24	656
Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Grafito rodeado con cable de cobre calibre 24	Grafito	240
Cloruro de sodio 2M	Cable de cobre calibre 24	Grafito rodeado con cable de cobre calibre 24	Grafito	130
Yoduro de potasio 0.5M	Cable de cobre calibre 24	Grafito rodeado con cable de cobre calibre 24	Grafito	320

Entre los medios, se realizaron combinaciones haciendo un circuito en serie con variaciones. El voltaje obtenido para estas combinaciones, así como las características consideradas para cada caso, se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6.** Medición de voltaje con la combinación de 50 ml de ácido acético y 50 ml de cada medio, 1, 2 y 3, todos interconectados en un circuito de serie con cable de cobre calibre 24 y variables definidas para optimizar el voltaje.

Solución Iónica (cátodo)	Puente	Ánodo	Cátodo	Voltaje [mV]
Medio 1, 2 y 3 en circuito en serie	Cloruro de litio 2M	Grafito rodeado con cable de cobre calibre 24	Grafito	683
Medio 1, 2 y 3 en circuito en serie	Cloruro de sodio 2M	Grafito rodeado con cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	561

Entre las muestras, se hicieron combinaciones con circuito en serie, agregando también medio para observar si ocurrían variaciones. El voltaje obtenido para estas combinaciones, así como las características consideradas para cada caso, se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7.** Medición de voltaje con la combinación de 50 ml de ácido acético y 50 ml de cada medio, 1, 2 y 3, todos interconectados en un circuito de serie con cable de cobre calibre 24 y variables definidas para optimizar el voltaje.

Muestra usada como ánodo	Solución Iónica (cátodo)	Puente	Ánodo	Cátodo	Voltaje [mV]
Medio 1, 2 y 3 en circuito en serie	Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Grafito	287
Medio 1, 2 y 3 en circuito en serie	Cloruro de sodio 1M y cloruro de litio 1M en circuito en serie	Cable de cobre calibre 24	Cable de cobre calibre 14	Grafito	515
Medio 1, 2 y 3 con 50 mL de medio con E. coli adicionado con arabinosa en circuito en serie	Cloruro de litio 1M	Cable de cobre calibre 24 (todas las conexiones)	Cable de cobre calibre 14	Grafito	670

### Análisis

De los resultados obtenidos, se puede observar que las condiciones que dieron un mayor voltaje fueron las de e-coli, cloruro de litio 1M y puente de cobre calibre 24, con ánodo de cobre grafito de 24 bits y cátodo de cable de cobre calibre 24, dando un voltaje de 715 mv.

A partir de esto, se encontraron varios factores que

pueden influir en la variación de voltaje que se obtuvo en los mismos; el principal motivo al que se le atribuye es la presencia o ausencia de oxígeno en el medio, además de las soluciones, la agitación y las concentraciones de soluciones salinas y el tipo de microorganismos presentes en el muestreo realizado. La presencia de oxígeno en la cámara del ánodo puede ser un problema porque el oxígeno disuelto se encuentra en el proceso de tratamiento, particularmente a tasas de flujo altas, ya que la clave para lograr un CFM efectivo es la transferencia de electrones de las bacterias al ánodo, pero cuando el oxígeno está presente con una bacteria compatible con ella, oxidan su combustible con oxígeno en lugar de usar el electrodo. Sin embargo, en el caso de que las bacterias presentes en el medio sean por naturaleza anaeróbicas el cambio a un medio rico en oxígeno influye alterando el metabolismo y la eficiencia para generar energía, pues como se mencionó anteriormente, pueden vivir en condiciones anóxicas y por sí mismas, ya que son ricas en sustancias como nitratos o sulfatos que favorecen la transferencia de electrones. Un aspecto importante a destacar es que se encontró una relación lineal entre la cantidad de superficie expuesta y el grado de

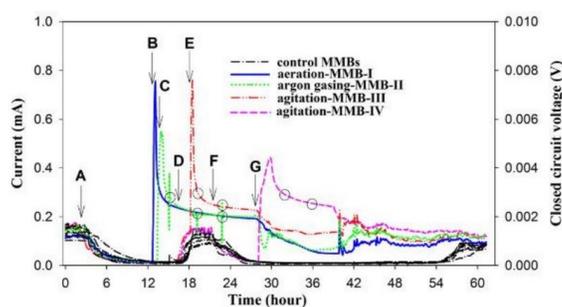
inhibición por la biocapa (Winfield et al., 2019).

Aunque el MFC, según la literatura, funciona mejor con organismos de origen vegetal, como las algas, no se obtuvieron resultados sobresalientes de la muestra 3 de lodo, lo cual se atribuyó al cambio de oxígeno descrito anteriormente, dado que el metabolismo de la planta, al ser una célula de mayor complejidad, tiende a experimentar una fase de adaptación prolongada, así como a que el experimento en cuestión no permitió alargar el tiempo para poder observar sus diferentes cambios o progresiones. De igual forma, es posible que las células vegetales sufran condiciones de estrés con acetato de sodio 1M (Winfield et al., 2019).

La presencia de oxígeno en el cátodo también fue benéfica en los resultados de voltaje, y se atribuye a permitir que la solución está en mayor contacto con el cátodo, haciendo que la transferencia de electrones se mueva con mayor facilidad al mejorar el rendimiento (Winfield, et al., 2019).

Otro desafío fue la selección del material para el cátodo, pero, de acuerdo con los resultados y el estado de la técnica, el grafito es ideal para materiales biológicos porque no reacciona con las sustancias. (An J. et al., 2010). Para corroborar la información sobre la influencia del oxígeno en el medio, se puede observar la figura 2.

El procedimiento que se realizó con respecto al voltaje si el medio estaba agitado, consistió en suministrar argón como gas por aireación directa (suministro de oxígeno) y control, y el resultado fue favorecedor porque el flujo de turbulencias producido compensa constantemente la caída de corriente provocada por la falta de oxígeno (An J. et al., 2010).



**Figura 2.** Gráfico comparativo de la influencia del oxígeno en el medio.

Por otro lado, es importante mencionar la influencia de las concentraciones de las soluciones, ya que en el ánodo del MFC se puede producir un efecto antagónico debido al aumento en la salinidad, y a pesar de incrementar la conductividad del sistema, puede verse afectada la biocapa. De igual manera, el tipo de microorganismo influye en si es aeróbico o anaeróbico; después llega un punto en el que no importa cuánto aumente la concentración y ya no se pueden transferir más electrones (Lefebvre et al., 2010).

El experimento tuvo muchos factores a considerar, por lo que se recomienda realizar un diseño de experimentos que permita variar estos factores y conocer cuáles son los más relevantes y sus diferentes combinaciones, con el fin de obtener un MFC con mayor eficiencia y rendimiento.

## CONCLUSIONES

Este trabajo tiene muchos factores y variables a considerar. No obstante, se logró el objetivo principal: producir electricidad con bacterias. El voltaje más alto alcanzado fue de 715 mv, por lo que los contenedores más grandes producirían una cantidad de energía importante. Así, al desarrollar este procedimiento a mayor escala, se puede cambiar la forma en que el ser humano obtiene energía eléctrica para los diferentes usos que se le da.

Como parte de los resultados obtenidos en este trabajo, se puede decir que la bioelectricidad es una opción sustentable para producir energía, y que con la corriente y voltaje adquiridos se pueden reemplazar las baterías actuales y brindar el mismo rendimiento. Además, para garantizar que este proceso sea sostenible, se podría crear un circuito cerrado con el CO<sub>2</sub> generado por el proceso MFC y alimentar a las plantas que generan

sedimento.

Asimismo, resulta relevante agregar que el rendimiento de este trabajo podría ser incluso mejor si se tuvieran en cuenta las reglas de creación de un MF adecuado, porque en el presente estudio no se contemplaron los ánodos en un ambiente anaeróbico, lo que influyó directamente en los resultados obtenidos.

### BIBLIOGRAFÍA

- An, J., Lee, S. J., Ng, H. Y., & Chang, I. S. (2010). Determination of effects of turbulence flow in a cathode environment on electricity generation using a tidal mud-based cylindrical-type sediment microbial fuel cell. *Journal of environmental management*, 91(12), 2478-2482.
- L. (2012). Bacteria, source of energy for the future. *Tecnura*, 16(32), 118–143.
- Lefebvre, O., Tan, Z., Kharkwal, S., & Ng, H. Y. (2012). Effect of increasing anodic NaCl concentration on microbial fuel cell performance. *Bioresource Technology*, 112, 336–340. doi:10.1016/j.biortech.2012.02.048
- Luo, H., Yu, S., Liu, G., Zhang, R., & Teng, W. (2016). Effect of in-situ immobilized anode on performance of the microbial fuel cell with high concentration of sodium acetate. *Fuel*, 182, 732-739.
- Mejía, A. A. R., Vázquez, J. A., González, A., Strik, D. P., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F., & Buisman, C. J. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870-876.
- Winfield, J., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2019). Response of ceramic microbial fuel cells to direct anodic airflow and novel hydrogel cathodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15344- 15354.