Aprovechamiento de residuos agroindustriales en la generación de energía eléctrica.

Use of agro-industrial waste in electricity generation.

Rocío Meza Gordillo* (1).
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
rocio.mg@tuxtla.tecnm.mx.

Jorge Luis Camas Anzueto (2). Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
jcamas@tuxtla.tecnm.mx.

Arnulfo Rosales Quintero (3). Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
arquinte@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 13, 2026; aceptado en octubre 13, 2026.
Esta conferencia fue presentada en el Segundo Encuentro de Investigación en Óptica, Optoelectrónica y Optomecatrónica 2023.

Resumen.

Las celdas alcalinas abióticas (CAA) representan una alternativa prometedora para la generación de energía eléctrica sostenible a partir de la oxidación de compuestos orgánicos en medio básico. En este trabajo se evaluó el aprovechamiento de biomasa residual de Mangifera indica L. cv "Haden" (semilla y cáscara) como combustible orgánico. Inicialmente se caracterizó la respuesta del voltaje en circuito abierto utilizando sustratos modelo (glucosa y almidón) y bases fuertes (NaOH y KOH) en distintas concentraciones. Se diseñó un prototipo funcional miniaturizado e impreso en 3D mediante software CAD. Al utilizar harina de semilla de mango (0.3 *g/mL) y NaOH* 6 *M, la CAA alcanzó un voltaje máximo de salida en circuito abierto de* 1103.2 ± 22 *mV, una densidad de potencia de* 0.613 ± 0.004 *mW* cm^{-2}*, una densidad de corriente de* 2.25 ± 0.091 *mA* cm^{-2} *y una resistencia interna de* $545.54\ \Omega$*. La generación continua de energía se mantuvo durante* 144 *h, demostrando la factibilidad de valorización energética de esta biomasa agroindustrial.*

Palabras clave: Biomasa residual, celda alcalina abiótica, impresión 3D, *Mangifera indica*, potencial eléctrico.

Abstract.

Abiotic alkaline fuel cells (AAC) generate electricity through the oxidation of organic compounds under strong basic conditions. This study evaluated the use of residual biomass from Mangifera indica L. cv "Haden" (seed and peel) as an organic fuel. Initially, open-circuit voltage behavior was characterized by using model substrates (glucose and starch) and strong bases (NaOH and KOH) at different concentrations. A miniaturized functional prototype was designed and 3D printed using CAD software. Using mango seed flour (0.3 *g/mL) and* 6 *M NaOH, the AAC achieved an open-circuit output voltage of* 1103.2 ± 22 *mV, a power density of* 0.613 ± 0.004 *mW* cm^{-2}*, a current density of*

2.25 ± 0.091 *mA* cm^{-2}*, and an internal resistance of* 545.54 Ω*. Electrical energy generation was sustained over* 144 *h, demonstrating the feasibility of energy recovery from this agricultural waste.*

Keywords: 3D printing, abiotic alkaline cell, electrical potential, Mangifera indica, residual biomass.

1. Descripción de la conferencia.

El consumo global de energía eléctrica requiere el desarrollo de fuentes asequibles, seguras, sostenibles y modernas. Las celdas de combustible biológico (CCB) son dispositivos electroquímicos capaces de convertir directamente la energía química contenida en enlaces orgánicos en energía eléctrica. Dentro de esta clasificación, las celdas alcalinas abióticas (CAA) ofrecen ventajas sustanciales frente a los sistemas bióticos: pueden operar a temperatura ambiente, no dependen del mantenimiento metabólico de cultivos microbianos o enzimáticos, poseen una menor huella ambiental y facilitan su miniaturización.

La biomasa residual de origen agrícola representa un recurso renovable abundante. En México, la producción anual de mango (Mangifera indica L.) supera los 2 millones de toneladas, de las cuales cerca del 16% se industrializa, generando hasta un 50% de desperdicios integrados por cáscaras (15-20%) y semillas (35-60%). Dichos residuos son ricos en carbohidratos poliméricos como el almidón y ácidos orgánicos. En medio alcalino, los carbohidratos sufren hidrólisis facilitada y oxidación catalítica, liberando electrones que pueden ser transferidos desde el ánodo hacia el cátodo a través de un circuito externo.

El objetivo del presente trabajo consistió en diseñar, construir y evaluar un prototipo funcional de celda alcalina abiótica alimentada con harina de residuos de M. indica L. cv "Haden" para la generación de energía eléctrica renovable.

2. Métodos.

Preparación de las muestras.

Los frutos de mango (M. indica cv. "Haden") en estadio de madurez comercial 4 se obtuvieron en Tapachula, Chiapas. Las cáscaras y semillas fueron separadas, deshidratadas en horno de charolas a $60 \pm 2°C$, molidas y tamizadas a un tamaño de partícula < 0.500 mm.

Configuración preliminar y diseños factoriales.

Para identificar la base y el sustrato de mejor desempeño, se utilizó una celda modelo con un volumen de reacción de 20 mL, ánodo de carbono (0.85 cm^2) y cátodo de zinc (0.85 cm^2) distanciados a 4 cm.

Efecto de la base y sustrato.

Para conocer el efecto de la base y el sustrato se aplicó un diseño factorial 2^2 evaluando glucosa y almidón (0.1 g/mL) con NaOH y KOH (1 M).

Efecto de las concentraciones de la base.

Se utilizó un diseño 3^2 combinando NaOH ($2, 4$ y 6 M) con almidón ($0.1, 0.2$ y 0.3 g/mL) para conocer el efecto de las concentraciones y definir las condiciones de generación de energía.

Sustrato residual.

Para conocer el sustrato que generara la mayor respuesta, se implementó un diseño factorial mixto 3×2 evaluando el tipo de residuo (semilla, cáscara y mezcla 1: 1) a 0.3 g/mL en presencia de NaOH y KOH (6 M).

Diseño y fabricación del prototipo de CAA.

El prototipo físico se proyectó en el software SOLIDWORKS 2020 considerando un volumen de cámara de 20 mL (2 cm × 5 cm × 2 cm), un espacio de cabeza del 20% y dimensiones externas de 3.5 cm × 6.5 cm × 4 cm con paredes de 7.5 mm. La estructura fue fabricada en una impresora 3D FLASHFORGE Guider IIs.

Mediciones electroquímicas y analíticas.

El voltaje de salida en circuito abierto (V_{CA}) se monitoreó con un multímetro digital RADOX. Las pruebas en circuito cerrado emplearon resistencias de carga (100 Ω a 500 kΩ) para construir las curvas de polarización y potencia. La intensidad (I), potencia (P) y resistencia interna (R_I) se calcularon mediante las ecuaciones (1), (2) y (3):

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

$$P = V \cdot I \quad (2)$$

$$R_I = \frac{V_{CA} - V_R}{I} \quad (3)$$

La concentración de azúcares reductores se cuantificó por el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) a 540 nm. Los productos de oxidación se identificaron mediante Espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear de Protón (^{1}H-RMN).

3. Desarrollo.

Evaluación de sustratos modelo y bases.

En la evaluación con sustratos puros (1 M de base), el almidón generó voltajes superiores y más estables que la glucosa (1048.33 ± 10 mV con NaOH frente a 1005.83 ± 12 mV). Esto se debe a que la glucosa monomérica se consume rápidamente, mientras que el almidón experimenta una hidrólisis alcalina gradual que suministra monómeros oxidables de forma sostenida. Al incrementar la concentración del electrolito, la solución de NaOH 6 M con 0.3 g/mL de almidón alcanzó un voltaje máximo de 1267.5 ± 10 mV, atribuido a la mayor conductividad iónica y abundancia de iones OH^-, en comparación con la hidrólisis con KOH. En la figura 1 se muestra el comportamiento obtenido de la glucosa y e almidón en soluciones de NaOH y KOH.

Desempeño de los residuos de *M. indica* cv "Haden".

Al sustituir los sustratos sintéticos por la biomasa de mango, la harina de semilla combinada con NaOH 6 M obtuvo el mejor desempeño eléctrico ($V_{CA} = 1038.55 \pm 4$ mV). La semilla demostró ser superior a la cáscara debido a su alto contenido de almidón y presencia de ácidos orgánicos descarboxilables en medio básico. En la figura 2 se muestra el prototipo impreso en 3D.

Como se observa en la Tabla 1, los parámetros eléctricos máximos obtenidos en el prototipo optimizado superan los valores reportados en la literatura para celdas abióticas con sustratos complejos.

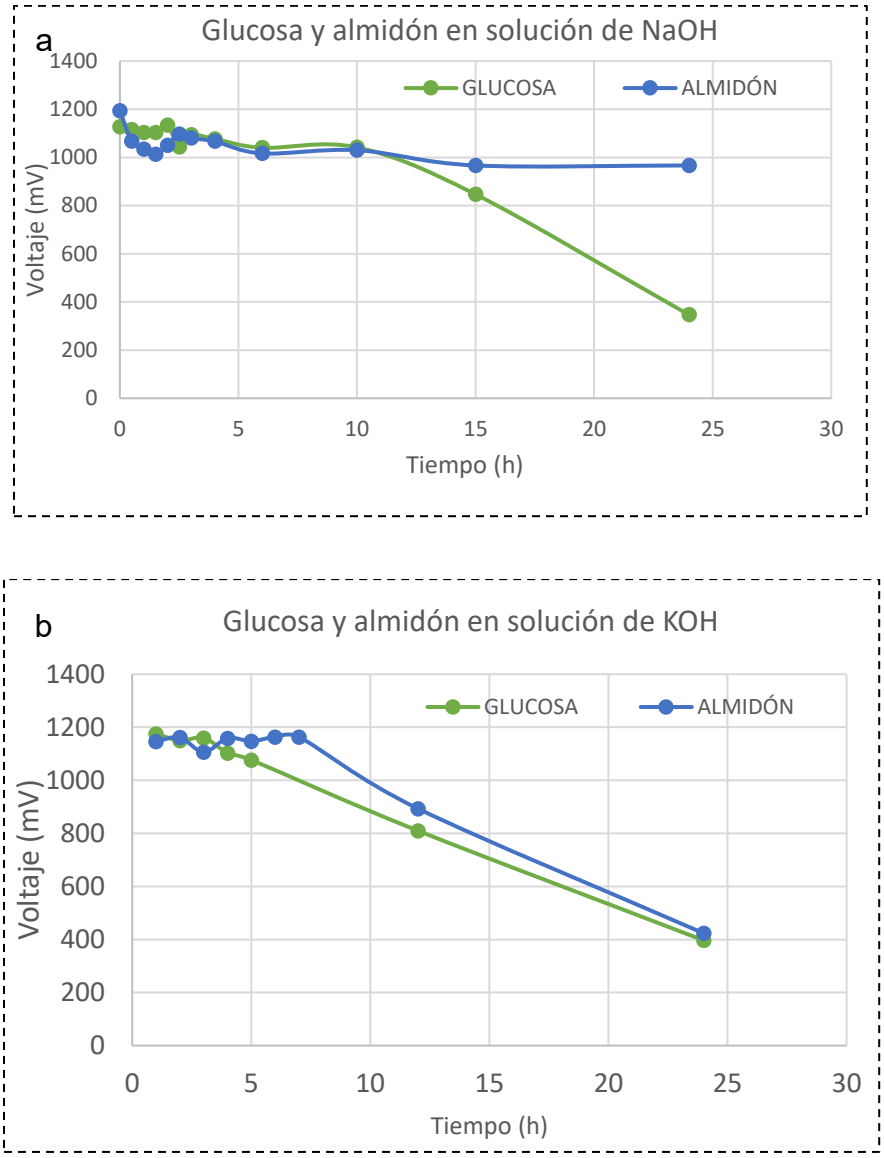


Figura 1. Comportamiento del voltaje de salida en celdas alcalinas abióticas alimentadas con glucosa y almidón, a) usando NaOH; b) usando KOH.

El análisis por ^{1}H-RMN confirmó la presencia del hidrógeno del carbono anomérico de la glucosa (5 ppm) desde la hora 0 hasta la 144, validando la hidrólisis continua del almidón de la semilla, así como señales asociadas a metilos de ácidos carboxílicos de cadena corta (2 ppm) generados como subproductos de oxidación. La identificación de productos de oxidación nos ayudó a corroborar que el almidón es aprovechado en las condiciones establecidas, así como el aprovechamiento de ácidos carboxílicos, ya que se pudo verificar la presencia de un ácido de cadena corta. Sin embargo, es necesario un estudio amplio para poder entender el mecanismo de oxidación del residuo de semilla de M. indica L. cv "Haden" como HPLC, RMN 13C, por mencionar algunas técnicas.

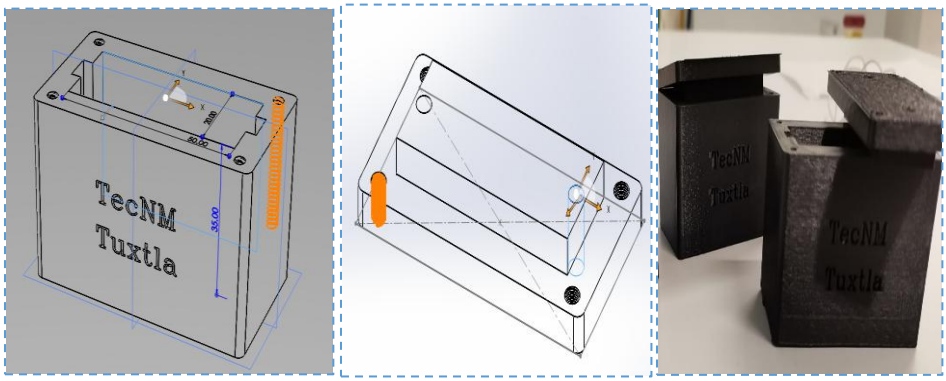


Figura 2. Esquema del prototipo geométrico de la celda alcalina abiótica impreso en 3D.

Tabla 1. Mediciones eléctricas de la CAA optimizada frente a otros sustratos de literatura.

Sustrato / Configuración	**Voltaje (mV)**	**Densidad de corriente (mA cm^{-2})**	**Densidad de potencia (mW cm^{-2})**	**Resistencia interna (Ω)**	**Referencia**
Residuo Semilla *M. indica*	1103.2 ± 22	2.25 ± 0.091	0.613 ± 0.004	545.54	Este trabajo
Glucosa 1 M	760 ± 6	0.78	0.25	—	Liu et al., 2016
Jugo de *Carica papaya*	750	—	0.70	—	Provera et al., 2016
Terminalia catappa	990 ± 9	—	0.25	—	Togibasa et al., 2019

Conclusiones.

Se demostró la factibilidad técnica de utilizar residuos de harina de semilla de *Mangifera indica* L. cv "Haden" como sustrato renovable para la generación de energía eléctrica en celdas alcalinas abióticas.

La concentración de la base fuerte (NaOH 6 M) incrementó significativamente la conductividad del electrolito y promovió la hidrólisis de la biomasa, obteniendo un voltaje estable durante 144 h de operación.
El prototipo miniaturizado impreso en 3D registró una densidad de potencia máxima de 0.613 ± 0.004 mW cm^{-2} y una resistencia interna de 545.54 Ω, superando los parámetros típicos reportados para este tipo de dispositivos abióticos.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por las facilidades otorgadas en la realización de este proyecto.

Referencias bibliográficas.

Liu, X., Li, Z., Yang, Y., Liu, P., & Zhang, P. (2016). *Electricity generation from a refuelable glucose alkaline fuel cell with a methyl viologen-immobilized activated carbon anode.* Electrochimica Acta, 222, 1430–1437.

Provera, M., Han, Z., Liaw, B. Y., & Su, W. W. (2016). *Communication—Electrochemical Power Generation from Culled Papaya Fruits.* Journal of The Electrochemical Society, 163(7), A1457.

Togibasa, O., Haryati, E., Dahlan, K., Ansanay, Y., Siregar, T., & Liling, M. N. (2019). *Characterization of Bio-battery from Tropical Almond Paste.* Journal of Physics: Conference Series, 1204(1), 012036.

Información de los autores.



Rocío Meza Gordillo es profesora de tiempo completo del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Desarrolla proyectos de investigación relacionados con la valorización de residuos agroindustriales, extracción y síntesis orgánica de compuestos de interés relacionados con la generación de materiales.



Jorge Luis Camas Anzueto es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Chiapas. Obtuvo su grado de maestría y doctorado en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Actualmente ostenta el reconocimiento en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel II por parte de la SECIHTI. Fue galardonado con el Reconocimiento al Mérito Estatal a la Investigación en 2016 en la categoría III. Líder de la línea de investigación Sistemas Optomecatrónicos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica (MCIM) y Líder de la línea de Investigación Fotónica y Electrónica del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI) del ITTG. Ha publicado más de 70 artículos de riguroso arbitraje en revistas indizadas en la Journal Citations Reports (JCR), 22 artículos en revistas de otros índices. Cuenta con más de 150 memorias de congresos nacionales e internacionales y ha dirigido proyectos de investigación CONAHCYT, TecNM, y FOMIX.



Arnulfo Rosales Quintero es profesor investigador del Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Sus intereses profesionales se enfocan en las áreas de fenómenos de transporte, cultivo y escalamiento de microalgas e ingeniería de procesos.