



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**Generación de energía eléctrica en una celda de combustible  
microbiana utilizando vinaza mezcalera**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Maestra en Sistemas Ambientales**

**Presenta:**

Kimberly Janeth Galindo González

**Director(a) de tesis:**

Dr. Sergio Valle Cervantes

**Codirector(a)**

Dr. Eduardo Fuentes Quezada

Durango, Dgo. México

Noviembre 2024



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Durango  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **05 / Noviembre / 2024.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 443 / 24.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

**C. KIMBERLY JANETH GALINDO GONZÁLEZ**  
**No. DE CONTROL G21041612**  
**PRESENTE.**


De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestra en Sistemas Ambientales**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

**“Generación de Energía Eléctrica en una Celda de Combustible Microbiana Utilizando Vinaza Mezcalera”**

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE.**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*“La Técnica al Servicio de la Patria”*

  
**C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



FJGG'ammc.



Bldg. Felipe Pescador No. 1830 Ote., Durango, Dgo., C.P. 34080 Tels. 618-818-69-36  
e-mail: depposgrado@itdurango.edu.mx      tecnm.mx | itdur





Victoria de Durango, Dgo., a **05 / Noviembre / 2024.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 442 / 24.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

**C. KIMBERLY JANETH GALINDO GONZÁLEZ**  
**No. DE CONTROL G21041612**  
**PRESENTE.**

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestra en Sistemas Ambientales** cuyo título es:

**“Generación de Energía Eléctrica en una Celda de Combustible Microbiana Utilizando Vinaza Mezcalera”**

CONTENIDO:

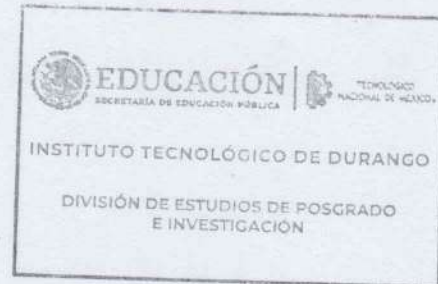
|               |                          |
|---------------|--------------------------|
|               | RESUMEN                  |
|               | ABSTRACT                 |
| CAPÍTULO I.   | INTRODUCCIÓN             |
| CAPÍTULO II.  | MARCO TEÓRICO            |
| CAPÍTULO III. | MATERIALES Y MÉTODOS     |
| CAPÍTULO IV.  | RESULTADOS Y DISCUSIONES |
| CAPÍTULO V.   | CONCLUSIONES             |
| CAPÍTULO VI.  | ANEXOS                   |

Sin otro asunto en particular, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE.**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*“La Técnica al Servicio de la Patria”*

**C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



FJGG'ammc.



**LICENCIA DE USO OTORGADA POR KIMBERLY JANETH GALINDO GONZÁLEZ**, de nacionalidad mexicana, mayor de edad, con domicilio ubicado en Calle Bruno #1027, Fraccionamiento Villas del Guadiana IV, Durango, Dgo., en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **"GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA UTILIZANDO VINAZA MEZCALERA"** en adelante **"LA OBRA"** quien para todos los fines del presente documento se denominará **"EL AUTOR Y/O EL TITULAR"**, a favor del Instituto Tecnológico de Durango del Tecnológico Nacional de México, y con fundamento en lo dispuesto en los artículos 5, 18, 24, 25, 27, 30, 32 y 148 de la Ley Federal de Derechos de Autor, se establecen las cláusulas siguientes:

**PRIMERA –OBJETO: "EL AUTOR Y/O TITULAR"**, mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico de Durango del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de **"LA OBRA"**, para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

**SEGUNDA - TERRITORIO:** La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

**TERCERA -ALCANCE:** La presente licencia contempla la autorización para formato uso de **"LA OBRA"** en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse.

**CUARTA – EXCLUSIVIDAD:** La presente licencia de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico de Durango; por lo tanto, **"EL AUTOR Y/O TITULAR"** conserva los derechos patrimoniales y morales de **"LA OBRA"**, objeto del presente documento.

**QUINTA – CRÉDITOS:** El Instituto Tecnológico de Durango y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el **"AUTOR Y/O TITULAR"** es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre **"LA OBRA"**; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

**SEXTA – AUTORÍA: "EL AUTOR Y/O TITULAR"** manifiesta ser el único titular de los derechos de autor que derivan de **"LA OBRA"** y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, *sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable.*

Dado en la Ciudad de Durango, Dgo., a los quince días del mes de noviembre de 2019.

**"EL AUTOR Y/O TITULAR"**



---

KIMBERLY JANETH GALINDO GONZÁLEZ

Durango, Dgo. a 15 de octubre de 2024

Por este conducto se hace constar que la tesis cuyo título es **Generación de Energía Eléctrica en una Celda de Combustible Microbiana Utilizando Vinaza Mezcalera**, de la alumna **Kimberly Janeth Galindo González**, con número de control **21041612**, estudiante del **programa Maestría en Sistemas Ambientales**, revisada por segunda vez, se sometió al software Turnitin Similarity para ser examinado, en donde el reporte del software mencionado mostró un porcentaje de **5% de similitud general**.

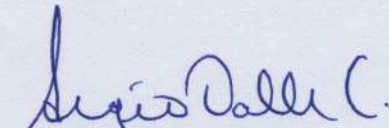
En base al reporte de Turnitin, al criterio ético y profesional del director de tesis y al área del programa, se considera que **cumple** con los criterios de originalidad.

En base a lo anterior se emite el siguiente dictamen.

**Protocolo.** Se autoriza el desarrollo del protocolo examinado

**Tesis.** Se autoriza dar inicio a los trámites de obtención de grado.

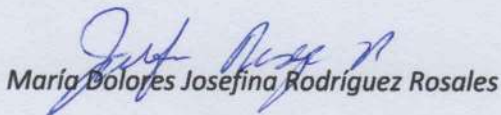
Atentamente,



*Dr. Sergio Valle Cervantes*

Director de la Tesis

Vo.Bo.



*María Dolores Josefina Rodríguez Rosales*  
Asesora



*Dr. Alfredo de Jesús Martínez Roldán*  
Asesor



*Diana Cristina Martínez Casillas*  
Asesora

Ccp

Alumno

Coordinación del programa



## Índice

|  |     |
|--|-----|
| Lista de figuras                               | v   |
| Lista de Símbolos y/o Nomenclatura             | v   |
| Lista de tablas                                | v   |
| Dedicatorias                                   | vi  |
| Agradecimientos                                | vii |
| Resumen  | 1   |
| Abstract                                       | 1   |
| Capítulo1 Introducción                         | 2   |
| 1.1 Antecedentes                               | 3   |
| 1.2 Justificación                              | 7   |
| 1.3 Objetivo General                           | 7   |
| 1.4 Objetivos Particulares                     | 7   |
| 1.5 Descripción del contenido de los capítulos | 8   |
| Capítulo 2 Marco teórico                       | 9   |
| 2.1 Celdas de combustible microbianas          | 9   |
| 2.1.1 Electroodos                              | 10  |
| 2.1.2 Ánodo                                    | 10  |
| 2.1.3 Cátodo                                   | 11  |
| 2.1.4 Membrana intercambiadora de protones     | 11  |
| 2.1.5 Tipos de CCM                             | 11  |
| 2.1.6 Evaluación de la celda                   | 12  |
| 2.2 Curvas de polarización                     | 12  |
| 2.3 Fisiología del agave                       | 13  |
| 2.4 ¿Qué es el mezcal?                         | 14  |
| 2.5 Elaboración de mezcal                      | 14  |
| 2.6 <i>Agave durangensis</i>                   | 15  |
| 2.2 Vinaza                                     | 18  |
| 2.2.1 Problemática ambiental de las vinazas    | 18  |
| 2.2.2 Usos de la vinaza                        | 19  |
| 2.8 DBO <sub>5</sub>                           | 19  |
| 2.9 DQO  | 20  |



|  |    |
|--|----|
| 2.10 Inóculo                                 | 20 |
| Capítulo 3 Materiales y métodos              | 21 |
| 3.1 Adaptación de la celda                   | 21 |
| 3.2 Caracterización de la vinaza             | 21 |
| 3.2.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)       | 22 |
| 3.2.2 Acidez                                 | 24 |
| 3.2.3 Conductividad Eléctrica                | 25 |
| 3.2.4 Contenido de Nitrógeno                 | 25 |
| 3.2.5 Contenido de Fosfatos                  | 25 |
| 3.2.6 Demanda Biológica de Oxígeno           | 26 |
| 3.2.7 Sólidos Suspendidos Totales (SST)      | 27 |
| 3.2.8 Sólidos Sedimentables (SS)             | 28 |
| 3.3 Evaluación de la actividad en el inóculo | 28 |
| 3.4 Proceso de aclimatación del inóculo      | 29 |
| 3.6.2 Evaluación de las celdas               | 30 |
| 3.7 Diseño experimental                      | 31 |
| Capítulo 4 Resultados y discusiones          | 32 |
| 4.1 Construcción de la celda                 | 32 |
| 4.2 Caracterización de la vinaza             | 32 |
| 4.3 Evaluación de la actividad en el inóculo | 33 |
| 4.4 Evaluación de las celdas                 | 34 |
| 4.6 Vinaza como sustrato                     | 39 |
| 4.7 Diseño experimental                      | 45 |
| Capítulo 5 Conclusiones                      | 51 |
| 5.1 Recomendaciones                          | 51 |
| 5.2 Limitaciones                             | 52 |
| Bibliografía                                 | 53 |
| Capítulo 6 Anexos                            | 57 |
| Demanda Química de Oxígeno                   | 57 |



### Lista de figuras

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| Figura 2.1. Componentes de la CCM .....                                       | 10                                   |
| Figura 2.2 Figura A CCM tipo H, figura B CCM de dos cámaras .....             | 11                                   |
| Figura 2.3. Curvas de polarización .....                                      | 13                                   |
| Figura 2.4. Fisiología del agave .....  | 14                                   |
| Figura 2.5. Proceso de elaboración del mezcal (Adaptado de SEMARNAT, 2017) .. | 15                                   |
| Figura 3.6. Sedimentación de la muestra.....                                  | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Figura 3.7. Actividad en el inóculo.....                                      | 29                                   |
| Figura 8. Degradación de materia orgánica .....                               | 38                                   |
| Figura 9. Comportamiento del pH .....   | 42                                   |
| Figura 10. Curva de polarización.....   | 45                                   |
| Figura 4.11 Efectos del voltaje. ....   | 46                                   |
| Figura 4.12. Gráfica de superficie .....                                      | 47                                   |
| Figura 4.13. Optimización.....  | 48                                   |
| Figura 4.14. Gráfica de contorno.....   | 49                                   |

### Lista de Símbolos y/o Nomenclatura

CCM Celda de combustible microbiana  
DQO Demanda Química de Oxígeno  
DBO<sub>5</sub> Demanda Biológica de Oxígeno

### Lista de tablas

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Tabla 2.1. Distribución del Agave Durangensis (Maciel, 2010) ..... | 17                                   |
| Tabla 4.2. Actividad en el inóculo.....                            | 34                                   |
| Tabla 3. DBO <sub>5</sub> , Nitratos y Fosfatos .....              | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Tabla 4.4. DBO <sub>5</sub> , Nitratos y Fosfatos .....            | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Tabla 5. Valores DQO .....   | 57                                   |



## **Dedicatorias**

Dedico mi trabajo a mi pareja, mis padres, mis hermanos y mis niños, pues sin ellos no estaría donde estoy ahorita.



## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a mi pareja, mis padres, mis hermanos y mis niños por impulsarme a ser mejor y no dejar que me rindiera pues siempre obtuve palabras de aliento y amor, por brindarme su conocimiento y estar para mí incondicionalmente, por creer en mí aún y cuando ni yo lo hacía, también agradecer a mis compañeros de maestría, maestros y asesores, pues cuando necesite de alguno de ellos siempre estuvieron dispuestos a ayudarme, así como también a CONAHCYT por otorgarme la beca para poder realizar mis estudios.



## **Resumen**

El objetivo de este trabajo fue evaluar la generación de energía eléctrica mediante celdas de combustible microbianas (CCM) utilizando vinaza mezcalera como inóculo y como sustrato. Se evaluaron tres concentraciones con base en los valores de DQO (3,500, 7,000 y 10,500 mg/L), se monitorearon distintos parámetros como pH, DQO, voltaje y curvas de polarización, para observar el desempeño de las celdas y la generación de energía. La mejor concentración fue la de 7000 mg/L para ambos casos, ya que se generaron 1115 mV de OCV, una densidad de potencia máxima de 23.17 W/cm<sup>2</sup>, una densidad de corriente de 83.04 W/m<sup>2</sup>, un voltaje de 932 mV y logró una remoción de materia orgánica del 94%, esto cuando la vinaza fue utilizada como inóculo y 1743 mV de OCV, con densidad de potencia máxima de 25.20 W/cm<sup>2</sup>, una densidad de corriente de 83.04 W/m<sup>2</sup>, un voltaje de 1378 mV y una remoción del 98% al emplearla como inóculo.

## **Abstract**

This work aimed to evaluate the generation of electrical energy by microbial fuel cells (MFCs) using mezcal vinasse as inoculum and substrate. Three concentrations of COD (3,500, 7,000, and 10,500 mg/L) were evaluated, and different parameters such as pH, COD, voltage, and polarization curves were monitored to observe the development of the cells. The best concentration was 7000 mg/L for both cases since it generated 1115 mV of OCV, a maximum power density of 23.17 W/cm<sup>2</sup>, and 94% organic matter removal. That was when the stillage was used as inoculum and 1743 mV of OCV, with a maximum power density of 25.20 W/cm<sup>2</sup> and removal of 98% when it was used as inoculum.