



MONOGRAFÍA DE FÍSICA

Convocatoria: Noviembre 2020

Generación de electricidad empleando geobacter

¿Cuál es la relación de los niveles de voltaje en milivoltios generados por celdas biológicas (fuentes de geobacter) en un circuito en serie?

Código del candidato: 004727 - 0017

N° de palabras: 3456

Supervisor: Jose Rubio

Chiclayo, Perú

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor José Rubio por guiarme a lo largo de mi trabajo monográfico.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
Capítulo I: Marco Teórico	8
1.1. Conceptos básicos.....	8
1.2. Electricidad.....	9
1.3. Recorrido de la energía eléctrica	11
1.4. Fuentes de generación de energía eléctrica en el Perú y en el mundo	11
1.5. Generación de electricidad a partir de la Bacteria de Geobacter.....	13
1.6. Funcionamiento y representación eléctrica en serie de celdas de combustible microbiana (fuentes eléctricas de Geobacter).....	15
1.7. Regresión no lineal	17
Capítulo II: Planteamiento del Problema y de la Experimentación.....	18
2.1. Variables	18
2.2. Materiales	18
2.3. Condiciones sobre configuración y principios éticos.....	18
Capítulo III: Procedimiento y métodos	19
3.1. Elaboración del entorno experimental	19
3.1.1 Esquema de la batería de Geobacter.....	19
3.1.2 Construcción de la batería de Geobacter.....	19
3.2. Procesamiento de datos	21
Capítulo IV: Datos Obtenidos y Análisis	24
4.1. Datos brutos.....	24
4.2. Datos procesados.....	25
4.3. Gráficas.....	26
CONCLUSIONES	31
MEJORA DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	33

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES, TABLAS Y GRÁFICOS

1. Ilustraciones

1.1.	Ilustración 1: Flujo de electrones.....	9
1.2.	Ilustración 2: Átomo de Bohr	10
1.3.	Ilustración 3: Recorrido de la energía eléctrica	11
1.4.	Ilustración 4: Las fuentes de la electricidad en el Perú.....	12
1.5.	Ilustración 5: Porcentaje de electricidad generada en el mundo por fuente energética 2017.....	13
1.6.	Ilustración 6: Bacteria Geobacter	14
1.7.	Ilustración 7: Esquema básico de una Celda de Combustible Microbiana	14
1.8.	Ilustración 8: Simbología eléctrica de una fuente de voltaje de la Geobacter.	15
1.9.	Ilustración 9: Simbología eléctrica de fuentes de voltaje de la Geobacter dispuestas en serie.....	16
1.10.	Ilustración 10: Esquema de la bacteria de Geobacter	19
1.11.	Ilustración 11: Preparación del ánodo	20
1.12.	Ilustración 12: Preparación del cátodo	20
1.13.	Ilustración 13: Batería de Geobacter.....	21

2. Tablas

2.1.	Tabla 1: Registro de voltaje de las fuentes de la Geobacter.....	24
2.2.	Tabla 2: Promedio y error porcentual de la asociación de voltaje de las fuentes de la Geobacter	25
2.3.	Tabla 3: Desviación estándar y coeficiente de variación de asociación de voltaje de las fuentes de la Geobacter	25
2.4.	Tabla 4: Logaritmo natural para la variable dependiente.....	29
2.5.	Tabla 5: Correlación entre número del casillero del Geobacter y el voltaje en el primer registro (r_1).....	29
2.6.	Tabla 6: Correlación entre número del casillero del Geobacter y el voltaje en el primer registro (r_2).....	30
2.7.	Tabla 7: Correlación entre número del casillero del Geobacter y el voltaje en el tercer registro (r_3).....	30
2.8.	Tabla 8: Correlación entre número del casillero del Geobacter y el voltaje en el cuarto registro (r_4)	30
2.9.	Tabla 9: Correlación entre número del casillero del Geobacter y el voltaje en el quinto registro (r_5)	30

3. Gráficos

- 3.1. **Gráfico 1:** Voltaje de las 10 celdas eléctricas de la Geobacter en el primer registro 26
- 3.2. **Gráfico 2:** Voltaje de las 10 celdas eléctricas de la Geobacter en el segundo registro 27
- 3.3. **Gráfico 3:** Voltaje de las 10 celdas eléctricas de la Geobacter en el tercer registro 27
- 3.4. **Gráfico 4:** Voltaje de las 10 celdas eléctricas de la Geobacter en el cuarto registro 28
- 3.5. **Gráfico 5:** Voltaje de las 10 celdas eléctricas de la Geobacter con el promedio de los cuatro registros 28

INTRODUCCIÓN

En los países en vías de desarrollo, una característica frecuente es la falta de energía eléctrica en zonas rurales que están alejadas, donde una interconexión a la red de distribución no está justificada económicamente.

La importancia del presente estudio consiste en ver el grado de disponibilidad, y estudio de la energía producida por la bacteria Geobacter.

La carencia de energía convencional a una población rural dispersa, concentradas en pequeños caseríos, resulta hasta la fecha difícil y en muchos casos imposibles electrificar, en razón a los criterios de rentabilidad del servicio de las empresas concesionarias de energía eléctrica.

En consecuencia, cuanta más pequeña, dispersa y pobre es una comunidad, menos oportunidad tendrá de ser considerada en los proyectos de expansión de suministro eléctrico.

El estudio de generación y de la energía mediante la bacteria Geobacter, se presenta como una alternativa de solución a la falta de energía eléctrica en zonas rurales.

Akela (2009) en su trabajo "Economical and environmental impacts of renewable energy systems, renewable energy" dice que el mundo en la actualidad basa sus fuentes de energía en el petróleo, carbón y gas natural, llamados fuentes de energía tradicionales, recursos que están dañando el medio ambiente y la vida humana.

En el Perú y el mundo lo que se requiere es de energía renovable que es un factor importante, suficiente y que sea sostenible para favorecer el ecosistema de nuestro planeta.

Generar electricidad a partir de las plantas, es convertir la energía calorífica en electricidad, las plantas fotosintetizan la materia orgánica para su desarrollo mediante el dióxido de carbono, agua y radiación solar, la materia orgánica se excrementa a través de sus raíces como desecho, en la tierra las bacterias (desecho) se descomponen en materia orgánica y producen electrones y protones que es lo que producen un voltaje y a partir de ello una corriente (electricidad).

CAPITULO I:

Marco Teórico

1.1. Conceptos básicos

La energía es una magnitud escalar que se define como la capacidad de realizar trabajo, producir un movimiento o generar un cambio. Es inherente a todos los sistemas físicos y su unidad de medida en el SI es el Jule (J).

Las fuentes de energía se dividen en dos categorías: renovables y no renovables. La primera proviene de fuentes o procesos naturales que se reponen constantemente, entre ellas están: La Solar, obtenida a partir de la radiación electromagnética procedente del sol; Hidráulica o Hídrica, procedente de la corriente de agua; Biomasa que se produce a partir del material orgánico de plantas y animales; Y la Geotermia que es el calor natural de la tierra; Mientras que las no renovables solo están disponibles en cantidades limitadas y su reposición lleva mucho tiempo, entre ellas están: El petróleo, el carbón, la nuclear, el gas natural y los líquidos de gas de hidrocarburos.

Las fuentes de energía existentes se pueden clasificar en dos categorías: Primarias y secundarias. Las primarias se componen de combustibles originales o sin convertir que se encuentran en la naturaleza, estos incluyen: Petróleo, gas natural, carbón, biomasa, corriente de agua, viento y radiación solar. Mientras que las secundarias derivan de la transformación de fuentes de energía primaria. Como, por ejemplo: La gasolina deriva de un tratamiento del petróleo crudo, y la energía eléctrica es obtenida mediante plantas eléctricas.

Asimismo, un gran desafío que enfrenta la humanidad es reemplazar la energía no renovable con energía renovable para disminuir el impacto negativo en el medio ambiente; De esa manera, desde 1910 se sabe que los microorganismos son capaces de producir combustibles a partir de su materia orgánica en corriente eléctrica, y desde algunos años atrás surgió el interés de estudiar y emplear baterías microbianas, que son dispositivos que permiten convertir esta energía química de un combustible en electricidad, como es el caso de la bacteria *Geobacter*.

1.2. Electricidad

La electricidad es una forma de energía que se define como el flujo de electrones entre átomos. El movimiento de cargas eléctricas a lo largo de un medio conductor (Como se observa en la ilustración 1) constituye un flujo de electricidad llamada corriente, que lo medimos en amperios (I).

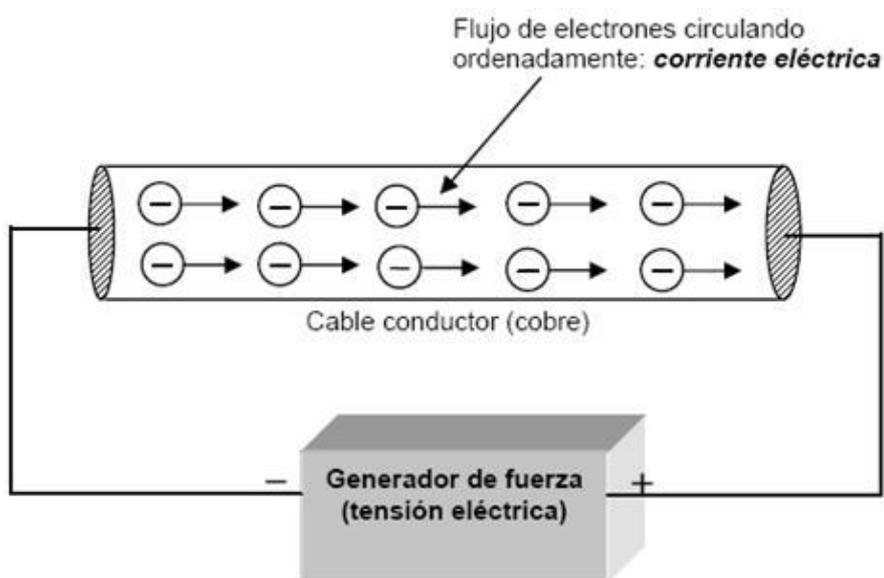


Ilustración 1: Flujo de electrones. Recuperado de: <https://mejoreslinks.masdelaweb.com/la-corriente-electrica/>

Como bien sabemos, todas las materias están formadas por átomos, lo que está compuesto por electrones y un núcleo formado por neutrones y protones, los electrones están ligados en su órbita por atracción de los protones, pero que aún así pueden liberarse de su órbita por algunas fuerzas externas, y eso se les conoce como “electrones libres”, que se mueven de un átomo a otro, produciendo flujo de electrones. Estos son la base de la electricidad.

El modelo atómico de Bohr, también llamado modelo Rutherford-Bohr desarrollado por el físico danés Niels Bohr en 1913, es un modelo de gran utilidad a medida que estudiamos la electricidad. Este modelo representa al átomo como pequeño, con un núcleo cargado positivamente, rodeado de electrones que viajan en órbitas circulares alrededor del núcleo. Como se observa en la Ilustración 2, consiste en un pequeño núcleo cargado positivamente orbitado por electrones cargados negativamente.

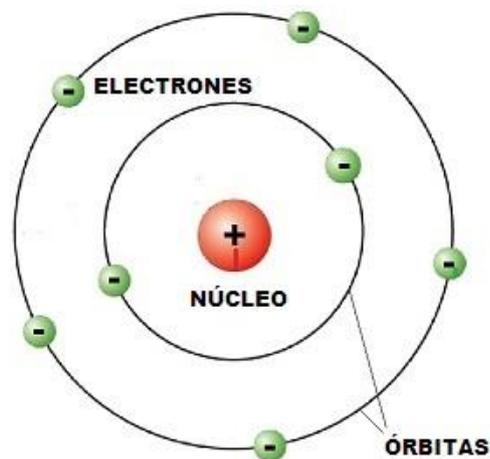


Ilustración 2: Átomo de Bohr. Recuperado de:
<https://modelosatomicos.com/bohr/>

1.3. Recorrido de la energía eléctrica

Generación: Es el primer proceso en la entrega de electricidad a los consumidores. Esta electricidad se produce en plantas o industrias capaces de extraer energía eléctrica de fuentes primarias, ya sea renovables o no renovables.

Transmisión: Es el proceso para repartir la energía ya procesada y convertida en electricidad desde las plantas a las subestaciones a una red de distribución ubicada en áreas pobladas.

Distribución: Desde las subestaciones, la energía eléctrica se distribuye a las viviendas que están alrededor. La empresa distribuidora es responsable de garantizar un buen funcionamiento de la electricidad.

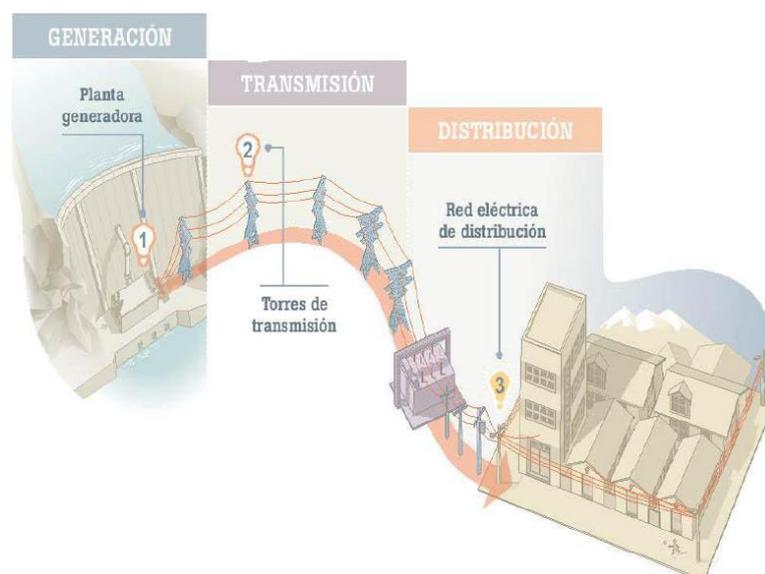


Ilustración 3: Recorrido de la energía eléctrica. Recuperado de: <https://sites.google.com/site/eltrabajodeunelectrlista/como-llega-la-electricidad-a-mi-casa>

1.4. Fuentes de generación de energía eléctrica en el Perú y el mundo

Antes de la llegada de la electricidad en el Perú, la iluminación en Lima estaba dada por lámparas de gas, referentemente 2203 por domicilio, mientras que, para el alumbrado público y edificios, se utilizaban 5219 luces a gas. Ha sido notable la

expansión del uso de energía eléctrica y se tiene como objetivo que para el 2025, el 100% de los hogares peruanos cuenten con suministro eléctrico. En la ilustración 4 se puede observar las fuentes de electricidad en el Perú, en donde existe una mayor participación del gas natural, mientras que aproximadamente la mitad de la producción de energía eléctrica, lo constituyen hidrocarburos líquidos (líquidos de gas natural y petróleo).

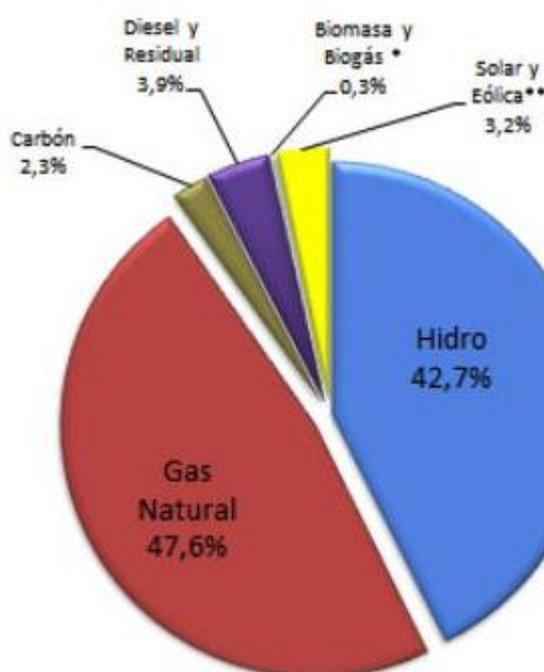


Ilustración 4: Las fuentes de la electricidad en el Perú (red pública SEIN), Agosto 2017. Recuperado de: <https://deltavolt.pe/energia-renovable/renovable-peru>

Mientras que, el porcentaje de electricidad generada en el mundo desde 1971 hasta el 2010, se ha duplicado, de un 5,500 MTEP a 12,000 MTEP. En la ilustración 5 observamos que más del 65% de la generación de energía eléctrica, es producida por combustibles fósiles; En el 2015 alrededor del 20% corresponde a la generación hidroeléctrica y el 8% corresponde al uso de energías renovables no convencionales como la mareomotriz, eólica y solar.

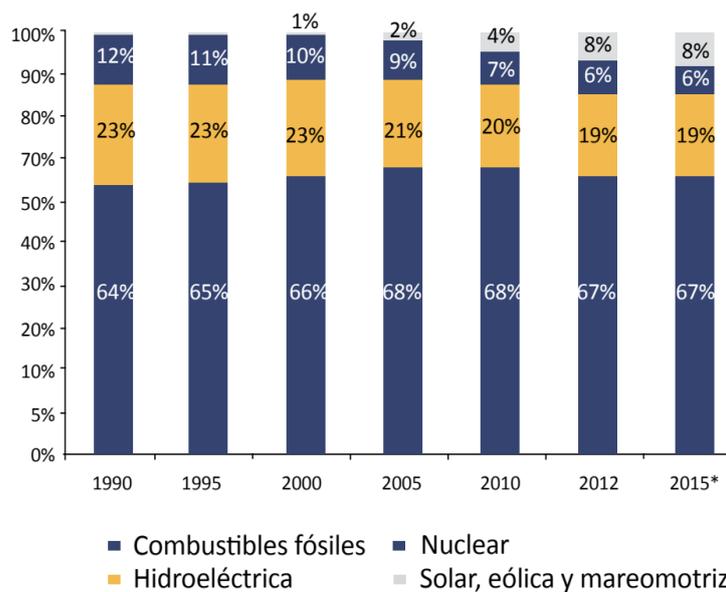


Ilustración 5: Porcentaje de electricidad generada en el mundo por fuente energética 2017. Recuperado de:
https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documentoal/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Industria-Electricidad-Peru-25anos.pdf

1.5. Generación de electricidad a partir de la bacteria *Geobacter*

La bacteria *Geobacter* es una bacteria Gram-negativa, que se encuentra clasificada en el grupo Deltaproteobacteria de la familia Geobacteracea. Fue descubierta y aislada en 1987 del sedimento de agua dulce del río Potomac en Washington D.C, por el profesor universitario en el Departamento de Microbiología de la Universidad de Massachussets, Derek Lovley. Esta bacteria tiene la capacidad de transferir electrones a los iones Fe (III) y Mn (IV), óxidos de nitrógeno, sustancias de alto peso molecular formadas por la degradación química y biológica de restos de plantas y de animales. Además, permite la transferencia de electrones de forma directa a los electrodos generando pequeñas corrientes eléctricas.

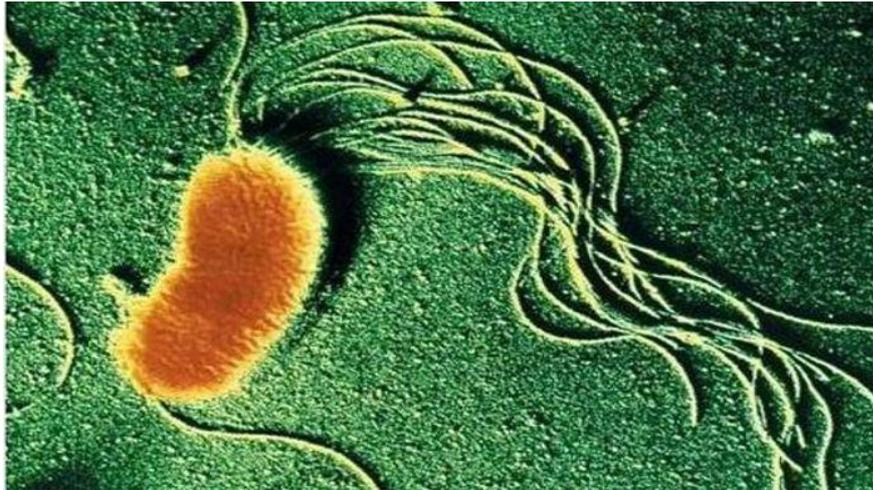


Ilustración 6: Bacteria Geobacter. Recuperado de: <https://www.labroots.com/trending/microbiology/5830/microbe-geobacter>

La Geobacter es un tipo de bacteria que transforma energía química en energía eléctrica, se alimentan de los compuestos orgánicos que encuentran en el medio y los metabolizan liberando electrones, que se obtienen de la oxidación de compuestos orgánicos (acetato), estos pueden ser transferidos a los metales y también pueden ser llevados a electrodos, a partir de ello permite obtener electricidad y así formar una celda de combustible microbiana

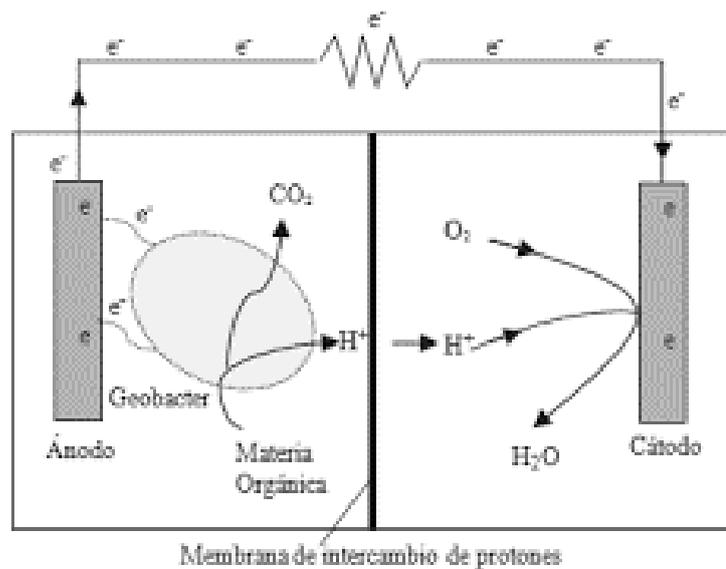


Ilustración 7: Esquema básico de una Celda de Combustible Microbiana. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2012000200011

Los materiales con los que se construyen los ánodos pueden ser de carbón, zinc. La reacción en el ánodo, donde la Geobacter interactúa con la materia orgánica "acetato" oxidándola completamente, está dada por la con la Ec. (1).



Los materiales con los que se construyen los cátodos pueden ser de cobre, grafito, papel carbón, tela de carbono, carbón vítreo. La reacción en el cátodo donde se reduce el oxígeno puro con los protones y electrones, para formar agua está dada por la con la Ec. (2).



1.6. Funcionamiento y representación eléctrica en serie de celdas de combustible microbiana (fuentes eléctricas de Geobacter)

El funcionamiento eléctrico de una celda de la Geobacter se determina a partir de las mediciones de voltaje que se realizan en la resistencia externa conectada entre el ánodo y el cátodo, además de la resistencia interna de la celda y la fuerza electromotriz de la misma, tal como se ilustra en la figura 8.

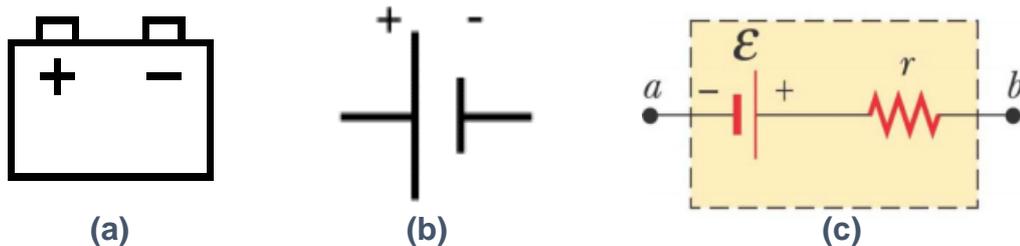


Ilustración 8: Simbología eléctrica de una fuente de voltaje de la Geobacter (fuente propia)

$$\mathbf{V_{ab} = \varepsilon + Ir} \quad \mathbf{Ecuación 3}$$

Donde: V_{ab} : Voltaje experimental medido con el voltímetro, que es la energía de activación de la reacción); ε : Fuerza electromotriz e Ir : Voltaje interno de la

fuente, que es el potencial de la resistencia óhmica de los electrolitos, membrana de intercambio de iones y conexiones eléctricas.

Por otro lado una celda funciona como un circuito cerrado en serie con una resistencia interna (r) y otra externa (R) es decir:

$$V_{ab} = I(R + r) \quad \text{Ecuación 4}$$

Combinando la ecuación 3 y ecuación 4, se obtiene:

$$\varepsilon = IR \quad \text{Ecuación 5}$$

Entonces la potencia de celda queda definido como:

$$P = \frac{V_{ab}^2 R}{(R+r)^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

En la ecuación 6, se observa claramente que a menor resistencia interna o ésta con un valor idéntico a la resistencia externa se maximiza la potencia.

En el caso de las celdas eléctricas de la Geobacter conectadas en serie (ver figura 9) el voltaje medido se obtiene según la ecuación 7.

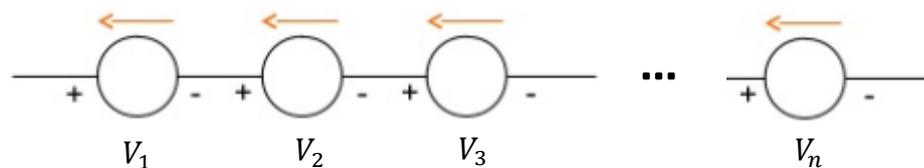


Ilustración 9: Simbología eléctrica de fuentes de voltaje de la Geobacter dispuestas en serie.

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde V_T , es el voltaje total medido y V_1, V_2, V_3, \dots y V_n los voltajes registrados en cada una de las celdas eléctricas de la Geobacter.

La potencia eléctrica total (P_T) de un conjunto de celdas eléctricas de la Geobacter conectadas en serie, queda definido de la siguiente forma:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad \text{Ecuación 8}$$

1.7. Regresión no lineal

Es un método de análisis de datos que permite ajustar los parámetros de una ecuación no lineal a un conjunto determinado de datos, lo cual resulta en una curva de mejor ajuste, la cual se aproxima en la mayor medida posible a los datos.

CAPITULO II:

Planteamiento del problema y de la experimentación

Pregunta de Investigación: ¿Cuál es la relación de los niveles de voltaje en milivoltios generados por celdas biológicas (fuentes de geobacter) en un circuito en serie?

Hipótesis: Existe una correlación alta de variables dado que a mayor fuentes de voltaje y en serie se suman los voltajes.

2.1. Variables

Variable independiente: Número de fuentes de la bacteria geobacter

Variables dependientes: Voltaje de la fuente

Variables controladas: Área del terreno, área de electrodos, temperatura ambiente.

2.2. Materiales

- Computadora
- Voltímetro GOLD POWER (DT830L)
- Fragmentos de zinc y cobre
- Celda microbiana
- Guantes y mascarilla

2.3. Condiciones sobre configuración y principios éticos

Al trabajar con una bacteria, la geobacter, es necesario el uso de de guantes y mascarilla, ya que ayudan a mantener las manos limpias y no respirar aire contaminado, disminuyendo la posibilidad de contraer gérmenes que pueden afectar a la salud.

CAPITULO III:

Procedimiento y Métodos

3.1. Elaboración del entorno experimental

Nuestra metodología se desarrolló en 3 fases, las cuales se describen a continuación:

3.1.1 Esquema de la batería de Geobacter:

El primer paso será recrear un esquema de la batería de Geobacter en un entorno controlado, para saber dónde y cómo ubicar cada uno de los elementos utilizados. Se ha señalado cada parte con el fin de comprender el sistema.

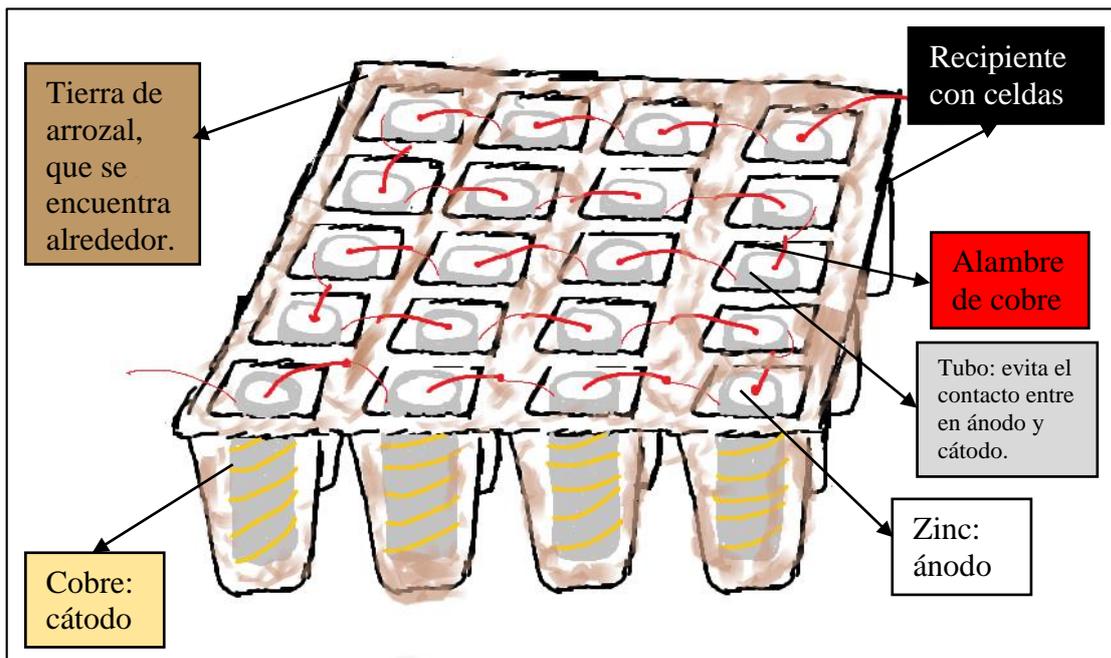


Ilustración 10: Esquema de la batería de Geobacter (fuente propia)

3.1.2 Construcción de la batería de Geobacter:

Para la construcción de la batería, lo primero que se debe hacer es tomar un cuadrado de zinc (que funciona como ánodo) de aproximadamente 5cm x 4cm, a este se le suelda un cable para posteriormente conectarlo con otros cilindros y permitir la

continuidad entre los conductores, a este se le agrega un poco de tierra de arrozal con un contenido de humedad significativo, como se observa en la ilustración 11.



Ilustración 11: Preparación del ánodo (fuente propia)

Después, se enrolla el zinc para después introducirlo en un tubo de aproximadamente 4.3cm de alto y 1.5cm de diámetro (estas medidas son depende de cada celda de la batería de Geobacter), y a este se le enrolla un espiral de cobre (que funciona como cátodo) que debería estar también soldado con un cable más delgado para que sea mejor manejable, como se observa en la ilustración 12. La función del tubo es evitar el contacto entre el zinc y el cobre, para que exista continuidad o movimiento de los electrones.



Ilustración 12: Preparación del cátodo (fuente propia)

Este procedimiento se repite para colocarlo en las 10 celdas unidas en serie, como se observa en la ilustración 13. Posteriormente se sueldan los cables para permitir la continuidad en serie entre cada celda de Geobacter, y finalmente, después de instalar los circuitos, se agrega la tierra de arrozal (que es en donde se encuentra la bacteria de Geobacter) en cada celda de la batería de Geobacter, cubriendo por completo los circuitos.

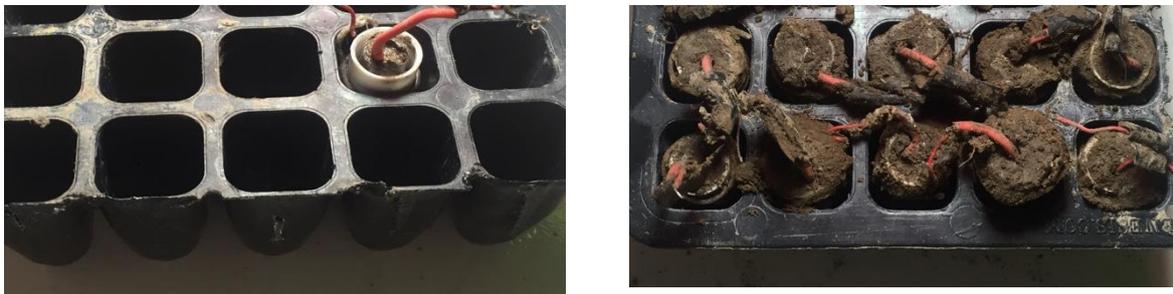


Ilustración 13: Batería de Geobacter (fuente propia)

De esa manera el circuito polarizará la reacción química de la bacteria Geobacter y el material inorgánico en los polos de los ánodos y cátodos, aprovechando así la energía.

Y por último, para el proceso de medición y para completar este registro de datos, se introduce los terminales o las puntas del instrumento en las celdillas de la batería generando un voltaje en la pantalla del voltímetro.

3.2. Procesamiento de datos.

A continuación, se mostrará el procedimiento usado para el procesamiento de los datos que se ha realizado en las tablas siguientes de datos brutos.

Primero se debe hallar el promedio aritmético de las cuatro medidas que se han realizado por celda. Esto se da de la suma de todos los datos por celda, dividido entre el número de pruebas, en este caso sería cinco.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^4 x_i}{n}$$

Primero se debe hallar el error porcentual, se debe tener en cuenta la incertidumbre absoluta, que es el semiancho del intervalo, y para ello debemos tener en cuenta el valor más grande y el valor mínimo, y se sigue la siguiente fórmula.

$$I_{absoluta} = \frac{X_{max} - X_{min}}{2}$$

Teniendo en cuenta la incertidumbre absoluta y el promedio de cada uno de los datos por celda, se debe seguir la siguiente fórmula:

$$I_{porcentual}(\%) = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\%$$

Para hallar la desviación estándar, que es la dispersión promedio de cada uno de los datos con respecto del valor central. Para poder hallarla se sigue la siguiente fórmula:

$$S_i = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{n - 1}$$

Y tercero, se halla el coeficiente de variación, que indica la variabilidad en términos porcentuales de cada uno de los datos con respecto al valor central.

$$CV = \frac{S_i}{\bar{x}} \times 100\%$$

Donde:

- \bar{x} = Promedio
- S_i = Desviación estándar.
- CV = Coeficiente de variación.
- X_{max} = Valor máximo.
- X_{min} = Valor mínimo.
- Δx = Incertidumbre absoluta.
- \bar{x} = Promedio en milivoltios (mV).
- x_i = Datos de los registros por celda.
- n = Número de registros por celda.

CAPITULO IV:

Datos Obtenidos Y Análisis

4.1. Datos brutos

Para realizar la medición, el instrumento de medición (voltímetro) se instala en paralelo. El terminal rojo es colocado en el cobre (cátodo), mientras que el negro es colocado en el zinc (ánodo). El terminal negro va avanzando a las siguientes celdas, mientras que el terminal rojo permanece fijo en la primera celda, de esa manera los voltajes se van sumando por crear una conexión en serie, eso quiere decir que conforme va aumentando el número de celdas, va aumentando el voltaje.

Tabla 1: Registro de voltaje (milivoltios) de las fuentes de la Geobacter

Número de Celdas	Registro Nº 1	Registro Nº 2	Registro Nº 3	Registro Nº 4
1	43.60	43.80	44.20	44.40
2	57.10	56.60	57.40	56.90
3	78.50	77.50	77.60	78.40
4	97.60	96.10	96.90	97.40
5	113.10	113.70	114.00	115.20
6	166.50	167.00	169.50	169.00
7	182.00	183.70	184.30	182.00
8	307.00	310.70	310.00	308.30
9	400.00	401.70	400.30	402.00
10	455.50	458.70	457.80	456.00

Fuente propia

Interpretación: En la tabla 1 se muestra el registro de los datos que se han obtenido por cada celda de la fuente de la Geobacter en milivoltios. La fuente de Geobacter está dividida en 10 celdas, y para cada una se ha medido 4 veces el voltaje (4 registros). Hay un total de 40 datos.

4.2. Datos procesados

Tabla 2: Promedio y error porcentual de la asociación de voltaje de las fuentes de la Geobacter

Número de Celdas	Registro Nº 1	Registro Nº 2	Registro Nº 3	Registro Nº 4	Promedio (\bar{x})	Error porcentual (%)
1	43.60	43.80	44.20	44.40	44.00	0.9075
2	57.10	56.60	57.40	56.90	57.00	0.8803
3	78.50	77.50	77.60	78.40	78.00	0.6410
4	97.60	96.10	96.90	97.40	97.00	0.9804
5	113.10	113.70	114.00	115.20	114.00	0.9211
6	166.50	167.0	169.50	169.00	168.00	0.8929
7	182.00	183.70	184.30	182.00	183.00	0.6284
8	307.00	310.70	310.00	308.30	309.00	0.5987
9	400.00	401.70	400.30	402.00	401.00	0.2494
10	455.50	458.70	457.80	456.00	457.00	0.3501

Fuente propia

Interpretación: En la tabla 2 se observa el cálculo del promedio y error porcentual de los voltajes (mV) de cada celda en las 4 tomas.

Tabla 3: Desviación estándar y coeficiente de variación de asociación de voltaje de las fuentes de la Geobacter

Número de Celdas	Registro Nº 1	Registro Nº 2	Registro Nº 3	Registro Nº 4	Promedio (\bar{x})	Desviación estandar	Coeficiente de variación
1	43.60	43.80	44.20	44.40	44.00	0.37	0.83%
2	57.10	56.60	57.40	56.90	57.00	0.34	0.59%
3	78.50	77.50	77.60	78.40	78.00	0.52	0.67%
4	97.60	96.10	96.90	97.40	97.00	0.67	0.69%
5	113.10	113.70	114.00	115.20	114.00	0.88	0.77%
6	166.50	167.0	169.50	169.00	168.00	1.47	0.88%
7	182.00	183.70	184.30	182.00	183.00	1.18	0.65%
8	307.00	310.70	310.00	308.30	309.00	1.67	0.54%
9	400.00	401.70	400.30	402.00	401.00	1.00	0.25%
10	455.50	458.70	457.80	456.00	457.00	1.50	0.33%

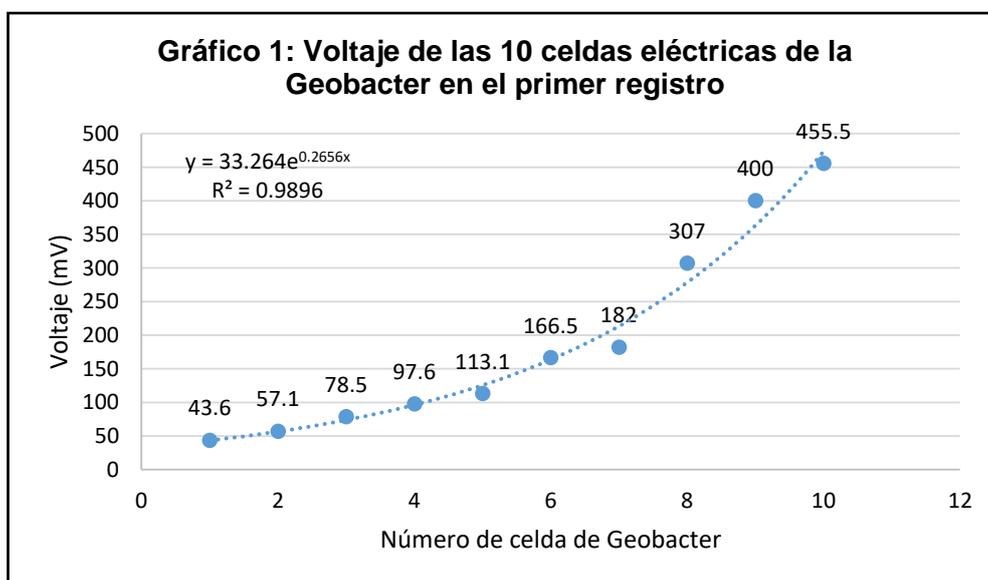
Fuente propia

Interpretación: En la tabla 3 se observa las tomas realizadas en las 10 celdas del Geobacter, además del promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

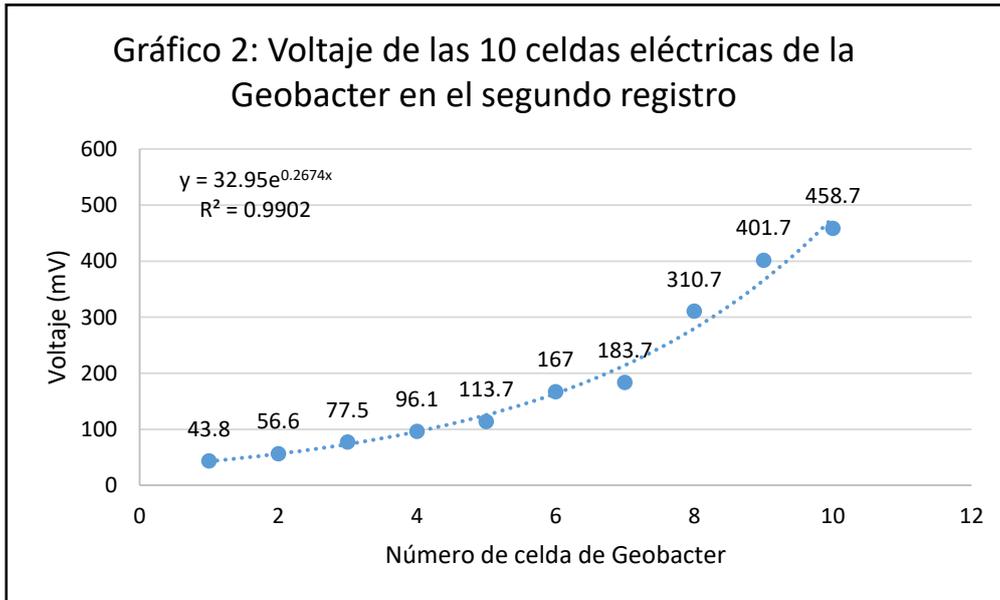
Como ya se había mencionado en el capítulo III en la parte de toma de datos, se fue incrementando las celdas una a una siguiendo una conexión en serie, como por ejemplo: Al trabajar con una celda, se tomaron 4 tomas, estas varían de 43.6 a 44.4 v, con un promedio de 44 milivoltios, además la dispersión promedio de estas tomas es de 0.365 con respecto al valor central; y la variabilidad del 0.83% de los valores de los registros con respecto al promedio; Hasta llegar a la toma de los 4 registros de datos cuando se trabaja con las 10 celdas, en donde el promedio fue de 457 milivoltios, desviación promedio de 1.5 y una variabilidad del 0.33%.

4.3. Gráficas

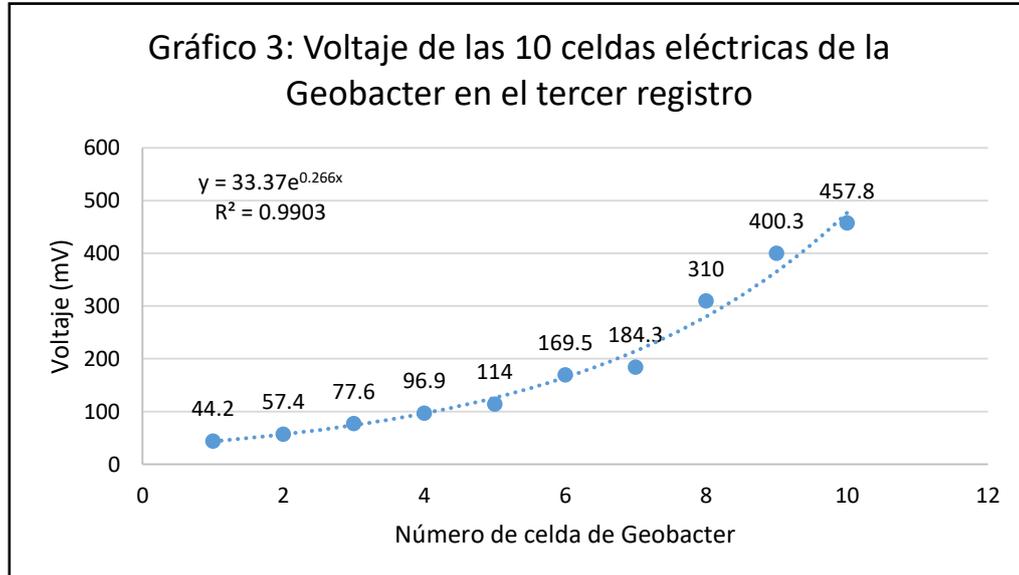
Usando los datos mostrados en las tablas anteriores, se realizaron las siguientes gráficas:



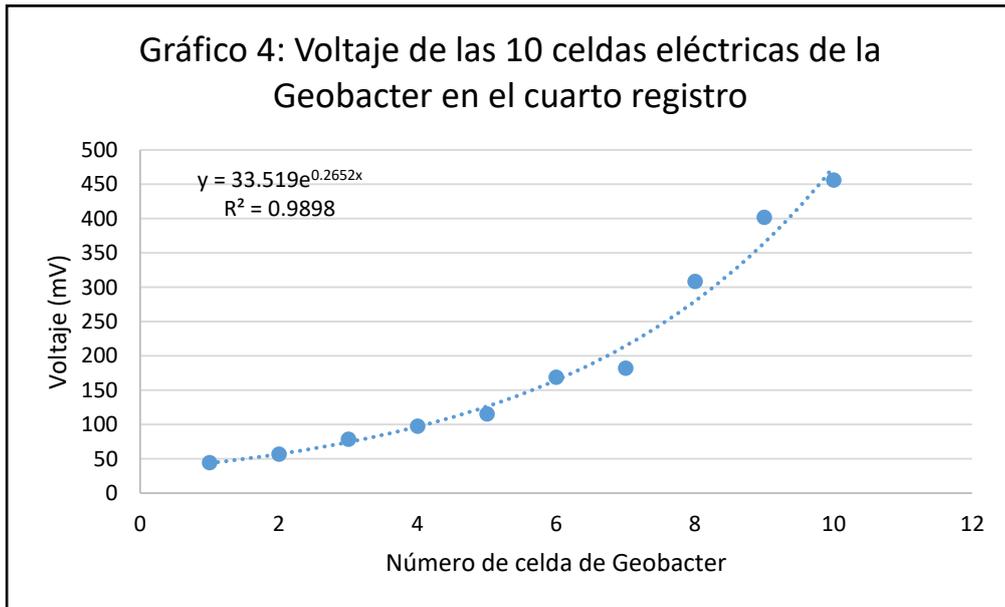
Interpretación: En el primer gráfico (grafico 1) se observa el comportamiento de los valores del voltaje del primer registro, siguiendo una tendencia exponencial. Se muestra un aumento del voltaje con respecto al número de celda. Son un total de 10 datos que van de forma creciente, a partir de un mínimo de 43.6mV hasta un máximo de 455.5mV.



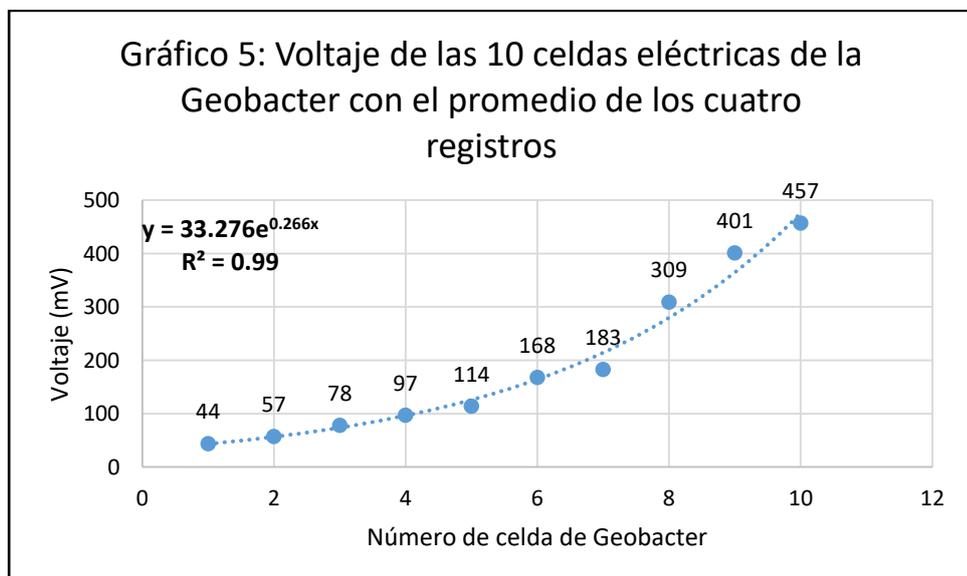
Interpretación: En el segundo gráfico se observa el comportamiento de los valores del voltaje del segundo registro, siguiendo una tendencia exponencial. Se muestra un aumento del voltaje con respecto al número de celda. Son un total de 10 datos que van de forma creciente, a partir de un mínimo de 43.8mV hasta un máximo de 458.7mV.



Interpretación: En el tercer gráfico se observa el comportamiento de los valores del voltaje del tercer registro, siguiendo una tendencia exponencial. Se muestra un aumento del voltaje con respecto al número de celda. Son un total de 10 datos que van de forma creciente, a partir de un mínimo de 44.2mV hasta un máximo de 457.8mV.



Interpretación: En el cuarto gráfico se observa el comportamiento de los valores del voltaje del cuarto registro, siguiendo una tendencia exponencial. Se muestra un aumento del voltaje con respecto al número de celda. Son un total de 10 datos que van de forma creciente, a partir de un mínimo de 44.4mV hasta un máximo de 456mV.



Interpretación: En el gráfico 5 se observa el comportamiento de los promedios del voltaje en cada celda, siguiendo una tendencia exponencial. Además, se observa un crecimiento relativamente lento desde la celda 1 hasta la celda 6; Luego, un

crecimiento constante, y a partir de la celda 7 en adelante el crecimiento es más rápido. Son un total de 10 datos que van de forma creciente, a partir de un mínimo de 44mV hasta un máximo de 457mV.

Utilizando el software de Microsoft Excel se procede a linealizar la variable dependiente hallando el Logaritmo natural de cada uno del voltaje en los 4 registros. Esto permitirá hallar la correlación entre las variables utilizando el coeficiente de *correlación de Pearson*, quedando así:

Tabla 4: Logaritmo natural para la variable dependiente.

Casillero del Geobacter	Ln (Registro N° 1)	Ln (Registro N° 2)	Ln (Registro N° 3)	Ln (Registro N° 4)	Ln (Promedio (\bar{x}))
1	3,78	3,78	3,79	3,79	3,78
2	4,04	4,04	4,05	4,04	4,04
3	4,36	4,35	4,35	4,36	4,36
4	4,58	4,57	4,57	4,58	4,57
5	4,73	4,73	4,74	4,75	4,74
6	5,11	5,12	5,13	5,13	5,12
7	5,20	5,21	5,22	5,20	5,21
8	5,73	5,74	5,74	5,73	5,73
9	5,99	6,00	5,99	6,00	5,99
10	6,12	6,13	6,13	6,12	6,12

Estando las variables linealizadas se procede a calcular la correlación de Pearson entre número de los casilleros del Geobacter y el voltaje en milivoltios utilizando el software estadístico SPSS. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 5: Correlación entre número del casillero del Geobacter y el voltaje en el primer registro (r_1)

		Casillero de Geobacter	Voltaje en milivoltios en el Registro N° 01
Casillero de Geobacter	Correlación de Pearson	1	,9948**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	10	10
Voltaje en milivoltios en el Registro N° 01	Correlación de Pearson	,9948**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	10	10

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 6: Correlación entre número del casillero del Geobacter y el voltaje en el segundo registro (r_2)

		Casillero de Geobacter	Voltaje en milivoltios en el Registro N° 02
Casillero de Geobacter	Correlación de Pearson	1	,9951**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	10	10
Voltaje en milivoltios en el Registro N° 02	Correlación de Pearson	,9951**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	10	10

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 7: Correlación entre número del casillero del Geobacter y el voltaje en el tercer registro (r_3)

		Casillero de Geobacter	Voltaje en milivoltios en el Registro N° 03
Casillero de Geobacter	Correlación de Pearson	1	,9951**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	10	10
Voltaje en milivoltios en el Registro N° 03	Correlación de Pearson	,9951**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	10	10

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 8: Correlación entre número del casillero del Geobacter y el voltaje en el cuarto registro (r_4)

		Casillero de Geobacter	Voltaje en milivoltios en el Registro N° 04
Casillero de Geobacter	Correlación de Pearson	1	,9949**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	10	10
Voltaje en milivoltios en el Registro N° 04	Correlación de Pearson	,9949**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	10	10

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 9: Correlación entre número del casillero del Geobacter y el voltaje en el quinto registro (r_5)

		Casillero de Geobacter	Voltaje en milivoltios en el Registro Promedio
Casillero de Geobacter	Correlación de Pearson	1	,9949**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	10	10
Voltaje en milivoltios en el Registro Promedio	Correlación de Pearson	,9949**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	10	10

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

CONCLUSIÓN

En las tablas 5, 6, 7, 8 y 9 se observa que en todas las correlaciones entre el número de casilleros del Geobacter y el voltaje en milivoltios de los 4 registros, las relaciones son altas ($r_1 = 0.9948$; $r_2 = 0.9951$; $r_3 = 0.9951$; $r_4 = 0.9949$; $r_5 = 0.9950$); se confirma por la significancia en el nivel 0.01, esto significa que a mayor cantidad de casilleros del Geobacter el voltaje en mili voltios aumenta. Asimismo se menciona que la correlación más baja fue con el primer registro y la más alta con el segundo y tercer registro. Por tanto, se confirma que hay una alta relación entre las variables de estudio quedando demostrada la hipótesis de la relación de variables de tendencia exponencial, cuyos modelos son:

$$\hat{y}_1 = 33.264 * e^{0.2656x}$$

$$\hat{y}_2 = 32.95 * e^{0.2674x}$$

$$\hat{y}_3 = 33.37 * e^{0.266x}$$

$$\hat{y}_4 = 33.519 * e^{0.2652x}$$

La tendencia de la nube de puntos promedios tal como se muestra en la gráfica 5 describió una relación exponencial, esto es la ecuación general que relaciona el número de fuentes de geobacter y el voltaje en milivoltios que estas registran en serie es:

$$\mathbf{V = 33.276e^{0.266n}}$$

Donde **V** es el voltaje de las celdas y **n** es el número de celdas. en serie

MEJORA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología utilizada en esta monografía fue para generar energía a través de la cepa bacteriana utilizando la batería Geobacter con tierra del arrozal. Una limitación que se presentó fue que al no estar en temporada de cultivo de arroz no se pudo obtener aguas de mayor concentración de bacteria Geobacter. Otra limitación fue la dificultad para encontrar y zinc, que funciona como el cátodo. Además, evitar el contacto entre el cátodo y el ánodo (cobre y zinc) al momento de la toma de datos. Asimismo, conseguir un instrumento de medición con una mayor sensibilidad para la toma de valores pequeños de energía. Por otro lado, el incremento del tamaño de muestra mejoraría la precisión de los modelos ya que se trabajó con una muestra de 10 tomas y 4 registros. Se recomienda contar con investigaciones sobre el tema en donde utilicen software más especializado para el registro de los datos.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Bauer, W., & Westfall, G. (2011). *Física para ciencias e ingeniería: Volumen 1* (1st ed.). México: McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Bauer, W., & Westfall, G. (2011). *Física para ingeniería y ciencias: Volumen 2* (1st ed.). México: McGraw-Hill/Interamericana Editores
- Saavedra, I. (2012). Diseño de una Celda de Combustible Microbiológica con Uso de Bacterias Oxidantes de Azufre y Hierro. Santiago de Chile, Chile: Universidad De Chile. Recuperado el 31 de Agosto del 2020, de: http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2012/cf-saavedra_is/pdfAmont/cf-saavedra_is.pdf
- Morán, D. (s.f.). Biopila Geobacter. Instituto Mexicano Madero sistema bilingüe, Puebla de Zaragoza, México.
- Follos, F. (2013). *GEOBACTER – Las ecobacterias*. Blogspot. Recuperado de: <http://ferfollos.blogspot.com/2013/05/geobacter-las-ecobacterias.html>
- Evans, K. (2017). Conozca mejor un microbio: Geobacter. Labroots. Recuperado de: <https://www.labroots.com/trending/microbiology/5830/microbe-geobacter>
- Gasparotti, N. (2013). Bacterias que producirían electricidad con hidrógeno y dióxido de carbono. Energiverde. Recuperado de: <http://www.energiverde.com/energia-verde/bacterias-que-producirian-electricidad-con-hidrogeno-y-dioxido-de-carbono>
- Romero, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. Scielo. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2012000200011

- Nevin, K. (2008). Power output and columbic efficiencies from biofilms of *Geobacter sulfurreducens* comparable to mixed community microbial fuel cells. *Environmental Microbiology*. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.572.859&rep=rep1&type=pdf>
- Revelo, D. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMS): UN RETO PARA LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA. RECUPERADO DE: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000600004
- Geoenciclopedia. (2018). Modelo atómico de Bohr. Geoenciclopedia. Recuperado de: <https://www.geoenciclopedia.com/modelo-atomico-de-bohr/>
- Endesa. (s.f.). How electricity is generated. Endesa. Recuperado de: <https://www.endesa.com/en/discover-energy/energy-and-more/how-electricity-is-generated>
- Lovley, D. (2013). *Geobacter Sulfurreducens*. Ingenieros.es. Uso de las bacterias para producir electricidad. Recuperado de: <http://www.ingenieros.es/noticias/ver/geobacter-sulfurreducens-uso-debacterias-para-producir-electricidad/3665#:~:text=metallireducens%20llamada%20Geobacter%20Sulfurreducens%2C%20que,el%20%C3%BAnico%20aceptor%20de%20electrones.>