



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
AVANZADOS, S. C.**

POSGRADO

**Generación de electricidad en una celda de
combustible microbiano**

**Tesis que como requisito para obtener el grado de Maestría en
Ciencias en Energías Renovables con Especialidad en Biomasa**

Presentan:

Rodrigo Alvarez Briseño

José Raúl Rojas Morales

Dr. Guillermo González Sánchez

Director de tesis

Chihuahua, Chih., Noviembre, 2013

Agradecimientos

- A la Universidad Tecnológica del Estado de Zacatecas por habernos brindado la oportunidad de estudiar esta maestría.
- Al CIMAV por habernos aceptado como alumnos en el programa de la maestría en Energías Renovables segunda generación.
- A nuestro asesor y profesor Dr. Guillermo González Sánchez por su valioso tiempo y sus conocimientos, por todo su apoyo en la elaboración de este trabajo y por la amistad brindada.
- A la M.C. Sara Espinoza Villegas por su apoyo y confianza aportada en la realización de este trabajo.
- Al Dr. Guillermo Rodríguez Hernández por su apoyo y confianza aportada en la realización de este trabajo.
- A nuestro director de la carrera de Energías Renovables en la UTEZ, Manlio Fabio Velasco García por su apoyo y confianza en la realización de este trabajo.
- A la Universidad Tecnología de la Zona Metropolitana de Guadalajara por su apoyo brindado en nuestra preparación.

Tabla de contenidos

Índice de Figuras.....	iv
1 Introducción.....	4
1.1 Configuraciones de Reactores.....	7
1.2 Microorganismo.....	7
1.3 Sustratos.....	9
1.4 Ánodo.....	9
1.5 Cátodo.....	10
1.6 Membrana de intercambio de protones.....	10
1.7 Puente Salino.....	11
2 Hipótesis.....	14
3 Justificación.....	14
4 Objetivos.....	14
4.1 Objetivo Principal.....	14
4.1 Objetivos particulares.....	14
4.2 Cronograma de Actividades.....	15
5 Materiales y Métodos.....	16
5.1 Celda de una sola cámara.....	16
5.2 Celdas de tipo H.....	20
5.2.1 Celda 1 tipo H.....	20
5.2.2 Celda 2 tipo H.....	24
5.3 Celda de dos cámaras.....	27
5.3.1 Puente salino:.....	28
5.3.2 Celda 1 de dos cámaras.....	31
5.3.3 Celda 2 de dos cámaras.....	34
5.4 Electrodeposición de partículas de níquel.....	36
5.4.1 Material:.....	36
5.4.2 Equipo:.....	37
5.4.3 Metodología:.....	37
5.5 Celda de 2 cámaras (Blanco).....	41

5.6	Software para monitoreo de voltaje	41
5.7	Celdas de 2 cámaras con Labview®	44
5.7.1	Celda 1 de dos cámaras con Labview®	44
5.7.2	Material:	45
5.7.3	Equipo:	45
5.7.4	Metodología:	45
5.8	Celda 2 de cámaras como consorcio bacteriano lodos activados y agua residual.....	47
5.8.1	Material	47
5.8.2	Equipo:	47
5.8.3	Metodología:	47
6	Resultados y discusión.	49
6.1	Celda de una sola cámara	49
6.2	Celdas de tipo H	50
6.3	Celdas de dos cámaras	53
6.4	Celdas de dos cámaras con Labview®	61
7	Conclusiones	67
8	Trabajo Futuro	68
8.1	Celda de una sola cámara con puente salino	68
8.2	Celda de una sola cámara con membrana	69
8.3	Celda de una sola cámara con membrana	71
9	Bibliografía.....	73

Índice de Figuras

Figura 1.- Funcionamiento de una Celda de Combustible Microbiano	4
Figura 2.- Reactores basados en diferentes criterios	7
Figura 3.- Imagen de bacterias transportadora de electrones utilizando nanocables o pili, esta imagen corresponde a una bacteria como la <i>Geobacter</i>	8
Figura 4.- Membrana de Nafion®	11
Figura 5.- Celdas de 2 cámaras unidas por un puente salino.	12
Figura 6. El transporte de los iones de hidrógeno (H^+) a través del agua se lleva a cabo por el mecanismo de Grotthuss, en el que los enlaces de hidrógeno (líneas de trazos) y enlaces covalentes (líneas solidas) entre las moléculas de agua se rompen y se vuelven a formar.....	13
Figura 7.- Autoclave para la esterilización de la cámara.	17
Figura 8.- Planta de tratamiento de aguas residuales municipales.	17
Figura 9.- Toma de la muestra del afluente, todas las muestras se depositaron en contenedores de vidrio previamente lavado, para posteriormente trasladarlas en una hielera con hielos.	18
Figura 10.- Medidor de pH tipo potenciométrico.....	18
Figura 11.- Celda de una sola cámara.....	19
Figura 12.- Celda tipo H	22
Figura 13.- Papel celofán utilizado como membrana	22
Figura 14.- Celda tipo H armada donde se mide el voltaje utilizando un multímetro de alta impedancia.	23
Figura 15.- Celda tipo H	25
Figura 16.- Medición del pH	25
Figura 17.- Membrana de guante de hule utilizada para unir ambas cámaras.	26
Figura 18.- Celda tipo H armada utilizando el guante de hule como membrana y monitoreando el voltaje con un multímetro marca Steren.	26
Figura 19.- En esta imagen se aprecia cómo se doblaron los tubos de vidrio para posteriormente utilizarlos como puentes salino.....	28
Figura 20.- Forma del puente salino.....	29
Figura 21.- Medición de KCl y Agar-Agar	29
Figura 22.- Preparación de la solución de del puente salino.....	30
Figura 23.- Llenado de electrólito en tubos de vidrio.....	30
Figura 24.- Celda de combustible microbiano de 2 cámaras unidas con un	32
Puente salino, ambas celdas trabajando en condiciones aerobias.	32
Figura 25.- Medición del voltaje generado utilizando un multímetro de alta impedancia.	33
Figura 26.- Tiras utilizada para medir el pH en las celdas anódicas.	33
Figura 27.- Dimensiones con las que cuenta el puente salino, para unir ambas cámaras, la solución contenida es de KCl (Cloruro de Potasio).	34
Figura 28.- Celda de 2 cámaras unidas con un puente salino, utilizando como consorcio microbiano lodos activados y como sustrato caldo glucosado, trabajando en condiciones anaerobia la cámara anódica.	35
Figura 29.- Medición de voltaje en la celda anaeróbica de dos cámaras, utilizando un multímetro de alta impedancia.	36
Figura 30.- Limpiezas de los electrodos utilizando una solución alcalina, a una temperatura de 80 grados centígrados, durante 2 minutos.	37
Figura 31.- Preparación de solución electrolítica con sulfato de níquel.....	38
Figura 32.- Esquema de conexión para la electrodeposición.	39

Figura 33.- Electrodeposición del níquel en el carbón y grafito utilizando una fuente de corriente directa con un voltaje de 20 V con una corriente de 1A.	39
Figura 34.- Limpieza del grafito y barra de carbón con agua destilada.	40
Figura 35.- Medición de la masa del grafito utilizando una báscula granataria.	40
Figura 36.- Tarjeta de adquisición de datos USB 6090.	42
Figura 37.- Interfaz gráfica para el monitoreo del voltaje.	42
Figura 38.- Diagrama de conexión de ambos canales.	43
Figura 39.- Dimensiones con las que cuenta el puente salino, para unir ambas cámaras, la solución contenida es de KCl(Cloruro de Potasio).	45
Figura 40.-Implementación de la celda microbiana de 2 cámaras unidas por un puente salino, operando en condiciones anaerobias, del lado derecho cátodo del izquierdo ánodo.	46
Figura 41.- Dimensiones con las que cuenta el puente salino, para unir ambas cámaras, la solución contenida es de KCl(Cloruro de Potasio).	48
Figura 42.-Celda 2 dos cámaras utilizando lodos como consorcio bacteriano y caldo glucosado con aguas residuales como sustrato, en ambas celdas se utilizaron barras de grafito como electrodo, ambas unidas con un puente salino.	49
Figura 43.- Oxidación de la conexión en el ánodo.	51
Figura 44.- En esta figura se muestra la generación de burbujas que presento la cámara anódica al paso de 1 a 2 días, del corrimiento.	53
Figura 45.-En esta grafica se presentan el voltaje y la potencia obtenida por esta celda en un lapso de 7 días y trabajando en condiciones aeróbicas.	54
Figura 46.- En esta gráfica se muestra el comportamiento que tuvo el pH, en la celda anódica.	55
Figura 47.- En esta imagen se muestra la generación de burbujas en la cámara anódica.	56
Figura 48.-En esta gráfica se puede apreciar que al quinto día se generó el mayor voltaje para después tener un descenso de voltaje lentamente.	57
Figura 49.- En esta gráfica se muestra el comportamiento que tuvo el voltaje y el pH, en la cámara anódica del blanco.	58
Figura 50.-Comportamiento de la celda en un lapso de 15 días, mostrando de igual forma la generación de potencia.	61
Figura 51.-En esta figura se aprecia la decoloración que tuvo la cámara anódica después del décimo día, donde se presentó una floculación de lodos, esto debido probablemente al consumo de caldo glucosado.	62
Figura 52.- En esta imagen se puede apreciar la forma que adquirió la cámara anódica después del onceavo día, en la cual previamente se le agregaron 25 ml de caldo glucosado.	63
Figura 53.- En esta grafica se muestra los datos registrados por la tarjeta de adquisición de datos, y las potencias generadas en 13 días de corrimiento.	64
Figura 54.-Celda anódica en condiciones anaeróbicas al finalizar el corrimiento, con una floculación de lodos, y una pequeña capa de lodos en la parte superior del matraz.	65

Índice de Tablas

Tabla 1.- Tipos de bacterias de transferencia directa y aquellas que requieren un mediador.....	9
Tabla 2.- Tabla donde se muestran las condiciones de operación de las celdas tipo H.....	20
Tabla 3.- Tabla donde se muestran las condiciones de operación de las celdas de dos cámaras.....	27
Tabla 4.- Tabla donde se muestran las condiciones de operación de las celdas de dos cámaras.....	44
Tabla 5.- Tabla comparativa de los resultados obtenidos en las celdas de tipo H.....	52
Tabla 6.-En esta tabla se muestra las condiciones en las cuales se trabajaron ambas celdas, mostrando el voltaje y potencia promedio durante los días del corrimiento.....	59
Tabla 7.-Tabla comparativa con otra investigación.....	60
Tabla 8.-Condiciones en las cuales se llevaron a cabo ambas celdas 1 y 2, mostrando el voltaje y la potencia generada ambas en promedio durante los días del corrimiento.....	66

Resumen

El desafío tecnológico más grande en la actualidad es la alternancia de nuevas fuentes de energías, principalmente las renovables, los microorganismos son capaces de producir este tipo de energía renovable. Las celdas microbianas de combustible tienen la tarea de convertir la materia orgánica en electricidad, es por ello que en este trabajo se emplearon 3 tipos de celdas de combustible microbianas (CCM) a escala de laboratorio para la generación de electricidad utilizando materiales comunes en ambas celdas.

En la cámara anódica se empleó como consorcio bacteriano aguas residuales provenientes del afluyente y lodos activados de aguas residuales municipales. Se utilizaron como electrodos en la cámara anódica, barras de carbón y grafito para la captación de electrones.

La primera celda tuvo una configuración de una sola cámara, para el paso de electrones se utilizó barras de grafito en la cámara anódica y una malla de grafito en la catódica y como membrana se utilizó lona de auto obteniendo un voltaje de 0V en los 7 días del corrimiento.

En la segunda celda fue de tipo H con dos cámaras, en la cual se utilizaron barras de grafito para la captación de electrones, como separador de las cámaras anódica y catódica se utilizó guante de uso doméstico, en esta celda se trabajó por lotes con duraciones de 7 días, encontrando que en estas celdas no se obtuvo generación de voltaje.

La tercera celda consistió en dos cámaras utilizando como unión un puente salino, empleando caldo glucosado como sustrato, trabajando en condiciones aerobias y anaerobias en lapsos de tiempo de 7 y 16 días. Obteniendo valores de voltaje promedio de 143.471mV en condiciones aerobias y 209.027mV en condiciones anaerobias con resistencia de 10M Ω en 7 días. En el lapso de 16 días se obtuvo 180.132mV, y 143.794mV en promedio, ambos en condiciones anaerobias conectando una resistencia de 144K Ω .

En este tipo de sistemas se demostró que el consorcio microbiano contenido en las aguas residuales y lodos activados municipales, tiene una generación de electricidad en el orden de los milivoltios (mV).

Abstract

The biggest current technological challenge is the alternation of new energy sources, mainly the renewable ones. Microorganisms are capable of producing this type of energy. Microbial combustible cells have the task of convert organic matter into electricity. Thus for this work two types of microbial combustible cells (MCC) were employed in a laboratory scale for the generation of electricity using common materials in both cells.

In both cells treated wastewater and activated sludge from biological reactor affluent were utilized as bacterial consortium source. Carbon bars were used as electrodes and graphite for drawing electrons in.

The first cell was a configuration of a single camera, for the passage of electrons is used graphite rods in the anode chamber and a mesh of graphite in the cathode and membrane was used as canvas of car getting a voltage of 0 V in the 7 days of testing.

In the second cell was of type H with two cameras, which used graphite rods for the abstraction of electrons, such as separator of the anode and cathode cameras was used nylon glove in this cell worked with batch durations of 7 days, finding that in these cells no voltage generation was obtained.

The remaining cells consisted of two chambers using a saline bridge as a joint, utilizing glucose broth as a substrate, working in aerobe and anaerobe conditions in time lapses of 7 and 16 days. Obtaining average values of 143.4 mV in aerobic conditions and 209.0mV in anaerobic conditions with a resistance of 10M Ω in 7 days. During the lapse of 16 days, the outcome was 180.1mV and 143.7 mV in average, both in anaerobe conditions with a resistance of 144K Ω .

In this type of systems it was demonstrated that the microbial consortium contained in wastewaters and activated municipal sludge can be utilized as a source of glucose supply, having an electricity generation in the order of millivolts (mV).

1 Introducción.

Una de las tecnologías más prometedoras para la producción biológica de energía eléctrica son las celdas de combustible microbianas (CCM) o del término en inglés (MFC) microbial fuel cell. Una CCM es un reactor biológico especializado donde los electrones son procesados durante el metabolismo microbiano, esta actividad es interceptada para proveer energía eléctrica. Dentro de una CCM la oxidación del compuesto donador de electrones es físicamente separada de parte de la terminal aceptora de electrones. Los microbios están en crecimiento en la cámara del ánodo donde el compuesto donador de electrones es oxidado. Los electrones pasan del ánodo al cátodo a través de un circuito externo con una carga resistiva, entonces pasan al cátodo donde finalmente son aceptados. Típicamente el compartimiento del ánodo es separado del cátodo por una membrana de intercambio protónico (MIP) o del término en inglés (PEM) Proton Exchange Membrane. Los protones pasan de la cámara del ánodo a través de la membrana de intercambio protónico hacia el cátodo donde finalmente se unen con el oxígeno y los electrones provenientes del circuito de la resistencia formando agua. Al desviar el flujo de electrones por parte de la respiración microbiana hacia los electrodos, las CCM convierten la energía química a energía eléctrica ver Figura 1.

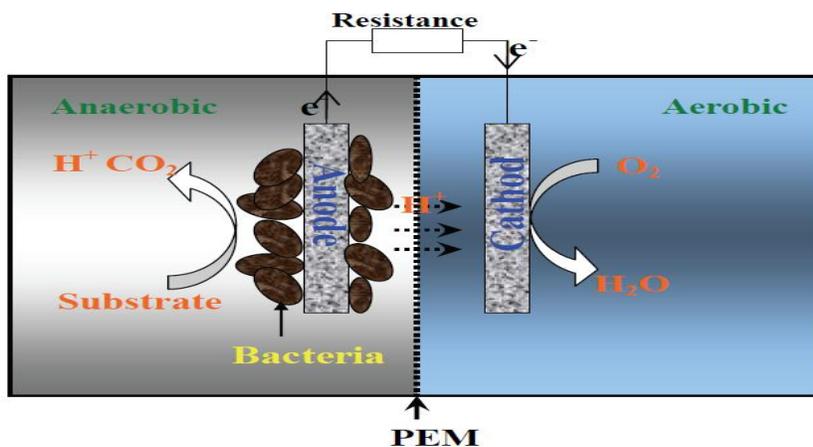


Figura 1.- Funcionamiento de una Celda de Combustible Microbiano

Una CCM convierte un sustrato biodegradable directamente a electricidad, esto se consigue cuando las bacterias a través de su metabolismo transfieren electrones desde un donador tal como la glucosa a un aceptor de electrones. En una CCM las bacterias no transfieren directamente los electrones producidos a su aceptor terminal, sino que estos son desviados hacia el ánodo, esta transferencia puede ocurrir de varias formas, bien sea a través de la membrana celular o a partir de un mediador soluble y los electrones fluyen a través de un circuito externo.

Las CCM tienen ventajas sobre otras tecnologías usadas para la generación de energía eléctrica a partir de la materia orgánica:

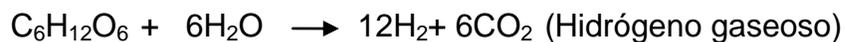
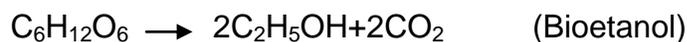
Primero; la conversión directa de sustrato a electricidad permite altas eficiencias.

Segundo; operan eficientemente a temperatura ambiente, incluidas bajas temperaturas.

Tercero; no requieren del tratamiento del biogás generado en la celda.

Cuarto; no requieren de energía extra para airear el cátodo, pues este puede ser aireado pasivamente.

A partir de la biomasa orgánica presente en residuos sólidos y líquidos se puede obtener una variedad de biocombustibles y subproductos, siendo la glucosa la principal fuente de carbono (Logan, 2004; Alzate et al., 2007; He y Angenet., 2006). Entre las reacciones estequiométricas principales del metabolismo fermentativo microbiológico están:



Entre las CCM con membrana de intercambio protónico (PEM) existen tres configuraciones típicas (figura 2).

- i. Bioreactor desacoplado de la CMM: los microorganismos generan H₂ que se emplea como combustible en una celda.
- ii. Bioreactor integrado a la CCM: los microorganismos generan H₂ que se convierte a electricidad en una única celda.
- iii. La CCM con transferencia directa de electrones: generación eléctrica microbológica y transferencia directa al ánodo (Rabaey *et al.*, 2005).

Las CCM pueden ser monitoreadas a través de parámetros electroquímicos tales como densidad de potencia, corriente eléctrica generada y el voltaje. De igual forma, un parámetro biológico muy importante es la carga orgánica del sustrato a emplear expresada en kg.m⁻³.d⁻¹ (Rabaey *et al.*, 2003).

La primera evidencia de generación de electricidad por una bacteria en una MFC es reportada por Potter en 1912. Sin embargo, pocos estudios posteriores estaban interesados en este campo hasta un renacimiento corto casi medio siglo después. Debido a inconvenientes como la baja capacidad de generación, una necesidad de mediadores de electrones artificiales, y el exitoso desarrollo de otras tecnologías alternativas (por ejemplo, la tecnología fotovoltaica química), a principios las MFC no se consideraban prometedoras. En 1999, *Kim et al.* informó la primera MFC con mediador soluble y con *Shewanella putrefaciens* como biocatalizador que provocó un rápido desarrollo en la última década, la densidad de potencia reportada de la MFC ha aumentado de menos de 1 Wm⁻³ a más de 4000 mWm⁻³.

Las aplicaciones potenciales de las MFC se han ido incrementando las cuales van desde tratamientos de aguas residuales hasta generación de electricidad (Zhang X., *et al* 2013).

1.1 Configuraciones de Reactores.

Varios configuraciones de MFC revisadas por (Minghua Zhou *et al* 2013). Figura 2 muestra un resumen de los tipos de reactores basados en diferentes criterios.

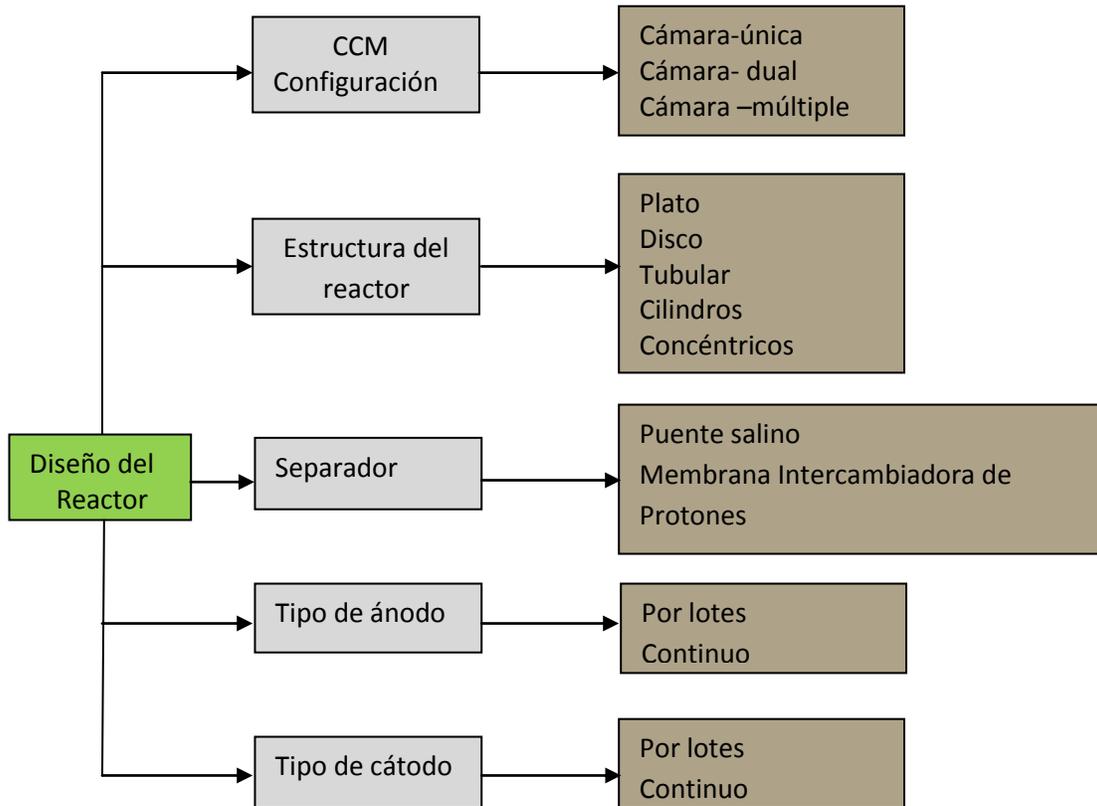


Figura 2.- Reactores basados en diferentes criterios

1.2 Microorganismo.

Muchos trabajos han utilizado inóculo proveniente de varios sistemas como lodos activados (Lee y Col., 2003), lodos anaerobios (Rabaey y Col., 2003), aguas residuales domésticas (Min y Logan, 2004), aguas residuales industriales (Prasad y Col., 2006), sedimentos marinos (Bond y Col., 2002) o sedimentos acuáticos (Holmes y col., 2004a). Los mejores resultados se han obtenido empleando lodos activados o anaerobios (Rabaey y Col., 2008.). Los cultivos mixtos generan una mayor energía que los cultivos puros, esto se debe a las interacciones sinérgicas

que se presentan en el ánodo y a la participación de cepas con capacidades metabólicas complementarias (Lee *et al.*, 2003).

La transferencia extracelular de electrones se puede definir como el proceso en el cual los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos son transferidos a la superficie externa de la célula para reducir un aceptor terminal de electrones extracelular (Lovley, 2008). Por ello se han estudiado a varias familias microbiológicas para definir el mecanismo por el cual transfieren sus electrones, en los cuales se encuentran las *Geobacter* y *Rhodoferax*; los cuales poseen mecanismos de transporte de electrones internos y no requieren la ayuda de mediadores para liberar dichos electrones al ánodo (Lovley & Kevin, 2008). También se cree que la bacteria *Shawenella*, puede facilitar la transferencia de electrones en distancias muy largas por medio de los nanocables o pili hacia el electrodo, ver figura.

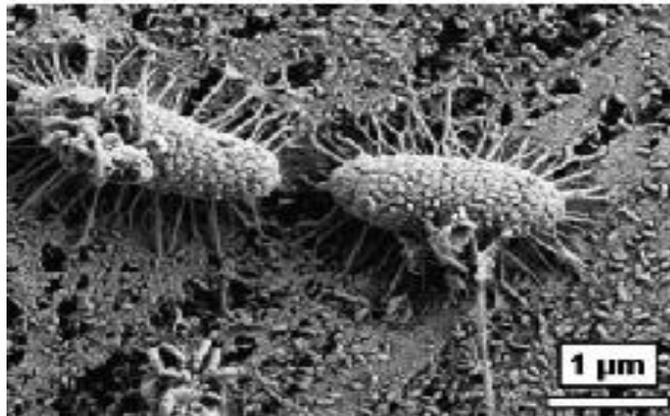


Figura 3.- Imagen de bacterias transportadora de electrones utilizando nanocables o pili, esta imagen corresponde a una bacteria como la *Geobacter*.

Por otro lado existen aquellas que necesitan un mediador exógeno para transferir sus electrones hacia el ánodo. Un mediador es un compuesto que puede entrar en la célula, aceptar electrones de varios acarreadores intracelulares de electrones, salir de la célula en estado reducido y entonces donar los electrones al ánodo.

Bacterias que requieren mediadores	Bacterias de transferencia directa
<i>Actinobasillus succinogenes</i>	<i>Aeromonas hydrophila</i>
<i>Shewanella oneidensis</i>	<i>Geobacter metallireducens</i>
<i>Proteus vulgaris</i>	<i>Shewanella putrefacens</i>
<i>Enterococcus gallinarum</i>	<i>Geobacter sulfurreducens</i>

Tabla 1-. Tipos de bacterias de transferencia directa y aquellas que requieren un mediador.

1.3 Sustratos.

Diversos estudios realizados a lo largo del tiempo demuestran que el uso de cultivos con bacterias específicas como las antes mencionadas utilizan como sustrato glucosa (Rabaey *et al.* 2003, Liu y Logan 2004, Logan *et al.* 2007) así como aguas residuales domesticas (Liu *et al.* 2004).

1.4 Ánodo.

Los materiales con los que se deben construir los ánodos deben ser conductivos, biocompatibles y químicamente estables en la solución del reactor, el material utilizado en la mayoría de la celdas es el carbono en todas sus presentaciones.

Para incrementar el desempeño del ánodo, diferentes estrategias químicas y físicas han sido utilizadas. Materiales electrocatalíticos como son compuestos de polianilinas han mostrado que mejoran la generación de corriente ayudando a la oxidación directa de metabolitos microbianos. (Falcón *et. al.* 2009).

1.5 Cátodo.

La elección del material del cátodo afecta de manera importante el desempeño, y su variedad de aplicaciones (Cheng *et al.*, 2006b). Para incrementar la velocidad de reducción de oxígeno, los catalizadores de platino son usualmente usados para oxígeno disuelto o cátodos de difusión de gas. La cantidad de platino puede mantenerse a 0.1 mg cm^{-2} . Recientemente, metales nobles han sido propuestos como cátodos para las MFCs (Logan *et al.*, 2006). El níquel es una propuesta favorable para la oxidación del oxígeno (Priscilla A. *et al* 2010).

1.6 Membrana de intercambio de protones.

Una membrana de Nafion® (perfluorosulfonato) es un polímero lineal con grupos $-\text{SO}_3$ que están fijos a la cadena fluorcarbonatada y que contiene contraiones positivos, por ejemplo H^+ . El Nafion® es un polímero muy utilizado, tanto por su alta resistencia química y mecánica como por su alta conductividad eléctrica (protónica) como membrana separadora entre cátodo y ánodo en electrolizadores de agua y en celdas de combustible, ultrafiltración, nanofiltración, desalinización de agua salada, entre otras aplicaciones. Básicamente una MIP (membrana intercambiadora de protones) que separa los cationes provenientes de aniones y los aniones provenientes de los cationes. (M.Y Kariduraganavar *et. Al* 2006)³⁹

La MIP más comúnmente utilizada es Nafion® (DuPont Co., USA) aunque existen otras opciones como Ultrex® CMI-7000 que también son adecuadas para CCM.

1.6.1 Funcionamiento de la membrana conductora de protones (nafion).

La membrana conductora de protones usualmente consiste de un politetrafluoroetileno (teflón) en la cual un grupo de ácidos sulfónicos son unidos. La membrana conductora de protones trabaja cuando los H^+ brincan en

cada SO_3^- (trióxido de azufre) atravesando el material (Colleen Spiegel 2008)⁴⁵. Como se ilustra en la siguiente figura 4.

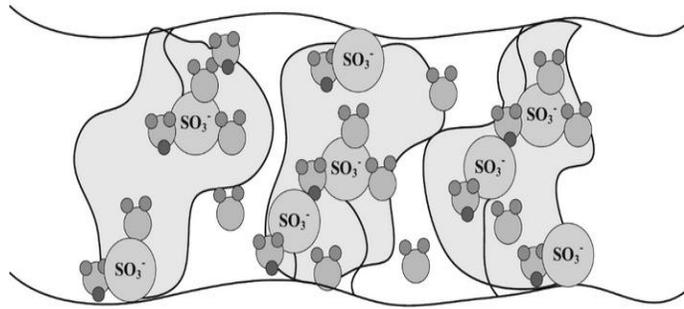


Figura 4-. Membrana de Nafion®

1.7 Puente Salino.

Un puente salino es un tubo que une los dos recipientes sin dejar circular ni mezclarse las dos disoluciones (ánodo y cátodo). Un puente salino contiene un electrolito que puede ser KCl , NH_4 , NO_3 , KNO_3 , NaOH , etc.

Un puente salino permite el paso de iones de un lado a otro, el bajo rendimiento de potencia a la salida de la CCM es directamente atribuido a la alta resistencia interna del puente salino (19920 ± 50 ohms), comparando con una membrana polimérica que es del orden de (1286 ± 1 ohms) mediciones basadas usando espectroscopia de impedancia.(Booki Min *et. al* 2005).

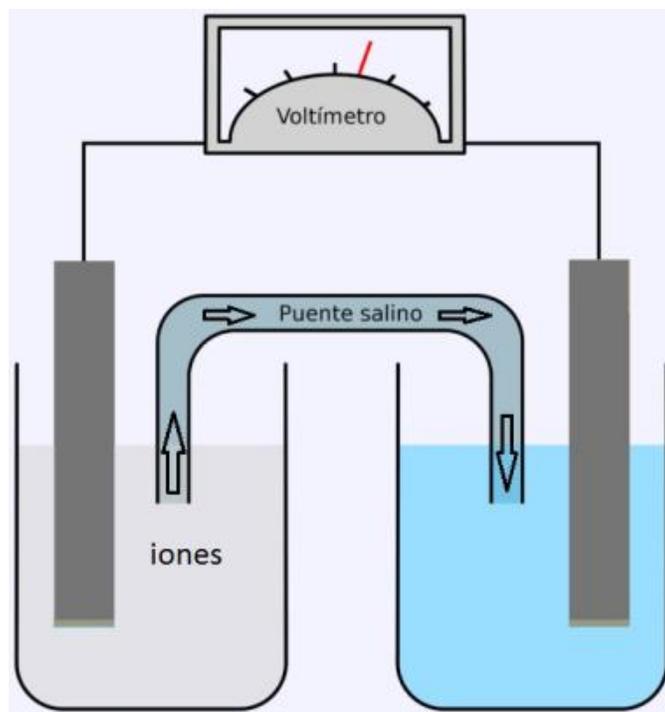


Figura 5-. Celdas de 2 cámaras unidas por un puente salino.

La transferencia de protones en solución acuosa es extremadamente común e importante en los procesos naturales y tecnológicos. Para volúmenes de agua y hielo se han encontrado indicadores que los protones no son transportados por difusión pero si por un especial mecanismo de conducción, recientemente de forma experimental y teórica se ha demostrado la extrema movilidad de la carga del protón a través del agua que involucra un mecanismo llamado Grotthuss.

El mecanismo Grotthuss implica un intercambio permanente de enlaces covalentes y de hidrógeno entre átomos de O y H, que conduce a un desplazamiento neto de la carga positiva.

Por lo tanto, en este mecanismo, sólo la carga del protón y no se está transportando su masa, lo que explica su gran movilidad en el agua.

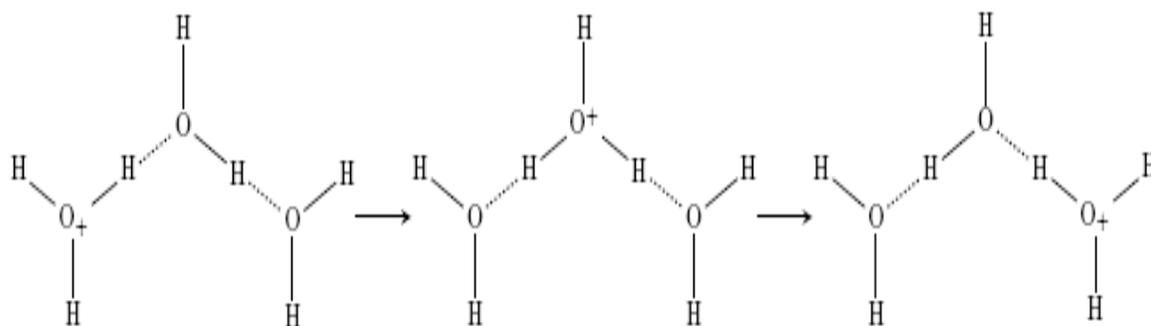


Figura 6. El transporte de los iones de hidrógeno (H^+) a través del agua se lleva a cabo por el mecanismo de Grotthuss, en el que los enlaces de hidrógeno (líneas de trazos) y enlaces covalentes (líneas solidas) entre las moléculas de agua se rompen y se vuelven a formar.

2 Hipótesis.

Con celdas de dos cámaras utilizando membranas de uso doméstico así como puente salino como unión de estas, se puede conseguir un voltaje en el orden de los 100mV en promedio aproximadamente en periodos de entre 7 y 15 días.

3 Justificación.

Las pilas de combustible microbianas son una tecnología emergente que podría contribuir a afrontar y resolver dos problemas de sumo interés que enfrenta la sociedad actualmente: la crisis energética y la disponibilidad del agua. Enfrentamos el reto de poner a la disposición de la sociedad fuentes de energía 100% renovables con impactos al medio ambiente mínimos o nulos, es de suma importancia encaminar esfuerzos para lograr dicho objetivo.

4 Objetivos

4.1 Objetivo Principal.

Se implementaran 3 tipos de celdas microbianas para la generación de voltaje a un nivel de 100mV, utilizando como consorcio microbiano aguas residuales y lodos activados en condiciones tanto aerobias como anaerobias, en lapsos de corrimientos de 7 y 15 días.

4.1 Objetivos particulares.

- Fabricación de las celdas de combustible utilizando como separador tanto un puente salino como materiales de uso doméstico como membranas.
- Monitoreo del voltaje generado en la celda de combustible microbiano con software especializado.

4.2 Cronograma de Actividades

		2013											
SECUENCIA	ACTIVIDAD		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ags	Sep	Oct	Nov
1	Búsqueda de áreas de oportunidad	P	■	■									
		R	■	■									
2	Revisión Bibliográfica	P			■	■	■	■					
		R			■	■	■						
3	Hipótesis y Justificación	P					■	■	■				
		R					■	■					
4	Objetivo y Metodología	P					■	■	■				
		R					■	■	■				
5	Compra de Materiales	P							■	■	■		
		R							■	■	■	■	
6	Experimento 1, 2 y 3	P								■			
		R							■	■	■		
7	Experimento 4,5, 6,7 y 8	P								■			
		R							■	■	■	■	
8	Evaluación de Resultados	P										■	
		R										■	■
9	Conclusiones	P										■	
		R										■	■
10	Redacción de la Tesis	P					■	■	■	■	■	■	■
		R					■	■	■	■	■	■	■

P * Programado

R * Real

5 Materiales y Métodos.

5.1 Celda de una sola cámara

5.1.1 Material:

Lona de auto, 10 cm².

Tabla de corte para los alimentos de cocina de 5mm de grosor.

Tubo de PVC de 3'' de ancho por 2'' de largo con un volumen del compartimiento del ánodo: 273 cm³.

Barra de grafito de 1cm de diámetro por 15 cm de largo, con área de contacto en la cámara de 18.8 cm².

1 hoja de foamy negro y 5 gramos de glucosa.

Tela de carbón y malla metálica que sirve como electrodo. 10 cm² de cada una.

Tres gamos de limadura de una moneda de 20 pesos compuesta de níquel y cobre.

Cuatro tornillos de 10 cm x 4 mm rosca milimétrica.

Alambre UTP para realizar las conexiones.

5.1.2 Equipo:

Autoclave de 10 litros de capacidad marca Presto®.

Medidor de pH potenciométrico.

Multímetro marca Fluke® modelo 322

5.1.3 Metodología:

Una vez armada la celda se realizó lo siguiente:

Se utilizó una autoclave para realizar la esterilización tanto a las barras de grafito como a la estructura de la celda, a 120 °C a 15 psi por 15 minutos.



Figura 7.- Autoclave para la esterilización de la cámara.

Se llenó el depósito del ánodo con agua residual (afluente), y se agregó 5 g de glucosa.



Figura 8.- Planta de tratamiento de aguas residuales municipales.



Figura 9.- Toma de la muestra del afluente, todas las muestras se depositaron en contenedores de vidrio previamente lavado, para posteriormente trasladarlas en una hielera con hielos.

Se midió el pH del agua residual contenido en la cámara del ánodo.



Figura 10.- Medidor de pH tipo potenciométrico

Toma del pH de la muestra del afluente, dándonos un valor de 7.00

Se tapó la cámara del ánodo para conservar condiciones anaerobias, y se extrajo el aire con una jeringa y manguera.

Se conectaron los electrodos de las dos cámaras a un multímetro de gancho marca fluke® para monitorear el voltaje generado por la celda a circuito abierto, por un periodo de 7 días.



Figura 11.- Celda de una sola cámara

5.2 Celdas de tipo H

Se implementaron 2 celdas de tipo H, utilizando como membrana papel celofán y guante de hule, trabajando en las siguientes condiciones como se muestra en la siguiente tabla.

	Bacterias	Volumen ánodo (cm3)	Volumen ánodo (cm3)	Electrodo ánodo	Electrodo cátodo	Separador	Condiciones	Voltaje inicial (mV)
celda 1	Aguas residuales	300	300 agua destilada	Barra de grafito	Barra de grafito	Papel celofán	anaerobias	0
celda 2	Agua residuales	300	300 agua destilada	Barra de grafito	Barra de grafito	Guante de hule	anaerobias	0

Tabla 2-. Tabla donde se muestran las condiciones de operación de las celdas tipo H.

5.2.1 Celda 1 tipo H

Se implementó una celda de tipo H de dos cámaras, utilizando como separador papel celofán, ambas cámaras en condiciones anaerobias trabajando en lapsos de 7 días, utilizando barras de grafito para la captación de los electrones.

5.2.1.1 Material:

Tubo PVC con volumen del compartimiento del ánodo y cátodo: 300 cm^3 por cada uno.

Dos barras de grafito de 1 cm de diámetro por 15 cm de largo, con área de contacto de 20 cm^2 .

10 cm^2 de papel celofán con área transversal del separador (papel celofán)

1.75 cm^2 .

Tapa para tubo PVC 3". 8 tornillos de acero inoxidable de 5 mm x 25 mm.

Brida fabricada con nylamid para sujetar a la membrana (papel celofán).

Un tubo de silicón y un tubo de pegamento de CPVC.

5.2.1.2 Equipo:

Medidor de pH potenciométrico.

Multímetro Steren Mul-40

5.2.1.3 Metodología

Una vez ensamblada la celda se realizó lo siguiente:

Primero se lavó con agua y jabón tanto el depósito como las barras de grafito.

Se llenó el depósito del ánodo con agua residual (afluente) y se midió el pH dando un valor de 7.00, después se agregó 5 g de glucosa, después de 10 minutos se midió el pH dando un valor de 7.00.



Figura 12.- Celda tipo H



Figura 13.- Papel celofán utilizado como membrana

Se armó la celda para posteriormente monitorear el voltaje generado por un periodo de 7 días, con un multímetro marca Steren® modelo MUL-40.



Figura 14.- Celda tipo H armada donde se mide el voltaje utilizando un multímetro de alta impedancia.

5.2.2 Celda 2 tipo H

Se implementó una celda de tipo H de dos cámaras, utilizando como separador papel celofán, ambas cámaras en condiciones anaerobias trabajando en lapsos de 7 días, utilizando barras de grafito para la captación de los electrones.

5.2.2.1 Material:

Tubo PVC con volumen del compartimiento del ánodo y cátodo: 300 cm^3 por cada uno.

Dos barras de grafito de 1cm de diámetro por 15 cm de largo, con área de contacto de 20 cm^2 .

Un guante de hule para trabajo doméstico para recortar un área trasversal de 1.75 cm^2 .

Tapa para tubo PVC 3''. 8 tornillos de acero inoxidable de 5 mm X 25 mm.

Brida fabricada con nylamid para sujetar a la membrana (hule de guante).

Un tubo de silicón y un tubo de pegamento de CPVC.

5.2.2.2 Metodología

Se lavaron los depósitos, las barras de grafito con agua y detergente para trastes.

Se llenó el depósito del ánodo con agua residual (aficiente) previamente filtrada con filtro de papel de 50 micras y se midió el pH dando un valor de 7.00, después se agregó 5 g de glucosa, después de 10 minutos se midió nuevamente el pH obteniendo un valor de 7.00.



Figura 15.- Celda tipo H



Figura 16.- Medición del pH



Figura 17.- Membrana de guante de hule utilizada para unir ambas cámaras.

Se armó la celda monitoreando el voltaje generado por un periodo de 7 días, con un multímetro marca Steren modelo MUL-40.



Figura 18.- Celda tipo H armada utilizando el guante de hule como membrana y monitoreando el voltaje con un multímetro marca Steren.

5.3 Celda de dos cámaras

Se trabajó con 2 celdas de dos cámaras, para unir ambas celdas se utilizó un puente salino, se dejó por un lapso de 7 días. En la siguiente tabla se muestra las condiciones de operación.

	Bacterias	Sustrato 25ml	Volumen ánodo (ml)	Volumen ánodo (ml)	Electrodo ánodo	Electrodo cátodo	Unión	Condiciones	Voltaje inicial (mV)
celda 1	Aguas residuales	Caldo glucosado	250	250 agua destilada	Barra de carbón	Barra de carbón	Puente salino	anaerobias	94
celda 2	Lodos activados	Caldo glucosado	450	550 agua destilada	Barra de grafito	Barra de grafito	Puente salino	anaerobias	128

Tabla 3-. Tabla donde se muestran las condiciones de operación de las celdas de dos cámaras.

5.3.1 Puente salino:

Para unir ambas cámaras se creó un puente salino para el paso de protones entre la celda anódica y la catódica. Utilizando como sal KCl (Cloruro de Potasio).

5.3.1.1 Material

Tubo de vidrio, agar, KCl grado reactivo, agua destilada.

5.3.1.2 Equipo

Mechero Meker-Fisher, balanza analítica, pipeta graduada, matraz Erlenmeyer 250 ml, vaso de precipitado 150 ml.

5.3.1.3 Metodología

Para el puente salino se fabricaron dos tubos los cuales para poder doblarlos se tuvieron que calentar con el mechero Fisher, como se muestra en la siguiente figura y crear un puente en forma de **U** esto con la finalidad de que pudiera hacer contacto con ambas cámaras.



Figura 19.- En esta imagen se aprecia cómo se doblaron los tubos de vidrio para posteriormente utilizarlos como puentes salino.

Las dimensiones de los dos tubos doblados en forma de **U** son las siguientes:

10 cm x 10 cm x 10 cm y 14 cm x 14 cm x 14 cm.

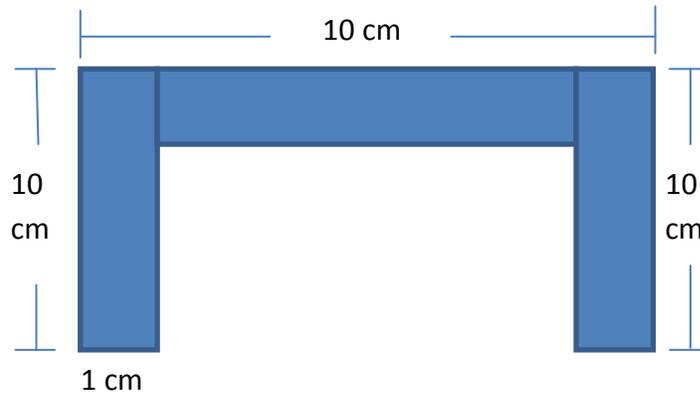


Figura 20.- Forma del puente salino.

Se preparó el puente salino con las siguientes proporciones; 0.45 g de agar y 4.5 g de KCl en 30 ml de agua destilada, para esto se pesó el agar y el KCl en una báscula digital.



Figura 21.- Medición de KCl y Agar-Agar

Para este proceso se utilizó un vaso de precipitado con 100 ml de agua destilada donde se calentó hasta alcanzar una temperatura de 80 °C aproximadamente, se vació el agar-agar microbiológico lentamente y se mantuvo en constante agitación utilizando un tubo de vidrio. Para posteriormente se fue vaciando cloruro de

potasio (KCl), como se muestra en la figura 21, donde se siguió manteniendo en constante agitación hasta que la solución se tornó transparente.



Figura 22.- Preparación de la solución de del puente salino

De forma inmediata se vació la solución en los tubos de vidrio previamente doblados, con la ayuda de una pipeta, se llenó los tubos con la solución, se dejó enfriar a temperatura ambiente hasta que adquiriera solidez.



Figura 23.- Llenado de electrólito en tubos de vidrio

5.3.2 Celda 1 de dos cámaras

Se construyó una celda microbiana en condiciones anaeróbica dos cámaras, utilizando dos matraces Erlenmeyer con volumen de 250 ml cada uno, con un puente salino para el paso de iones.

5.3.2.1 Material

Puente Salino de 10 x 10 x10 cm, dos electrodos de carbón con dimensiones de 7 cm x 0.7 cm, cable de cobre UTP.

5.3.2.2 Equipo

Matraz Erlenmeyer 250 ml, multímetro digital marca Steren®.

5.3.2.3 Metodología

En el ánodo como consorcio bacteriano se extrajeron 225 ml de agua residual proveniente del afluente, como sustrato 25 ml de caldo glucosado previamente preparado, con un electrodo de carbón sujetado con un alambre de cobre para el paso de electrones.

En la parte del cátodo se utilizaron 250 ml de agua destilada, con un electrodo de carbón y alambre de cobre para depositar los electrones en el electrodo provenientes del ánodo. Ver figura 24.



Figura 24.- Celda de combustible microbiano de 2 cámaras unidas con un Puente salino, ambas celdas trabajando en condiciones aerobias.

5.3.2.4 Monitoreo del voltaje generado

En esta celda el lote se dejó por 7 días en condiciones aeróbicas, se realizaron mediciones diariamente con la ayuda de un multímetro marca Steren® con una impedancia de entrada de 10 MΩ ver figura.

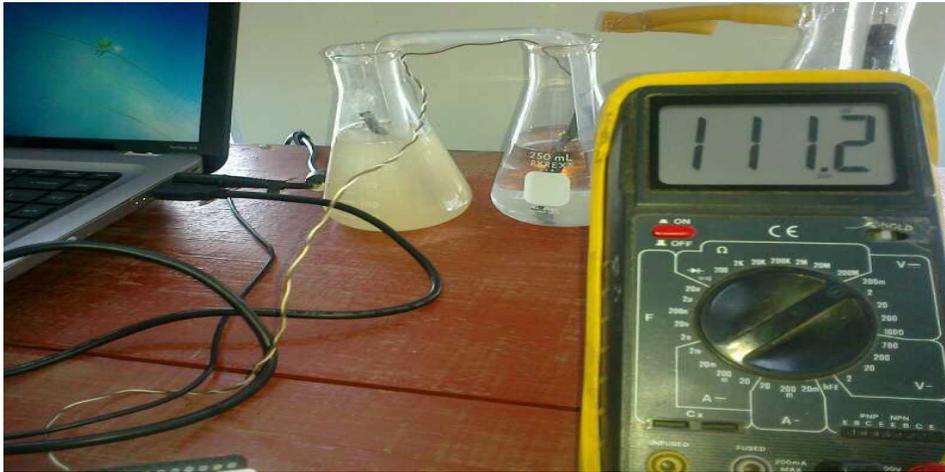


Figura 25.- Medición del voltaje generado utilizando un multímetro de alta impedancia.

Los datos iniciales fueron: voltaje 94 mV con una temperatura de 22 °C y un pH de 7, para medir el pH se utilizaron tiras de papel indicador universal marca CIVEQ.



Figura 26.- Tiras utilizada para medir el pH en las celdas anódicas.

5.3.3 Celda 2 de dos cámaras

Se construyó una celda microbiana en condiciones anaeróbica de dos cámaras, utilizando dos matraces kitasato con volumen de 500 ml cada uno, con un puente salino para el paso del ion de hidrogeno.

5.3.3.1 Material

Puente Salino de 14 x 14 x 14 cm, dos electrodos de carbón con dimensiones de 7 cm x 0.7 cm, cable de cobre UTP, manguera, jeringa de 5 ml, tijeras, tapón para matraces, 25 ml de caldo glucosado.

5.3.3.2 Equipo

Matraz Erlenmeyer 500 ml, multímetro digital marca Steren®.

5.3.3.3 Metodología:

Se creó un puente salino de Cloruro de potasio (KCl) utilizando la metodología antes mencionada, con las siguientes dimensiones 14 X 14 X 14 X 0.5 cm como se muestra en el Figura 27.

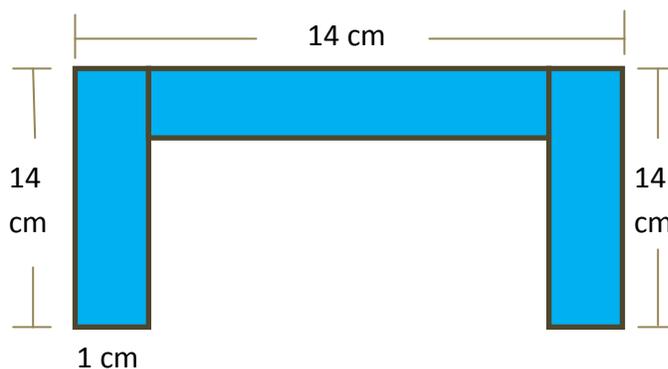


Figura 27-. Dimensiones con las que cuenta el puente salino, para unir ambas cámaras, la solución contenida es de KCl (Cloruro de Potasio).

En el ánodo como consorcio bacteriano se extrajeron 475 ml de agua residual proveniente del reactor, como sustrato 25 ml de caldo glucosado previamente preparado, con un electrodo de grafito sujetado con un alambre de cobre para el paso de electrones. Para poder generar las condiciones anaeróbicas, se utilizó un tapón para sellar la parte superior del matraz, el cual se le hizo un orificio para el paso del puente salino, para generar el vacío se utilizó una manguera que se conectó con la salida lateral con la que cuenta el matraz, kitasato, con la ayuda de una jeringa se le extrajo el aire contenido dentro del matraz para posteriormente hacerle un torniquete a la manguera. Como se muestra en la figura 28.



Figura 28.- Celda de 2 cámaras unidas con un puente salino, utilizando como consorcio microbiano lodos activados y como sustrato caldo glucosado, trabajando en condiciones anaerobia la cámara anódica.

En la parte del cátodo se utilizaron 550 ml de agua destilada, con un electrodo de grafito y alambre de cobre para depositar los electrones en el electrodo provenientes del ánodo para unir el cátodo y el ánodo. Se utilizó el puente salino generado con anterioridad.

Para la medición de voltaje inicial se utilizó un multímetro marca esteren con una impedancia de entrada de 10 M Ω .

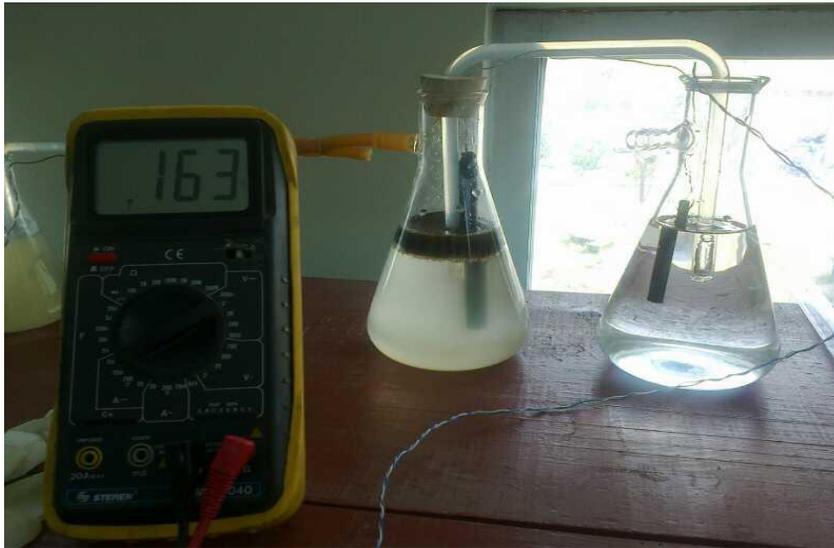


Figura 29.- Medición de voltaje en la celda anaeróbica de dos cámaras, utilizando un multímetro de alta impedancia.

En esta celda el lote se dejó por 7 días, los datos iniciales fueron: voltaje 128 mV con una temperatura de 22 °C y un pH de 7.

5.4 Electrodeposición de partículas de níquel.

5.4.1 Material:

Una barra de grafito de 1 cm de diámetro por 15 cm de largo, una barra de carbón poroso de 0.7 cm por 7 cm de largo. Ácido sulfúrico (H₂SO₄), sulfato de níquel (NiSO₄), agua destilada, lija fina del No100 e hidróxido de Sodio (NaOH).

5.4.2 Equipo:

Termoagitadora, vaso de precipitado de 150 ml, cronómetro, termómetro y fuente de poder de CD.

5.4.3 Metodología:

5.4.3.1 Limpieza de los electrodos

Antes de utilizar los electrodos se realizó la limpieza de estos de la siguiente manera; se lijaron los electrodos de carbón y grafito suavemente para quitar posibles metales o impurezas, ya lijado se desengraso en una solución alcalina con una concentración de 50 g/l a una temperatura de 80 °C, para esto se utilizó un vaso de precipitado, con 100 g de Hidróxido de Sodio (NaOH) en 200 ml de agua destilada, para tener una constante agitación se utilizó una termoagitadora para calentar la solución y mantenerla en constante agitación.

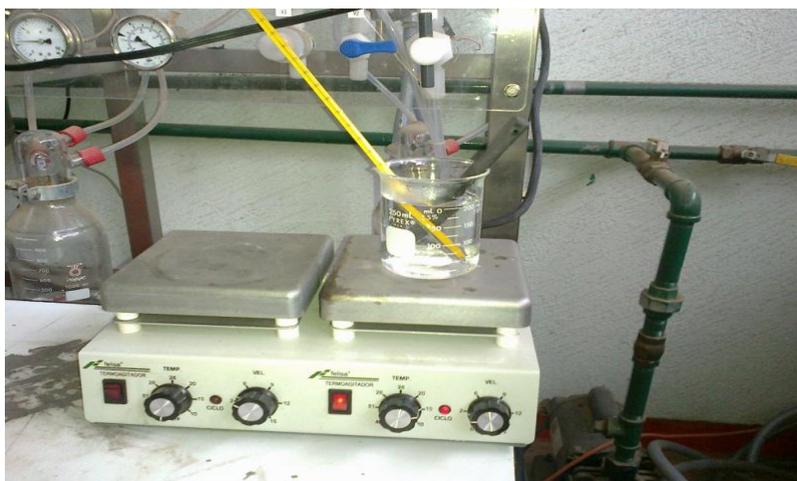


Figura 30.- Limpiezas de los electrodos utilizando una solución alcalina, a una temperatura de 80 grados centígrados, durante 2 minutos.

Para limpiar el electrodo de la solución alcalina se lavó con agua destilada para posteriormente realizar un lavado con una solución de acida al 10% de volumen, para esto se vació 2ml de ácido sulfúrico con 200ml de agua destilada en un vaso de precipitado y se introdujo en electrodo en el vaso de precipitado por un tiempo de aproximadamente 50seg, después se aclaró con agua destilada.(Jesús La Parra 2002)¹⁴.

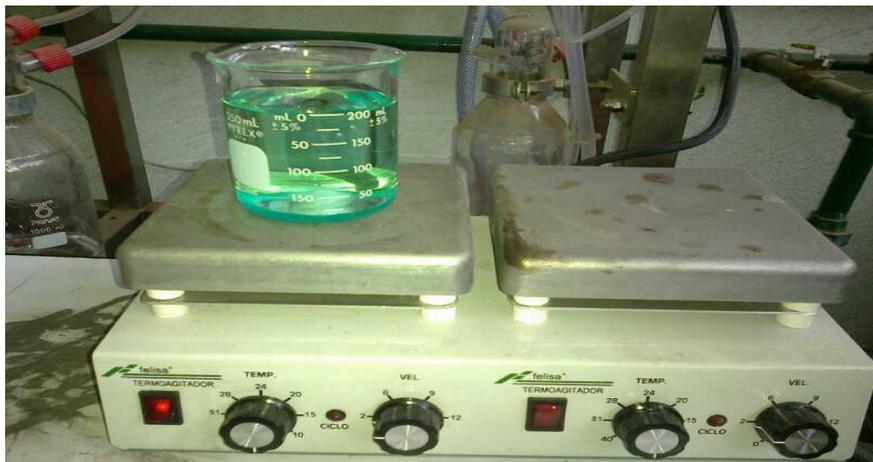


Figura 31.- Preparación de solución electrolítica con sulfato de níquel

Después se pesó el grafito y la barra de carbón antes de realizar el procedimiento de electrodeposición con la finalidad de saber cuánto níquel se depositó en cada barra.

Masa de la barra de carbón = 2.5 g

Masa de la barra de grafito =23.5 g

Después se preparó la solución electrolítica en un vaso de precipitado de 200 ml, se preparó con 5.3 g de sulfato de níquel x 200 ml de agua destilada, se mantuvo en constante agitación, para esto se utilizó la termoagitadora.

Para posteriormente realizar la electrodeposición en la cual se utilizaron como electrodos por parte del ánodo un pedazo de níquel, y de cátodo la barra de carbón y grafito. Se utilizaron cables de cobre para la conexión con la fuente de voltaje.

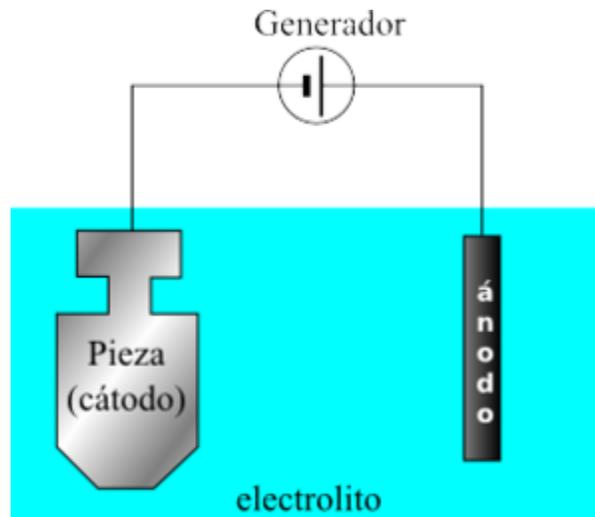


Figura 32.- Esquema de conexión para la electrodeposición.

La conexión se realizó de la siguiente manera; el ánodo (Níquel) se conectó con la parte positiva de la fuente, el cátodo (barra de grafito o carbón) a la parte negativa de la fuente, se la aplicó un voltaje de 20 Voltios a 1 amper, durante 30 minutos. (Jesús La Parra. 2009)¹⁴.

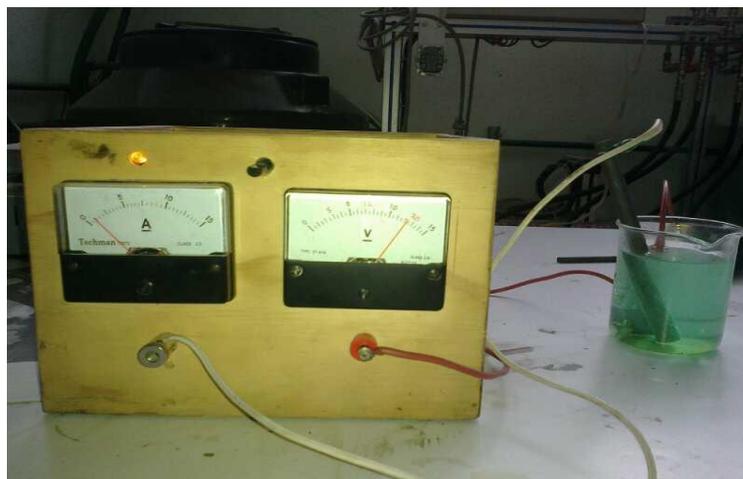


Figura 33.- Electrodeposición del níquel en el carbón y grafito utilizando una fuente de corriente directa con un voltaje de 20 V con una corriente de 1A.

Una vez realizado el procedimiento se realizó una limpieza con agua destilada al chorro.



Figura 34.- Limpieza del grafito y barra de carbón con agua destilada.

Después se secaron al aire libre por un tiempo de 20 minutos, una vez secados se realizó nuevamente la medición de la masa, sin obtener masa extra agregada a cada barra, las mediciones fueron;

Masa de la barra de carbón = 2.5g

Masa de la barra de grafito = 23.5g



Figura 35.- Medición de la masa del grafito utilizando una báscula granataria.

5.5 Celda de 2 cámaras (Blanco)

Se implementó un blanco para determinar si con pura agua destilada tanto en el ánodo así como en el cátodo se generaba voltaje y así compararlo con los experimentos anteriores.

5.5.1 Material:

Puente salino, electrodos de carbón y cable UTP.

5.5.2 Equipo:

Matraz Erlenmeyer 250 ml, Multímetro, Lap Top.

5.5.3 Metodología:

5.6 Software para monitoreo de voltaje

Se desarrolló un software en Labview® 2011 para ello se utilizó una tarjeta de adquisición de datos USB 6090 de National Instruments® con una impedancia de entrada 144 kΩ en los canales analógicos, se utilizó esta tarjeta para la constante medición del voltaje generado por las celdas para posteriormente almacenarlo en una base de datos.



Figura 36.- Tarjeta de adquisición de datos USB 6090.

Se creó una interfaz de usuario virtual donde muestra el volumen del ánodo en ml, representado por un tanque, el valor del voltaje generado por la celda en mV (milivolts) en tiempo real, en una gráfica se muestra el comportamiento que ha tenido la celda respecto a la generación de voltaje en un tiempo de 24hr, así como una tabla donde muestra los voltajes leídos por la tarjeta de adquisición de datos en todo el tiempo de funcionamiento como se muestra en la figura 37.

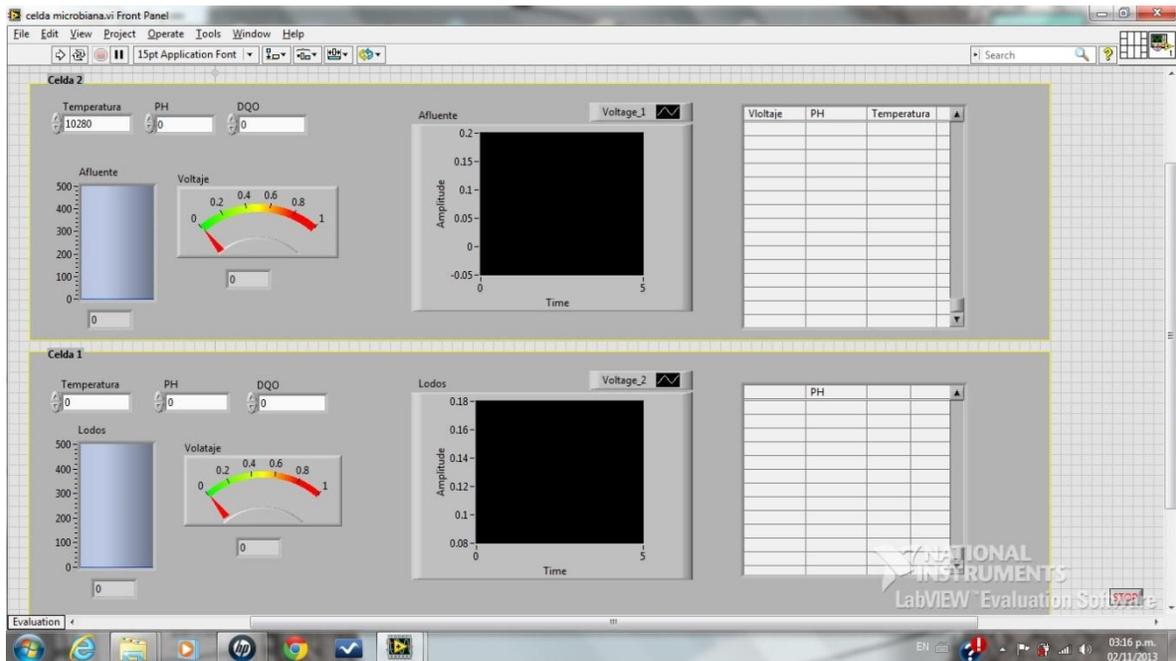


Figura 37.- Interfaz gráfica para el monitoreo del voltaje.

Este software está configurado para realizar lecturas cada 600s y almacenarlas en una base de datos la cual se puede visualizar como una hoja de cálculo. En la tarjeta de adquisición de datos se utilizaron 2 puertos analógicos como se muestra en la figura 38. Los canales utilizados fueron el A0 y A1.

Este software está diseñado para monitorear 2 celdas simultáneamente

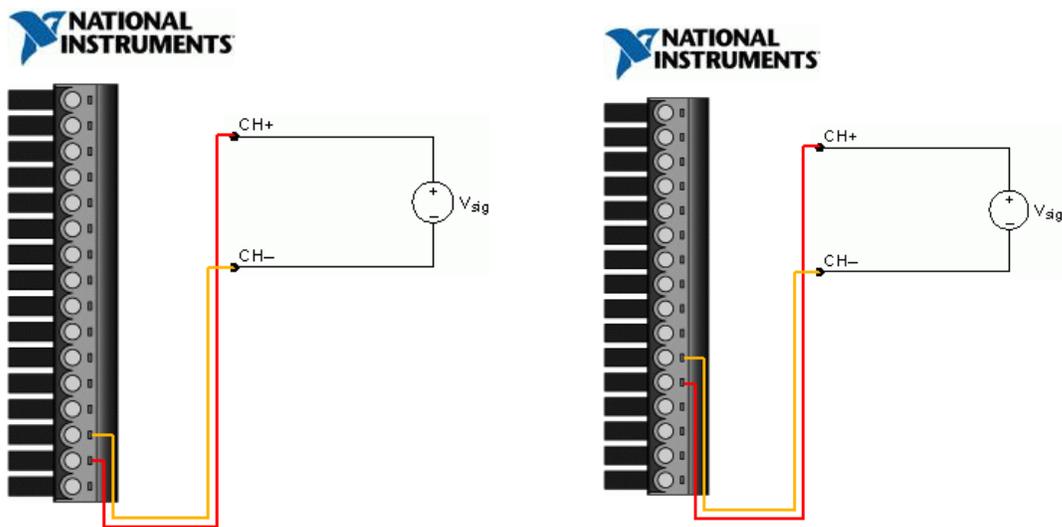


Figura 38.- Diagrama de conexión de ambos canales.

5.7 Celdas de 2 cámaras con Labview®

Se trabajó con 2 celdas de dos cámaras en constante monitoreo con el software Labview®, para unir ambas celdas se utilizó un puente salino, se dejó por un lapso de 7 días. En la siguiente tabla se muestra las condiciones de operación.

	Bacterias	Sustrato 25ml	Volumen ánodo (ml)	Volumen ánodo (ml)	Electrodo ánodo	Electrodo cátodo	Unión	Condiciones	Voltaje inicial (mV)
celda 1	Aguas residuales	Caldo glucosado	250	250 agua destilada	Barra de carbón	Barra de carbón con níquel	Puente salino	anaerobias	151
celda 2	Lodos activados y aguas residuales	Caldo glucosado	250	300 agua destilada	Barra de carbón	Barra de carbón con níquel	Puente salino	anaerobias	133

Tabla 4-. Tabla donde se muestran las condiciones de operación de las celdas de dos cámaras.

5.7.1 Celda 1 de dos cámaras con Labview®

Se construyó una celda microbiana en condiciones anaeróbica de dos cámaras, utilizando dos matraces Erlenmeyer con volumen de 250 ml aproximadamente cada uno. Con un puente salino para el paso de hidrogeno.

5.7.2 Material:

Puente salino de 10 x 10 x 10 x 1 cm, manguera, un electrodo de carbón electrodepositado, un electrodo de carbón con dimensiones de 7 x 0.7 cm, jeringa, tijeras, tapón para matraces, glucosa, caldo nutritivo y cable UTP.

5.7.3 Equipo:

Matraz Erlenmeyer 500 ml, Tarjeta de Adquisición de datos NI USB 6008, Lap Top.

5.7.4 Metodología:

Se creó un puente salino de Cloruro de Potasio (KCl) utilizando la metodología antes mencionada, con las siguientes dimensiones 10 X 10 X 10 X 1 cm como se muestra en la figura 39.

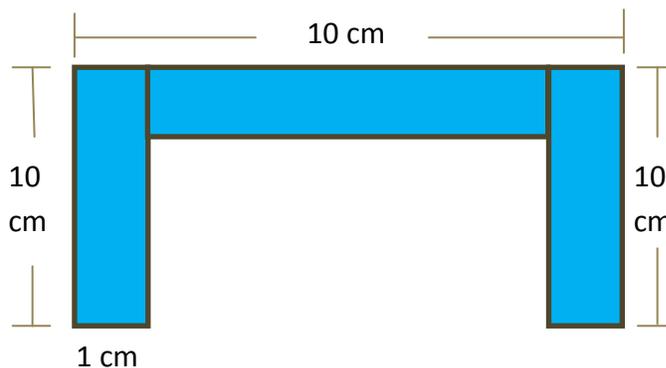


Figura 39.- Dimensiones con las que cuenta el puente salino, para unir ambas cámaras, la solución contenida es de KCl(Cloruro de Potasio).

En el ánodo como consorcio bacteriano se extrajeron 225 ml de lodos activados, como sustrato 25 ml de caldo glucosado previamente preparado se utilizó un

tapón para crear las condiciones anaeróbicas, a este tapón se le realizaron dos orificios uno para el paso del puente salino y otro para crear las condiciones anaerobias, se utilizó un electrodo de carbón sujetado con un alambre de cobre para el paso de electrones.

En la parte del cátodo se utilizaron 250 ml de agua destilada, con un electrodo de carbón con partículas de níquel y alambre de cobre para depositar los electrones en el electrodo provenientes del ánodo, para unir ambas celdas se utilizó un puente salino echo previamente, ver figura 40.



Figura 40.-Implementación de la celda microbiana de 2 cámaras unidas por un puente salino, operando en condiciones anaerobias, del lado derecho cátodo del izquierdo ánodo.

Esta celda se dejó operar en un lapso de 16 días, en condiciones anaeróbicas, se realizó la lectura de temperatura y pH al inicio y al final del lote para esto se utilizó un termómetro y tiras de pH siendo estas 21 °C y 7 respectivamente, para el monitoreo del voltaje se utilizó la tarjeta de adquisición de datos con una impedancia de entrada de 144,000.00 ohms y con el software previamente desarrollado, para almacenarlos en una base de datos.

5.8 Celda 2 de cámaras como consorcio bacteriano lodos activados y agua residual.

Se construyó una celda microbiana en condiciones anaeróbicas de dos cámaras, utilizando dos matraces Erlenmeyer, este experimento se dejara por un lapso de 14 días para saber si en más tiempo se genera un voltaje más alto y determinar el tiempo de generación de voltaje.

5.8.1 Material

Puente salino, manguera, un electrodo de carbón electrodepositado, un electrodo de carbón, jeringa, tijeras, tapón para matraces, glucosa, caldo nutritivo y cable UTP.

5.8.2 Equipo:

Matraz Erlenmeyer 500 ml, Tarjeta de Adquisición de datos NI USB 6008, Lap- Top.

5.8.3 Metodología:

Se creó un puente salino de Cloruro de Potasio (KCl) utilizando la metodología antes mencionada, con las siguientes dimensiones 10 X 10 X 10 X 0.5 cm como se muestra en la figura 41.

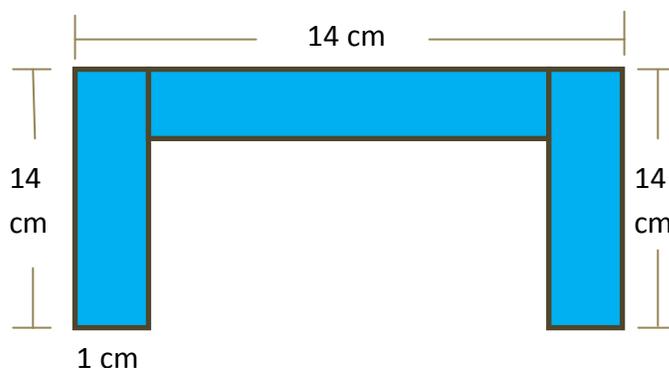


Figura 41.- Dimensiones con las que cuenta el puente salino, para unir ambas cámaras, la solución contenida es de KCl(Cloruro de Potasio).

En el ánodo como consorcio bacteriano se utilizaron 100 ml de lodos activados y 100 ml de Agua residual, como sustrato 25 ml de caldo glucosado previamente preparado se utilizó un tapón para crear las condiciones anaeróbicas, a este tapón se le realizaron dos orificios uno para el paso del puente salino y otro para crear las condiciones anaerobias, se utilizó un electrodo de carbón sujetado con un alambre de cobre para el paso de electrones.

En la parte del cátodo se utilizaron 300 ml de agua destilada, con un electrodo de carbón con partículas de níquel y alambre de cobre para depositar los electrones en el electrodo provenientes del ánodo, para unir ambas celdas se utilizó un puente salino hecho previamente.



Figura 42.-Celda 2 dos cámaras utilizando lodos como consorcio bacteriano y caldo glucosado con aguas residuales como sustrato, en ambas celdas se utilizaron barras de grafito como electrodo, ambas unidas con un puente salino.

6 Resultados y discusión.

6.1 Celda de una sola cámara

6.1.1 Resultados

La obtención de voltaje al inicio fue de 0.2 volts es decir 200 mV, por supuesto este resultado fue motivante, pero al analizar más detenidamente la celda y detectar pequeñas fugas de líquido entre la unión de la membrana y tras corregir el problema la generación de voltaje fue 0 mV.

6.1.2 Discusión

Por supuesto que este es un resultado esperado debido, a las pocas probabilidades de obtener un voltaje, dado la membrana utilizada y la poca o nula reducción en el cátodo, temperatura, pH, y la distancia entre los electrodos, la falta de mediadores redox, así como al área efectiva del ánodo y cátodo.

6.2 Celdas de tipo H

6.2.1 Celda 1 de tipo H

6.2.1.1 Resultados

La obtención de voltaje desde el inicio fue de 0.0 mV, en esta celda no se detectó voltaje alguno.

6.2.1.2 Discusión

Si bien el papel celofán es un material polimérico este puede ser utilizado como membrana, en el experimento se tienen varias variables; reducción del cátodo, la distancia entre los electrodos, la falta de mediadores redox, temperatura, pH, cantidad de sustrato, así como al área efectiva del ánodo y cátodo.

6.2.2 Celda 2 de tipo H

6.2.2.1 Resultados

La obtención de voltaje desde el inicio fue de 0.0 mV, en esta celda no se detectó voltaje alguno los primeros dos días, después se detectó un voltaje de aproximadamente 300 mV, al quinto día no se detectó voltaje.

6.2.2.2 Discusión

Después del término de los siete días se procedió a desarmarla encontrando oxidado el cable por tal razón la generación del voltaje, ver figura 43.

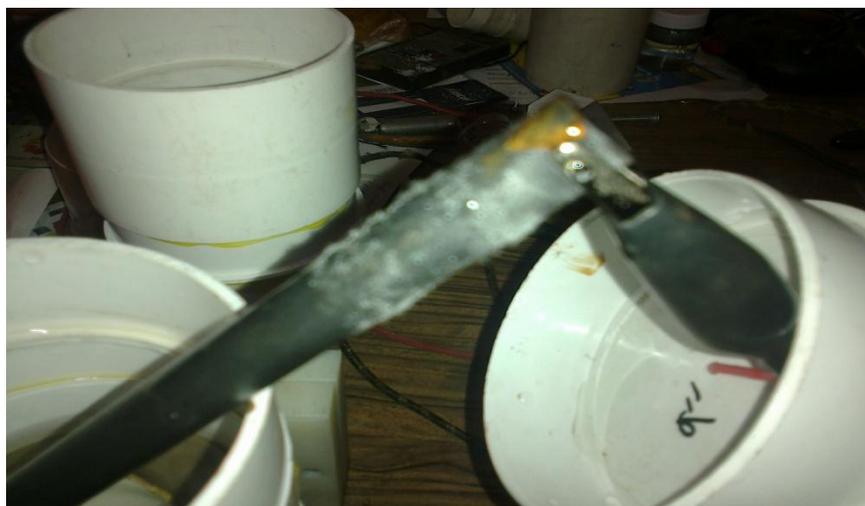


Figura 43.- Oxidación de la conexión en el ánodo.

Al oxidarse por la humedad y por la creación de ácidos debido al agua residual esta celda generó ese pico de voltaje.

Se midió el pH al terminar el experimento y este tenía un valor de aproximadamente de 5.00.

6.2.3 . Tabla comparativa en las celdas de tipo H.

	Bacterias	Sustrato	Electrodo ánodo	Carga	Condiciones	Separador	Días	Voltaje promedio (mV)	Potencia Promedio (nW)
celda 1	Aguas residuales	Glucosa	Barra de grafito	10MΩ	anaerobia	Papel celofán	7	0	0
celda 2	Aguas residuales	Glucosa	Barra de grafito	10MΩ	anaerobia	Guante de hule	7	0	0

Tabla 5-. Tabla comparativa de los resultados obtenidos en las celdas de tipo H.

En la tabla mostrada con anterioridad se puede observar las condiciones en las cuales se operaron estas celdas de tipo H ambas trabajaron durante 7 días, en donde ambas celdas no tuvieron generación de voltaje en este tiempo.

6.3 Celdas de dos cámaras

6.3.1 Celda 1 de dos cámaras.

6.3.1.1 Resultados

Al siguiente día se generaron unas pocas burbujas en la parte superior del ánodo, y existió un incremento de voltaje de 118 mV con el mismo pH.



Figura 44.- En esta figura se muestra la generación de burbujas que presento la cámara anódica al paso de 1 a 2 días, del corrimiento.

Pero con un descenso de temperatura hacia los 21 °C, para el segundo día existió un aumento de voltaje de aproximadamente de 181.6 mV, con un pH de 6 y una temperatura de 20 °C, para el cuarto día existió un pequeño aumento de voltaje de 196.45 mV con el mismo pH y la misma temperatura, en quinto día el pH y la

temperatura se mantuvieron solo el voltaje tuvo un pequeño ascenso de 210.2 mV, siendo este su voltaje máximo, cabe mencionar que estas mediciones se realizaron con la impedancia del multímetro. Para el día posterior el voltaje descendió a los 111 mV, con la misma temperatura y el mismo pH, para establecerse en estos valores.

En las siguiente gráfica se puede apreciar el desempeño que tuvo la celda

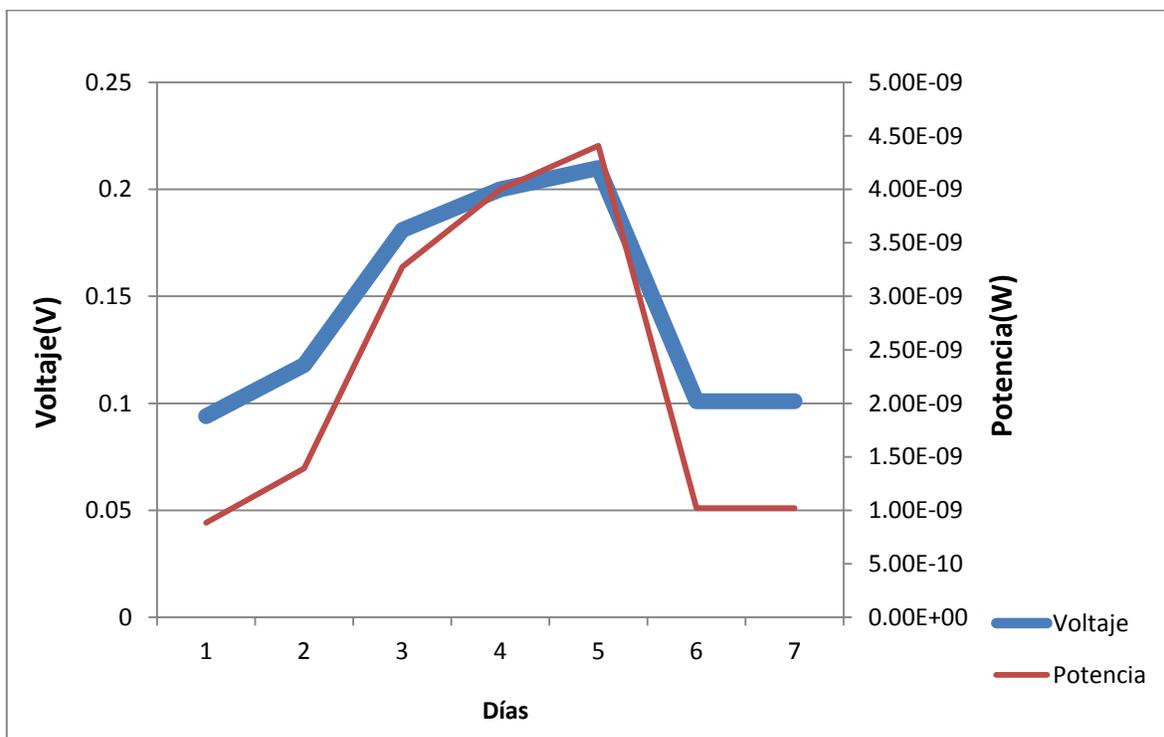


Figura 45.-En esta grafica se presentan el voltaje y la potencia obtenida por esta celda en un lapso de 7 días y trabajando en condiciones aeróbicas.

Se realizó el monitoreo electroquímico para determinar la potencia (W), utilizando la siguiente formula $W = V * I$, donde, V=Voltaje (mV), I=Corriente El pH, tuvo variaciones a lo largo del corrimiento de la celda, este puede ser un parámetro importante para la determinación del funcionamiento de la celda.

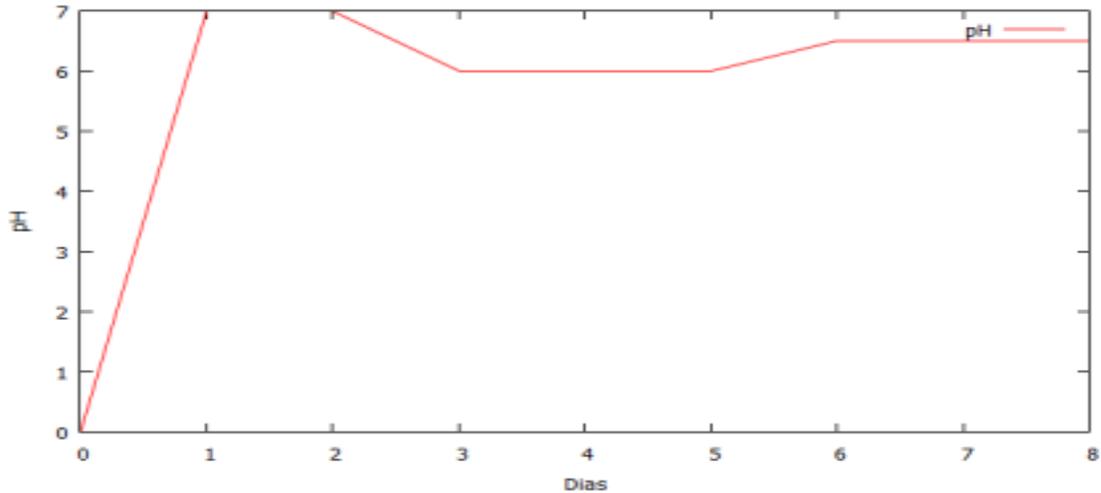


Figura 46.- En esta gráfica se muestra el comportamiento que tuvo el pH, en la celda anódica.

En esta gráfica se muestra el comportamiento de pH en los 7 días del corrimiento de la celda, la celda comenzó con un pH de 7, en el quinto día en donde se registró el voltaje máximo el valor del pH fue de 6, esto se debe a que los microorganismos al consumir la materia orgánica principalmente aquella rica en carbohidratos liberan hidrogeno, con ello aumenta la cantidad de hidrogeno contenido en el líquido, este proceso hace que este líquido contenido en la cámara anódica sea más acida.

6.3.2 Celda 2 de dos cámaras

En esta celda el lote se dejó por 7 días, los datos iniciales fueron: voltaje 128 mV con una temperatura de 22 °C y un pH de 7, al siguiente día se generaron unas pocas burbujas en la parte superior del ánodo, y existió un incremento de voltaje de 133 mv.

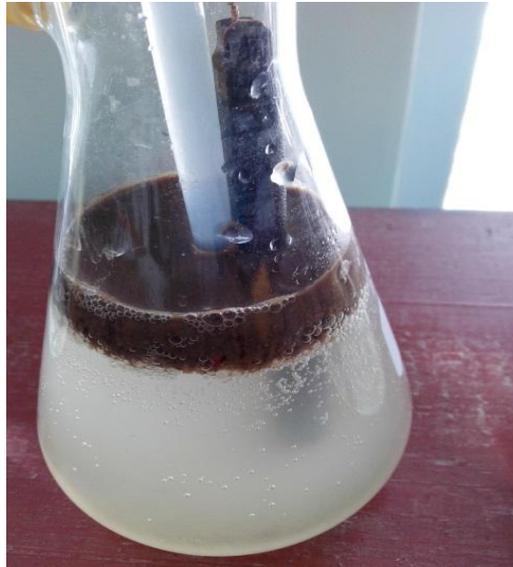


Figura 47.- En esta imagen se muestra la generación de burbujas en la cámara anódica.

Para el segundo día el voltaje medido fue de 158 mV, para el cuarto día existió un pequeño aumento de voltaje de 198 mv para el quinto día decayó a los 293 mV, al día siguiente tuvo un aumento de 301 mV, para el sexto día descender su voltaje a los 250 mV. Como se muestra en la figura 51.

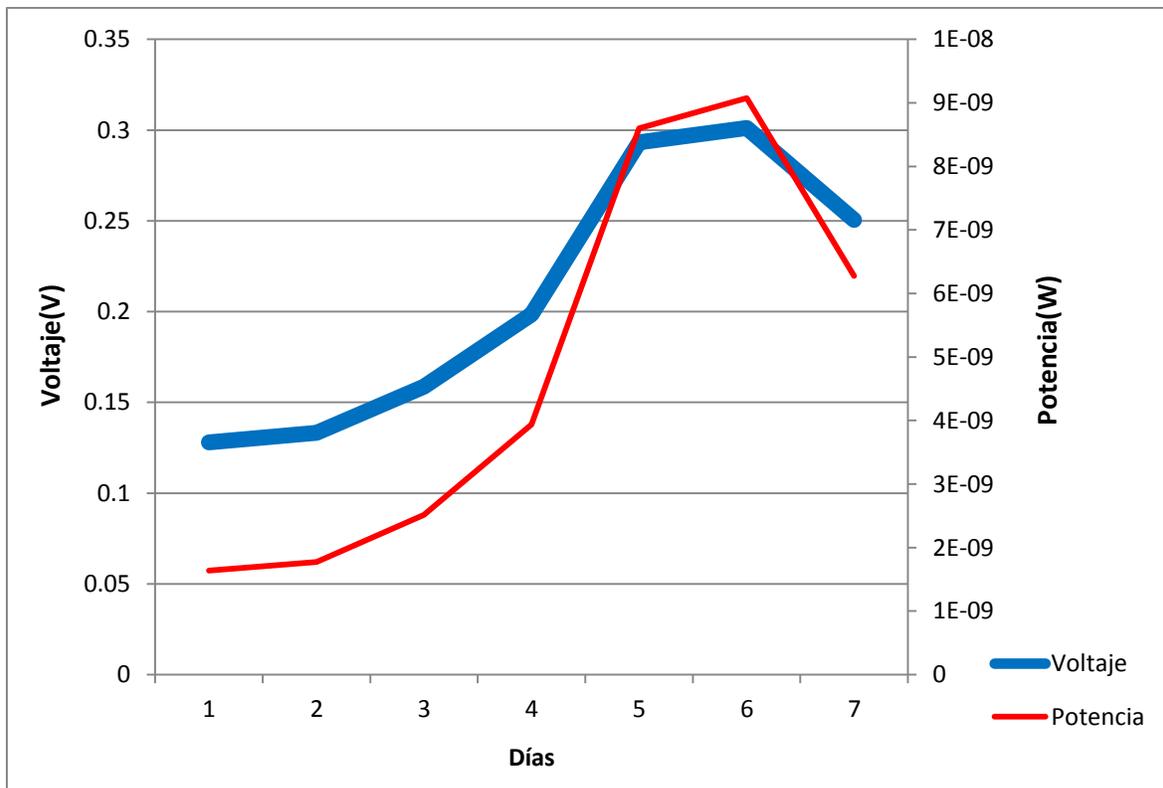


Figura 48.-En esta gráfica se puede apreciar que al quinto día se generó el mayor voltaje para después tener un descenso de voltaje lentamente

También se mido tanto la temperatura como el pH final, 20°C y 6 respectivamente al finalizar el lote.

6.3.3 Celda 3 de dos cámaras (blanco)

Se dejó 7 días realizando mediciones diariamente pero los valores se mantuvieron constantes. De igual forma se utilizó un multímetro de alta impedancia registrando un voltaje y pH constantes de 0.020 mV y 7 respectivamente, estos datos son plasmados en la siguiente gráfica.

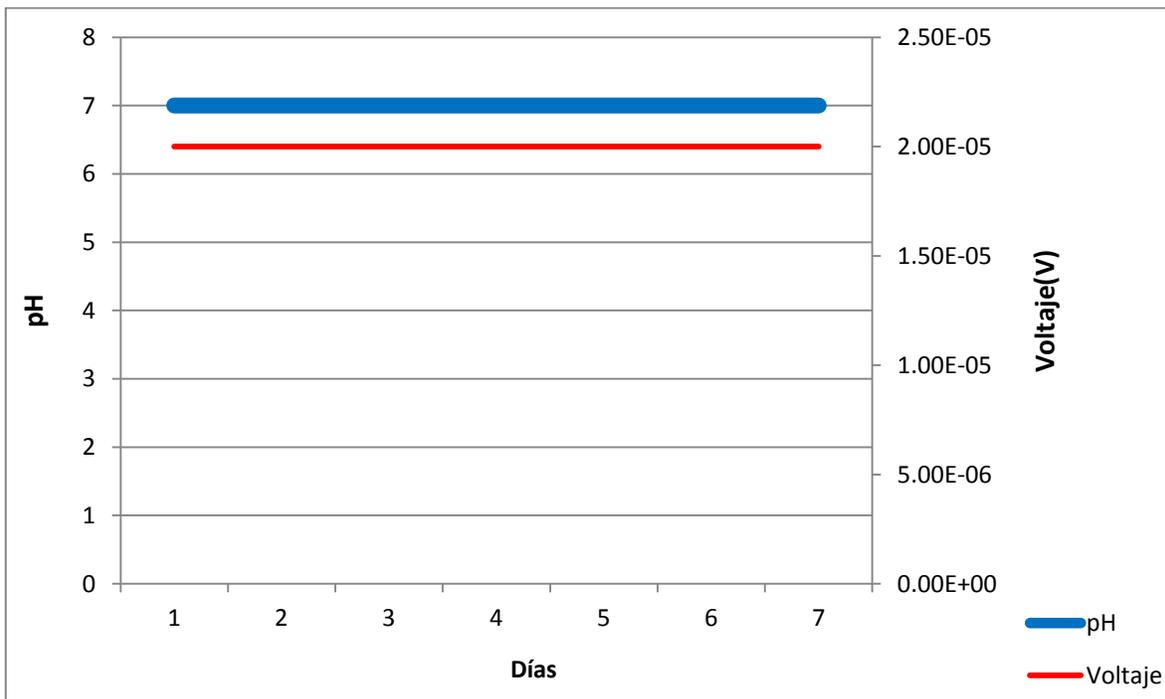


Figura 49.- En esta gráfica se muestra el comportamiento que tuvo el voltaje y el pH, en la cámara anódica del blanco.

6.3.4 Tabla comparativa de las celdas de 2 cámaras.

	Bacterias	Sustrato	Electrodo ánodo	Carga	Condiciones	Unión	Días	Voltaje promedio(mV)	Potencia Promedio (nW)
celda 1	Aguas residuales	Caldo glucosado	Barra de carbón porosa	10MΩ	aerobia	Puente salino	7	143.5714	2.2840
celda 2	Lodos activados	Caldo glucosado	Barra de grafito	10MΩ	anaerobia	Puente salino	7	209.027	4.8303
Blanco	Agua destilada		Barra de grafito	10MΩ	aerobia	Puente salino	7	0.20	0.000004

Tabla 6.-En esta tabla se muestra las condiciones en las cuales se trabajaron ambas celdas, mostrando el voltaje y potencia promedio durante los días del corrimiento.

En esta tabla se muestra los voltajes generados por las celdas de dos cámaras unidas por un puente salino, se aprecia que la celda 1 y 2 tuvieron una generación de voltaje promedio de 143.57 y 209.02 milivoltios respectivamente, comparándolo con la celda 3(Blanco), en donde se aprecia que esta celda si tuvo generación de voltaje por debajo de 1 mV.

Para calcular la potencia se utilizó la formula $P = V * I$, donde la P es la potencia en watts, la V es el voltaje en voltios y la I es la corriente en amperes, para calcular la corriente se tomó la resistencia del multímetro que es de un valor de 10 MΩ.

6.3.5 Tabla comparativa con otra investigación

En la siguiente tabla se muestran una comparación con los resultados obtenidos por (Aishwarya D., *et al.* 2001), en base a nuestra experimentación, determinando que los lodos activados contienen bacterias generadoras de electricidad.

	Bacterias	Sustrato	Electrodo ánodo	Ánodo	Cátodo	Unión	Días	Tipo	Voltaje promedio (mV)
Celda 2 dos cámaras	250 ml Lodos activados	25 ml de Caldo glucosado	Barra de carbón 7 cm x 0.7 cm	250 ml	500 ml de agua destilada	Puente salino (KCl)	7	Anaerobias	209.027
Aishwarya D., et al.,2011	1 ml Inoculo de Aguas Residuales	500 ml Suero de leche	Barra de carbón 12cm x 1.5cm.	500 ml	500 ml de agua destilada	Puente salino (KCl)	7	Anaerobias	500

Tabla 7.-Tabla comparativa con otra investigación

6.4 Celdas de dos cámaras con Labview®

6.4.1 Celda 1 de dos cámaras con Labview®

Esta celda se trabajó en condiciones anaerobias en el ánodo y aeróbica en el cátodo, con un corrimiento de 16 días, en constante monitoreo por la tarjeta de adquisición de datos para posteriormente almacenarlas en una base de datos, con la finalidad de graficar el comportamiento que tuvo la celda en este lapso de tiempo.

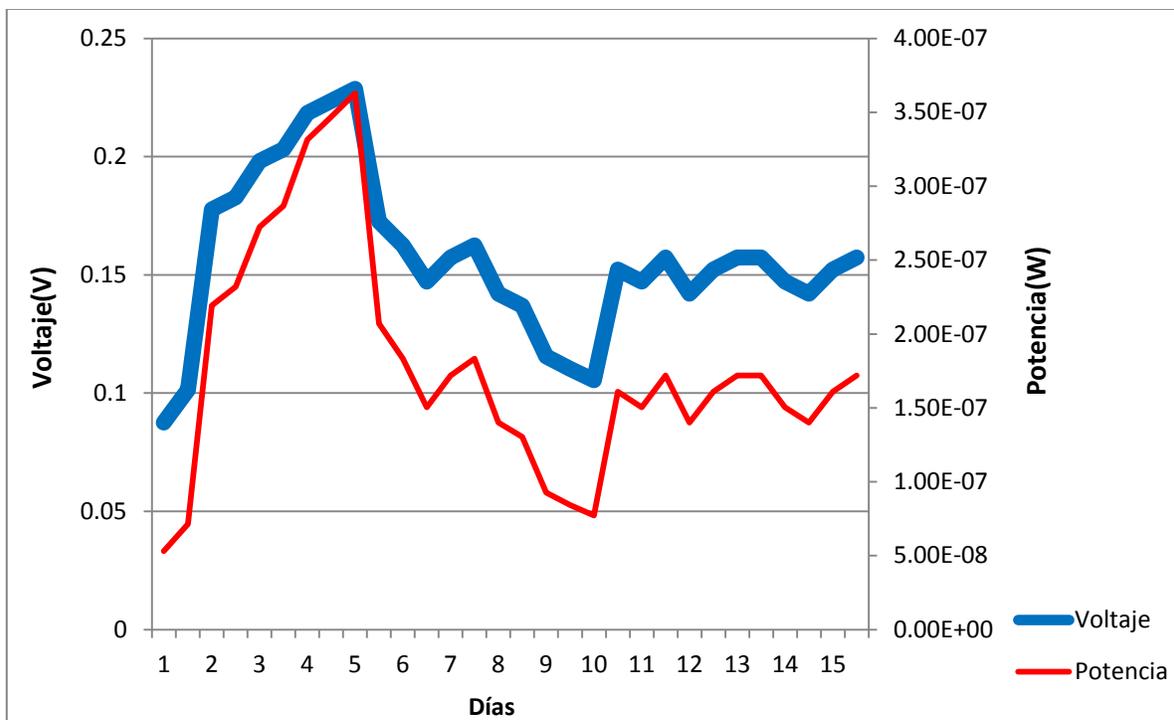


Figura 50.-Comportamiento de la celda en un lapso de 15 días, mostrando de igual forma la generación de potencia.

En la gráfica se puede apreciar que el comportamiento de la celda fue en asenso hasta el quinto día en donde alcanzo un voltaje máximo de 0.228 voltios, para después descender en un promedio 0.149 voltios, hasta el décimo día llegar a un valor de 0.105 voltios en este día la parte anódica tuvo una floculación de los

lodos en la parte anódica con una decoloración del líquido como se aprecia en la figura 51, esto demuestra que los microorganismos presentes en los lodos activados si consumieron caldo glucosado.



Figura 51.-En esta figura se aprecia la decoloración que tuvo la cámara anódica después del décimo día, donde se presentó una floculación de lodos, esto debido probablemente al consumo de caldo glucosado.

Para este día se le agregó 25 ml de caldo glucosado en la cámara anódica esto con la finalidad de que los microorganismos tuvieran más sustrato y ver el comportamiento del voltaje en esta cámara.



Figura 52.- En esta imagen se puede apreciar la forma que adquirió la cámara anódica después del onceavo día, en la cual previamente se le agregaron 25 ml de caldo glucosado.

Para el onceavo día la celda tuvo un aumento de aproximadamente 0.046 volts para después mantenerse en un rango promedio de 0.151 voltios.

6.4.2 Celda 2 de dos cámaras con Labview®

Esta celda se trabajó en condiciones anaerobias en el ánodo y aeróbica en el cátodo, con un corrimiento de 14 días, en constante monitoreo por la tarjeta de adquisición de datos para posteriormente almacenarlas en una base de datos, los datos almacenados, en esta celda se utilizó lodos activados como consorcio bacteriano y como sustrato agua residual con caldo glucosado, esto para aumentar la generación de electricidad en base al anterior experimento ya que las aguas residuales también contiene carbohidratos.

En la siguiente figura se puede apreciar la generación de voltaje de esta celda.

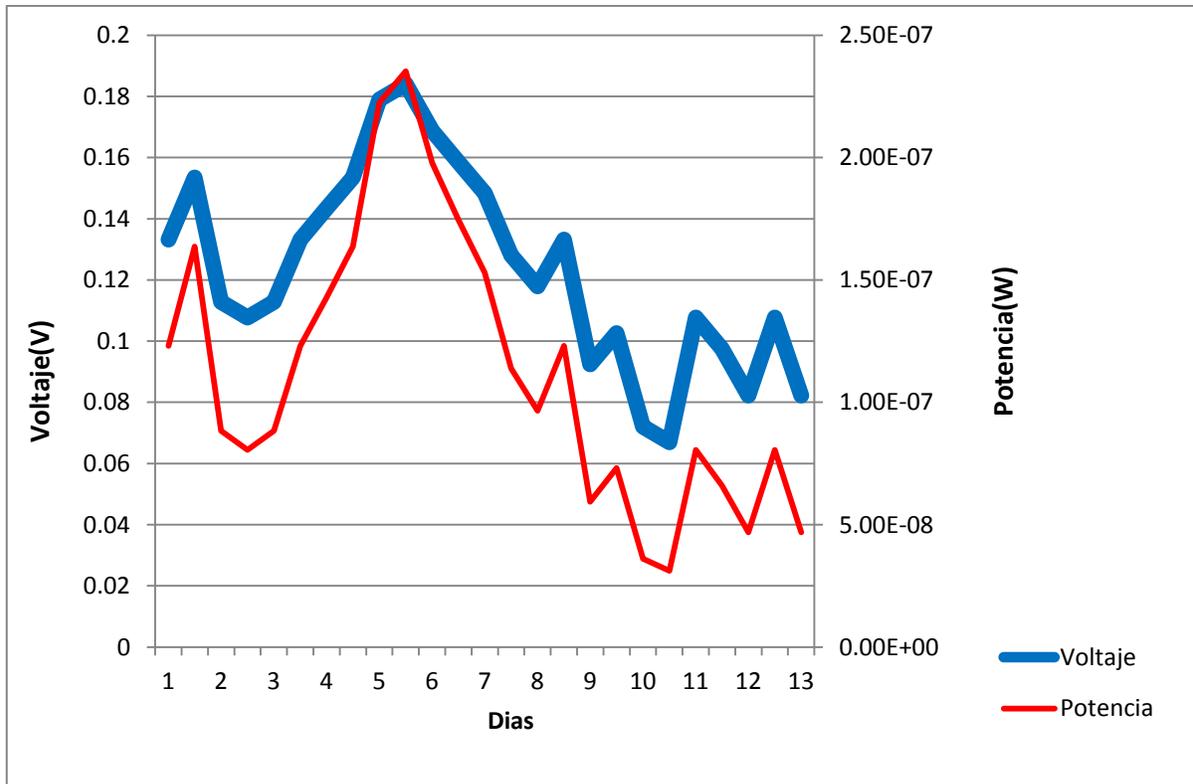


Figura 53.- En esta grafica se muestra los datos registrados por la tarjeta de adquisición de datos, y las potencias generadas en 13 días de corrimiento.

Como se muestra en la gráfica hasta el tercer día la actividad microbiana empezaba a tener un crecimiento exponencial, este proceso tardo dos día donde la celda tuvo su voltaje máximo de 0.184 volts, ya que para los siguientes 5 días la generación de voltaje fue reduciendo en promedio 0.129 voltios por día, para los 3 días restantes el voltaje oscilo en un rango de 0.082 y 0.107 volts.

Para este día la celda empezaba a tener un comportamiento similar al experimento anterior, mostro una floculación de lodos con una capa de lodos en la parte superior de la cámara anódica, como se muestra en la figura



Figura 54.-Celda anódica en condiciones anaeróbicas al finalizar el corrimiento, con una floculación de lodos, y una pequeña capa de lodos en la parte superior del matraz.

Mostrando una amortiguación después de estos días y hacia los días posteriores, en esta celda no existió una decoloración en de líquido como en la celda anterior.

Así pues se demuestra que las bacterias que se encuentran en las aguas residuales municipales de la ciudad de Zacatecas, son capaces de generar energía eléctrica.

Así mismo ambos sistemas demuestran una generación de voltaje transitoria en el tiempo de inmersión. Esto puede decirse que la concentración de las especies electroactivas se incrementa en presencia de materia oxidante en el medio como es el caso de glucosa, y que la celda microbiana mostro mejores resultados utilizando bacterias presentes en lodos activados tanto anaeróbicas como aeróbicas, en el caso de las cámaras anaeróbicas se mostró una mayor actividad microbiana y una generación de voltaje variante en el tiempo este fenómeno se

debe a la propia naturaleza del microorganismo o a una no homogeneidad de los microorganismos ya que estos se pudieron posicionar en la parte inferior de la cámara. La siguiente tabla muestra las condiciones de operación de ambas celdas.

	Bacterias	Sustrato	Electrodo ánodo	Carga	Condiciones	unión	Días	Voltaje promedio(mV)	Potencia Promedio (nW)
celda 1	Lodos activados	Caldo glucosado	Barra de carbón	144KΩ	anaerobia	Puente salino	16	156.6079	178.2931
celda 2	Lodos activados y aguas residuales	Caldo glucosado	Barra de carbón	144KΩ	anaerobia	Puente salino	14	168.7879	565.9290

Tabla 8.-Condiciones en las cuales se llevaron a cabo ambas celdas 1 y 2, mostrando el voltaje y la potencia generada ambas en promedio durante los días del corrimiento.

En esta tabla se plasma el voltaje promedio generado por ambas celdas, utilizando la impedancia de entrada de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008 de National Instrument, así obteniendo potencias promedio de 178.293 nW y 565.929 nW respectivamente.

Para calcular la potencia se utilizó la formula $P = V * I$, donde la P es la potencia en watts, la V es el voltaje en voltios y la I es la corriente en amperes, para calcular la corriente se tomó la resistencia de la tarjeta de adquisición de datos que es de un valor de 144 KΩ.

7 Conclusiones

- Se construyeron, implementaron y monitorearon 3 configuraciones de celdas microbianas.
- En las celdas de una sola cámara y de tipo H no se obtuvo voltaje alguno.
- En las celdas de 2 cámaras se obtuvieron voltajes del orden de los 157 mV en promedio, demostrando así que con el agua residual o lodos activados se puede generar electricidad, este resultado por supuesto se está traslapando con el voltaje generado debido a la oxidación de la conexión en el ánodo.
- En base a los resultados obtenidos el consorcio bacteriano de lodos activados tiene una mayor generación de voltaje.
- El software desarrollado es una herramienta indispensable para el monitoreo del voltaje generado en la celda.

8 Trabajo Futuro

8.1 Celda de una sola cámara con puente salino

Se construirá una celda microbiana del tipo de una sola cámara, con el separador del tipo puente salino la cual contendrá las siguientes características:

Volumen del compartimiento del ánodo: 96ml

Se usara como electrodo una barra de grafito con área de contacto de la cámara de 1.75 cm²

Área transversal del separador (puente salino) 9.6 cm²

Longitud del puente salino: 1 cm

Por el lado del Cátodo se le colocará una tela de carbón con tres gamos de polvo de níquel.

8.1.1 Metodología:

Se utilizará una autoclave para realizar la esterilización tanto a las barras de grafito como a la estructura de la celda.

Se llenará el depósito con agua residual previamente filtrada con papel filtro para retener sólidos mayores de 50 micras.

Se medirá el pH del agua residual contenido en la cámara del ánodo.

Se tapaná la cámara del ánodo para conservar condiciones anaerobias.

Se inyectara nitrógeno gaseoso en la cámara para desplazar el aire.

Se conectarán los electrodos de las dos cámaras a una tarjeta de adquisición de datos, para que por medio de un programa realizado con el software de Labview® monitorear el voltaje generado por la celda a circuito abierto.

Se monitoreará la temperatura de la cámara del ánodo por medio del software de Labview®.

Se tendrá la cámara funcionando en un tiempo de 7 días para registrar los datos de voltaje generado y temperatura de la cámara.

Los siguientes experimentos dependen si hay apoyo o no con la compra del material.

8.2 Celda de una sola cámara con membrana

Se construirá una celda microbiana del tipo de una sola cámara, con el separador del tipo membrana polimérica la cual contendrá las siguientes características:

Volumen del compartimiento del ánodo: 96 ml

Se usará como ánodo un electrodo con una superficie de grafito, con área de contacto de la cámara de 1.75 cm^2

Por el lado del Cátodo se le colocará una tela de carbón como electrodo con $0.5 \text{ mg de Pt/cm}^2$.

Se utilizará remplazo de alambre de platino CVS10 de la marca sigma-aldrich para realizar las conexiones.

8.2.1 Metodología:

Se utilizará una autoclave para realizar la esterilización tanto a las barras de grafito como a la estructura de la celda. (pendiente; temperatura y tiempo).

Se activará la membrana de Nafion® antes de usar en una solución de H_2SO_4 1M a 45°C por 24hrs.

Se llenará el depósito con agua residual previamente filtrada con papel filtro para retener sólidos mayores de 50 micras.

Se medirá el pH del agua residual contenido en la cámara del ánodo.

Se tapará la cámara del ánodo para conservar condiciones anaerobias.

Se inyectará nitrógeno gaseoso en la cámara para desplazar el aire.

Se conectarán los electrodos de las dos cámaras a una tarjeta de adquisición de datos, para que por medio de la realización de un programa con el software de Labview® monitorear el voltaje generado por la celda con una carga resistiva de 1000 Ω .

Se monitoreará la temperatura de la cámara del ánodo por medio del software de Labview®.

Se tendrá la cámara funcionando en un tiempo de 7 días para registrar los datos de voltaje generado y temperatura de la cámara.

8.3 Celda de una sola cámara con membrana

Se construirá una celda microbiana del tipo de una sola cámara, con el separador del tipo membrana polimérica la cual contendrá las siguientes características:

Volumen del compartimiento del ánodo: 96 ml

Se usara como ánodo papel Toray con clave del proveedor 030TGPH030 1005 con área de contacto de la cámara de 1.75 cm²

Por el lado del Cátodo se le colocará una tela de carbón como electrodo con 0.5 mg de Pt/cm².

Se utilizará remplazo de alambre de platino CVS10 de la marca Sigma-Aldrich para realizar las conexiones.

Se pegará las conexiones tanto al cátodo como al ánodo con silicón o resina epóxica no conductora.

8.3.1 Metodología:

Se utilizara una autoclave para realizar la esterilización tanto a las barras de grafito como a la estructura de la celda.(pendiente temperatura y tiempo).

Se activara la membrana de Nafion® antes de usar en una solución de H₂SO₄ 1N a 45°C por 24hrs.

Se llenará el depósito con agua residual previamente filtrada con papel filtro para retener sólidos mayores de 50 micras.

Se medirá el pH del agua residual contenido en la cámara del ánodo.

Se tapará la cámara del ánodo para conservar condiciones anaerobias.

Se inyectara nitrógeno gaseoso en la cámara para desplazar el aire.

Se conectarán los electrodos de las dos cámaras a una tarjeta de adquisición de datos, para que por medio de la realización de un programa con el software de Labview® monitorear el voltaje generado por la celda con una carga resistiva de 1000 Ω .

Se monitoreará la temperatura de la cámara del ánodo por medio del software de Labview®.

Se tendrá la cámara funcionando en un tiempo de 07 días para registrar los datos de voltaje generado y temperatura de la cámara.

Experimento 4....n(es dependiendo del material)

9 Bibliografía

Aelterman P., et al.,2006. Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. Environ. Sci. Technol.40:3388-3394.

Ahn Y y Logan B. 2012. Domestic wastewater treatment using multi-electrode continuous flow MFCs with a separator electrode assembly design. Bioenergy and biofuels.97:409-416.

Alzate G.A., et al., 2008.Generación de Electricidad a partir de una celda de combustible Microbiana tipo PEM. Interciencia. 33: 503-509.

Brant M., et al., 2010. Anode effects on microbial fuel cell, school of computer science and engineering, university of Washington, California polytechnic state university.

Brown L.T ,LeMay,E.H, Bursten, E.B. 2004, 14 Cinética Química, 20 Electroquímica, 13 Propiedades de las Disoluciones, Química la Ciencia Central 9. Prentice Hall, México.pp.524-534,776-819,485-516.

Logan E.B. 2008. 6 Arquitectura. John Wiley and Sons, Inc. Microbial fuel cell. Canada.

Logan E.B., et al., 2006. Microbial fuel cell methodology and technology. Environmental science and Technology.

Buitrón G. y Pérez J.2011. Producción de Electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. 14:5-11.

Cai H., et al., 2012. Treatment of carbon cloth anodes for improving power generation in a dual-chamber microbial fuel cell. *Society of Chemical Industry*. 88:623-628.

Commault S.A., et al., 2013. Influence of anode potentials on selection of *Geobacter* strains in microbial electrolysis cells. *Bioresource Technology*.139:226-234.

Dalvi D.A., et al., 2011. Microbial fuel cell for production of Bioelectricity from whey and biological waste treatment. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. 2:263-268.

Das L. y Mangwani N., 2010. Recent developments in microbial fuel cells: a review. *Journal of Scientific and Industrial Research*.69:727-731.

Du Z, et al.,2007. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Science Direct Biotechnology Advances (ELSEVIER)*. 25:464–482.

Elakkiya E. y Matheswaran M. 2013.Comparison of anodic metabolisms in bioelectricity production during treatment of dairy wastewater in Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*. 136:407-412.

Falcón A., et al., 2009. Bioelectricidad. *BioTecnología*.13:62-78.

Franks E.A., et al., 2010.Bacterial Biofilms: the powerhouse of microbial fuel cell. *Biofuels*.4:589-604.

Ghangrekar M.M. y Shinde V.B. 2008, Microbial fuel cell: a new approach of wastewater treatment with power generation. *Microbial fuel cell*.

Guo Fei, et al ., 2013. Mustard tuber wastewater treatment and simultaneous electricity generation using microbial fuel cells. *Bioresource Technology*.

Hatzell C., et al., 2012. Powering microbial electrolysis cells by capacitor circuits charged using microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*.229:198-202.

He Z y Angenent T.L. 2006. Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells. *Inter Science*.19-20:2009-2015.

Hong K.B., et al., 2006. Microbial fuel cell-type biochemical oxygen demand sensor. *Encyclopedia of Sensors*.10:1-12.

Ichihashi O y Hirooka K. 2013. Deterioration in the cathode performance during operation of the microbial fuel cells and the restoration of the performance by the Immersion treatment. *Microbial & Biochemical Technology*.

Ivanov I., et al.,2013. A quantitative method to evaluate microbial electrolysis cell effectiveness for energy recovery and wastewater treatment. *SciVerse ScienceDirect*.38:3135-3142.

Laidler J.K y Meiser H.J.2005. 8 Celdas Elec troquímicas. Fisicoquímica, C.E.C.S.A. México.

Lehninger A, et al.,2004. La lógica Molecular de los Organismos vivos, Principios de Bioquímica. Omega. México.19-38.

Prakash D y Anand K.2013. Design of microbial fuel cell for continuous electricity production using manure sludge waste. *International Journal of Scientific and Engineering Research*.4:1826-1844.

Prescott M.L., et al.,2002. Interacciones Microbianas y Ecología Microbiana. Microbiología. Mc Graw Hill. México.641:650.

Rozendal A.R, et al. 2006. Effects of Membrane Cation Transport on pH and Microbial Fuel Cell Performance. Environmental science & technology. 40:5206-5211.

Selembo A.P., et al., 2009. Hydrogen production with nickel powder cathode catalysts in microbial electrolysis cells. International journal of hydrogen energy.35:428-437.

Sool H. L., et al ., 2007. Evaluation of energy-conversion efficiencies in microbial fuel cells (MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates. Water Research. :1-9.

Velasquez S.B., et al. 2011. Factors affecting current production in microbial fuel cells using different industrial wastewaters. Bioresource Technology. :1-33.

Vologni. V., et al.,2013.Increased power generation from primary sludge by a submersible microbial fuel cell and optimum operational conditions. Bioprocess Biosyst Eng.

Yan Z., et al .2013. Graphene Supported Pt-Co Alloy Nanoparticles as Cathode Catalyst for Microbial Fuel Cells. *Int. J. Electrochem. Sci.* 8 :149 – 158.

Yang Y., et al.,2010.Microbial fuel cells come of age. J Chem Technol Biotechnol.

Zhang Fang., et al., 2011.Mesh optimization for microbial fuel cell cathodes constructed around stainless steel mesh current collectors. *Journal of Power Sources*.196:1097-1102.

Zhang Fei., et al., 2013.Improving electricity production in tubular microbial fuel cells through optimizing the anolyte flow with spiral spacers. *Bioresource Technology* .134:251–256.

Zhang X., et al., 2013. Power generation by packed-bed air-cathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. 142:109–114.

Zhang Y.2012.Energy recovery from waste streams with microbial fuel cell (MFC)-based technologies. Technical University of Denmark. :14-19.

Zhou M., et al.,2012. Recent advances in microbial fuel cells (MFCs) and microbial electrolysis cells (MECs) for wastewater treatment, bioenergy and bioproducts. *J Chem Technol Biotechnol*.88:508-518.

Zhuang Li., et al., 2012.Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater. *Bioresource Technology*.123:406-412.