



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Evaluación de las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas para la generación de energía eléctrica en celdas de combustible microbiana, 2019

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniera Ambiental

AUTORA:

Esmeralda Valentin Torres (0000-0001-5739-562x)

ASESOR:

Mg. Rita Jaqueline Cabello Torres (0000-0002-9965-9678)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2019

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado a mis padres, por mucho apoyo y paciencia brindada durante toda mi etapa universitaria.

Y a toda persona que haya influido positivamente en mí y haya hecho posible todo este trabajo forjado con mucho esfuerzo y dedicación.

Agradecimiento

A las personas que estuvieron conmigo en todos mis logros académicos. A mis padres, que me apoyaron con amor y comprensión, sin ellos no podría haber alcanzado este nivel actual de éxito.

A mis asesores, cada uno de los cuales me ha brindado asesoramiento y orientación durante todo el proceso de esta investigación.

Página del jurado

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

Yo, Esmeralda Valentin Torres identificado con DNI N° 71719067, a efecto de cumplir con la disposición vigentes consideradas en el reglamento de grados y títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería Ambiental, Escuela profesional de Ingeniería Ambiental, declaro bajo juramento que toda la documentación es auténtica y veraz.

Así mismo, declaro también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en la presente tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento y omisión tanto de los documentos como de información aportada por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad Cesar Vallejo

Lima, 10 de Diciembre del 2019.



Esmeralda Valentin Torres

DNI: 71719067

Índice

Carátula	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento.....	iii
Página del jurado	iv
Declaratoria de autenticidad	v
Índice.....	vi
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
Resumen	ix
Abstract	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MÉTODO.....	11
2.1 Tipo y diseño de investigación	11
2.2 Operacionalización de variables	13
2.3 Población, muestra y muestreo	14
2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad.....	14
2.5 Procedimiento	17
2.6 Métodos de análisis de datos	18
2.7 Aspectos éticos.....	18
III. RESULTADOS	19
IV. DISCUSIÓN.....	26
V. CONCLUSIONES	29
VI. RECOMENDACIONES.....	30
REFERENCIAS.....	31
ANEXOS.....	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Tipos de electrodos en la CCM ventajas y desventajas*

Tabla 2. *Factores que participan para generar energía eléctrica*

Tabla 3. *Antecedentes*

Tabla 4. *Variables codificadas*

Tabla 5. *Diseño Box-Behnken*

Tabla 6. *Operacionlización de Variables*

Tabla 7. *Validez de equipos*

Tabla 8. *Parámetros fisicoquímicos antes del tratamiento*

Tabla 9. *Parámetros fisicoquímicos después del tratamiento*

Tabla 10. *Respuestas obtenidas experimentalmente y respuestas estimadas*

Tabla 11. *Resultados del análisis de varianza para para la generación de energía*

Tabla 12. *Resultados del análisis de varianza para para la remoción de DQO*

Tabla 13. *Condiciones óptimas de las variables respuesta*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de una celda de combustible microbiana

Figura 2. Estructura de una celda de una sola cámara y dos cámaras

Figura 3. Mapa de la zona de muestreo

Figura 4. Rumen (bacterias celulolíticas)

Figura 5. Agua residual de matadero

Figura 6. Construcción de la celda

Figura 7. Comparación de los valores estimados con los valores experimentales para la generación de energía eléctrica

Figura 8. Comparación de los valores estimados con los valores experimentales para la remoción de DQO (%)

Figura 9. Gráficos de superficie de respuesta tridimensional para la generación de energía

Figura 10. Gráficos de superficie de respuesta tridimensional para % de remoción de la DQO

Figura 11. Efecto del tiempo para la generación de energía

RESUMEN

El objetivo de este presente estudio es evaluar las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas para la generación de energía eléctrica en celdas de combustible microbiana. Se empleó un diseño Box-Behnken para la generar los valores óptimos en el proceso, los experimentos se realizaron empleando diferentes tipos de materiales de electrodo (zinc, grafito y cobre), tamaño de electrodo ($10,8\text{cm}^2$, $17,6\text{cm}^2$ y $24,4\text{cm}^2$) y relación de las bacterias celulolíticas (80ml/L, 160ml/L y 2400ml/L) en un tiempo de 168h. La máxima producción de potencia eléctrica fue de $246,87\text{ mWm}^{-2}$, cuando se utilizó el par de electrodos grafito-cobre, con un área del electrodo de $10,8\text{cm}^2$ y una dosis de rumen de 1600ml/L, por otro lado, la máxima remoción de DQO fue alcanzada con grafito-grafito, con un área del electrodo $10,8\text{cm}^2$ y una dosis de rumen de 80ml/L. Las celdas de combustible microbiana resultó ser eficiente logrando remover la concentración de materia orgánica presente y simultáneamente obtener como producto energía limpia.

Palabras clave: aguas residuales, celdas de combustible microbiana, rumen, DQO, energía.

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the wastewater from a slaughterhouse nourished with cellulolytic bacteria for the generation of electrical energy in microbial fuel cells. A Box-Behnken design was used to generate the optimal values in the process, the experiments were performed using different types of electrode materials (zinc, graphite and copper), electrode size (10.8cm², 17.6cm² and 24, 4cm²) and cellulolytic bacteria ratio (80ml/L, 160ml/L y 2400ml/L) in a time of 168h. The maximum production of electrical power was 246.87 mWm⁻², when the graphite-copper electrode pair was used, with an electrode area of 10.8cm² and a rumen dose of 160ml/L, on the other hand the maximum removal of COD was reached with graphite-graphite, with a 10.8cm² electrode area and a 80ml/L rumen dose. The microbial fuel cells proved to be efficient, removing the concentration of organic matter present and simultaneously obtaining clean energy as a product.

Keywords: wastewater, microbial fuel cells, rumen, COD, energy.

I. INTRODUCCIÓN

En los inicios de la industria, las centrales eléctricas se instalaban en cualquier zona sin tomar en cuenta si era un bosque o campo agrícola, el ambiente no era considerado y solo importaba las ganancias económicas (Breeze, 2019, p.15). Con el pasar de los años el crecimiento demográfico global aumentó, originando que haya más demanda energética, es por ello que en la actualidad se ha convertido en una preocupación de interés en todos los países (Hasanuzzaman et al., 2020, p.89). Se empezó a tomar en cuenta al ambiente en la Conferencia Internacional en 1972 cuando se mencionó que el hombre tiene la responsabilidad de resguardar el medio en que vive para las generaciones presentes y futuras. Con ello se dió a conocer que las relaciones del ser humano con el ambiente sufrieron transiciones importantes, los cuales con el pasar del tiempo han tenido participación significativa en la salud y el desarrollo cultural (Nriagu, 2019, p.489).

La energía eléctrica es utilizada en todos los ámbitos, las industrias, hogares, escuelas y hospitales (Pietrosemoli y Rodríguez, 2019, p.420). La generación de energía y su consumo está relacionada con las actividades humanas es por esta razón que son contribuyentes clave de las emisiones de contaminantes del aire (Wang et al., 2019, p.71), además en comparación con otras industrias, causa un gran impacto en el ambiente que habitamos (Breeze, 2019, p.15).

La forma de generación de energía hoy en día es distinta a años anteriores, los combustibles fósiles eran los más utilizados, considerados recursos no renovables (Yu y Yıldız, 2018, p.952). Los combustibles fósiles tienen diferentes formas entre ellas se encuentran al carbón, petróleo y gas natural. Además, estos fueron, son y seguirán siendo la columna vertebral de la electricidad global (Stephenson, 2018, p.5). Por ello, los humanos debido al impacto negativo que implica el uso de este tipo de combustibles empezaron a explorar a las fuentes de energía renovable.

La energía renovable proviene de la naturaleza por ejemplo la eólica, solar, hidroeléctricas, geotérmica, entre otros. Se empezó a utilizar este tipo de energía como una forma de mitigación del cambio climático global (Li et al., 2018, pp. 352-359). El costo de generación de energía es casi igual o menos incluso al del uso de combustibles fósiles, es por ello que también son consideradas altamente sostenibles (Strielkowski, 2019, p.97).

Otra forma de generación de energía es el empleo de celdas de combustible biológicas debido a sus condiciones de funcionamiento moderadas y al uso de una variedad de sustratos biodegradables como combustible (Rahimnejad et al., 2015, p. 2).

Las celdas de combustible microbiana son dos cámaras bioelectroquímicas (Figura 1) que producen energía eléctrica durante el tratamiento de las aguas residuales (Roy et al., 2017, p. 245), además es una tecnología verde y limpia que aprovecha el poder de los microorganismos para minimizar la contaminación ambiental y a su vez poder generar energía renovable (Zhi et al., 2014, p.3).

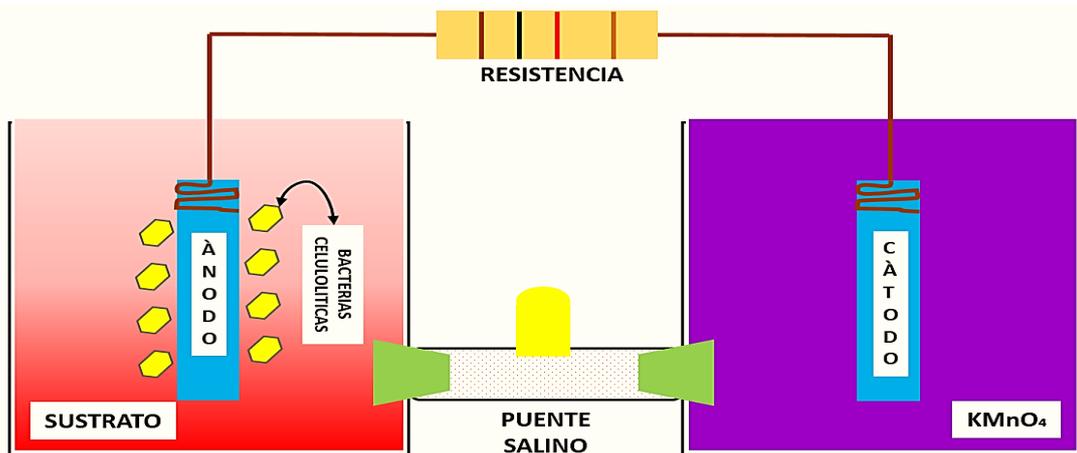


Figura 1. Estructura de una celda de combustible microbiana

Fuente: Elaboración Propia

Las celdas de combustible se clasifican por el tipo de combustible que se utiliza, tal como se muestra en el **Anexo 1**, además se muestra el tipo de electrolito y la temperatura de funcionamiento.

Los principales componentes de la CCM son los siguientes:

- La cámara anódica, es una cámara anaerobia en donde se encuentra el sistema de catalizador del ánodo, el combustible, los microbios y el sistema de transporte de electrones (Dutta y Kundu, 2018, p.3).
- La cámara catódica, se encuentra el sistema de catalizador catódico y el oxidante. El oxidante empleado suele ser aire u oxígeno. En algunos casos, se agregan parejas redox en el compartimento del cátodo para acelerar la reacción del cátodo. Los electrones y protones se consumen en el cátodo, lo que reduce el oxígeno al agua y genera electricidad (Scott, 2016, p. 11).

- La membrana de intercambio de protones separa la cámara anódica y catódica, y es un separador que evita la transferencia de otras especies (Beriş y Alpay, 2018, p.523). La membrana ideal para las celdas de combustibles tiene que cumplir ciertas características como una resistencia interna, permeabilidad, estabilidad química, mecánica y térmica, costos, entre otros (Dharmalingam, Kugarajah y Sugumar, 2019, p.158). Se utilizó como membrana a un puente salino, ya que facilita la transferencia de protones (Parkash, 2015, p. 13), en este caso se utilizó al NaCl saturado como puente para facilitar la transferencia de iones. Además, el puente salino es un factor importante en la construcción de CCM.

El sustrato (combustible) forma parte de la cámara anódica, es uno de los factores más importantes en los procesos biológicos (Najafpour, 2015, p.544), el tipo de sustrato interviene en el rendimiento de las bacterias en la celda de combustible microbiano (Wu et al., 2014, p. 1). Además, el tipo de combustible afecta la potencia y la corriente producidas en las CCM. Existen sustratos complejos que pueden generar electricidad, como los lodos de aguas residuales domésticas, industriales, sedimentos de cuerpos de agua, entre otros (Gezginci y Uysal, 2014, p. 1746).

Se utilizó como sustrato a las aguas residuales de matadero, este tipo de agua se caracterizan principalmente por contener sangre de los animales, pelo y otros contaminantes solubles. Este tipo de efluente presenta compuestos orgánicos con concentraciones altas (Lara, 2011, p. 12).

El uso de microorganismos como biocatalizadores conlleva una serie de ventajas. No hay necesidad de un complejo y costoso aislamiento para preparación del biocatalizador. En condiciones adecuadas, los microorganismos representan catalizadores auto-reproductores (Schröder, 2009, p. 206). El cultivo mixto de microorganismos del suelo de sedimentos marinos, el agua de lodos activos y las aguas residuales son recursos naturales ricos de organismos para la generación de energía (Jafary et al., 2012, párr. 3). Las bacterias celulolíticas son de gran importancia hoy en día para la obtención de energía sostenible (Koeck et al., 2014, p.172)

Las bacterias celulolíticas son bacterias anaerobias que se encuentran en el aparato digestivo de los rumiantes. Por otro lado, Hungate hace más de 50 años, aisló a las bacterias más abundantes y las nombró como *Bacteroides* y *Ruminococcus*, para luego reclasificarlas como

Fibrobacter succinogenes ya que no compartía homología a nivel del 16S con otros bacteroides (Stahl et al., 1988, p. 1081).

Los electrodos son parte de cada cámara, tanto la anódica como la catódica. En la cámara del ánodo se coloca un electrodo donde estos deben brindar una superficie adecuada para que los microorganismos puedan crecer y desarrollarse (Virdis et al., 2011, p. 651). Los tipos de electrodos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. *Tipos de electrodos en la CCM ventajas y desventajas*

ELECTRODO	VENTAJA	DESVENTAJA
Acero Inoxidable	Alta conductividad de electrones, es relativamente barato y de fácil acceso.	Pequeña área de superficie, problemas de biocompatibilidad y es corrosivo.
Zinc	Muy estable y alto grado pureza	Tiempo de vida limitada
Vara De Grafito	Alta conductividad de electrones, alta estabilidad química, relativamente barato y de fácil acceso.	Presenta problemas para incrementar el área de superficie.
Cepillo De Fibra De Grafito	Fácil construcción y presenta alta área específica.	Presenta obstrucciones.
Cobre	Mayor resistencia	Es frágil
Filtro De Carbono	Presenta gran superficie.	Presenta alta resistencia.
Papel Carbón	Presenta cables de fácil conexión.	Frágil
Oro	Buena conductividad y es menos el grado de corrosión.	El costo del electrodo es elevado.
Platino	Buena conductividad y es menos el grado de corrosión.	El costo del electrodo es elevado.
Cobalto	Buena conductividad	El costo es moderado.

Fuente: Kumari, Shankar y Mondal, 2018, p.137.

En la tabla 1 se muestra los materiales de electrodos utilizados para las celdas de combustible microbiana, siendo los más costosos el oro, cobalto y platino, mientras que los más usados son el cobre, papel carbón y cepillo de fibra grafito.

Existen dos tipos de diseños para las CCM, se observa en la figura 2 para el diseño de una sola cámara y de dos cámaras.

- Una sola cámara: las celdas de un compartimento ofrecen diseños más simples y ahorro de costos. Por lo general, poseen solo una cámara anódica sin el requisito de aireación en una cámara catódica. Este diseño consta de un ánodo en una cámara de ánodo rectangular acoplado con un cátodo de aire poroso que está expuesto directamente al aire (Du, Li y Gu, 2007, pp.470-471).

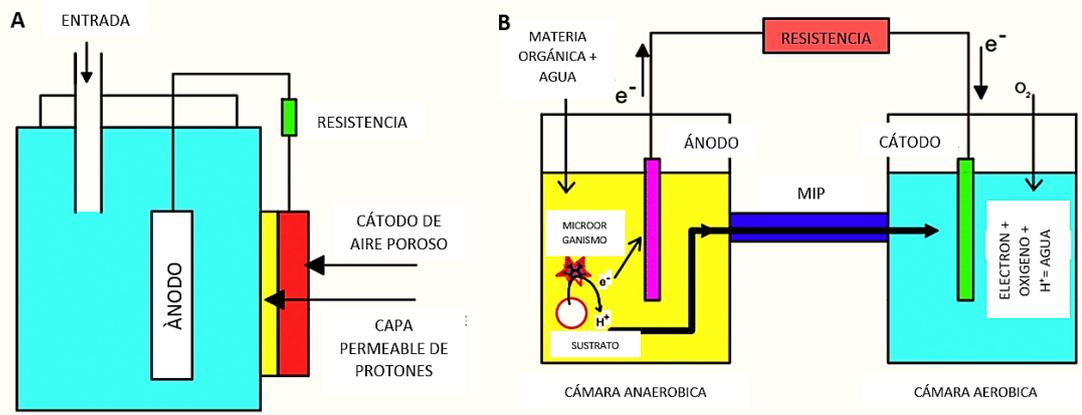


Figura 2. Estructura de una celda de una sola cámara y dos cámaras

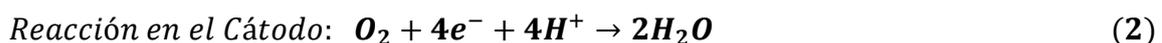
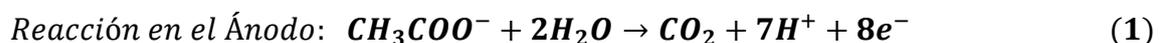
Fuente: Do et al., 2018, pp.912-913

- Dos cámaras: son dos cámaras que están conectadas por una membrana de intercambio de protones. La membrana de intercambio de protones puede ser Nafión, pero también puede reemplazarse por un puente de sal, que es una combinación de agar y sales, vertido y solidificado en el puente (Nandy y Kundu, 2018, p. 31).

El proceso de funcionamiento de una CCM es distinto que otras tecnologías, la CCM presenta dos cámaras, cada cámara presenta un electrodo siendo la parte anaerobia la cámara del ánodo y la parte aerobia la cámara del cátodo, los electrones que son generados en la cámara anódica se adhieren al electrodo para luego ser liberados y viajen por los cables de cobre llegando a la cámara catódica. A su vez, en la otra cámara se van generando protones (Hurtado, Revelo y Ruiz, 2013, pp. 8-9).

En las celdas ocurre la reacción Redox, la cámara del ánodo oxida los sustratos presentes y la cámara del cátodo ocurre la reacción de reducción. Las reacciones de los electrodos se muestran en la ecuación (1) y (2) utilizando al acetato como un sustrato de ejemplo.

Se muestran a continuación utilizando al acetato como un sustrato de ejemplo.



Las ventajas que presentan las celdas de combustible microbiana es que son amigables con el ambiente en comparación con otras tecnologías de producción de energía y es una tecnología verde y limpia para el tratamiento de aguas residuales. Las desventajas que presentan las celdas de combustible microbiana son algunos de los componentes de la celda como el tipo de electrodo ya que son caros y frágiles para la ejecución de estos materiales a gran escala (Tharali, Sain y Osborne, 2016, pp. 260-261).

Una posible limitación es el uso de estas celdas a temperaturas bajas lo cual ocasiona que las bacterias no realicen su trabajo de degradar la materia orgánica de una forma eficiente originando que las reacciones sean lentas (Rahimnejad et al., 2015, p. 752).

Para calcular la energía producida en la CCM se utilizará las siguientes ecuaciones que se muestra en la tabla 2:

Tabla 2. Factores que participan para generar energía eléctrica

INTENSIDAD DE CORRIENTE	VOLTAJE	POTENCIA
<p>La Intensidad de Corriente es cuando varios electrones poseen un coulomb de carga y se trasladan de un cuerpo a otro en corto tiempo.</p> $I = E/R$ <ul style="list-style-type: none"> • I = Amperaje (A) • E = Tensión (V) • R = Resistencia (Ω) 	<p>Se mide mediante la división de la energía en joule sobre la carga en coulomb. La unidad del voltaje es el Voltio.</p> $E = I \times R$ <ul style="list-style-type: none"> • I = Amperaje (A) • E = Tensión (V) • R = Resistencia (Ω) 	<p>La unidad de la potencia es el Watt, cuyo símbolo es el "W". Un watt es igual a un joule de trabajo realizado por segundo.</p> $W = I^2 \times R$ <ul style="list-style-type: none"> • W= Watts (w) • I = Amperaje (A) • R = Resistencia (Ω)

Fuente: Adaptado a Hugot, 2014, pp. 792-795

Se investigó sobre las celdas de combustible microbiana, identificando que cada factor que interviene, es importante en la remoción de demanda química de oxígeno y obtener como producto la generación de energía eléctrica, los antecedentes más relevantes se presentan en la tabla 3, en donde se mencionan las condiciones operativas de la celda para cada diferente sustrato. Con estas investigaciones mostradas en la tabla 3, se podrá comparar los resultados obtenidos de la presente investigación con otros autores.

Tabla 3. Antecedentes

DISEÑO DE CELDA	TIPO DE SUSTRATO	CONDICIONES DE OPERACIÓN	ENERGÍA	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
DOBLE CÁMARA	Aguas residuales de matadero	El volumen es 1L en cada cámara. El electrodo en la cámara del ánodo (grafito) y cátodo (grafito-cobre-zinc) con distintas superficies (7,8cm ² , 15,7cm ² y 31,4cm ²), en la cámara catódica se colocó KMnO ₄ . La resistencia es de 1000Ω y se utiliza al puente salino para la unión de ambas cámaras.	Densidad de potencia-voltaje: 700mWm ⁻² – 2,4V	Christwardana et al., 2016.
DOBLE CÁMARA	Agua Residual Domésticas	El volumen es 1,3L en cada cámara. El electrodo en la cámara del ánodo y cátodo es de 8 alambres de cobre (20,1cm ²). La resistencia es de 100 Ω y se utiliza al puente salino para la unión de ambas cámaras.	Densidad de potencia - intensidad de corriente: 2.9 mW m ⁻² / 0.24 mA	Kargi y Eker, 2007.
DOBLE CÁMARA	Aguas residuales de destilería	El electrodo en el ánodo es grafito (90 mm y 2mm) y en el cátodo es una solución de KMnO ₄ . Dimensiones de las cámaras es de 203.2mm x 203.2 mm x 304,8mm. La resistencia es de 100 Ω. Se utiliza al puente salino para la unión de ambas cámaras.	Densidad de potencia - intensidad de corriente - voltaje: 18.35 mW/m ² - 0.34 mA - 824 mV	Pradeep, Anupama y Hampannavar, 2011.
DOBLE CÁMARA	Agua Residual Domésticas	El volumen es 1000 cm ³ en cada cámara. El electrodo en el ánodo y en el cátodo es grafito (20cm ³). Se utiliza al puente salino para la unión de ambas cámaras.	Densidad de potencia - voltaje: 25 mW m ⁻² - 0.23 V	Rodrigo et al., 2007.
UNA SOLA CÁMARA	Aguas residuales de procesamiento de almidón	Es una cámara cuboide de plástico (Plexiglas) (10 cm × 5 cm × 8,5 cm) con un conjunto de electrodo de membrana en un lado. Se utilizó al Nafioón 117, Dupont como membrana. El ánodo (papel de carbón) y un cátodo (papel de carbono que contiene 1,12 mg / cm ² de Pt catalizador), teniendo un área de superficie de 25 y 17 cm ² , respectivamente. Una resistencia de 1000 Ω.	Densidad de potencia – voltaje – intensidad de corriente en el tercer ciclo: 239.4 mW / m ² - 490.8 mV - 893.3 mA / m ²	Lu et al., 2009

DISEÑO DE CELDA	TIPO DE SUSTRATO	CONDICIONES DE OPERACIÓN	ENERGÍA	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
DOBLE CÁMARA	MYG (extracto de malta 1%, levadura 0.4%, glucosa 1%)	El volumen es 500 ml en cada cámara. El electrodo utilizado son varillas de grafito (altura = 4,5 cm; diámetro = 0,7 cm) y placas de grafito de espesor 2 mm (3 × 5 cm). La resistencia es de 500 Ω. Se utiliza al puente salino para la unión de ambas cámaras.	Densidad de potencia – intensidad - voltaje: 9,3 mW / m ² - 0,338 mV - 27,6 mA / m ²	Mohan, Manojmuthukumar y Das, 2008.
UNA SOLA CÁMARA	Agua Residual Domésticas	Electrodo usado son fibras de grafito con amoniaco (0,22 m ²). El volumen es de 28 ml. Las condiciones de operación son mesofílicas.	Densidad de potencia: 422 mW/m ²	Ahn, y Logan, 2010.
UNA SOLA CÁMARA	Albúmina de suero bovino Y Peptona	El volumen es de 28 ml con dos electrodos (3 cm de diámetro) colocados en lados opuestos. El cátodo era papel de carbón Toray a prueba de humedad con una carga superficial de 0,35 mg de platino / cm ² en un lado; el ánodo era papel de carbón Toray a prueba de humedad y el circuito tenía una resistencia de 1000 Ω. El área de superficie por volumen de reactor fue de 25 m ² / m ³ .	Densidades de potencia: 354 a 10 mW / m ² usando albúmina de suero bovino (BSA) y 269 +/- 14 mW / m ² usando peptona.	Heilmann y Logan, 2006.
DOBLE CÁMARA	Heces humanas	El electrodo en el ánodo es papel carbón (6 cm x 8 cm) y en el cátodo papel carbón (4 cm x 5 cm) con 40% de platino. El volumen del ánodo y la cámara del cátodo fueron de 1 L cada uno (10 cm x 10 cm x 10 cm), y se separaron por la membrana de intercambio de protones (6 cm x 6 cm, Nafion 117).	1° prueba sin tratamiento se obtuvo 548 mV con una resistencia de 1000 Ω. Y con tratamiento es 22 mW/m ² .	Fangzhou et al., 2011.
UNA SOLA CÁMARA	Aguas residuales del tratamiento hidrotermal de madera	La celda está compuesta por un ánodo y un cátodo colocado en una cámara cilíndrica de plexiglás de 4 cm de longitud por 3 cm de diámetro (volumen de 28 ml). El electrodo en el ánodo es un cepillo de fibra de carbono (2 cm de longitud, 2,5 cm de diámetro) y en el cátodo (área de 7 cm ²) estaba hecho de papel carbón con cuatro capas de difusión de PTFE y una capa de catalizador de platino.	Densidad de potencia e intensidad de corriente: 70 mW/m ² - 318 mA/m ²	Toczyłowska, Szymona y Kloch, 2018.

Perú es un país diverso en la producción de energía mediante fuentes renovables siendo la más utilizada las hidroeléctricas y las termoeléctricas. El Perú se encuentra en el quinto lugar de América Latina como el más atractivo para invertir en energía renovable (RECAI, 2019). Según EY (2017), la generación de energía de los RER representó el 5.06% del total del mix energético que se produce en el Perú, los proyectos de hidroeléctrica representaron el 42.97%, eólica con un 40.42%, mientras que la biomasa solo representó un 11.62% y la solar solo un 4.99%.

Sin embargo, el Perú presenta el problema de la accesibilidad de energía eléctrica en zonas rurales según la Agencia Internacional de la Energía (2018). El banco mundial de energía indica que la cobertura eléctrica para el Perú en el año 2017 fue de 83,68%, lo que significa que el 16,32% no tuvo acceso a dicho suministro.

En esta investigación las aguas residuales de matadero actúan como sustrato, cuya función principal de las bacterias celulolíticas con el agua residual es convertir la energía química en eléctrica, mediante la oxidación que ocurre en la cámara del ánodo que es llevada a cabo por las bacterias celulolíticas.

Este trabajo de investigación es una manera sostenible de generar energía sin perjudicar al ambiente, teniendo como consecuencia beneficios a las comunidades y en el medio donde se vive. Además, con esta tecnología las personas que no viven en la ciudad pueden acceder fácilmente ya que los materiales no son costosos y se reutilizarán a las aguas residuales que se generan para así no arrojarlas directamente a un cuerpo de agua o al suelo.

Las celdas de combustible microbiana son aplicadas desde hace poco en otros países, es por eso que se quiere realizar este proyecto en Perú, ya que es considerado un país vulnerable al Cambio Climático.

Las CCM presentan diversas ventajas, son consideradas sostenibles cuando se utiliza para el tratamiento de aguas residuales. Una de sus ventajas es que son idóneos para transformar la energía química en eléctrica mediante vías biológicas (Santoro et al., 2017, p.228). En cuanto a una desventaja es la inversión económica que se utiliza para la construcción de esta celda (He et al., 2017, p. 392). Este tipo de celdas de combustible microbiana presenta limitaciones siendo la principal la arquitectura de la celda (Jung y Pandit, 2019, p. 388).

Para la formulación del problema general se tomó como referencia a la realidad problemática indicando ¿Cuál es la cantidad de energía eléctrica que producen las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana? y los problemas específicos que se presenta son ¿Cuáles son los valores óptimos para la generación de energía eléctrica y remoción de DQO que producen las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana? y ¿Cuál es la máxima eficiencia de remoción de DQO de las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana?

Las hipótesis fueron planteadas e indica que la hipótesis general es: los valores de voltaje y corriente obtenidos son mayores a 824 mV y 0.34 mA, mientras que las hipótesis específicas nos menciona que los valores óptimos para la generación de energía eléctrica son el grafito, teniendo un área de $24,4\text{cm}^2$ y una dosis de rumen de 120ml; y los valores óptimos para la remoción de DQO son el cobre, teniendo una área de $24,4\text{cm}^2$ y una dosis de rumen de 120ml, y se plantea que la máxima eficiencia de remoción de DQO es de un 65% de las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana .

De la misma manera los objetivos fueron planteados, teniendo como objetivo general evaluar la generación de energía eléctrica producida por las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana y como objetivos específicos determinar los valores óptimos para la generación de energía eléctrica y remoción de DQO producida por las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana y determinar la máxima eficiencia de remoción de DQO de las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana.

II. MÉTODO

2.1 Tipo y diseño de investigación

El tipo del proyecto de investigación es aplicada porque se estima que lo planteado en el proyecto es apropiado para la evaluación, comparación, interpretación de resultados y determinación de causalidad (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.42). La experimentación consiste en la manipulación de la variable independiente sobre la variable dependiente (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.129).

Se desarrolló un diseño experimental de Box-Behnken de tres factores y tres niveles para evaluar las mejores condiciones operativas en la generación de energía eléctrica a partir de una muestra de agua residual de matadero. Se manipuló las dosis de rumen, área de electrodo y el tipo de potencial redox, luego se aplicó el diseño de superficie de respuesta apropiado en procesos que involucran dos a seis factores (Mishra y Datta, 2018, p.172) para generar modelos de predicción y optimización del sistema.

Tabla 4. Variables codificadas

	Símbolo	Factor	Código de Variables		
			-1	0	1
Variable Respuesta	X ₁	Potencial Redox	-0,76	0	0,34
	X ₂	Área de Electrodo	10,8	17,6	24,4
	X ₃	Dosis de Rumen	80	160	240

Tabla 5. Diseño Box – Behnken

	Potencial Redox (X ₁)	Área de Electrodo (X ₂)	Dosis de Rumen (X ₃)
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1

9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Fuente: Mishra, y Datta, 2018, p.183

El análisis estadístico de superficie de respuesta (Box-Behnken) permitió analizar los resultados obtenidos, ya que es una representación geométrica de la variable respuesta trazada en función de las variables independientes (Wagner, Mount y Giles, 2014, p. 301). Estos diseños requieren tres niveles por factor. El modelo de superficie de respuesta nos permite analizar y optimizar las condiciones de los factores que influyen de manera significativa o sin significancia en las variables respuestas (Ait-Amir, Pougnet y El Hami, 2015, p.158).

Se empleó 3 factores con 3 niveles y 3 réplicas en los puntos centrales debido a los 15 experimentos desarrollados en la generación de energía eléctrica y remoción de DQO en aguas residuales de matadero.

El programa estadístico Statgraphics Centurion XVI.I se utilizó para el diseño, modelado matemático y obtener las condiciones óptimas de los factores (X_1 , X_2 , X_3). La generación de energía eléctrica (Y_1) y la remoción de DQO (Y_2) son las variables respuesta.

2.2 Operacionalización de variables

Tabla 6. Operacionlización de Variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
VARIABLE INDEPENDIENTE: Aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas	Aguas Residuales de Matadero: tipo de agua se caracterizan principalmente por contener sangre de los animales, pelo y otros contaminantes solubles. Los efluentes presentan elevadas concentraciones de compuestos orgánicos y nitrógeno (Lara, 2011). Bacterias Celulolíticas: Las bacterias celulolíticas anaeróbicas producen celulosomas, que se encuentran en diferentes especies, presentan diversidad en su organización y las enzimas que contiene, incluyen algunas proteínas no conocidas (Taylor et al., 2009).	Las bacterias celulolíticas (rumen) se colocó en la celda de combustible microbiana para ser medido sus características fisicoquímicas, para ello se medirá el pH, las condiciones del sustrato, y la temperatura ambiente de la celda.	Características del rumen	pH	Ordinal
				Temperatura	
			Características de las aguas residuales de matadero	pH	Ordinal
				Conductividad	
Turbidez					
DQO					
VARIABLE DEPENDIENTE: Generación de energía eléctrica	Energía Eléctrica: Este tipo de energía se origina por el movimiento de las cargas eléctricas en la parte interna de los materiales de conducción, lo cual se obtiene corriente eléctrica. (Şen, 2018).	La cantidad de energía eléctrica generado por la bacteria se medirá con la obtención de la cantidad de voltaje e intensidad de corriente en tiempos distintos.	Generación de Energía Eléctrica	Intensidad de Corriente	Ordinal
				Voltaje	
				Potencia	

2.3 Población, muestra y muestreo

La población de esta investigación son las aguas residuales de matadero, que fueron obtenidos del Camal de la Hoyada en Huacho.

Ubicación: Hualmay, Huacho.

La muestra fue obtenida del Camal de la Hoyada en Huacho, la ubicación se muestra en la figura 4, las aguas fueron recolectados teniendo un total de 9L, siendo 500 ml colocado en cada experimento para realizar la investigación y lo que restó fue utilizado para analizar los parámetros fisicoquímicos del agua.

En el proyecto de investigación se utilizó el muestreo aleatorio simple, lo cual brinda a cada elemento de la población la posibilidad igual e independiente de ser incluido en la muestra. La posibilidad de la selección de cada combinación posible de elementos también debe ser igual (Williamson, 2018, p. 406).

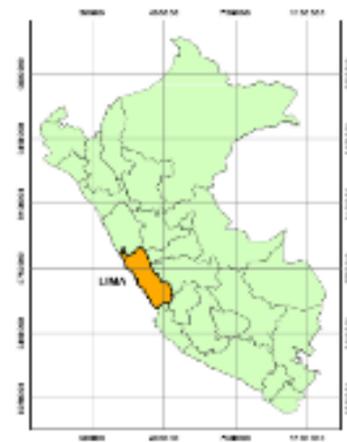
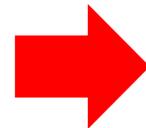
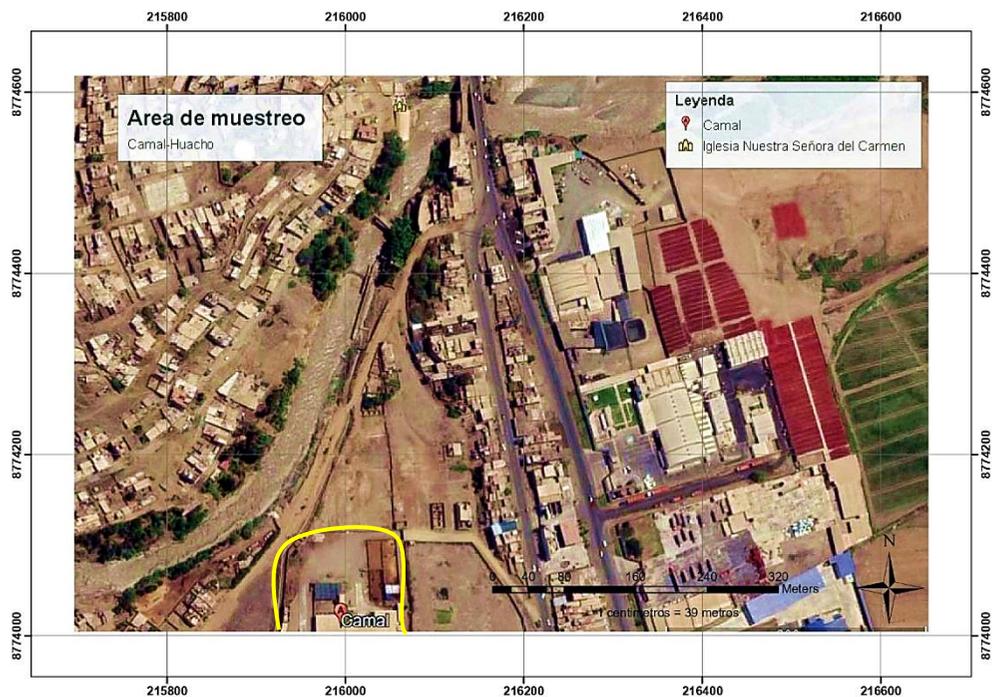
2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

La técnica que se usó en esta investigación es la observación y las fichas de registro, es una técnica ampliamente utilizada por los investigadores, considerada por muchos como fundamental para la investigación (Williamson, 2018, p.412). La observación se empleó para poder identificar el proceso de generación de energía donde bacterias celulolíticas cumplen el papel de degradar la materia orgánica presente en el agua residual de mataderos. Las fichas de registro se utilizaron para la recolección de datos de los análisis fisicoquímicos de las aguas residuales de matadero, siendo las siguientes:

- Ficha De Recolección De Datos Del Rumen (Bacterias celulolíticas) (**Anexo 2**)
- Ficha De Las Recolección De Las Aguas Residuales (**Anexo 3**)
- Ficha De Los Análisis Fisicoquímicos De Las Aguas Residuales (**Anexo 4**)

La validez de los datos se presenta en la tabla 7, donde se muestran los equipos utilizados con la metodología empleada.

La confiabilidad de los datos son las calibraciones que se realizaron a todos los equipos que permitieron obtener datos, se hicieron antes de medir cualquier parámetro fisicoquímico en el experimento, se calibró todos los equipos antes de iniciar las mediciones y para asegurar que estos equipos midieron correctamente se volvieron a hacer para acreditar los datos.



<p align="center">UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO</p>	
<ul style="list-style-type: none"> AUTOR: Esmeralda Valentin Torres 	<p align="center">FECHA: Setiembre 2019</p>
<ul style="list-style-type: none"> MAPA: Área De Muestreo 	
<ul style="list-style-type: none"> UBICACIÓN DISTRITO: Huacho PROVINCIA: Huaura DEPARTAMENTO: Lima 	<p align="center">MAPA: M-1</p>

Figura 4. Mapa de la zona de muestreo

2.4.1 Validación de Equipos

Tabla 7. Validez de los equipos utilizados

NOMBRE	MODELO/ SERIE	FUNCIÓN	IMÁGENES
pH-metro	HANNA / HI 8424	El método 4500-H ⁺ , es el principio básico de la medición del pH es la determinación de la actividad de los iones de hidrógeno por medición potenciométrica utilizando un electrodo de hidrógeno estándar y un electrodo de referencia, metodología (APHA, 2017)	
Turbidímetro	HANNA / LP200011	El método 2130 se basa en una comparación de la intensidad de la luz dispersada por el simple en condiciones definidas con la intensidad de la luz dispersada por la suspensión de referencia estándar en las mismas condiciones (APHA, 2017).	
Colorímetro	HANNA / DR890	El método 5220, nos dice que materia orgánica se oxidan mediante una mezcla hirviendo de ácidos crómico y sulfúrico. Un reflujo simple en solución fuertemente ácida con un exceso conocido de dicromato de potasio (K ₂ Cr ₂ O ₇) (APHA, 2017).	
Conductímetro	BASIC / D7012292	El método 2510 es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica. Esta habilidad depende de la presencia de iones; en su concentración total, movilidad y valencia, y en la temperatura de medición (APHA, 2017).	
Reactor Digital	DRB/2001205 C 0036	El reactor digital se usa para la medición de DQO, nitrógeno total, entre otros. Además, se utiliza para el análisis de metales o muestras biológicas en cuerpos de agua (Hach).	

2.5 PROCEDIMIENTO

En este subtema se describen las etapas del proyecto de investigación:

Etapa N°01: RECOLECCIÓN DE BACTERIAS CELULOLÍTICAS

Para la obtención de las bacterias celulolíticas (rumen), se viajó hasta la ciudad de Huacho para recolectar el rumen de un animal del Camal de la Hoyada, una vez obtenido el rumen se procede a exprimir para obtener el líquido ruminal.

Etapa N°02: RECOLECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Para la obtención de las aguas residuales, se viajó a la ciudad de Huacho para obtener el agua residual del Camal de la Hoyada.



Figura 4. Rumen (bacterias celulolíticas) **Figura 5.** Agua residual de matadero

Etapa N°03: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DE AGUAS RESIDUALES

Para el análisis fisicoquímico de aguas residuales del camal, se tomó 500 ml de agua residual para hallar los parámetros de pH, conductividad eléctrica, turbidez, DQO y temperatura se determinaron en el laboratorio de la Universidad César Vallejo.

Etapa N°04: CONSTRUCCIÓN DE LA CCM

Se fabricó una celda de combustible microbiana de vidrio, esta celda consta de 1 cámara anódica y 1 cámara catódica, teniendo cada cámara una capacidad de 500ml, además de tener 100 mm de longitud, 80 mm de ancho y 130 mm de altura, siendo operado a temperatura y presión ambiente (23,5°C).

Etapa N°05: FABRICACIÓN DEL PUENTE SALINO

La membrana de intercambio de protones (puente salino) se realizó haciendo NaCl saturado (36gr/100ml) para luego ser mezclado con agar-agar. Se hirvió NaCl saturado, una vez hervido se vertió 1gr de agar por cada 10ml de NaCl saturado, luego antes que se solidifique se colocó en el puente de las celdas y se deja reposar durante 1h para que

sea consistente el puente, este puente une la cámara del ánodo y la cámara del cátodo (Khan, Bhattacharjee y Amin, 2012, pp.116-117).

Etapa N°05: ELABORACIÓN DE LA SOLUCIÓN KMnO_4

En la cámara del cátodo se colocó una solución de 79 gr de KMnO_4 en 0,5L de agua destilada.

Etapa N°06: FABRICACIÓN DEL CIRCUITO EXTERNO

Se utilizaron 3 áreas de electrodos $10,8\text{cm}^2$, $17,6\text{cm}^2$ y $24,4\text{cm}^2$ de cobre, zinc y grafito.

Se utilizó una resistencia de 680 ohmios.



Figura 6. Construcción de la celda

2.6 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS

Para realizar los análisis de datos se utilizará el programa Microsoft Excel y Statgraphics Centurion XVI.I ya que es una investigación experimental.

Se realizó el análisis de ANOVA para obtener el modelo y la influencia que tiene cada factor en la generación de energía y remoción de DQO, con el ANOVA se obtuvo el F-valor, el p-valor, la falta de ajuste del modelo, el error puro del modelo y la ecuación de regresión que permite obtener datos estimados para luego compararlos con los datos experimentales.

2.7 ASPECTOS ÉTICOS

Los autores citados en esta investigación están mencionados en bibliografía del proyecto. Además, el autor tiene el compromiso de respetar otros documentos relacionados al tema de investigación que se ha realizado. Los análisis se realizaron en el laboratorio de la Universidad César Vallejo ya que tiene equipos calibrados, por ello los resultados que se obtengan en la experimentación se respetan.

III. RESULTADOS

En la tabla 8, se muestra los resultados de los parámetros fisicoquímicos antes de empezar a tratar las aguas residuales de matadero, teniendo una temperatura constante de 23,5 °C.

Tabla 8. *Parámetros fisicoquímicos antes del tratamiento*

Corridas	FACTORES			pH	C.E (mS/cm)	Turbidez (NTU)
	Pot. Redox (E°)	Área del Electrodo (cm ²)	Dosis de Rumen (ml/L)			
1	-1	-1	0	6,03	9,03	123,37
2	1	-1	0	6,02	9,04	123,37
3	-1	1	0	5,97	9,04	123,37
4	1	1	0	5,98	9,04	123,37
5	-1	0	-1	5,99	8,98	101,69
6	1	0	-1	5,98	8,98	101,69
7	-1	0	1	5,93	9,14	141,32
8	1	0	1	5,92	9,12	141,32
9	0	-1	-1	6,02	8,99	101,69
10	0	1	-1	6,05	8,99	101,69
11	0	-1	1	5,88	9,12	141,32
12	0	1	1	5,91	9,12	141,32
13	0	0	0	5,98	9,05	123,37
14	0	0	0	5,96	9,05	123,37
15	0	0	0	5,97	9,05	123,37

Se puede observar que los valores de pH ácido aparecen cuando se agrega 120 ml de bacterias celulolíticas (rumen), causando que estos valores oscilen entre 5,85 y 5,95.

En la tabla 9, se muestra los resultados de los parámetros fisicoquímicos después de tratar a las residuales de matadero, las celdas estuvieron a temperatura ambiente (23,5 °C).

Tabla 9. *Parámetros fisicoquímicos del agua residual después del tratamiento*

Corridas	FACTORES			pH	C.E (mS/cm)	Turbidez (NTU)
	Pot. Redox (E°)	Área del Electrodo (cm ²)	Dosis de Rumen (ml/L)			
1	-1	-1	0	6,36	50,6	74
2	1	-1	0	6,48	50,1	56,01
3	-1	1	0	5,69	61,7	85
4	1	1	0	5,81	59,6	93
5	-1	0	-1	5,87	58,9	95

6	1	0	-1	5,84	66,8	99
7	-1	0	1	5,82	66,3	103
8	1	0	1	5,96	68,3	115
9	0	-1	-1	6,54	73,5	52
10	0	1	-1	6,17	56,9	41,35
11	0	-1	1	6,48	65,3	64
12	0	1	1	6,51	64,2	71
13	0	0	0	6,67	66,7	96
14	0	0	0	6,56	60,7	89
15	0	0	0	6,31	67,5	100

Se aplicó un modelo de superficie de respuesta polinómica de segundo orden (cuadrático). Basado en los resultados del diseño experimental, se generó ecuaciones de regresión (3) y (4) con variables codificadas obtenidas para la generación de energía y remoción de DQO, siendo:

$$\begin{aligned}
 \text{POTENCIA} = & 246 + 199,0X_1 + 11,6X_2 + 1,35X_3 - 14,0X_1X_1 - 8,50X_1X_2 \\
 & + 0,755X_1X_3 + 0,113X_2X_2 - 0,0300X_2X_3 - 0,00242X_3X_3 \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \% \text{ REMOCIÓN DE DQO} \\
 = & 86,60 - 0,84X_1 - 0,574X_2 - 0,0107X_3 - 16,94X_1X_1 \\
 & + 0,01222X_2X_2 - 0,000313X_3X_3 - 0,0065X_1X_2 - 0,0541X_1X_3 \\
 & + 0,00115X_2X_3 \quad (4)
 \end{aligned}$$

En la Tabla 10 se muestra los valores obtenidos experimentalmente y valores estimados obtenidos con la ecuación de regresión.

Tabla 10. Respuestas obtenidas experimentalmente y respuestas estimadas

Corridos	FACTORES			RESPUESTA 1		RESPUESTA 2	
				POTENCIA ELÉCTRICA (mWm ⁻²)		% REMOCIÓN DQO	
	Pot. Redox (E°)	Área del Electrodo (cm ²)	Dosis de Rumen (ml/L)	Experimental	Estimado	Experimental	Estimado
1	-1	-1	0	58,23	65,13	73,6859	74,16
2	1	-1	0	246,88	259,24	76,1583	76,22
3	-1	1	0	22,64	18,54	73,3768	73,52
4	1	1	0	95,76	82,80	76,1583	75,49
5	-1	0	-1	26,71	38,05	73,2578	72,75

6	1	0	-1	107,51	134,38	77,2935	77,15
7	-1	0	1	39,20	27,42	72,8981	72,80
8	1	0	1	213,76	189,48	71,6682	72,43
9	0	-1	-1	199,32	172,07	81,3292	81,39
10	0	1	-1	60,11	52,08	79,4665	80,06
11	0	-1	1	214,07	223,17	78,1252	77,53
12	0	1	1	42,23	70,55	77,5102	77,45
13	0	0	0	127,61	128,11	79,5579	79,04
14	0	0	0	126,31	128,11	78,6308	79,04
15	0	0	0	128,85	128,11	78,9398	79,04

La significancia estadística del modelo se hizo aún más evidente por el hecho de que se determinó que los valores calculados con las ecuaciones predictivas estaban muy cerca de los valores experimentales por tener un $R^2:95,35\%$, $R^2_{ajust.}:86,97\%$ en la generación de energía eléctrica (Figura 7) y un $R^2:97,73\%$, $R^2_{ajust.}:93,65\%$ en la remoción de DQO (Figura 8).

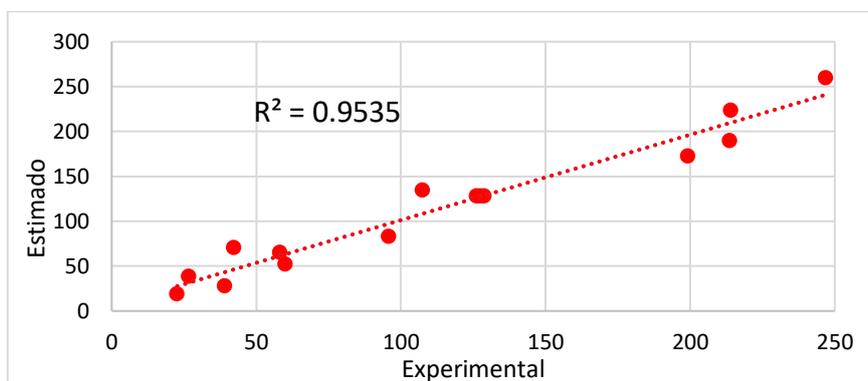


Figura 7. Comparación de los valores estimados con los valores experimentales para la generación de energía eléctrica

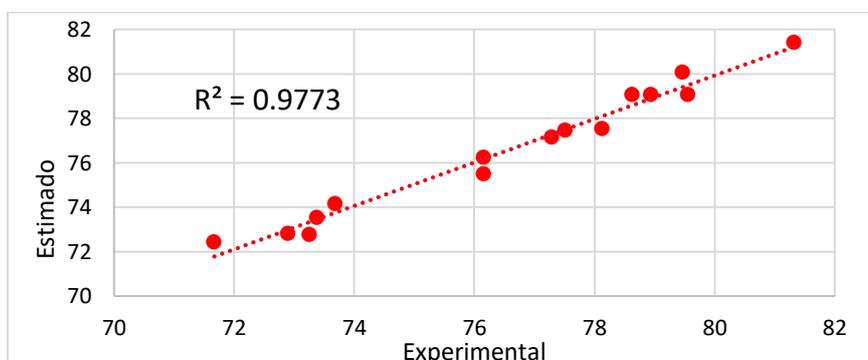


Figura 8. Comparación de los valores estimados con los valores experimentales para la remoción de DQO (%)

En la tabla 11 se muestra los resultados del análisis de varianza de la generación de energía, se observa que existen valores significativos ($p < 0,05$) siendo el modelo, el X_1 (pot. redox) y el X_2 (área de electrodo). Sin embargo, se observa que X_1 presenta un valor F de 45,73, siendo este coeficiente el que afecta más para la generación de energía.

Tabla 11. Resultados del análisis de varianza para la generación de energía eléctrica

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Valor p	Comentario
Modelo	9	74906,8	8323	11,39	0,008	Significativo
X_1	1	33427,2	33427,2	45,73	0,0011	Significativo
X_2	1	23514,1	23514,1	32,17	0,0024	Significativo
X_3	1	959,142	959,142	1,31	0,3039	No Significativo
$X_1.X_1$	1	17,4274	17,4274	0,02	0,8833	No Significativo
$X_2.X_2$	1	100,227	100,227	0,14	0,7263	No Significativo
$X_3.X_3$	1	55,2792	55,2792	0,08	0,7943	No Significativo
$X_1.X_2$	1	4518,89	4518,89	6,18	0,055	No Significativo
$X_1.X_3$	1	1158,17	1158,17	1,58	0,264	No Significativo
$X_2.X_3$	1	266,088	266,088	0,36	0,573	No Significativo
Error	5	3655,1	731,0			
Total	14	78561,9				

R^2 : 95,35%, $R^2_{ajust.}$: 86,97%

En la tabla 12 se muestra los resultados del análisis de varianza de la remoción de DQO, se observa que existen valores significativos ($p < 0,05$) siendo el modelo, el X_1 (pot. redox), el X_3 (dosis de rumen) y la interacción de $X_1.X_1$ y $X_1.X_3$. Sin embargo, se observa que la interacción de $X_1.X_1$ presenta un valor F de 121,00 siendo el coeficiente cuadrático el que afecta más a la remoción de DQO.

Tabla 12. Resultados del análisis de varianza para para la remoción de DQO

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Valor p	Comentario
Modelo	9	118,233	13,1370	23,97	0,001	Significativo
X_1	1	8,10031	8,10031	14,78	0,0121	Significativo
X_2	1	0,887036	0,887036	1,62	0,2593	No Significativo
X_3	1	10,1753	10,1753	18,56	0,0077	Significativo
$X_1.X_1$	1	66,33	66,33	121,00	0,0001	Significativo
$X_2.X_2$	1	1,18739	1,18739	2,17	0,2011	No Significativo
$X_3.X_3$	1	0,924616	0,924616	1,69	0,2507	No Significativo

X ₁ .X ₂	1	0,00253353	0,00253355	0,00	0,9484	No Significativo
X ₁ .X ₃	1	6,06893	6,06893	11,07	0,0208	Significativo
X ₂ .X ₃	1	0,3844	0,3844	0,70	0,4405	No Significativo
Error total	5	2,7409	0,54818			
Total	14	120,931				

R^2 : 97,73%, $R^2_{ajust.}$: 93,65%

En las Figura 9 (a) - (c) y 10 (a) - (c) se muestra los gráficos de superficie de respuesta con una vista 3D con diferentes combinaciones de los factores, observándose los picos más altos para la generación de energía y para la remoción de la DQO.

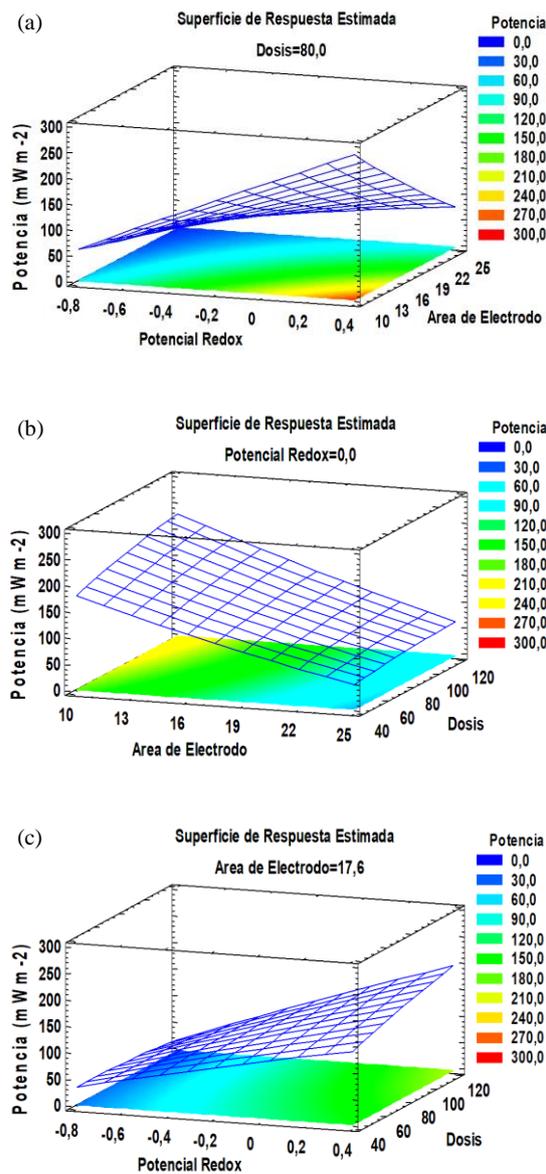


Figura 9. Gráficos de superficie de respuesta tridimensional para la generación de energía

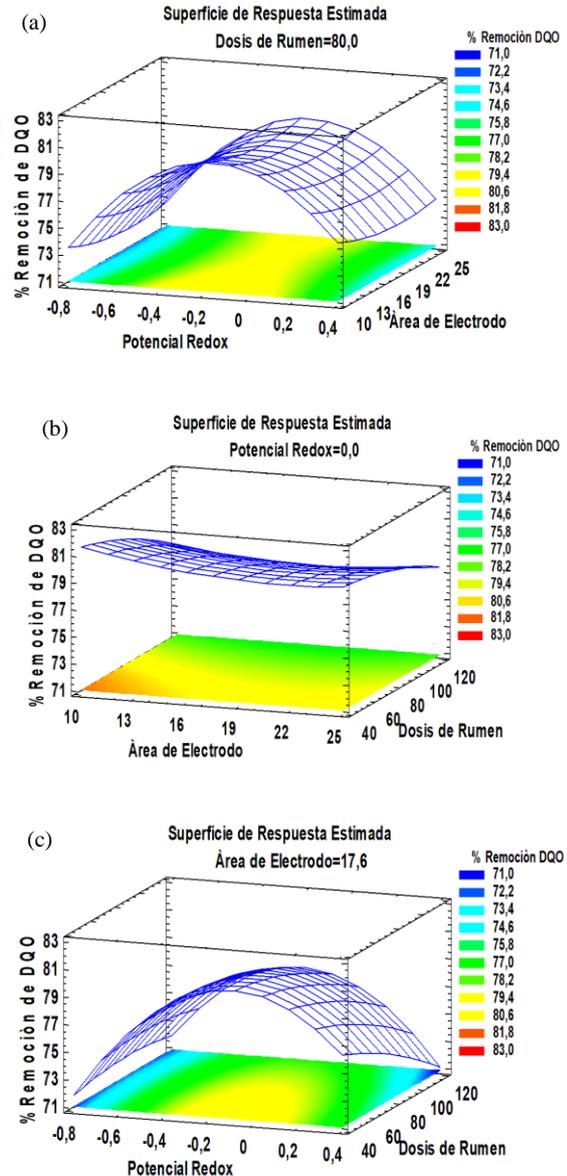


Figura 10. Gráficos de superficie de respuesta tridimensional para % de remoción de la DQO

Todas las figuras indican condiciones de operación óptimas teniendo picos claros, lo que significa que las mejores condiciones para los valores máximos de las respuestas se atribuyen a todas las variables en el espacio de diseño. Como se puede ver en las Figs. 12 (a) la interacción del potencial redox con el área de electrodo se obtiene los máximos valores de potencia para la generación de energía, mientras que en la Figs. 13 (b) la interacción del potencial redox con la dosis de rumen se obtiene una mayor eficiencia de remoción de la DQO.

Las condiciones óptimas generadas por el programa Statgraphics Centurion XVI.I se presentan en la tabla 13, se muestra las condiciones operativas óptimas para la máxima eficiencia de generación de energía y la mayor remoción de la DQO.

Tabla 13. *Condiciones óptimas de las variables respuesta*

	Potencia Eléctrica (mWm⁻²)	% Remoción de DQO
Potencial Redox	0,339	-0,090
Área de Electrodo	10,802	10,802
Dosis de Rumen	120	40

Con la obtención de las condiciones óptimas de la variable respuesta Potencia, se procede a realizar la Figura 11, en la cual nos indica el efecto del tiempo, según el código de variables la corrida # 2, es la corrida que presenta características cercanas a las condiciones óptimas.

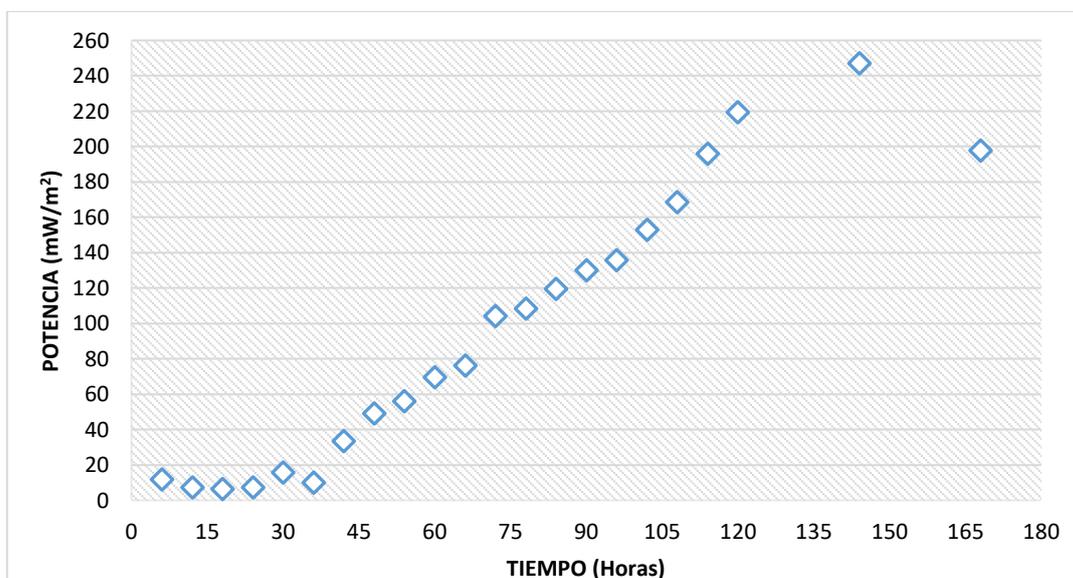
En la tabla 14, se muestra los valores de voltaje (mV), intensidad (mA) y potencia (mWm⁻²) que se obtuvo con el cobre (0,34 E°), un área de electrodo (10,8cm²) y una dosis de rumen (120ml) a un tiempo de 168h.

Tabla 14. *Valores de voltaje (mV), intensidad de corriente (mA) y potencia (mWm⁻²)*

Tiempo (Horas)	Voltaje (mV)	Amperaje (mA)	Potencia (mWm⁻²)
6h	92,20	0,13558824	11,58
12h	72,50	0,10661765	7,16
18h	68,50	0,10073529	6,39
24h	72,50	0,10661765	7,16
30h	107,10	0,1575	15,62
36h	85,10	0,12514706	9,86
42h	156,80	0,23058824	33,48

48h	189,90	0,27926471	49,10
54h	202,50	0,29779412	55,84
60h	225,90	0,33220588	69,49
66h	236,60	0,34794118	76,22
72h	276,50	0,40661765	104,10
78h	282,10	0,41485294	108,36
84h	296,00	0,43529412	119,30
90h	308,90	0,45426471	129,93
96h	315,80	0,46441176	135,80
102h	335,20	0,49294118	152,99
108h	351,70	0,51720588	168,43
114h	379,20	0,55764706	195,80
120h	401,40	0,59029412	219,39
144h	425,80	0,62617647	246,88
168h	380,90	0,56014706	197,56

Figura 11. Efecto del tiempo para la generación de energía



En la figura 11 se muestra la potencia eléctrica generada, indicando que entre 144h llegó a su máximo valor, por lo que hay una disminución de la materia orgánica en el sustrato, generando que las bacterias celulolíticas empiecen a morir causado por la ausencia del alimento suficiente para poder vivir, originando que se produzca menos electricidad.

La disminución de potencia entre las 168h indica una disminución de bacterias celulolíticas por la falta de materia orgánica en el sustrato, para comprobarlo se realizó la medición de DQO al inicio y al final del proceso (168h), teniendo un potencial redox +0,34 E°, un área de electrodo 10,8cm² y dosis de rumen 120ml. Con ello se logró remover de 10146,5 mg/L a 2410,75 mg/L.

IV. DISCUSIÓN

Las celdas de combustible microbiana empleando a las bacterias celulolíticas como biocatalizadores para tratar las aguas residuales de matadero resultó ser eficiente en la remoción de DQO y generación de energía limpia (81,33% y 246,88 mWm⁻²). Se obtuvieron los mayores voltajes e intensidad de corriente (505,80mV y 0,7438mA) correspondieron al cobre cuyo potencial redox es de +0,34E°, y los valores mínimos (216,60mV y 0,3185mA) correspondieron al zinc cuyo potencial redox es de -0,76E°, utilizando 0,5L de agua residual agregado con una dosis de bacterias celulolíticas (120ml) en un tiempo de 144h. Estos resultados se debieron a la presencia del Cu, el cual puede aceptar más electrones que el Zn, además se conoce que el Zn presenta un tiempo de vida limitada y el cobre una mayor resistencia (Kumari, Shankar y Mondal, 2018). En la investigación de Christwardana et al. (2016) se demuestra que el cobre también es un buen material de electrodo en comparación con otros, obteniendo los máximos y mínimos voltajes e intensidad de corriente en un tiempo de 120h generando 1,2V y 0,0012A (grafito-cobre) y 0,7V 0,0007A (grafito-zinc) teniendo una capacidad de 1L agregado con una dosis de sustrato-rumen (1:10 v/v) en cada cámara, mencionando que el Zn era susceptible a la corrosión causando impurezas en el electrodo, estas impurezas pueden cubrir la superficie de Zn e inhibir el cátodo para aceptar electrones del ánodo, lo que conduce a una producción de baja potencia.

Según el análisis estadístico los parámetros óptimos que removieron DQO de las aguas residuales de matadero fueron con los siguientes factores: potencial redox (+0,34E°), área de electrodo (10,8cm²) y dosis de rumen (40ml), teniendo una capacidad en cada cámara de 0,5L. Estos factores mencionados lograron remover el 81,33% de la cantidad de materia orgánica presente en las aguas residuales de matadero (10066,5 mg/L-1879,5 mg/L). Sin embargo, Christwardana et al. (2016) removió el 67,9% de la DQO en un 1L de agua residual con una dosis de sustrato rumen (1:10 v/v) en un tiempo de 120h, esto se debió al metabolismo de los microorganismos presentes en el rumen, a una menor dosis pudieron alimentarse lo suficiente y consumir la mayor cantidad orgánica presente en el sustrato resultando una mayor eficiencia de remoción de DQO, además Palanisamy et al. (2019) menciona que si el electrodo presenta una gran área superficial los microorganismos demoran en colonizarse y adherirse a las paredes de los electrodos. Por otro lado, los parámetros óptimos para una máxima potencia generada en las celdas de combustible microbiana se deben a los siguientes factores: potencial redox (+0,34E°), área de

electrodo ($17,6\text{cm}^2$) y dosis de rumen (120ml), teniendo una capacidad en cada cámara de 0,5L. Estos factores mencionados lograron $246,88\text{mWm}^{-2}$ de potencia eléctrica en un tiempo de 144h. Christwardana et al. (2016) logro 236mWm^{-2} en un tiempo de 120h, teniendo una capacidad en cada cámara de 1L. Esto se debió al potencial redox empleado $+0,34\text{E}^\circ$ (cobre), siendo este tipo de electrodo el que acepta más electrones para que se genere la mayor cantidad de potencia.

Las bacterias celulolíticas presentes en el rumen fueron utilizados como biocatalizadores con dosis distintas (40ml, 80ml y 120ml) para cada sustrato, las celdas tuvieron una capacidad de 0,5L, estas bacterias resultaron significativas para el tratamiento de aguas residuales. En el experimento N°09 contenía una dosis de rumen de 40ml, resultando ser la celda que logró remover el 81,33% de la DQO presente en el agua en un tiempo de 168h, esto resultados se oponen a lo que dijo Christwardana et al. (2016) que al poner una gran cantidad de sustrato y poco rumen (10: 1) puede no ser beneficioso ya que podría inhibir la transferencia de electrones del sistema de microbios a la superficie del electrodo. En su investigación lograron remover el 67,9% de la DQO en un 1L de agua residual con una dosis de sustrato rumen (1:10 v/v) en un tiempo de 120h. Por otro lado, Toczyłowska, Szymona y Kloch (2018) lograron remover el 87% de la DQO a las 48h presente en las aguas residuales de industria maderera combinadas con aguas residuales municipales. Además, Alatraktchi et al., (2011) menciona que los microbios pueden adherirse al ánodo, por lo que aumentar el área del ánodo se ve afectada por el aumento de la generación de electrones y la reducción de la DQO.

Respecto al área de electrodo, se emplearon 3 distintas áreas ($10,8\text{cm}^2$, $17,6\text{cm}^2$ y $24,4\text{cm}^2$) en las celdas de combustible microbiana. En el experimento N°02 se utilizó un área de $10,8\text{cm}^2$, obteniendo valores de voltaje e intensidad $425,80\text{mV}/0,6261\text{mA}$ en 0,5L de capacidad en cada cámara, logrando remover un 76,16% en un tiempo de 168h cuando se trata a las aguas residuales de matadero con una dosis de rumen de 160ml/L. Sin embargo, Kargi y Eker (2007) empezaron con 6000 mg/L de la DQO y se logró remover el 75% de DQO al final del proceso obteniendo densidad de corriente 2.9mW m^{-2} e intensidad de 0,24 mA teniendo una capacidad de 1,4L y un área de electrodo de 20.1cm^2 , cuando trataron a las aguas residuales sintéticas con un cultivo mixto de bacterias en un tiempo de 96h. Kargi y Eker (2007) mencionan que existen aumentos pronunciados en la intensidad y la densidad de potencia cuando las áreas de superficie de electrodo son pequeñas y Palanisamy et al. (2019) menciona que si el electrodo presenta

una gran área superficial los microorganismos demoran en colonizarse y adherirse a las paredes de los electrodos.

Además de la remoción de DQO y la generación de energía eléctrica, también se realizó la medición pH, conductividad eléctrica y turbidez del sistema antes y después del proceso. La acidez de la solución de mezcla aumentó de 5,98 a 6,67. Los protones (H^+) generados en la cámara del ánodo por la oxidación de los sustratos fueron transferidos a través del puente salino hacia la cámara del cátodo ocasionando que el pH en un tiempo de 168 h aumente a 6,67 volviéndose un pH neutro. Afirmando lo que Fangzhou, et al. (2011) menciona que cuando las celdas de combustible microbiana tienen una operación de mucho tiempo, los H^+ se transfieren a la cámara catódica, de modo que el valor del pH aumenta. Así mismo, Christwardana et al. (2016) menciona el rápido consumo de protones conduce al aumento del pH de las aguas residuales, esto se debe a la tasa de protones transferidos a los cátodos es más rápida que la generación de protones en el ánodo.

V. CONCLUSIONES

1. La generación de energía eléctrica generada mediante celdas de combustibles microbiana utilizando aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas, resultó ser eficiente ya que se demostró que las aguas residuales de matadero cuando actúan como sustrato y las bacterias celulolíticas cuando actúan como catalizadores pueden remover concentración de materia orgánica presente en este tipo de agua y simultáneamente obtener como producto energía limpia al emplear las celdas de combustible microbiana. El empleo de las celdas utilizando como par de electrodos al grafito-cobre, teniendo un área de $10,8\text{cm}^2$ y con una dosis de rumen de 80ml llegaron a generar $246,88\text{ mWm}^{-2}$ en un tiempo de 144h.
2. Los valores óptimos obtenidos con el diseño empleado (Box-Behnken) resultaron que los factores que afectan significativamente a la generación de energía son el potencial redox y el área de electrodo, teniendo como valor p a 0,0011% en el potencial redox y 0,0024% en el área de electrodo. Por otro lado, la variable respuesta de remoción de la DQO, los factores que afectan significativamente es el potencial redox teniendo como valor p a 0,0121%, la dosis como valor p a 0,0077%, la interacción del potencial redox con el potencial redox teniendo como valor p a 0,0001% y la interacción del potencial redox con la dosis de rumen teniendo como valor p a 0,0208%. Finalizando que, los valores óptimos para la generación de energía es tener un potencial redox de $0,33\text{E}^\circ$, un área de electrodo de $10,8\text{cm}^2$ y una dosis de bacterias celulolíticas de 120ml, mientras que para la remoción de la DQO es tener un potencial redox de $-0,20\text{E}^\circ$, un área de electrodo de $10,8\text{cm}^2$ y una dosis de bacterias celulolíticas de 40ml.
3. Se realizó la medición de la DQO una vez terminado el proceso, observando en los resultados que las bacterias celulolíticas presentes en el agua residual son un factor importante para la degradación de materia orgánica, ya que se logró remover más del 75% de la DQO (10066,5 ppm a 1879,5 ppm) teniendo una dosis de bacterias al inicio de 120ml en 500 ml de sustrato. Además, se identificó que el pH aumento de pH de 6,35 a 6,56, teniendo una turbidez final de 56, indicando que el agua tiene un pH neutro.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda construir con celda de combustible microbiana de una capacidad mayor de 500ml, para lograr valores mayores de voltaje e intensidad de corriente obtenidos en esta investigación.
2. Se recomienda recoger datos de voltaje y corriente cada 6h después de las 144h para la generación de energía en las celdas de combustible microbiana ya que existe gran cantidad de horas sin recoger datos.
3. Se recomienda utilizar otra combinación de bacterias para aumentar la generación de energía eléctrica en las de combustible microbiana.
4. Para las siguientes investigaciones se recomienda acumular la potencia generada en baterías para alcanzar la suficiente energía para encender un foco, siendo este útil para las zonas rurales donde no tienen el acceso al suministro eléctrico.

REFERENCIAS

1. Acceso a la electricidad, sector rural (% de la población rural): Banco Mundial de Energía. (Diciembre, 2018). Banco Mundial de Energía. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.RU.ZS>
2. AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGIA. Base de Datos del Banco Mundial, Producción de electricidad a partir de fuentes nucleares [en línea], 2015 [Fecha de consulta: 15 Mayo de 2019]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/share/widget?end=2015&indicators=EG.ELC.ACCS.UR.ZS&locations=PE&start=1960>
3. AHN, Y., y LOGAN, B. Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures. *Bioresource Technology* [en línea], 2008, vol. 101(2), pp. 469–475. [Fecha de consulta: 25 Junio del 2019]. Disponible en: [10.1016/j.biortech.2009.07.039](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.039)
4. AIT-AMIR, B., POUUNET, P. y EL HAMI, A. Meta-Model Development. *Embedded Mechatronic Systems 2* [en línea], 2015, pp. 151–179. [Fecha de consulta: 15 Setiembre de 2019]. Disponible en: [10.1016/b978-1-78548-014-0.50006-2](https://doi.org/10.1016/b978-1-78548-014-0.50006-2)
5. BERİŞ, F. y ALPAY-KARAOĞLU, Ş. 3.12 Microbial Energy Production. *Comprehensive Energy Systems* [en línea], 2018, pp. 521–537 [Fecha de consulta: 29 de Mayo de 2019]. Disponible en: [10.1016/b978-0-12-809597-3.00328-x](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809597-3.00328-x)
6. BREEZE, Paul. Electricity Generation and the Environment. *Power Generation Technologies* [en línea], 2019, pp-15-31. [Fecha de consulta: 20 de abril de 2019]. Disponible en: [10.1016/b978-0-08-102631-1.00002-x](https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102631-1.00002-x)
7. CHRISTWARDANA, M. [et al.]. Microbial Fuel Cells for Simultaneous Electricity Generation and Organic Degradation from Slaughterhouse Wastewater. *International Journal of Renewable Energy Development (IJRED)* [en línea], 2016, vol. 5(2), pp. 107-112. [Fecha de consulta: 15 Abril de 2019]. Disponible en: [10.14710/ijred.5.2.107-112](https://doi.org/10.14710/ijred.5.2.107-112)
8. DHARMALINGAM, S., KUGARAJAH, V. y SUGUMAR, M. Membranes for Microbial Fuel Cells. *Microbial Electrochemical Technology* [en línea], 2019, vol. 1, pp. 143–194 [Fecha de consulta: 30 de Mayo de 2019]. Disponible en: [10.1016/b978-0-444-64052-9.00007-8](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64052-9.00007-8)
9. DO, M. [et al.]. Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review. *Science of The Total Environment* [en línea], 2018, vol. 639, pp. 910-920. [Fecha de consulta: 13 de Abril del 2019]. Disponible en: [10.1016/j.scitotenv.2018.05.136](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.136)

10. DU, Z., LI, H. y GU, T. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances* [en línea], 2007, vol. 25(5), pp.464–482. [Fecha de consulta: 18 de mayo de 2019]. Disponible en:10.1016/j.biotechadv.2007.05.004
11. DUTTA, K.,y KUNDU, P. Introduction to Microbial Fuel Cells. *Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells* [en línea], 2018, pp.1-6 [Fecha de consulta: 25 de Mayo de 2019]. Disponible en: 10.1016/b978-0-444-64017-8.00001-4
12. FANGZHOU, D [et al.]. Electricity generation directly using human feces wastewater for life support system. *Acta Astronautica* [en línea], 2011, vol. 68(9-10), pp. 1537–1547. [Fecha de consulta: 19 Julio del 2019]. Disponible en:10.1016/j.actaastro.2009.12.013
13. GEZGINCI, M., y UYSAL, Y. (2014). Electricity generation using different substrates and their different concentrations in microbial fuel cell. *Journal of Environmental Protection and Ecology* 15 [en línea], 2014, vol. 4, pp. 1744–1750 [Fecha de consulta: 19 de mayo de 2019]. Disponible en:https://www.researchgate.net/publication/270888105_Electricity_Generation_Using_Different_Substrates_and_Their_Different_Concentrations_in_MFC
14. HASANUZZAMAN, M. [et al.]. Energy Demand. *Energy for Sustainable Development* [en línea], 2019, pp. 41-87 [Fecha de consulta: 28 de abril de 2019]. Disponible en:10.1016/b978-0-12-814645-3.00003-1
15. HE, L. [et al.]. Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], 2017, vol. 71, pp. 388-503. [Fecha de consulta: 16 de Junio del 2019]. Disponible en:10.1016/j.rser.2016.12.069
16. HEILMANN, J. y LOGAN, B. Production of Electricity from Proteins Using a Microbial Fuel Cell. *Water Environment Research* [en línea], 2006, vol. 78(5), pp. 531–537. [Fecha de consulta: 10 Julio del 2019]. Disponible en: 10.2175/106143005x73046
17. HERNANDEZ, Roberto, FERNÁNDEZ, Carlos y BAPTISTA, Pilar. *Metodología de la investigación* [en línea]. 5. a ed. México: McGraw-Hill Companies, Inc, 2010. Disponible en: https://www.esup.edu.pe/descargas/dep_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigaci%C3%B3n%20ta%20Edici%C3%B3n.pdf
18. HUGOT, E. Electricity. *Handbook of Cane Sugar Engineering* [en línea], 2014, pp. 791–815. [Fecha de consulta: 25 Junio del 2019]. Disponible en:10.1016/b978-1-4832-3190-7.50051-9

19. HURTADO, Nelson, REVELO, Dolly y RUIZ, Jaime. Microbial Fuel Cells (Mfcs): A Challenge For The Removal Of Organic Matter And Electricity Generation [en línea], 2013, vol. 24(6), pp.17-28. [Fecha de consulta: 25 abril del 2019]. Disponible en: 10.4067/S0718-07642013000600004 ISBN: 978-607-15-0291-9
20. JAFARY, T. [et al.]. Investigation on performance of microbial fuel cells based on carbon sources and kinetic models. International Journal of Energy Research [en línea], 2012, vol. 37(12), pp. 1539–1549. [Fecha de consulta: 18 de mayo de 2019]. Disponible en: 10.1002/er.2994
21. JUNG, S. y PANDIT, S. Important Factors Influencing Microbial Fuel Cell Performance. Microbial Electrochemical Technology [en línea], 2019, pp. 377–406. [Fecha de consulta: 16 de Junio del 2019]. Disponible en: 10.1016/b978-0-444-64052-9.00015-7
22. KARGI, F. y EKER, S. Electricity generation with simultaneous wastewater treatment by a microbial fuel cell (MFC) with Cu and Cu–Au electrodes. Journal of Chemical Technology & Biotechnology [en línea], 2007, vol. 82(7), pp. 658–662. [Fecha de consulta: 19 de Junio del 2019]. Disponible en: 10.1002/jctb.1723
23. KHAN, M., BHATTACHARJEE, R. y AMIN, M. (2012). Performance of the Salt Bridge Based Microbial Fuel Cell. International Journal of Engineering & Technology [en línea], 2012, vol. 1(2), pp.115-123. [Fecha de consulta: 29 de Agosto de 2019]. Disponible en:10.14419/ijet.v1i2.78
24. KOECK, D. [et al.]. Genomics of cellulolytic bacteria. Current Opinion in Biotechnology [en línea], 2014, vol.29, pp. 171–183. [Fecha de consulta: 21 de Agosto del 2019]. Disponible en:10.1016/j.copbio.2014.07.002
25. KUMARI, U., SHANKAR, R. y MONDAL, P. Electrodes for Microbial Fuel Cells. Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells [en línea], 2018, pp. 125–141. [Fecha de consulta: 18 de mayo de 2019]. Disponible en:10.1016/b978-0-444-64017-8.00008-7
26. LARA, Ligia. Las aguas residuales del camal municipal del cantón baños y su incidencia en la contaminación del Río Pastaza en la Provincia de Tungurahua). Tesis (Título en Ingeniería Civil). Ecuador: Universidad técnica de Ambato, 2011, 193 pp. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/1611/1/Tesis%20587%20-%20Lara%20Villac%20C3%ADs%20Ligia%20Elena.pdf>
27. LI, M., [et al.]. Microbial fuel cell (MFC) power performance improvement through enhanced microbial electrogenicity. Biotechnology Advances [en línea], 2018, vol. 36, pp. 1316-1327 [Fecha de consulta: 13 de Mayo de 2019]. Disponible en: 10.1016/j.biotechadv.2018.04.010

28. Lu, N. [et al.]. Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology. *Biochemical Engineering Journal* [en línea], 2009, vol. 43(3), pp. 246–251. [Fecha de consulta: 25 Junio del 2019]. Disponible en: [10.1016/j.bej.2008.10.005](https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.005)
29. MISHRA, S., y DATTA-GUPTA, A. Experimental Design and Response Surface Analysis. *Applied Statistical Modeling and Data Analytics* [en línea], 2018, pp. 169–193 [Fecha de consulta: 15 Octubre de 2019]. Disponible en: [10.1016/b978-0-12-803279-4.00007-9](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803279-4.00007-9)
30. MOHAN, Y., MANOJMUTHUKUMAR, S., y DAS, D. Electricity generation using microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], 2008, vol. 33(1), pp. 423–426. [Fecha de consulta: 25 Junio del 2019]. Disponible en: [10.1016/j.ijhydene.2007.07.027](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.027)
31. NAJAFPOUR, G. Microbial Fuel Cells. *Biochemical Engineering and Biotechnology* [en línea], 2015, vol.18, pp.527-555. [Fecha de consulta: 17 de mayo de 2019]. Disponible en: [10.1016/b978-0-444-63357-6.00018-3](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63357-6.00018-3)
32. NANDY, A. y KUNDU, P. Configurations of Microbial Fuel Cells. *Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells* [en línea], 2018, pp. 25–45. [Fecha de consulta: 16 de Abril del 2019]. Disponible en: [10.1016/b978-0-444-64017-8.00003-8](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64017-8.00003-8)
33. NRIAGU, J. Environmental Pollution and Human Health in Ancient Times. *London: Encyclopedia of Environmental Health* [en línea], 2011, pp. 489–506 [Fecha de consulta: 24 de abril de 2019]. Disponible en: [10.1016/b978-0-444-52272-6.00439-6](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52272-6.00439-6)
34. PALANISAMY, G. [et al.]. A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes. *Journal of Cleaner Production* [en línea], 2019, pp.598-621 [Fecha de consulta: 24 de abril de 2019]. Disponible en: [10.1016/j.jclepro.2019.02.172](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.172)
35. PARKASH, Anand. (2015). Impact of Salt Bridge on Electricity Generation from Hostel Sewage Sludge using Double Chamber Microbial Fuel Cell. *Journal of Engineering and Technology* [en línea], 2015, vol. 1, pp. 13-18 [Fecha de consulta: 24 de Mayo de 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/313822860_Impact_of_Salt_Bridge_on_Electricity_Generation_from_Hostel_Sewage_Sludge_using_Double_Chamber_Microbial_Fuel_Cell
36. Perú es el quinto país más atractivo de América Latina para invertir en energías renovables [en línea]. *Gestión. PE.* 04 De Julio de 2019 [Fecha de consulta: 15 Mayo de 2019].

- 2019]. Disponible en: <https://gestion.pe/economia/peru-quinto-pais-atractivo-america-latina-invertir-energias-renovables-272247-noticia/>
37. PIETROSEMOLI, L., y RODRÍGUEZ, C. The Venezuelan energy crisis: Renewable energies in the transition towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], 2019, pp.415–426 [Fecha de consulta: 26 de abril de 2019]. Disponible en: 10.1016/j.rser.2019.02.014
 38. PRADEEP, N., ANUPAMA, S. y HAMPANNAVAR, U. Microbial fuel cell an alternative for COD removal of distillery wastewater. *Journal of research in Biology* [en línea], 2011, vol. 6, pp. 419-423. [Fecha de consulta: 20 de Junio del 2019]. Disponible en:https://www.researchgate.net/publication/260872427_Microbial_fuel_cell_an_alternative_for_COD_removal_of_distillery_wastewater
 39. RAHIMNEJAD, M. [et al.]. Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal* [en línea], 2015, vol. 54(3), pp. 745–756. [Fecha de consulta: 25 Junio del 2019]. Disponible en: 10.1016/j.aej.2015.03.031
 40. RODRIGO, M. [et al.]. Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell. *Journal of Power Sources* [en línea], 2007, vol. 169(1), pp. 198–204. [Fecha de consulta: 21 de Junio del 2019]. Disponible en:10.1016/j.jpowsour.2007.01.054
 41. ROY, S. [et al.]. *Microbial Fuel Cells*. London: Encyclopedia of Sustainable Technologies, 2017, 245–259 [Fecha de consulta: 28 de Mayo de 2019]. Disponible en: 10.1016/b978-0-12-409548-9.10122-8
 42. SANTORO, C. [et al.]. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources* [en línea], 2017, vol 9 (10), p. 57. [Fecha de consulta: 14 de Junio del 2019]. Disponible en:10.1016/j.jpowsour.2017.03.109
 43. SCHRÖDER, U. Fuel Cells – Exploratory Fuel Cells | Microbial Fuel Cells. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* [en línea], 2009, pp. 206–216. [Fecha de consulta: 19 Octubre de 2019]. Disponible en: 10.1016/b978-044452745-5.00290-2
 44. SCOTT, K. An introduction to microbial fuel cells. *Microbial Electrochemical and Fuel Cells* [en línea], 2016, pp. 3–27 [Fecha de consulta: 27 de Mayo de 2019]. Disponible en: 10.1016/b978-1-78242-375-1.00001-0
 45. ŞEN, Z. Energy Innovation. *Comprehensive Energy Systems* [en línea], 2018, pp. 1144–1198. [Fecha de consulta: 19 Julio del 2019]. Disponible en:10.1016/b978-0-12-809597-3.00137-1

46. STAHL, D. [et al.]. Use of phylogenetically based hybridization probes for studies of ruminal microbial ecology. *Applied and environmental microbiology* [en línea], 1998, vol. 54 (5), pp. 1079-1084. [Fecha de consulta: 29 de Setiembre de 2019]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC202606/>
47. STEPHENSON, M. The Carbon Cycle, Fossil Fuels and Climate Change. *Energy and Climate Change* [en línea], 2018, pp.1-26 [Fecha de consulta: 01 de Mayol de 2019]. Disponible en: 10.1016/b978-0-12-812021-7.00001-4
48. STRIELKOWSKI, Wadim. Renewable energy sources, power markets, and smart grids. *Social impacts of Smart Grids* [en línea], 2019, vol. 4, pp. 97–151. [Fecha de consulta: 19 Octubre de 2019]. Disponible en: 10.1006/B978-0-12-817770-9.0004-3
49. TAYLOR, L. [et al.]. Complete Cellulase System in the Marine Bacterium *Saccharophagus degradans* Strain 2-40T. *Journal of Bacteriology* [en línea], 2006, vol. 188(11), pp. 3849–3861. [Fecha de consulta: 15 Agosto de 2019]. Disponible en:10.1128/jb.01348-05
50. THARALI, A., SAIN, N. y OSBORNE, W. (2016). Microbial fuel cells in bioelectricity production. *Frontiers in Life Science* [en línea], 2016, vol. 9(4), pp. 252–266. [Fecha de consulta: 25 Mayo del 2019]. Disponible en:10.1080/21553769.2016.1230787
51. TOCZYŁOWSKA, R., SZYMONA, K. y KLOCH, M. Bioelectricity production from wood hydrothermal-treatment wastewater: Enhanced power generation in MFC-fed mixed wastewaters. *Science of The Total Environment* [en línea], 2018, vol. 634, pp. 586–594. [Fecha de consulta: 19 Julio del 2019]. Disponible en:10.1016/j.scitotenv.2018.04.002
52. VIRDIS, B. [et al.]. Microbial Fuel Cells. *Treatise on Water Science* [en línea], 2011, pp. 641–665. Disponible en: 10.1016/b978-0-444-53199-5.00098-1
53. WAGNER, J, MOUNT, E., y GILES, H. Design of Experiments. *Extrusion* [en línea], 2014, pp. 291–308. [Fecha de consulta: 15 Octubre de 2019]. Disponible en: 10.1016/b978-1-4377-3481-2.00025-9
54. WANG, X. [et al.]. Air pollution terrain nexus: A review considering energy generation and consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], 2019, vol.105, pp.71-85 [Fecha de consulta: 29 de abril de 2019] Disponible en: 10.1016/j.rser.2019.01.049
55. WEIMER, P. Microbial Ecology of the Rumen. *Reference Module in Life Sciences* [en línea], 2019, pp. 125-133 [Fecha de consulta: 29 de Octubre de 2019]. Disponible en:10.1016/b978-0-12-809633-8.20793-0

56. WILLIAMSON, K. Observation. Research Methods [en línea], 2018, pp. 405–427. [Fecha de consulta: 15 Octubre de 2019]. Disponible en:10.1016/b978-0-08-102220-7.00017-0
57. WU, W. [et al.]. Influence of substrate on electricity generation of *Shewanella loihica* PV-4 in microbial fuel cells. Microbial Cell Factories [en línea], 2014, vol. 13(1), p. 69 [Fecha de consulta: 17 de mayo de 2019]. Disponible en: 10.1186/1475-2859-13-69
58. YU, Liu y YILDIZ, İlhami. (2018). 1.24 Energy and Water Pollution. Comprehensive Energy Systems, [en línea], 2019, vol. 1.24, pp.950–979 [Fecha de consulta: 22 de abril de 2019]. Disponible en: 10.1016/b978-0-12-809597-3.00128-0
59. ZHI, W. [et al.]. Methods for understanding microbial community structures and functions in microbial fuel cells: A review. Bioresource Technology [en línea], 2014, vol. 171, pp. 461–468 [Fecha de consulta: 28 de Mayo de 2019]. Disponible en: 10.1016/j.biortech.2014.08.096

ANEXOS

ANEXO 1

TIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE	ELECTROLITO	RANGO DE TEMPERATURA	APLICACIÓN
Membrana de combustible de intercambio de protones	Membrana Polimérica	80-100	Transporte de Industrias
Celda de combustible alcalina	Hidróxido de Potasio	150-200	Estaciones Espaciales
Celda de combustible de ácido fosfórico	Ácido Fosfórico	180-200	Producción de Hidrógeno
Celda de combustible de óxido sólido	Circonia estabilizada por Itria	1000	Plantas de Alta Potencia
Celda de combustible de carbonato fundido	Litio/Carbonato de Potasio	650	Plantas de Alta Potencia
Celda de combustible de metanol directo	Membrana Polimérica	30-80	Producción de Hidrógeno
Celdas de biocombustible	Membrana Polimérica	Temperatura Ambiente	Tratamiento de Aguas Residuales

Fuente: Dharmalingam, S., Kugarajah, V. y Sugumar, M., 2019

ANEXO 02**FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DEL RUMEN (BACTERIAS CELULOLITICAS)**

NOMBRE DEL LUGAR DE RECOLECCION		
TIPO DE AGUA RESIDUAL		
UBICACIÓN		
DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO
CANTIDAD DE AGUA RESIDUAL	FECHA	TIPO DE MATERIAL

ANEXO 03**FICHA DE LAS RECOLECCION DE LAS AGUAS RESIDUALES**

ENCARGADO		
NOMBRE DEL CUERPO DE AGUA		
TIPO DE CUERPO DE AGUA		
UBICACIÓN		
DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO
COORDENADAS		
X	Y	M.S.N.M
DATOS		
TIPO DE MUESTREO		
FECHA		
HORA		
VOLUMEN RECOLECTADO		

ANEXO 04

FICHA DE LOS ANÁLISIS FISICOQUIMICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES

FECHA		HORA	
ENCARGADO			
VOLUMEN PARA LA CCM			
VOLUMEN DE MUESTRA PARA EL ANALISIS			

	ANALISIS FISICOQUIMICOS DE LA MUESTRA				
	pH	C.E	TURBIDEZ	DQO	TEMPERATURA
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					

ANEXO 5: Matriz de consistencia

OBJETIVO	PROBLEMA	HIPÓTESIS	VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
GENERAL	GENERAL	GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE: Aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas	Características del rumen	pH	Ordinal
Evaluar la generación de energía eléctrica producida por las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana	¿Cuál es la cantidad de energía eléctrica que producen las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana?	Los valores de voltaje y corriente obtenidos son mayores a 824 mV y 0.34 mA		Características de las aguas residuales de matadero	Temperatura	
					pH	
					Conductividad Eléctrica	
Turbidez						
DQO						
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	VARIABLE DEPENDIENTE: Generación de energía eléctrica	Generación de Energía Eléctrica	Intensidad de Corriente	Ordinal
Determinar los valores óptimos para la generación de energía eléctrica y remoción de DQO producida por las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana	¿Cuáles son los valores óptimos para la generación de energía eléctrica y remoción de DQO que producen las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana?	Los valores óptimos para la generación de energía eléctrica son el grafito, teniendo un área de 24,4cm ² y una dosis de rumen de 120ml; y los valores óptimos para la remoción de DQO son el cobre, teniendo un área de 24,4cm ² y una dosis de rumen de 120ml			Voltaje	
Determinar la máxima eficiencia de remoción de DQO de las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana.	¿Cuál es la máxima eficiencia de remoción de DQO de las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana?	La máxima eficiencia de remoción de DQO es de un 65% de las aguas residuales de matadero nutrido con bacterias celulolíticas en celdas de combustible microbiana.			Potencia	

ANEXO 6

