



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Revisión bibliográfica de la generación de electricidad mediante la aplicación de
bacterias electrogénicas**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental**

AUTORES:

Sinche Solano, Maycol (ORCID: 0000-0002-6393-4287)

Velasquez Cokche, Aaron Rodrigo (ORCID: 0000-0002-4437-3285)

ASESOR:

Dr. Valdiviezo Gonzales, Lorgio Gilberto (ORCID: 0000-0002-8200-4640)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA - PERÚ

2020

Dedicatoria

A mis padres pues su ayuda fue fundamental en todo este proceso de investigación, gracias a ustedes y al tiempo que me brindaron en los momentos más influyentes de toda esta etapa forjando a la gran persona que actualmente soy.

Agradecimiento

A la universidad “Cesar Vallejo”, la institución que me dio la bienvenida a un mundo diferente, pues sin la enseñanza probablemente no hubiese tenido la oportunidad de surgir en la vida. Agradezco mucho a mis profesores y compañeros que fueron parte de mi aprendizaje.

Índice de contenidos

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. MARCO TEÓRICO.....	12
III. MÉTODO.....	20
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	20
3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriostica.....	21
3.3. Escenario de estudio.....	22
3.4. Participantes.....	22
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	22
3.6. Procedimientos.....	22
3.7. Rigor científico.....	23
3.8. Método de análisis de información.....	23
3.9. Aspectos éticos.....	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
V. CONCLUSIONES.....	32
VI. RECOMENDACIONES.....	33
REFERENCIAS.....	41
ANEXOS.....	34

Índice de tablas

<i>Tabla N° 1 Producción eléctrica por zona (GWh).....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla N° 2 Producción eléctrica por zona y origen en el país.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla N° 3 Tipo de CCM y su rendimiento generado</i>	<i>14</i>
<i>Tabla N° 4 Taxonomía de las bacterias que generan energía.....</i>	<i>15.</i>
<i>Tabla N° 5 Resultados y estudios realizados anteriormente</i>	<i>18</i>
<i>Tabla N°6 Matriz de caracterización apriorística.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla N°7 Resultados de los mecanismos de transferencia y sustratos empleados.....</i>	<i>25</i>

Índice de figuras

<i>Figura 1 Modelo bioquímicamente estructurado para la estimación de la Eficiencia de una celda de combustible.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2. Representación esquemática de tipos de celda de combustión microbiana.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3. Modelo metabólico de una célula del género geobacter.....</i>	<i>16</i>

Índice de abreviaturas

<i>MINEM: Ministerio de energía y minas.....</i>	<i>10</i>
<i>J: Joule.....</i>	<i>10</i>
<i>GEI: Gases de efecto invernadero.....</i>	<i>10</i>
<i>GtCO₂/ año: giga toneladas de dióxido de carbono por año.....</i>	<i>10</i>
<i>GWh: Giga watt por hora.....</i>	<i>11</i>
<i>CCM: celda de combustión microbiano.....</i>	<i>12</i>
<i>MIP: membrana intercambiadora de protones.....</i>	<i>13</i>
<i>DP: densidad de potencia.....</i>	<i>18</i>

RESUMEN

Los objetivos de la presente investigación fueron explicar el mecanismo de transferencia de electrones que realizan las bacterias en la obtención de energía eléctrica y describir las características de los sustratos que se utilizan en la aplicación de bacterias electrogénicas, se usó una metodología de selección de 50 investigaciones, de las cuales 40 son artículos y 10 tesis, libros basadas en teorías y conocimiento de un problema particular. Se obtuvo como mejor resultado el lodo anaerobio con una densidad de potencia de 3650mW/m^2 utilizando glucosa y acetato como sustratos además de presentar el mecanismo directo de transferencia de electrones; se concluye por los resultados obtenidos que dicho mecanismo de transferencia directa de electrones es el más eficiente y que los sustratos influyen directamente en la generación de energía, no obstante, se recomienda mayores investigaciones futuras que otorguen su mejoría en características, mayor rendimiento y aplicaciones en zonas de altitudes superiores para alivianar las necesidades energéticas de las poblaciones más alejadas del país.

Palabras claves: celdas de combustión microbiana, bacterias electrogénicas, bioelectricidad, microorganismos y sustratos.

ABSTRACT

The objectives of this research were to explain the mechanism of electron transfer that bacteria perform in obtaining electrical energy and to describe the characteristics of the substrates used in the application of electrogenic bacteria. A selection methodology of 50 investigations was used, of which 40 are articles and 10 theses based on theories and knowledge of a particular problem. The best result was obtained with the anaerobic sludge with a power density of 3650mW/m² using glucose and acetate as substrates in addition to presenting the direct mechanism of electron transfer; it is concluded by the results obtained that this mechanism of direct electron transfer is the most efficient and that the substrates directly influence the generation of energy, however, further research is recommended to provide its improvement in characteristics, higher performance and applications in areas of higher altitudes to alleviate the energy needs of the most remote populations of the country.

Keywords: microbial combustion cells, electrogenic bacteria, bioelectricity, micro-organisms and substrates.

I. INTRODUCCIÓN

Los problemas más severos que afronta la sociedad actual son la crisis energética y la contaminación hídrica. Gonzales (2015, p.24), comenta que la población actual consume 410×10^{18} J de energía por año, esto es equiparable a 9×10^{16} L de petróleo. Este aumento de demanda ha originado serios problemas de contaminación ambiental en el planeta, y más del 50% de la generación de energía utiliza petróleo. En el año 2017 cerca de 1 millón de viviendas no disponen de alumbrado eléctrico y la mayor concentración se ubica en zonas rurales y urbanas. (MINEM, 2017, p.93). La generación de energía desarrolla un papel fundamental en el calentamiento global por 2 razones. La primera por ser responsable de una gran parte de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI): Actualmente, la electricidad representa casi 14 GtCO₂/año, es decir, alrededor del 29% de las emisiones anuales totales de gases de efecto invernadero. En segundo lugar, la electricidad se puede emplear como reemplazo de los combustibles fósiles, por ejemplo, el consumo directo de energía para vivienda y transporte en conjunto muestra cerca del 30% de las emisiones totales de energía; y el consumo de energía industrial representa un 19% adicional para producir movimiento o calor (Audoly et al., 2018, p.1). Es por eso que en el mundo los sistemas de energía se están moviendo hacia una producción que está basada primordialmente en fuentes de energías sustentables (Sorknaes et al., 2020, p.1). Se estima que el acceso de energía eléctrica a nivel mundial en áreas rurales al 2015 era de 77%, para el 2014 la producción eléctrica proveniente del petróleo, gas y carbón es del 66.345% y en Perú del 47,807% MINEM (2020, p.5), sostiene que en diciembre 2019 se muestra alrededor del 80% de la producción nacional eléctrica proviene de la zona centro del país, el 12% genera la zona sur, 6.1% zona norte y 1.5% zona oriente del Perú. A continuación, se establece los datos de producción eléctrica otorgados por el MINEM de los años 2018-2019 dentro del territorio peruano.

Tabla N° 1: Producción eléctrica por zona (GWh).

ZONA	DICIEMBRE		Δ	ACUMULADO ENERO-DICIEMBRE		Δ
	2018	2019		2018	2019	
Norte	312	301	-4%	3218	3482	8%
Centro	3814	3961	4%	43933	45774	4%
Sur	646	616	-5%	6860	6860	0,5%
Oriente	65	74	13%	851	851	-7%
Total	4838	4951	2,3%	56967	56967	3,8%

Fuente: MINEM (2019).

Tabla N°2: Producción eléctrica por zona y origen en el país.

ZONA	Diciembre 2019				
	Eólica	Hidráulica	Solar	Térmica	Total
Norte	73	144	-	84	301
Centro	-	2674	0,01	1287	3961
Sur	58	459	77	21	616
Oriente	-	-	-	74	74
Tota	131	3277	78	1466	4951

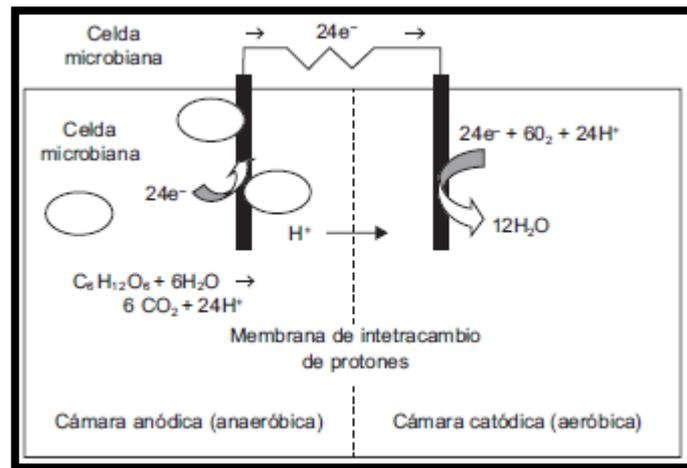
Fuente: MINEM (2019).

La presente revisión bibliográfica incluye una justificación teórica basada en artículos científicos internacionales de revista indexadas y organismos internacionales, por ende esta investigación permitirá tener acceso a la información orientada a un enfoque más amplio de la interacción de los microorganismos que generan energía eléctrica a través de una celda de combustión microbiana (CCM), ya sea utilizando sustratos como las aguas residuales y/o otros componentes, posibilitando al investigador, contrastar diferentes conceptos del tema en una realidad concreta, además de tener el respaldo concerniente a las nuevas opciones de energías renovables con menos impacto al ambiente. Es por ello que el presente estudio tiene por objetivo general realizar una revisión bibliográfica de la generación de energía eléctrica aplicando diversos tipos de bacterias electrogénicas, mientras que los objetivos específicos son explicar el mecanismo de transferencia de electrones que realizan las bacterias en la obtención de energía eléctrica y describir las características de los sustratos que se utilizan en la aplicación de bacterias electrogénicas, luego tenemos el planteamiento de los siguientes problemas como

se muestra en la descripción; problema general ¿Cuáles son los aspectos más importantes en el uso de bacterias electrogénicas? ; Además de los problemas específicos: ¿Cuál es el mecanismo de transferencia de electrones en las bacterias electrogénicas para el proceso de la obtención de energía eléctrica? y ¿Cuáles son las características de los sustratos que se utilizan en la aplicación de bacterias electrogénicas?.

II. MARCO TEÓRICO

La bioenergía en celdas de combustión se realiza mediante microorganismos anaerobios inmersos en aguas residuales, se puede promover el crecimiento de los microbios y las reacciones químicas en un nicho específico (Wang et al., 2020, p.1). La capacidad que tiene un CCM para producir electricidad ante cualquier sustrato biodegradable está siendo potencialmente estudiada para el tratamiento de aguas residuales principalmente por ser una alternativa ecológica y una tecnología adaptable a la digestión anaerobia convencional (Kalathil, Patil y Pant, 2018, p.310). Las celdas de combustible microbiano (CCM), generan electricidad por medio de la oxidación de compuestos orgánicos mediante los microorganismos, usualmente una CCM consta de 2 cámaras (ánodo y cátodo) por la primera cámara fluyen los electrones hacia el cátodo mediante un circuito eléctrico externo, mientras que en el cátodo se lleva a cabo la reacción de reducción de oxígeno debido a que los protones fluyen por la membrana intercambiadora de protones (Escamilla, et al., 2018, p.332). La CCM se divide en 2 tipos de cámaras principales, cámara única y doble. En la configuración de doble cámara los compartimentos de ánodo y cátodo están separados por la membrana conductora de iones o puente de sal, siendo diferentes las soluciones de anolitos y catolitos, mientras en una configuración de 1 cámara, está ausente la cámara catódica eliminando la membrana y los 2 electrodos están en contacto con la misma solución (Squadrito y Cristiani, p.149). En este sistema (CCM) las bacterias consumen el sustrato produciendo así electrones y protones a partir de la respiración celular, estos sustratos son materia orgánica como el butirato, acetato, lactosa, glucosa y aguas residuales (Tran, Lee y Kim, 2019, p.2).



A continuación se muestra en la Fig, 1, el proceso como los microorganismos generan energía eléctrica

Figura 1: Modelo bioquímicamente estructurado para la estimación de la Eficiencia de una celda de combustible.

Fuente: (Escamilla et al, 2018, p.332).

A continuación, se aborda el tipo de arquitectura de una CCM las cuales poseen diferentes configuraciones que han sido estudiados en el tiempo, entre ellas tenemos celda con diferentes tipos de cámaras. La celda de 2 cámaras la cual incluye el compartimento anódico, catódico y su separador ante esto interviene la membrana intercambiadora de protones (MIP) la cual es utilizada como puente que permitirá a los protones moverse mediante de ellos. Otro tipo de CCM es de cámara única la cual carece de membrana intercambiadora garantizando así el suministro de oxígeno en el cátodo mediante difusión directa de aire. A esto se suma una CCM de triple cámara que está comprendida por un compartimento anódico, centro de desalinización y un compartimento catódico donde los microorganismos oxidan la materia orgánica trasladando los electrones hacia el ánodo, mientras en el compartimento catódico se va reduciendo el oxígeno (Roy et al., p.251). Las CCM de una cámara tienen limitaciones ya que no poseen cámara catódica y anódica solo usa el oxígeno como el aceptor de electrones, la CCM de una cámara utiliza electrodos de grafito tanto en el anodo como en el catodo y la bacteria E.coli como biocatalizador, este fue diseñado en un solo recipiente de vidrio en la cual se utilizó

una capa de porcelana permeable a los protones para separar el catodo montado (Tamboli y Satya, 2019, p.416).

Se muestra en la siguiente figura el diseño arquitectónico de una CCM con 1, 2 y 3 camaras respectivamente

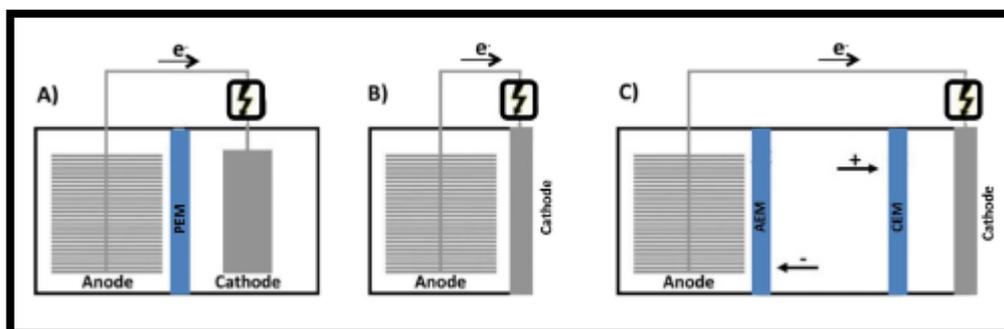


Fig.2 Representación esquemática de tipos de celda de combustión microbiana. (A) Celda de dos cámaras, B) celda de una cámara y C) celda de tres cámaras.

El diseño y arquitectura de una CCM inciden directamente en la aplicación de tratamiento de agua residuales ya que logra altas densidades de potencia (Li et al., 2017, p.389). A continuación, se hace mención de las aplicaciones de los diferentes tipos de celdas mediante la presente tabla.

Tabla N° 3. Tipo de CCM y su rendimiento generado.

Tipo de CCM	Rendimiento
Una cámara	La densidad de potencia generada fue de 103 mw/m ² (milliwatts/cm ²)
Con dos camaras	La máxima densidad de potencia fue de 25 mW/m ²

He., et al (2017).

Las bacterias que tienen la capacidad de generar electricidad, son los siguientes géneros Rhodoferrax, Shewanella, Pseudomonas, Aeromonas, Geobacter, Geopsychrobacter, Desulfuromonas, Clostridium y Geothrix (Serment et al., 2017, p.11). Las bacterias tienen un mecanismo fotosintético que es una proteína, dentro de ello está establecido todo el sistema donde se absorbe luz y conduce a formar el primer paso para generar energía, es decir, las bacterias cargan eléctricamente su membrana a disimilitud de las plantas (Calvo, 2008); es por ello que la bacteria

por medio de su metabolismo adquiere electrones y los transfiere en un gran porcentaje hacia algún electrodo, este proceso no requiere ningún mediador por los nanocables (Pili) que se conectan inmediatamente sobre el electrodo (Romero, Adrián y Lugo, 2012,p.127). A continuación, se realiza la presentación de la taxonomía de bacterias que generan electricidad.

Tabla N° 4. Taxonomía de las bacterias que generan energía.

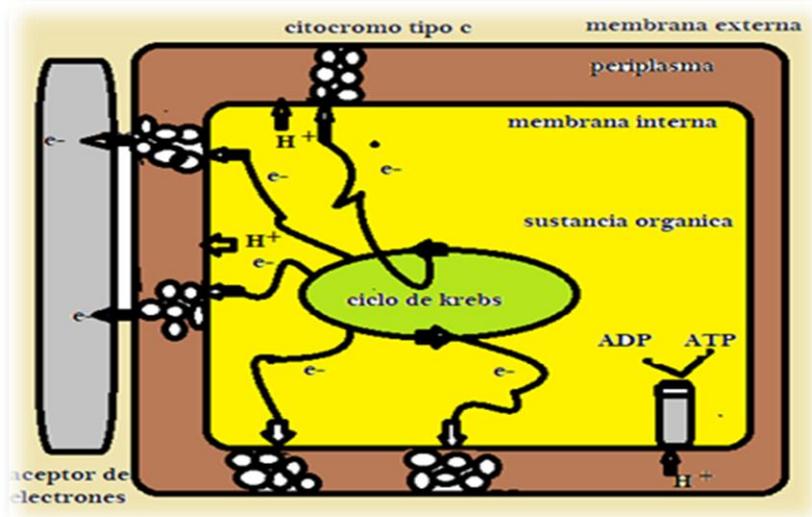
Dominio	Phylum	Familia	Genero	Especie
Bacteria	Proteobact eria	Comamonadacea e	Rhodoferax	R. Ferriducens
Bacteria	Proteobact eria	Shewanellaceae	Shewanella	Oneodensis
Bacteria	Proteobact eria	Pseudomonadac eae	Pseudomon as	P. Aeruginosa
Bacteria	Proteobact eria	Aeromonadaceae	Aeromonas	Hydrophyla
Bacteria	Proteobact eria	Geobacteraceae	Geobacter	G.sulfurreduc ens
Bacteria	Firmicutes	Clostridiaceae	Clostridium	G.perfringens

Fuente: Elaboración propia

Las bacterias electrogénicas o llamado biocatalizador utilizan el sustrato orgánico presente en la cámara anódica liberando electrones en el ánodo, que se reducirán en el cátodo en presencia de un aceptador terminal de electrones para posteriormente generar energía (Krishna, 2017, p.1). El sustrato otorga condiciones propicias para las bacterias además de otorgar un efecto promotor de actividad y estimulación (Cortés et al, 2015, p.155), del mismo modo, para Vejarano (2017, p.1) la concentración del sustrato influye en la producción de energía en la celda de combustión microbiana. Son numerosos los estudios realizados anteriormente sobre el uso de sustratos en CCM, pues son a condiciones de pH neutro con sustratos orgánicos tales como glucosa y acetato además de materiales complejos, sin embargo, los sustratos inorgánicos en CCM han sido poco estudiados, es decir, compuestos como sulfato, azufre y tetrionato (Jibaja et al., 2019, p.4). El sustrato compone el combustible a través del cual se produce la energía; inicialmente, se usaron sustratos simples como glucosa y acetato, sin embargo, actualmente se

emplean sustratos menos convencionales con la finalidad de utilizar la biomasa de las aguas residuales de distinto tipo y complementarlas para producir energía; los tipos de sustratos empleados son: El acetato, debido a su inactividad hacia los procesos microbianos (metanogénesis y fermentación), sacarosa, glucosa, almidón, lactato, tintes sintéticos, lactosa, maltosa, xilosa, formiato, propionato, etanol, entre los más importantes (Revelo, 2013, p.23).

Por otro lado, cuando se usa aguas residuales como sustrato se considera una tecnología sustentable para reemplazar las demandas crecientes de energía (Lopez, 2014, p.15). El metabolismo se origina por la sucesión de reacciones catalizadas enzimáticamente dividiéndose en catabolismo y anabolismo. El desarrollo por el cual la célula bacteriana sintetiza sus componentes propios se denomina anabolismo, por otro lado, el conjunto de reacciones degradativas de los nutrientes para conseguir electrones se conoce como catabolismo; entonces el metabolismo es el resultado colectivo de ambas reacciones que ocurren en la bacteria. (Varela y Grotiuz, 2012, p.43). Generalmente el metabolismo celular de los microorganismos para degradar los contaminantes, es de acuerdo a la manera de obtención de energía de estos, por otro lado, el metabolismo de las bacterias electrogénicas es quimioorganótrofo anaerobio, entonces, utilizan compuestos orgánicos como fuente de energía y de carbono para su desarrollo o crecimiento (Romero, 2012, p.4); es por ello que el metabolismo de las bacterias electrogenicas permitiría mayor eficiencia eléctrica (Jiménez, Garibay y Borja, 2017, p.341), además de ello según Haig y Da Motta (2019) el metabolismo microbiano puede



estar limitado según el carbono disponible. A continuación, presentamos el modelo metabólico de una célula generadora de electricidad.

Figura 3: Modelo metabólico de una célula del género *geobacter*.

El ciclo de Krebs genera dióxido de carbono (CO₂) y poder reductor que se aprovecha en la cadena transportadora de electrones, llegando al oxígeno y produciendo un gradiente de protones (H⁺) , que aprovecha para generar energía mediante ATP sintasa.

Fuente: Elaboración propia

Para Saavedra (2012, p.7) los electrones se pueden transferir de diferentes maneras:

- Transferencia directa por medio de estructuras bacterianas denominadas nanocables (pilis).
- Transferencia indirecta, con intermedios lanzadores de electrones.

Se necesita que los microorganismos transfieran sus electrones al electrodo en la cámara anaeróbica para que posteriormente pueda generar energía; en las bacterias *geobacter* es de transferencia directa vía citocromos tipo C porque al estudiar su secuenciado genoma hallaron gran cantidad de citocromos de ese tipo, la manera en que esta bacteria transfiere los electrones al electrodo, es por medio de 100 citocromos tipo C codificados en su genoma, asociados a la membrana externa, periplasma e interna (Jibaja, 2018, p.12).

El proceso principal, importante en términos de rendimiento eléctrico, es la transferencia de electrones inicialmente desde las células hasta la superficie del ánodo (Rozszenberszki et al., 2015, p.2); además según Logroño et al. (2014) la tasa de carga que tiene el sustrato influye en la bioelectricidad generada.

DÉNSIDAD DE POTENCIA

Se expresa como la potencia por unidad de área del electrodo (Wang et al, 2010), o también se conoce como la potencia por unidad de volumen del sustrato (Luo y Zhang, 2010), y esta se calcula de la siguiente manera

Ecuación 1: Densidad de potencia (DP)

$$DP = \frac{\text{Potencia (mW)}}{\text{Area de contacto del electrodo}(m^2)}$$

$$DP = P / A$$

$$A = 2\pi r \times h$$

Donde:

DP: densidad de potencia

P: potencia (mW)

A: área de contacto del electrodo(m^2)

ANTECEDENTES

Tabla N°5.- Resultados de estudios realizados anteriormente

Tipo de celda	Tipo de electrodo (ánodo) y su medida	Sustrato empleado	Volumen del sustrato	Tipo de bacteria	Densidad de Corriente (mA/m ²)	Autor
CCM(3 cámaras)	Tela de carbono simple (6,5 cm x 6,5 cm)	Agua residual sintética	2,126 g/L	Bacteria electrogénica	407mA/m ²	(Ragab et al.,2019)
CCM (2 cámaras)	Fibra de carbono lineal (20 cm)	Agua residual doméstica y acetato de Sodio	1.5 g/L	Geobacter metallireducens	489±50 w/m ²	(Han et al., 2020)
CCM(3 cámaras)	Escobilla de carbón cilíndrica	Acetato de Sodio	3 g/L	G. sulfurreducens	1.63 ± 0.04 W/m ²	(Santoro et al.,2017)
Cámara sencilla, MIP Nafion 115	Filtro de carbono suspendido en varilla de grafito	Glucosa y acetato	0.2 g/L	Lodo de digestor anaeróbico	3650mW/m ²	(Borole et al.,2009)
CCM (2 cámaras)	Electrodo de grafito de 3 mm de diámetro	compuestos inorgánicos reducidos de azufre	2 g/L	Acidithiobacillus Ferrooxidans	12,5 mA·cm ⁻²	(Saavedra 2012)
CCM (2 cámaras)	Electrodos de filtro de grafito de 1 x 1 cm	iones tiosulfato y férrico	36 ml	At. ferrooxidans LB151	24,23 mW/m ²	(Jibaja et al.,2019)
CCM (2 cámaras)	cámara anódica con 1,6 g de carbón activado	carbonato de potasio	0.1 ml	Shewanella putrefaciens	0.039w/m ²	(Vanegas, Cardona y Zapata, 2020)
1 reactor anaerobio de flujo ascendente y una CCM	Escobillon de fibras de carbón (2.5 mm de diámetro y 2.5 mm de longitud)	agua residual	1 g/L	Bacterias exoelectrogenicas	176 mW/m ²	(Martinez et al., 2016)
CCM (4 cámaras)	Gránulos de grafito	Agua residual sintético	200mg/L	Lodo anaeróbico	205 mW/m ²	(Guambo y Allauca 2015)

CCM (2 camaras)	Tela de grafito de 16 cm2 cada uno, acoplada a un alambre de acero inoxidable de 3.5 cm de longitud	Acetato y glucosa	0.0295 mg/L	Geobacter sulfurreducens	0.02142 mW/cm2	(Serment et al. 2017)
--------------------	--	----------------------	----------------	-----------------------------	-------------------	--------------------------

III. MÉTODO

2.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación es BÁSICA cuyo objetivo es profundizar o crear nuevas teóricas sobre cierto objeto y tema a investigar porque se sustenta en teorías y conocimientos de un problema particular.

Asimismo, el diseño es narrativo de tópicos, debido a que es un esquema de investigación e intervención que cuenta una historia que ayuda a procesar asuntos que no están claros, se utiliza con el objetivo de evaluar una serie de acontecimientos (Hernández, Fernández y Baptista, 2010, p.504).

<p>Describir las características de los sustratos que se utilizan en la aplicación de bacterias electrogénicas</p>	<p>¿Cuáles son las características de los sustratos que se utilizan en la aplicación de bacterias electrogénicas?</p>	<p>Sustratos</p>	<p>Orgánicos</p> <p>Inorgánicos</p>	<p>(Han et al., 2020)</p> <p>(Santoro et al., 2017)</p> <p>(Vanegas, Cardona y Zapata, 2020)</p> <p>(Martinez et al., 2016)</p> <p>(Kong, Yang y Sun, 2018)</p> <p>Kaushik and Jadhav, 2017)</p> <p>(Qu, 2011)</p> <p>(Guambo y Allauca 2015)</p>
--	---	-------------------------	-------------------------------------	---

2.3. Escenario de estudio

Nuestra investigación al tratarse de una revisión bibliográfica no cuenta con un estudio de escenario definido, sin embargo, se tomó como fuente artículos internacionales indexados para la elaboración del informe de investigación en base a revisiones que proporcionan contenidos consistentes sobre bacterias electrogénicas capaces de generar electricidad mediante una celda de combustión microbiana.

2.4. Participantes

En esta investigación se ha considerado artículos científicos, tesis, libros, capítulos de libros, portales web de ministerios y web internacional. Las fuentes empleadas fueron bibliotecas virtuales de revistas indexadas como: Scielo, Scopus, Web of Science (WoS) y Scince Direct además de investigaciones de universidades nacionales y extranjeras.

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica empleada ha sido la recopilación de datos de fuentes confiables como son las revistas indexadas, asimismo el instrumento de recolección que se muestra en el anexo N° 1, la cual nos permitió extraer información como los nombres de los autores, los objetivos, metodología y resultados.

2.6. Procedimientos

Inicialmente se realizó el muestreo de la información mediante palabras claves en inglés y español, en el cual se obtuvo 120 artículos actualizados no mayor a 5 años, posteriormente se realizó un proceso de selección donde se obtuvo 50 artículos primordiales de los cuales 10 fueron libros, tesis y 40 eran artículos, como criterio de selección se tomó la repartición de los 120 artículos por lo cual optamos por eliminar aquellos que no se asemejaban a la investigación requerida, también se eliminó aquellos artículos que no contaban con una indexación adecuada, otro punto esencial fue la antigüedad de los artículos lo cual fue un claro indicativo para poder descartar dicha información. Estos criterios selectivos ayudaron a obtener la cantidad final de referencias la cual se incluyó en el informe de investigación.

Palabras claves: celdas de combustión microbiana, bacterias electrogénicas, bioelectricidad, microorganismos y sustratos

2.7. Rigor científico

Nuestro trabajo tiene coherencia lógica ya que se ha extraído información de diversas fuentes indexadas debido al respaldo que presenta.

- En esta investigación se estableció el criterio de dependencia debido a la consistencia de la información utilizando la estrategia de comparación de métodos y resultados.
- Se establece el criterio de credibilidad debido a que busca establecer la confianza en la investigación mediante métodos asignados.
- Nuestra investigación cumple con el criterio de transferencia debido a que el investigador presenta un compromiso por proporcionar la suficiente información en el contexto estudiado para así compararlos con otros estudios.

2.8. Método de análisis de información

Inicialmente se agrupó y analizó la información coherentemente y prosiguió a realizarse los criterios de análisis de información.

- Uno de los criterios fue agrupar los antecedentes y el método de acuerdo a las similitudes que tienen las bacterias que transfieren electrones con la parte del diseño de una celda de combustión microbiana para mejorar su rendimiento.
- Se buscó las ventajas y desventajas que tenían los artículos antiguos con los más actuales debido a lo complejo de la información.
- Se indagó las similitudes y diferencias de los tipos de celdas de combustión para una eficiente generación de electricidad.

2.9. Aspectos éticos

El presente informe de investigación se realizó con fines académicos, donde se usaron fuentes de revistas indexadas como Science direct, Scopus, Scielo y Dialnet.

Asimismo, la información proporcionada es auténtica en todo el contenido, además se maneja una consideración intelectual por parte de los autores que aportan a nuestro informe de investigación los cuales fueron debidamente citados.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados en este capítulo son de acuerdo al mecanismo de transferencia de electrones y el tipo de sustrato más empleado, obteniéndose lo siguiente:

Tabla N°7: Resultados de los mecanismos de transferencia y sustratos empleados.

Mecanismos de transferencia de electrones	Bacteria empleada/ sustrato	Densidad de potencia (mW/m²)	Autor
La concentración del donante de electrones se da hacia el ánodo y a la resistencia externa. (Mecanismo de transferencia directa)	Lodo de digester anaeróbico / glucosa y acetato (sustrato orgánico)	3650mW/m ²	(Borole et al.,2009)
Las bacterias del biofilm son responsables de transferir los electrones al electrodo del ánodo sin mediadores. La corriente se incrementó debido a la alta actividad electrogénica, la alta transferencia de electrones al cátodo y la reacción catódica más rápida. (Mecanismo de transferencia directa)	Bacteria electrogénica/agua residual sintético (sustrato orgánico)	407mA/m ²	(Ragab et al.,2019)

<p>En el ánodo, las bacterias exoelectrogénicas utilizan los químicos orgánicos del agua y liberan electrones que se transfieren al cátodo a través del circuito. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Geobacter metallireducens/ Agua residual doméstica y acetato de Sodio (<i>sustrato orgánico</i>)</p>	<p>489±50 w/m²</p>	<p>(Han et al., 2020)</p>
<p>En particular, las bacterias electroactivas en el ánodo oxidan los orgánicos en las aguas residuales produciendo electrones, protones, dióxido de carbono e intermediarios orgánicos. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Bacterias electroactivas/ Acetato de Sodio (<i>sustrato orgánico</i>)</p>	<p>1.63 ± 0.04 W/m⁻²</p>	<p>(Santoro et al., 2017)</p>
<p>La baja densidad de corriente está relacionada con la poca transferencia de electrones. (Mecanismo de transferencia indirecta)</p>	<p>Shewanella putrefaciens/carbonato de potasio</p>	<p>0.039w/m²</p>	<p>(Vanegas, Cardona y Zapata, 2020)</p>

<p>Bajas resistencias externas favorecen la transferencia de electrones al ánodo por las bacterias exoelectrogénicas, lo que aumenta la generación de corriente eléctrica. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Bacterias exoelectrogenicas/agua residual (sustrato orgánico)</p>	<p>176 mW/m²</p>	<p>(Martinez et al., 2016)</p>
<p>Transferencia de electrones directa e indirectamente (Se usó ambos mecanismos de transferencia)</p>	<p>Lodo anaeróbico/Agua residual sintético (sustrato orgánico)</p>	<p>205 mW/m²</p>	<p>(Guambo y Allauca 2015)</p>
<p>Las especies bioelectroactivas (por ejemplo, los citocromos de la membrana externa, la conductividad de Pili y las excreciones extracelulares) desempeñan un papel en la transferencia de electrones entre las biopelículas y el electrodo de ánodo. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>actinobacterias y deltaproteobacterias / glucosa (sustrato orgánico)</p>	<p>327,67mW/m²</p>	<p>(Huarachi et al., 2017)</p>

<p>Los electrones del compuesto inorgánico reducido de azufre pueden alcanzar el ánodo debido a la bacteria adherida al electrodo mediante un mecanismo de transferencia directa (anodofilia). (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Acidithiobacillus ferrooxidans/ azufre (sustrato inorgánico)</p>	<p>9 mW/m²</p>	<p>(Saavedra, 2012)</p>
<p>Las bacterias utilizaron los iones tiosulfatos como donador de electrones en el ánodo es decir, usa su cadena respiratoria de electrones para sostener su crecimiento bacteriano.(Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Acidithiobacillus ferrooxidans LB151/ lones tiosulfato y férrico (sustrato inorgánico)</p>	<p>197, 3 mW/m²</p>	<p>(Jibaja, 2019)</p>
<p>Se dio una gran generación de energía debido al consumo de una buena parte de los donadores de los electrones, es decir, obtiene la una mejor eficiencia, siendo una transferencia indirecta de electrones. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Geobacter sulfurreducens/acetato y glucosa (sustrato orgánico)</p>	<p>0.02142 mW/cm²</p>	<p>(Serment et al. 2017)</p>

<p>El rendimiento de una celda de combustión microbiana puede aumentar usando membranas de desalinización para generar la transferencia de carga por cada electrón liberando al circuito. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Bacteria exoelectrogenica/Xilosa (sustrato orgánico)</p>	<p>931 ± 29 mW/m²</p>	<p>(Qu, 2011)</p>
<p>La bioelectricidad generada es directamente de la transferencia de electrones microbianos en los electrodos. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p><i>Pseudomonas fluorescens</i>/ Aguas residuales (sustrato orgánico)</p>	<p>2167±0.037mW/m²</p>	<p>(Kaushik and Jadhav,2017)</p>

<p>El pili ha sido implicado en el mecanismo de transferencia de electrones a largo plazo a través de las biopelículas anódicas de la bacteria. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Geobacter Sulfurreducens/acetato (sustrato orgánico)</p>	<p>3.9 W/m²</p>	<p>(Yi et al., 2009)</p>
<p>Se utilizó una placa de grafito perforada (30 agujeros por 3,14 mm²) como ánodo para aumentar la superficie y facilitar la transferencia efectiva de electrones al aceptador de electrones terminal seleccionado, la hexacianoferradura</p>	<p>Bacteria exoelectrogenica/glucosa</p>	<p>5.3W/m²</p>	<p>(Kong, Yang y Sun, 2018)</p>

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados obtenidos, los mecanismos de transferencia directa son los más empleados por los autores (13), sobre todo para las bacterias de especie *Geobacter Sulfurreducens*, *Pseudomonas fluorescens* quienes transportan los electrones hacia los electrodos por medio de los citocromos dispuestos en la membrana y/o pili, porque tienen la capacidad de oxidar completamente un compuesto orgánico, entonces, contribuye efectivamente a la producción de energía y está fuertemente relacionado con el metabolismo microbiano, a pesar de ello, los autores Guambo y Allauca (1) usaron lodos aerobios donde existe una diversidad biológica siendo complicado encontrar el mecanismo de transferencia realizado; y por último, solamente el autor Vanegas (2020) usó el mecanismo de transferencia indirecta, es decir, se basa en la utilización de compuestos solubles que actúan como una herramienta esencial para los organismos que son incapaces de transmitir directamente los electrones al ánodo.

En los sustratos, los más utilizados fueron la glucosa y acetato (60%), agua residual (30%), entre otros (10%); potenciales combustibles en celdas de combustión microbiana, además tiene la característica de mejorar la conductividad y la resistencia interna del sistema porque bacterias como *sulfurreducens* o *Pseudomonas fluorescens*, son dominantes cuando se utiliza los sustratos mencionados a diferencia del género *Shewanella* donde Vanegas (2020) menciona que son más conservadores, dentro de los sustratos que consiguieron mayor densidad de corriente son la glucosa y el acetato. Por otro lado, no se cuenta con mucha información de los sustratos inorgánicos, sin embargo, tres autores prefirieron emplear estos sustratos (compuestos inorgánicos reducidos de azufre e iones tiosulfato – férrico) donde el uso de iones tiosulfato y férrico tuvieron mayor densidad de corriente; a pesar de ello los sustratos orgánicos tienen mayor eficiencia que los inorgánicos.

IV. CONCLUSIONES

- Respecto al mecanismo de transferencia de electrones se determinó que en su mayoría los autores indican que las bacterias que utilizaron realizan una transferencia directa debido a la capacidad de degradar los compuestos orgánicos. Asimismo, una minoría de autores señalan que las bacterias investigadas realizaron el mecanismo de transferencia indirecta porque no intervienen en su metabolismo bacteriano.
- Los sustratos más eficientes y utilizados son los orgánicos, de los cuales se destacan la glucosa y el acetato, siendo importantes por su concentración y variada composición química, no obstante, actualmente las investigaciones se centran en el uso de sustratos menos convencionales para utilizar la biomasa presente en aguas residuales generando energía y disminuyendo costos de procesos de obtención.

V. RECOMENDACIONES

- Se recomienda una mayor investigación sobre las celdas de combustión microbiana y como las bacterias electrogénicas intervienen en los procesos metabólicos cuando degradan diferentes sustratos, pues se cuenta con pocas investigaciones relacionados a ello.
- Efectuar estudios a mayor escala utilizando diversos sustratos poco estudiados como los inorgánicos (azufre, sulfato y tetratoato) y su aplicación en la comunidad microbiana de CCM, para desarrollar un sistema funcional pero que pueda ser aplicado a las peculiaridades que requiere las zonas rurales más alejadas del Perú.
- Se recomienda profundizar los estudios de CCM con el uso de membranas naturales, pues resultaría más económico y sostenible, además desarrollar el proceso con diferentes variables como periodos más extensos, otros tipos de ánodos, y finalmente bacterias electrogénicas pocas empleadas en investigaciones.

VI. ANEXOS

Anexo 1: Ficha de recolección de datos

	FICHA DE ANALISIS DE CONTENIDO
Título:	
Páginas utilizadas:	Año de publicación: 2020 Lugar de publicación:
Tipo de investigación:	
Palabras claves:	.
Autores:	
Objetivos:	
Metodología:	
Resultados:	

Anexo 2: Resultados de los mecanismos de transferencia y sustratos empleados

Mecanismos de transferencia de electrones	Bacteria empleada/ sustrato	Densidad de potencia (mW/m ²)	Autor
La concentración del donante de electrones se da hacia el ánodo y a la resistencia externa. (Mecanismo de transferencia directa)	Lodo de digestor anaeróbico / glucosa y acetato (sustrato orgánico)	3650mW/m ²	(Borole et al.,2009)
Las bacterias del biofilm son responsables de transferir los electrones al electrodo del ánodo sin mediadores. La corriente se incrementó debido a la alta actividad electrogénica, la alta transferencia de electrones al cátodo y la reacción catódica más rápida. (Mecanismo de transferencia directa)	Bacteria electrogénica/agua residual sintético (sustrato orgánico)	407mA/m ²	(Ragab et al.,2019)

<p>En el ánodo, las bacterias exoelectrogénicas utilizan los químicos orgánicos del agua y liberan electrones que se transfieren al cátodo a través del circuito. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Geobacter metallireducens/ Agua residual doméstica y acetato de Sodio (<i>sustrato orgánico</i>)</p>	<p>489±50 w/m²</p>	<p>(Han et al., 2020)</p>
<p>En particular, las bacterias electroactivas en el ánodo oxidan los orgánicos en las aguas residuales produciendo electrones, protones, dióxido de carbono e intermediarios orgánicos. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Bacterias electroactivas/ Acetato de Sodio (<i>sustrato orgánico</i>)</p>	<p>1.63 ± 0.04 W/m⁻²</p>	<p>(Santoro et al.,2017)</p>
<p>La baja densidad de corriente está relacionada con la poca transferencia de electrones. (Mecanismo de transferencia indirecta)</p>	<p>Shewanella putrefaciens/carbonato de potasio</p>	<p>0.039w/m²</p>	<p>(Vanegas, Cardona y Zapata, 2020)</p>

<p>Bajas resistencias externas favorecen la transferencia de electrones al ánodo por las bacterias exoelectrogénicas, lo que aumenta la generación de corriente eléctrica. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Bacterias exoelectrogenicas/agua residual (sustrato orgánico)</p>	<p>176 mW/m²</p>	<p>(Martinez et al., 2016)</p>
<p>Transferencia de electrones directa e indirectamente (Se usó ambos mecanismos de transferencia)</p>	<p>Lodo anaeróbico/Agua residual sintético (sustrato orgánico)</p>	<p>205 mW/m²</p>	<p>(Guambo y Allauca 2015)</p>
<p>Las especies bioelectroactivas (por ejemplo, los citocromos de la membrana externa, la conductividad de Pili y las excreciones extracelulares) desempeñan un papel en la transferencia de electrones entre las biopelículas y el electrodo de ánodo. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>actinobacterias y deltaproteobacterias / glucosa (sustrato orgánico)</p>	<p>327,67mW/m²</p>	<p>(Huarachi et al., 2017)</p>

<p>Los electrones del compuesto inorgánico reducido de azufre pueden alcanzar el ánodo debido a la bacteria adherida al electrodo mediante un mecanismo de transferencia directa (anodofilia). (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Acidithiobacillus ferrooxidans/sustrato inorgánico (azufre)</p>	<p>9 mW/m²</p>	<p>(Saavedra, 2012)</p>
<p>Las bacterias utilizaron los iones tiosulfatos como donador de electrones en el ánodo es decir, usa su cadena respiratoria de electrones para sostener su crecimiento bacteriano.(Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Acidithiobacillus ferrooxidans LB151/ Iones tiosulfato y férrico (sustrato inorgánico)</p>	<p>197, 3 mW/m²</p>	<p>(Jibaja, 2019)</p>
<p>Se dio una gran generación de energía debido al consumo de una buena parte de los donadores de los electrones, es decir, obtiene la una mejor eficiencia, siendo una transferencia indirecta de electrones. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Geobacter sulfurreducens/acetato y glucosa (sustrato orgánico)</p>	<p>0.02142 mW/cm²</p>	<p>(Serment et al. 2017)</p>

<p>El rendimiento de una celda de combustión microbiana puede aumentar usando membranas de desalinización para generar la transferencia de carga por cada electrón liberando al circuito. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Bacteria exoelectrogenica/Xilosa (sustrato orgánico)</p>	<p>931 ± 29 mW/m²</p>	<p>(Qu, 2011)</p>
<p>La bioelectricidad generada es directamente de la transferencia de electrones microbianos en los electrodos. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Pseudomonas fluorescens/ Aguas residuales (sustrato orgánico)</p>	<p>2167±0.037mW/m²</p>	<p>(Kaushik and Jadhav,2017)</p>
<p>El pili ha sido implicado en el mecanismo de transferencia de electrones a largo plazo a través de las biopelículas anódicas de la bacteria. (Mecanismo de transferencia directa)</p>	<p>Geobacter Sulfurreducens/acetato (sustrato orgánico)</p>	<p>3.9 W/m²</p>	<p>(Yi et al., 2009)</p>

<p>Se utilizó una placa de grafito perforada (30 agujeros por 3,14 mm²) como ánodo para aumentar la superficie y facilitar la transferencia efectiva de electrones al aceptador de electrones terminal seleccionado, la hexacianoferradura</p>	<p>Bacteria exoelectrogenica/glucosa</p>	<p>5.3W/m²</p>	<p>(Kong, Yang y Sun, 2018)</p>
---	--	---------------------------	---------------------------------

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALBA, Ayde, ADRIAN, Jorge y LUGO, Armando. Bacterias, fuente de energía para el futuro. Febrero 2012. [Fecha de consulta: 13 de junio del 2020].
Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v16n32/v16n32a11.pdf>
- AUDOLY, Richard, VOGT-SCHILB, Adrien, GUIVARCH, Celine, PFEIFFER, Alexander. Pathways toward zero-carbon electricity required for climate stabilization. [En línea]. September 2018, vol.225. N°1 [Fecha de consulta: 01 de mayo Del 2020].
Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.026>
- BOROLE, Abhijeet, HAMILTON, Choo, VISHNIVETSKAYA Tatiana, LEAK, David y ANDRAS, Calin. Improving power production in acetatefed microbial fue cells via enrichment of exoelectrogenic organisms in flow-through systems. Biochemical Engineering Journal [en linea].May 2009. [Fecha de consulta: 19 de mayo del 2020].
Disponible: <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.08.008>
- CALVO, Rafael. ¿Bacterias productoras de energía? [en línea]. Diciembre 2008 [Fecha de consulta: 18 de junio del 2020].
Disponible:
https://www.unl.edu.ar/noticias/leer/5637/Bacterias_productoras_de_energia.html#.XuxVx0VKjIU
- CORTES, Sandra, VESGA, Nelcy, SIGARROA, Alina, MORENO, Laura y CARDENAS, Diana. Sustratos inoculados con microorganismos para el desarrollo de plantas de cacao (Theobroma cacao L.) en etapa de vivero. [en línea].Marzo 2019. [Fecha de consulta: 10 de junio del 2020].

Disponible: <http://ve.scielo.org/pdf/ba/v27n3/art03.pdf>

- ESCAMILLA, Jimenez, MAXVELL, Gustavo, GARAVAY, Oeijiel, BORJA, Claudio y SALIN, Manuel. Modelo bioquímicamente estructurado para la estimación de la eficiencia de una celda de combustible microbiana. Revista internacional de contaminación ambiental [en línea]. Mayo de 2018, vol 34, n° 2. [Fecha de Consulta: 10 de mayo del 2020].

Disponible: <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.02.13>

- GONZALEZ DEL CAMPO Villarrubia, Araceli. Valorización energética y tratamiento de efluentes residuales mediante celdas de combustible microbiológicas. Tesis (Título de Doctor), España: Universidad de Castilla-La Mancha, Facultad de ciencias y tecnologías Químicas, 2015.387pp.

Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=101145>

- HAIG, Ng, DA MOTTA, David. The structuring role of macrophytes on plankton community composition and bacterial metabolism in a large subtropical shallow lake. Acta Limnologica Brasiliensia [en línea]. vol 31. Junio 2019. [Fecha de consulta: 01 de junio del 2020].

Disponible: <https://www.scielo.br/pdf/alb/v31/2179-975X-alb-31-e19.pdf>

- HAN, Xiaoyu, QU, Youpeng, WU, Jing, LI, Da, REN, Nanqi, FENG, Yujie. Nitric oxide reduction by microbial fuel cell with carbon based gas diffusion cathode for power generation and gas purification. Journal of Hazardous Materials [en línea]. May 2020. [Fecha de consulta: 08 de mayo de 2020].

Disponible: <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122878>

- HE, Li, PENG, Du , CHEN, Yizhong, LU,Hongwei, CHENG, Xi y CHANG, Bei.Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. Renewable and sustainable energy reviews [en línea].May 2017, vol 71, n°1. [Fecha de consulta: 11 de mayo del 2020].
Disponible:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116311248>

- JIBAJA, Sandro, OYOLA, Vanessa, BERASTAIN, Arturo, RAMOS, Daniel, RONCAL, Elisa, MEDINA, Juan, UNTIVEROS, Graciela, SHEEN, Patricia y HURTADO, Jasmin. Producción de electricidad empleando acidithiobacillus ferrooxidans a partir de iones tiosulfato y férrico. [en línea].Marzo 2019. [Fecha de consulta: 16 de junio del 2020].
Disponible: <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v85n1/a02v85n1.pdf>

- JIBAJA CACERES, Sandro Juniors. “Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas a partir de tiosulfato utilizando cepas de acidithiobacillus ferrooxidans [en línea]. 2018. [Fecha de consulta: 04 de junio del 2020].
Disponible:
http://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/upch/3965/Produccion_JibajaCaceres_Sandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- JIMENEZ, Maxwell, GARIBAY, Claudia, BORJA, Manuel. Modelo bioquímicamente estructurado para la estimación de la eficiencia de una celda de combustible microbiana. [en línea]. Agosto 2017 [Fecha de consulta: 10 de junio del 2020].
Disponible:<http://www.scielo.org.mx/pdf/rca/v34n2/0188-4999-rca-34-02-331.pdf>

- KALATHIL, S, PATIL, S, PANT, D. Microbial fuel cells: Electrode materials. Encyclopedia of interfacial chemistry [en línea].2018, p309-318. [Fecha de consulta: 12 de mayo del 2020].
Disponible:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095472134596>

- Kim JR, Cheng S, Oh S-E, Logan BE. Power generation using different cation, Anion, and ultrafiltration membranes in microbial fuel cells. *Environ Sci Technol* 2007; 41(3):1004–9.

- KRISHNA, Vamshi, MOHAN, Venkata. Selective enrichment of electronic bacteria for fuel cell application: Enumerating microbial dynamics using Miseq platform [en línea]. Marzo 2016, [Fecha de consulta: 13 de mayo del 2020].
Disponible: <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.117>

- KONG, Xia, YANG, Gaixiu, SUN, Yongming .Performance Investigation of Batch Mode Microbial Fuel Cells Fed With High Concentration of glucose. [en línea] Marzo 2018[Fecha de consulta: 9 de Junio del 2019].
Disponible:<https://biomedres.us/pdfs/BJSTR.MS.ID.000864.pdf>

- LOGROÑO, Washintong, Echeverría Magdy, Recalde, Celso y Graziani, Pietro. Bioconversión de Residuos Sólidos Orgánicos con Suelos de la región Amazónica y Alto Andina del Ecuador en Celdas de Combustible Microbiano de Cámara Simple. [en línea]. Noviembre 2014 [Fecha de consulta: 17 de junio del 2020].
Disponible:<https://sci-hub.tw/http://dx.doi.org/10.4067/S071807642015000200008>

- LOPEZ, Juan. Desarrollo de una celda de combustible microbiana (CCM) para aplicación en tratamiento de aguas residuales [en línea]. Agosto 2014 [Fecha de consulta: 15-de mayo Del 2020].
Disponible:
<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/144/1/Desarrollo%20de%20una%20celda%20de%20combustible%20microbiana%20%28CCM%29%20para%20la%20aplicaci%C3%B3n%20en%20el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20%28Protegida%29..pdf>

- Luo, Y., Zhang, R., Li, J., Li, M., & Zhang, C. (2010). Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*, 759–764. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409019001?via%3Dihub>

- MINEM. (2017). Balance nacional de energía 2017. Dirección general de eficiencia energética-área de planeamiento energético. Octubre de 2019. Disponible: <http://www.minem.gob.pe/publicacion.php?idSector=12&idPublicacion=591>

- OLIOT, Manon, SYLVAIN, Galier, ROUX DE BALMANN, Helene y BERGEL, Alain. Ion transport in microbial fuel cells: Key roles, theory and critical review. *Applied Energy* [en línea]. December 2016, vol. 183, n° 1. [Fecha de consulta: 12 de junio del 2020]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916313459>

- PALANISAMY, Gowthami, YOUNG, Ho, SADHASIVAN, T, KURKURI, Mahaveer, CHAI, Sang y HEE, Sung. A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, an advanced development in electrodes and membranes. *Journal of Cleaner production* [en línea]. June 2019, vol 221, n° 1. [Fecha de consulta: 11 de mayo del 2020]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619305712>

- PASSOS, Vinicius, AQUINO, Sidney, RODRIGUES, Adalgisa y REGINATTO, Valeria. Energy generation in a microbial fuel cell using sludge from a wastewater

treatment plant. Scientia agrícola [en línea].September 2016, vol 73, n°5. [Fecha de consulta: 12 de mayo del 2020].

Disponible: <https://sci-hub.tw/http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0194>

- Principales indicadores del Sector eléctrico a nivel nacional [en línea].MINEM, 2020 [fecha de consulta: 15 de abril de 2020].

Disponible:

<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Cifras%20preliminares%20del%20Sector%20Electrico%20-%20Diciembre%202019%20-%20Rev%206-1.pdf>

- QU, Youpeng, FENG, Yujie, WANG, Xin, JIA, Liu, L, Jiangwei, WEIHUA, ÉI, LOGAN, Bruce. Simultaneous water desalination and electricity generation in a microbial desalination cell with electrolyte recirculation for pH control. Bioresource Technology. [en línea] Noviembre 2011 [Fecha de consulta: 06 de junio del 2019].

Disponible:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852411016567>

- RAGAB, Mostafa, ELAWWAD, Abdelsalam, ABDEL-HALIM, Hisham. Simultaneous power generation and pollutant removals using microbial desalination cell at variable operation modes. Renewable Energy. [en línea] Abril 2019 [Fecha de consulta: 10 de junio del 2019].

Disponible:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119307281>

- REVELO, Dolly, HURTADO, Nelson, RUIZ, Jaime. Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica [en línea]. Mayo 2013, [Fecha de consulta: 15 de mayo del 2020].
Disponible: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v24n6/art04.pdf>

- ROMERO, Alba, VASQUEZ, Jorge, LUGO, Armando. Bacterias, fuente de energía para el futuro. [en línea]. Mayo 2012 [Fecha de consulta: 14 de mayo del 2020].
Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v16n32/v16n32a11.pdf>

- ROZSENBERSZKI T, KOOK L, HUTVANGER D, NEMESTOTHY N, BELAFI-BAKO K, BAKONY P, KURDI R, SARKADY A. Comparison of Anaerobic Degradation Processes for Bioenergy Generation from Liquid Fraction of Pressed Solid Waste. [en línea]. Junio 2015, [Fecha de consulta: 14 de mayo del 2020].
Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-015-9379-y#citeas>

- SAAVEDRA SALAS, Igor Marcos. Diseño de una Celda de Combustible Microbiológica con uso de Bacterias Oxidantes de Azufre y Hierro. 2012. [en línea] [Fecha de consulta: 06 de junio del 2019].
Disponible:

http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104363/cfsaavedra_is.pdf?sequence=3&isAllowed=y

- SANTORO, Carlo, BENITO, Fernando y SEROV Alexey. Supercapacitive microbial desalination cells: New class of power generating devices for reduction

of salinity content. Applied Energy. [en línea] Julio 2017[Fecha de consulta: 13 de junio del 2019].

Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.056>

ISSN: 0306-2619

- SERMENT, Jorge, LARA, Eric, BECERRIL, Karina, SUAREZ, Sergio, RAMIREZ, Ninfa. Detección y aislamiento de microorganismos exoelectrógenos a partir de lodos del río Lerma, Estado de México [en línea]. Marzo 2017, [Fecha de consulta: 07 de mayo del 2020].
Disponible: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v33n4/0188-4999-rica-33-04-617.pdf>
- SLATEA Anthony, WHITEHEAD, Kathryn, BROWNSON, Dale BANKSA, Craig Microbial fuel cells: An overview of current technology. [en línea]. Septiembre 2019 n° 101, p.60-81 [Fecha de consulta: 15 de mayo del 2020].
Disponible: <https://www.journals.elsevier.com/renewable-and-sustainable-energy-reviews>
- SORKNAES, P, LUND, H , SKOV, I.R, DJORUP, S, SKYTTE, K, MORTHORST, P, FAUSTO, F. Smart energy markets-Future electricity, gas and heating markets. Renewable and Sustainable Energy Reviews [en línea]. March 2020, vol.119, n°1. [fecha de consulta: 19 de abril de 2020].
Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109655>
- S.Roy, S.Marzorati, A.Schievano, D.Pant. Microbial fuel cells. Indian institute of Technology [en línea]. December 2017.
Disponible: <https://sci-hub.tw/10.1016/B978-0-12-409548-9.10122-8>

- SQUADRITO, G, CRISTIANI, P. Microbial and enzymatic fuel cells. Compendium of Hydrogen energy [en línea].2016, vol n° 3, p.147-173. [Fecha de consulta 12 de mayo del 2020].

Disponible:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423638000062>

- TAMBOLI, Ekant y SATYA, J. Microbial fuel cell configurations: An overview. Microbial electrochemical technology [en línea].2019, n° 1, p.407-435. [Fecha de consulta 12 de mayo del 2020].

Disponible:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444640529000169>

- TRAN, T.V, LEE, I.C, KIM, K. Electricity production characterization of a sediment microbial fuel cell using different thermo-treated flat carbón cloth electrodes. International journal of Hydrogen Energy [en línea]. December 2019, vol 44, n° 1. [Fecha de consulta: 08 de mayo de 2020].

Disponible:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319919338376>

- VANEGAS, Diana, CARDONA, Monica, ZAPATA, Zulimata. Evaluation of Activated Carbon Electrodes as Anodes in a Microbial Fuel Cell Using Shewanella Putrefaciens. Revista Facultad de Ingeniería, vol. 29 (54). [en línea] Mayo 2020 [Fecha de consulta: 09 de junio del 2019].

Disponible: <file:///C:/Users/personal/Downloads/10468-Article%20Text-37150-1-10-20200513.pdf>

- VARELA, GUSTAVO, GROTIUZ G. Fisiología y metabolismo bacteriano. [en línea]. Diciembre 2008. [Fecha de consulta: 04 de junio del 2020].

Disponible: <https://acortar.link/hXBrA>

- Venkatesan PN, Dharmalingam S. Effect of cation transport of SPEEK – rutile TiO₂ electrolyte on microbial fuel cell performance. *J Membr Sci* 2015; 15 (492):518–27.

- VEJARANO, Felipe, BENITEZ, Neyla, BRAVO, Enrique, LOAIZA, Oscar y LIZCANO, William. Monitoreo electroquímico y caracterización microbiana de una celda de combustible microbiana alimentada con aguas residuales domésticas inoculada con lodo anaeróbico [en línea]. Agosto 2017. [Fecha de consulta: 14 de junio del 2020].
 Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcien/v22n2/2248-4000-rcien-22-02-00013.pdf?fbclid=IwAR0gYjVsRJaKaxQNIZhYt1hMsRRKjQeCFQb6Bbs3BYN1wb0qjMFA5xB8-U>

- WANG, Bo, LIU, Wenzong, ZHANG, Yifeng y WANG, Aijie. Bioenergy recovery from wastewater accelerated by solar power: Intermittent electro-driving regulation and capacitive storage in biomass. *Water Research* [en línea]. May 2020, vol. 175, n°1. [Fecha de consulta: 07 de mayo del 2020].
 Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135420302323>

- Wang, C., Chen, W., & Huang, R. (2010). influence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by *Escherichia coli*. *ScienceDirect*, 35(13):7217-7223. Obtenido de http://biotech.niu.edu.tw/files/writing/476_09e95a84.pdf

- YI, Hana, NEVINA, Kelly, KIMA, Byoung-Chan, FRANKS, Ashely, KLIMES, Ana, TENDER, Leonard, LOVLEVA, Derek. Selection of a variant of *Geobacter sulfurreducens* with enhanced capacity for current production in microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, vol.24 [en línea] Mayo 2009 [Fecha de consulta: 19 de Junio del 2020].
 Disponible: <https://sci-hub.tw/10.1016/j.bios.2009.05.004>

- GUAMBO, Alex, ALLAUCA, Gabriela. Estudio de la influencia de la demanda Bioquímica de Oxígeno de Aguas Residuales en la producción de Bioelectricidad de una celda de combustible microbiana. [en línea] Octubre 2015 [Fecha de consulta: 19 de Junio del 2020].
Disponible:
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4075>

- MARTINEZ, Cindy, HERRERA, David, GUTIERREZ, Ruben, BELLO, Ricardo. Tratamiento de agua residual doméstica mediante un reactor rafa y una celda microbiana de combustible. Revista internacional de contaminación ambiental. [en línea] Noviembre 2015 [Fecha de consulta: 10 de Junio del 2020].
Disponible:
<http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v32n3/0188-4999-rica-32-03-00267.pdf>

- KAUSHIK, A , JADHAV, S .Co. Conversion of waste to electricity in a microbial fuel cell using newly identified bacteria: Pseudomonas fluorescens. International Journal of Environmental Science and Technology. [en línea] Noviembre 2015 [Fecha de consulta: 02 de Junio del 2020].
Disponible:
<http://dx.doi.org/10.1007/s13762-017-1260-z>