



# UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

*La Universidad Católica de Loja*

## ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**Diseño, construcción y evaluación de un módulo de bioelectricidad.**

TRABAJO DE TITULACIÓN

**AUTORAS:**

Alvarado González, María Fernanda  
Paredes Ponce, Nataly Kruskaya

**DIRECTOR:**

Jaramillo Pacheco, Jorge Luis, Ing.

LOJA – ECUADOR

2019



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2019

## APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ingeniero

Jorge Luis Jaramillo Pacheco.

### DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De nuestra consideración:

El presente trabajo de titulación: **“Diseño, Construcción y Evaluación de un Módulo de Bioelectricidad”**, realizado por **Alvarado González María Fernanda y Paredes Ponce Nataly Kruskaya**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, octubre de 2019

f) .....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Nosotras, **Alvarado González María Fernanda y Paredes Ponce Nataly Kruskaya**, declaramos ser Autoras del presente trabajo de titulación: “Diseño, Construcción y Evaluación de un Módulo de Bioelectricidad”, de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, siendo Jorge Luis Jaramillo Pacheco, director del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente, declaramos conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que, en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f. ....

Autora: Alvarado González María Fernanda

Cédula: **1104971302**

f. ....

Autora: Paredes Ponce Nataly Kruskaya

Cédula: **1104682545**

## DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen Santísima, por darme el don de vivir un día más y haberme permitido nacer en el hogar que tengo.

A mis padres José y Gladys, quienes con amor y sacrificio supieron apoyar cada paso de mi vida, y por su ejemplo de sencillez, honradez y trabajo me enseñaron el valor de la familia.

A mi esposo Geovanny Paúl y a mi hijo Paúl Sebastián, quienes, con su amor incondicional, alegría y ocurrencias son el empuje que necesito cada día para seguir adelante y me enseñan a ser mejor persona y madre cada día.

A mi hermana Anabel, por ser mi gran amiga y apoyo incondicional en todos los momentos.

A mi hermano José Daniel, quien es un rayo de luz en mis momentos oscuros.

A mi papi Ángel, que desde el cielo siempre me cuida, guía y protege todos los días y nunca me deja sola.

A mi mami Blanqui, que es la persona con la que siempre puedo contar.

A mi ñaña Yajaira y mi ñaño Ulises, que siempre me han apoyado y han estado conmigo en las buenas y malas.

A mis primos Steeven, Aarón, Mateo, Sofía y Patrick por su sincero aprecio y bondad.

A mis amigos por haberme aceptado tal y como soy.

Nataly Kruskaya

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de investigación a mis padres por que han sido un pilar fundamental en mi vida llenándome de confianza y amor, inculcando en mi persona, esfuerzo, valentía y grandes valores.

A mis hermanos que me regalaron apoyo y cariño incondicional.

A la persona que me ha brindado su apoyo, consejo y comprensión cuando lo he necesitado y que a compartiendo conmigo sus alegrías y tristezas.

María Fernanda

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, darle gracias a Dios, por haberme permitido culminar esta etapa de estudios.

A la Universidad Técnica Particular de Loja, a la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, por acogerme en sus aulas y darme la oportunidad de prepararme y formarme para un futuro competitivo como profesional.

En forma particular expreso mi agradecimiento al Ing. Jorge Luis Jaramillo, que con infinita bondad y sapiencia supo dirigir el presente trabajo hasta su culminación.

También agradezco a todos y cada uno de mis profesores, quienes, con su gran trabajo, paciencia y responsabilidad, supieron transmitir sus amplios conocimientos y sabios consejos para llegar al final de camino.

Natally Kruskaya

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios quien me inspiro mi espíritu para la realización del presente estudio.

A mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día, por confiar en mí.

A las personas quienes me apoyaron en todo momento brindándome su comprensión, compañía y apoyo para culminar con esta etapa propuesta en mi vida.

A mi familia y compañeros que de manera directa o indirecta me dieron su pequeño aporte de confianza y amistad.

A la universidad Técnica particular de Loja que día a día orienta a sus estudiantes en las aulas del conocimiento.

A los docentes de la carrera por brindar sus conocimientos en cada ciclo brindando un poco de sabiduría y experiencia.

Agradezco de manera especial al Ingeniero Jorge Luis Jaramillo, quien brindo su confianza para la realización del presente trabajo, así como de su disposición de tiempo para la correcta guía y ejecución del trabajo de investigación.

María Fernanda



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Páginas
CARÁTULA .....	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
CAPITULO I .....	5
RESULTADOS DE LA ETAPA DE PREFACTIBILIDAD .....	5
1.1. Planteamiento del problema .....	6
1.2. Objetivos .....	6
1.2.1. Objetivo general. ....	6
1.2.2. Objetivos específicos. ....	6
1.3. Justificación e importancia del proyecto .....	6
1.4. Alcance del proyecto .....	7
1.5. Revisión de resultados de la etapa de prefactibilidad .....	7
1.5.1. Marco conceptual .....	7
1.6. Diseño de prototipos de células .....	9
1.6.1. Diseño del contenedor. ....	9
1.6.2. Selección de flora. ....	10
1.6.3. Selección del material para el ánodo y cátodo .....	10
1.7. Construcción de prototipos de células .....	11
CAPITULO II .....	13
INGENIERÍA BÁSICA DEL MÓDULO DE BIOELECTRICIDAD .....	13
2.1. Contenedor. ....	14
2.2. Flora .....	17
2.4. Storage de energía .....	18
CAPITULO III .....	28

INGENIERÍA DE DETALLE Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO.....	28
3.1. Reingeniería del contenedor.....	29
3.2. Reingeniería del arreglo de contenedores .....	30
CONCLUSIONES.....	46
RECOMENDACIONES.....	47
Bibliografía .....	48
ANEXOS .....	50
Anexo A. Microesquema LM317.....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1. Vista frontal de la configuración óptima (123D Design).....	11
Figura 2. Vista lateral de la configuración óptima (123D Desing) .....	12
Figura 3. Vista superior del arreglo de contenedores diseñado (123D Design).....	14
Figura 4. Vista lateral del arreglo de contenedores diseñado (123D Design) .....	15
Figura 5. Trazado de componentes .....	15
Figura 6. Corte de componentes.....	16
Figura 7. Montaje de componentes.....	16
Figura 8. Cubierta de plástico. ....	17
Figura 9. Diagrama de circuito de storage de energía montado sobre un microesquema LM317. ....	18
Figura 10. PCB del circuito de storage de energía montado sobre un microesquema LM317 .....	19
Figura 11. Diagrama de storage de energía montado sobre un microesquema LM317. ....	19
Figura 12. PBC del circuito de storage de energía montado sobre un microesquema LM317 .....	20
Figura 13. Diagrama de circuito doblador de voltaje, utilizando un circuito integrado NE555. ....	20
Figura 14. PBC del circuito doblador de voltaje, utilizando un circuito integrado NE555. ....	21
Figura 15. Vista superior del arreglo de contenedores PMFC, utilizando ciprés.....	22
Figura 16. Vista superior del arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo.....	23
Figura 17. Comportamiento del arreglo de contenedores en conexión serie – paralelo, como un arreglo de baterías. (Proteus ISIS 7).....	23
Figura 18. Diferencia de potencial para el arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 12 células .....	25
Figura 19. Intensidad de corriente para el arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 12 células .....	25
Figura 20. Resultados integrados de desempeño del arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 12 células .....	26
Figura 21. Diferencia de potencial para el arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 24 células .....	26
Figura 22. Intensidad de corriente para el arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 24 células .....	27
Figura 23. Resultados integrados de desempeño del arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 24 células .....	27

Figura 24. Vista lateral del contenedor rediseñado (123D Desing).....	29
Figura 25. Vista superior del contenedor rediseñado, con los electrodos (123D Desing) ....	29
Figura 26. Vista superior del arreglo de contenedores en conexión en serie (123Desing) ..	30
Figura 27. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 1 .....	31
Figura 28. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 2.....	31
Figura 29. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 3.....	32
Figura 30. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 4.....	32
Figura 31. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 5.....	33
Figura 32. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 6.....	33
Figura 33. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 1.....	34
Figura 34. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 2.....	34
Figura 35. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 3.....	35
Figura 36. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 4.....	35
Figura 37. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 5.....	36
Figura 38. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 6.....	36
Figura 39. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 1.....	38
Figura 40. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 2.....	38
Figura 41. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 3.....	39
Figura 42. Diferencia de potencia eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 4.....	39

Figura 43. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 5 .....	40
Figura 44. Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 6 .....	40
Figura 45. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 1. ....	41
Figura 46. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 2 .....	41
Figura 47. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 3 .....	42
Figura 48. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 4 .....	42
Figura 49. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 5 .....	43
Figura 50. Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 6 .....	43
Figura 51. Diferencia de potencial eléctrico, configuración de contenedores serie - paralelo. ....	44
Figura 52. Intensidad de corriente eléctrica, configuración de contenedores serie - paralelo. ....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

	Páginas
Tabla 1. Tipos de bacterias electrogénicas y sus características .....	8
Tabla 2. Tipos de MFC con cultivos de sedimentos electrogénicos .....	9
Tabla 3. Flora pre seccionada y sus características.....	10
Tabla 4. Diferencia de potencial entre los electrodos, a profundidad de 10 cm, para diferentes combinaciones de material.....	10
Tabla 5. Diferencia de potencial e intensidad de corriente para el arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 12 células .....	24
Tabla 6. Diferencia de potencial e intensidad de corriente para el arreglo de contenedores en conexión serie-paralelo, con 24 células .....	24
Tabla 7. Diferencia de potencial eléctrico (V) entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca. ....	30
Tabla 8. Intensidad de corriente eléctrica (mA) entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca. ....	30
Tabla 9. Diferencia de potencial eléctrico (V) entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda.....	37
Tabla 10. Intensidad de corriente eléctrica (mA) en el contenedor, tierra húmeda. ....	37
Tabla 11. Diferencia de potencial eléctrico e intensidad de corriente eléctrica, configuración de contenedores serie – paralelo.....	44

## RESUMEN

En este trabajo, se diseña, construye y evalúa el desempeño de una célula PFMC, con el uso del ciprés. Se explica los resultados obtenidos en las etapas de ingeniería básica, ingeniería de detalle y evaluación de desempeño de un arreglo de contenedores, cuyo objetivo principal es suplir las necesidades de electricidad a partir del aprovechamiento de la actividad bioeléctrica.

**PALABRAS CLAVE**— energía, energía ambiental, harvesting de energía ambiental, actividad bioeléctrica, celdas microbianas de combustible.

## ABSTRACT

In this work, it is designed, built and evaluated the performance of a PFMC cell, with the use of cypress. It are explained the obtained results in the stages of basic engineering, detailed engineering and performance evaluation of a container arrangement, which main objective is to meet the electricity needs from the use of bioelectric activity.

**KEYWORDS:** energy, environmental energy, harvesting of environmental energy, bioelectric activity, microbial fuel cells.



## INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y el aumento en la demanda per cápita de energía presionan sobre los recursos fósiles utilizados para su generación. Esto ha llevado a la búsqueda de nuevas fuentes de energía aprovechables, priorizando las ambientalmente neutras.

Entre las opciones identificadas para la provisión futura neutra de energía, especial interés merece el aprovechamiento de los iones producidos como consecuencia del metabolismo bacteriano. Esta “fuente” electroquímica y recargable, proporciona un diferencial de potencial eléctrico aprovechable, sin necesidad de dispositivos complejos (Wey, Southcott, Jemison, MacVittie, & Katz, 2014).

La bioelectricidad se define como la generación de energía eléctrica a partir de biomasa, materia viva o derivada de seres vivos (Carolina, 2016). En la actualidad, estudios científicos han permitido identificar varios microorganismos electrogénicos capaces de generar bioelectricidad, lo que sustenta la generación directa de energía eléctrica o combustibles a través del uso de procesos biológicos, principalmente enzimas, en sistemas bioelectroquímicos (Logan et al., 2006; Paña Vallejo, 2016). Entre estos sistemas, se cuenta a las denominadas células de combustible microbianas o MFC por sus siglas en inglés (Logan et al., 2006).

Entre las diversas posibles aplicaciones de la bioelectricidad, se recalca la provisión de energía eléctrica en zonas extremas y/o de equilibrio ecológico delicado que, aprovechando los efectos de fotosíntesis y la oxidación de rizodepositos existentes en el medio, proporcione electricidad sin llegar a convertirse en una tecnología invasiva.

Como parte de un programa de proyectos para evaluar la factibilidad del aprovechamiento de las condiciones ambientales en zonas de clima extremo, tales como gradiente térmico, radiación solar, microgeneración eólica, entre otros; en el Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica de la UTPL, se propuso el diseño, construcción y evaluación de desempeño de un módulo de bioelectricidad que emplee especies del páramo andino. Este proyecto se ejecutó en dos frentes. En el primero, se estableció el estado del arte en el aprovechamiento de la bioelectricidad y se evaluó la prefactibilidad del aprovechamiento de especies del páramo andino en la generación de bioelectricidad. En el segundo, se evaluó a nivel de factibilidad el aprovechamiento de especies del páramo andino para la generación de bioelectricidad. En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos en esta segunda fase, en tres capítulos.

En el primero, se presenta un resumen de los resultados del trabajo efectuado a la fase de prefactibilidad.

En el capítulo dos, se explica los resultados obtenidos en el diseño básico de un contenedor para generación de bioelectricidad utilizando plantas del páramo andino ecuatoriano.

En el capítulo tres, se muestra los resultados de la etapa de diseño de detalle y evaluación de desempeño del módulo.

A lo largo del proyecto, se aplicó el proceso del Engineering Design y se utilizó aplicativos de software para diseñar, modelar y simular tanto sistemas físicos como electrónicos.

## **CAPITULO I**

### **RESULTADOS DE LA ETAPA DE PREFACTIBILIDAD**

## **1.1. Planteamiento del problema**

Las últimas décadas se han caracterizado por el crecimiento, casi exponencial, de la demanda de energía, lo que a su vez presiona sobre los limitados recursos fósiles que se emplean mayoritariamente en su generación, provocando problemas muy serios en la conservación del delicado equilibrio ecológico. Esta situación es especialmente sensible, cuando se trata de la provisión de energía eléctrica en zonas protegidas o aisladas.

Por esta razón, es importante impulsar acciones de I+D en el aprovechamiento de energía ambiental que, por un lado, aporte la electricidad requerida, pero que por otro garantice la neutralidad del proceso de generación. Este es el caso del aprovechamiento de la bioelectricidad con especies del páramo andino.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general.**

- Diseñar, construir y evaluar el desempeño de un módulo de bioelectricidad para operación en zonas de clima extremo, a nivel de factibilidad.

### **1.2.2. Objetivos específicos.**

- Diseñar un módulo de bioelectricidad que utilice especies del páramo ecuatoriano.
- Elaborar el módulo de bioelectricidad diseñado.
- Evaluar el desempeño del módulo construido.

## **1.3. Justificación e importancia del proyecto.**

El proyecto busca construir y evaluar un módulo de bioelectricidad que permita abastecer de energía eléctrica, sin llegar a convertirse en una tecnología invasiva, en aquellas zonas en las que las condiciones del medio y ubicación geográfica no permiten el abastecimiento, a través de las fuentes convencionales de electricidad.

#### **1.4. Alcance del proyecto**

Se diseñó, construyó y evaluó el desempeño de un prototipo de módulo de bioelectricidad, a nivel de factibilidad, aprovechando el proceso de fotosíntesis y oxidación de rizodepositos existentes en el medio.

#### **1.5. Revisión de resultados de la etapa de prefactibilidad**

Como parte de este proyecto, se desarrolló una primera etapa de prefactibilidad, en la que se estableció el marco conceptual y se prototipó células tipo MFC y PMFC.

##### **1.5.1. Marco conceptual.**

(Mitchell, 2000; Panwar, Kaushik, & Kothari, 2011) definen a la bioenergía como la energía renovable que se produce a partir de diversas fuentes biológicas. Existen diversas tecnologías que aprovechan la energía acumulada en la biomasa, como la metanogénesis o aprovechamiento del metano, la generación de biohidrógeno, y, la bioelectricidad (Logan et al., 2006).

La bioelectricidad se extrae de sistemas bioelectroquímicos, en los que sustratos orgánicos se convierten en electrones exocelulares y protones, los cuales pueden ser recuperados de forma directa, para producir electricidad, generando como subproductos agua y dióxido de carbono (Carreon-Bautista, Erbay, Han, & Sanchez-Sinencio, 2015; Logan et al., 2006).

Se denomina célula microbiana de combustible (MFC, por sus siglas en inglés) a un sistema capaz de convertir energía química en energía eléctrica, utilizando microorganismos (Ueoka, Sese, Sue, Kouzuma, & Watanabe, 2016).

En la naturaleza, en la tierra se puede encontrar diferentes bacterias beneficiosas que protegen a las plantas contra los patógenos, y que forman una biopelícula alrededor de las raíces. Bajo condiciones adecuadas, determinadas bacterias electroactivas pueden aportar electrones, producidos como resultado de su actividad metabólica, a un electrodo aceptor (Alzate-Gaviria et al., 2010).

Para la construcción de los **electrodos** (ánodo y cátodo), se pueden utilizar diferentes materiales como cobre, platino, grafito u otros. Para el ánodo se utilizan conductores

biocompatibles y estables. Aunque se puede utilizar cobre, el material más versátil es el carbono, como barras o gránulos. En el caso del cátodo, el oxígeno es el aceptor de electrones más viable, gracias a su poder oxidante, abundancia, disponibilidad, sustentabilidad y mínima cantidad de desperdicios químicos generados (el producto final es agua)(Electrobacters, 2016).

Se ha comprobado la efectividad de **microorganismos** en la generación de electricidad empleando diferentes técnicas, como biorremediación y bioelectrogénesis. Para estos menesteres, son los microorganismos que viven en condiciones extremas de temperatura o grado de acidez (pH), los que tienen mayor relevancia (Logan et al., 2006).

Algunos de los **factores que influyen en la generación de energía en una MFC**, son las vías metabólicas que gobiernan el flujo de electrones y protones, la influencia del sustrato y el potencial del ánodo.

En la Tabla 1 se menciona algunas de las bacterias capaces de producir biohidrógeno, muy comunes en entornos naturales como el suelo, lodo de aguas residuales, compost, entre otros.

**Tabla 1.** Tipos de bacterias electrogénicas y sus características

Familia	Género	Especies	Propiedades	Hábitat
<b>Geo-bacteraceae.</b> <b>G. metallireducens</b>	Shewanella	Shewanella oneidensis Shewanella loihica	Capaces de reducir los iones Fe+3 (férrico) a Fe+2 (ferroso)	Bacteria anaerobia que habita en las profundidades del océano, sedimentos y suelo
		Geobacter Metallireducens	Metabolizan contaminantes considerados peligrosos para el ser humano	Tierra

**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras

Las MFC que utilizan cultivos puros de especies electrogénicas, se dividen en células de combustible sedimentarias (SMFC) y células de combustible fotosintéticas (PMFC).

En la Tabla 2, se presenta una comparación de desempeño de diferentes MFC, que utilizan cultivos de microorganismos electrogénicos.

**Tabla 2.** Tipos de MFC con cultivos de sedimentos electrogénicos

Tipo	Ánodo	Cátodo	I min-max (mA)	V (V)	Potencia ( $\mu$ W)	Lugar de Generación	Sedimento presente
SMFC	Cobre	Zinc	0.021	0.151	3.171	Aguas residuales.	Shewanella oneidensis
			0.275	1.006	276.65		
SMFC	Grafito	Grafito	0.132	0.664	87.85	Aguas contaminadas, o altas en pH y metano	Shewanella oneidensis
PMFC	Grafito	Grafito	0.083	0.3	50	Tierra y Plantas Vivas	Geobacter metallireducens

Fuente: Autoras

Elaboración: Autoras

La célula de combustible microbiana de la planta, fotosintética o vegetal (PMFC) es una forma sostenible y renovable de producción de electricidad. Puede ser vista como una evolución de MFC basada en los compuestos del suelo, la misma que utiliza procesos existentes en las raíces de las plantas para proporcionar nutrientes adicionales a las bacterias. La planta está integrada en el ánodo de la célula de combustible microbiana, en donde los compuestos orgánicos depositados por las raíces, se oxidan por bacterias electroquímicamente activas y terminan en el suelo como material de raíz muerta, que entonces alimenta a las bacterias. (Bretschger, Osterstock, Pinchak, Ishii, & Nelson, 2010; Piyare, Murphy, Tosato, & Brunelli, 2017; Timmers, Strik, Hamelers, & Buisman, 2010).

## 1.6. Diseño de prototipos de células

El diseño de las células microbianas incluye tres momentos fundamentales: diseño del contenedor, selección de flora y selección del material para el ánodo y el cátodo.

### 1.6.1. Diseño del contenedor.

Como contenedores para células PMFC se utilizan cubos (Piyare et al., 2017), prismas (Deng, Chen, & Zhao, 2012), circulares (Brunelli, Tosato, & Rossi, 2016), cilíndricas (Rossi et al., 2017) y parcelas (F., C., & Y., 2015). Los contenedores pueden construirse de plástico (Rossi et al., 2017), acrílico (Wang, Chen, & Huang, 2010) y/o madera (Tecnología, 2014), y su volumen varía entre amplios rangos.

### 1.6.2. Selección de flora.

En el marco de este proyecto, se priorizó la vegetación existente en el páramo andino, considerando que estas poseen las características de robustez y adaptación al medio requeridas. Las especies consideradas fueron la durante, el Ciprés y el eucalipto, cuyas características fundamentales se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Flora pre seccionada y sus características

Familia	Nombre Científico	Nombre Común	Características
<b>Myrtaceae</b>	Eucalyptus urograndis	Eucalipto	Puede llegar a medir 60 metros de alto. Tiene un tronco grisáceo liso y unas hojas de un tono verde claro y alargadas.
<b>Cupresáceas</b>	Cupressus	Ciprés	Tipo árbol, puede alcanzar los 20 metros de altura. Su tallo es recto, muy fuerte y la corteza es de color gris.
<b>Verbenaceae</b>	Duranta Erecta	Duranta	Tipo Arbusto, puede alcanzar entre 3,5 y 4 metros y entre 2 y 2,5 de diámetro. De forma ovoidal con los extremos de las ramas semi péndulas

Fuente: Autoras

Elaboración: Autoras

### 1.6.3. Selección del material para el ánodo y cátodo.

En la etapa de prefactibilidad, se experimentó con diversos materiales y configuraciones. En la Tabla 4 se presenta los resultados obtenidos para los materiales que demostraron las mejores prestaciones: cobre, acero y aluminio.

**Tabla 4.** Diferencia de potencial entre los electrodos, a profundidad de 10 cm, para diferentes combinaciones de material

Cátodo	Ánodo	Diferencia de potencial (V)
<b>Cobre 1.5 mm</b>	Acero 1 mm	0,612
	Aluminio Placa 1.5 mm	0,628
<b>Acero 1 mm</b>	Cobre 1.5 mm	0,612
	Aluminio Placa 1.5 mm	0,037
<b>Aluminio placa 1.5 mm</b>	Cobre 1.5 mm	-0,628
	Acero 1 mm	0,037

Fuente: Autoras

Elaboración: Autoras

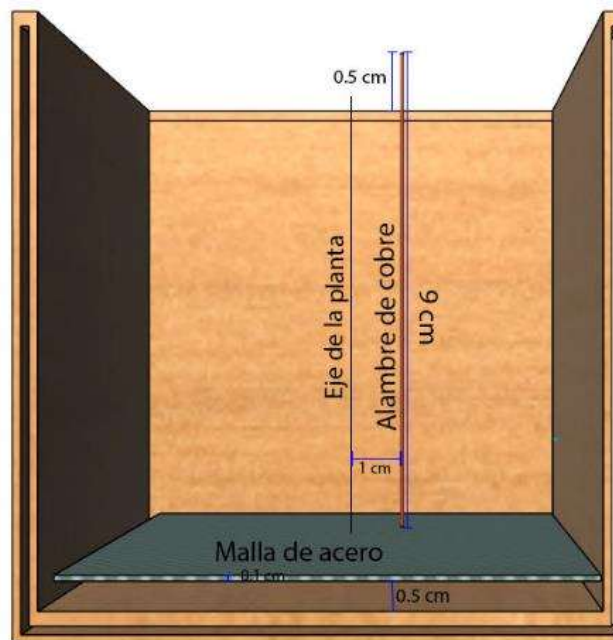


La experimentación con diferentes configuraciones, demostró que los mejores resultados se obtienen para cobre de 1.5 mm de diámetro en el ánodo y acero, en diferentes presentaciones (alambre de 1mm o malla de 1.5 mm de espesor) en el cátodo.

### 1.7. Construcción de prototipos de células

En la etapa de prefactibilidad, se experimentó con diferentes configuraciones para los electrodos, profundidad del sustrato, y una de las tres especies preseleccionadas.

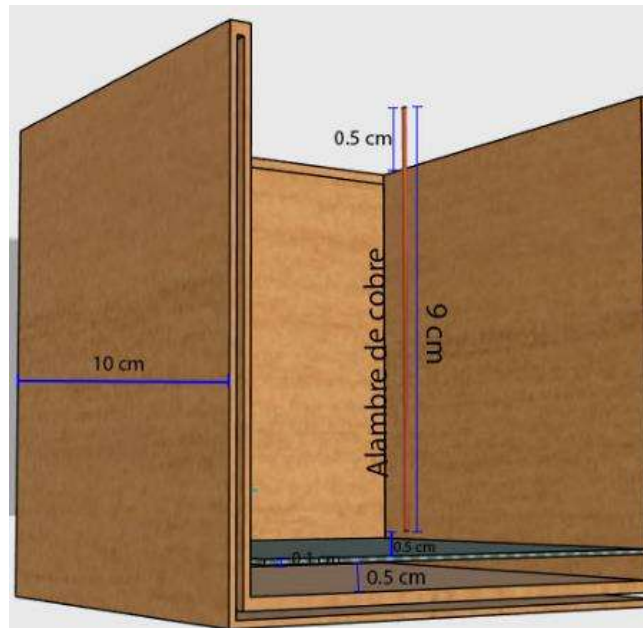
Los resultados mostraron que los mejores valores de potencia eléctrica se obtienen para la configuración de electrodos mostrada en las Fig. 1 y 2, en la que el ánodo se construye de cobre, de 1.5 mm de diámetro, y, para el cátodo se emplea malla de acero, de 1 mm de espesor. Para el ánodo, se utilizó cobre en alambre, enterrado 9 cm del electrodo en el sedimento, y expuesto 0.5 cm al oxígeno, a una distancia de 1 cm de la raíz. Para el cátodo, se utilizó malla de acero, en forma prismática, de 9 cm de lado, la misma que se encuentra sobre sedimento, a 0.5 cm de la base del contenedor.



**Figura 1.** Vista frontal de la configuración óptima (123D Design)

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras



**Figura 2.** Vista lateral de la configuración óptima (123D Desing)  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras

Para esta configuración, los resultados obtenidos al medir la actividad biométrica demostraron que el mejor desempeño se tiene con el ciprés, con 10 cm de profundidad de sustrato.

## **CAPITULO II**

### **INGENIERÍA BÁSICA DEL MÓDULO DE BIOELECTRICIDAD**

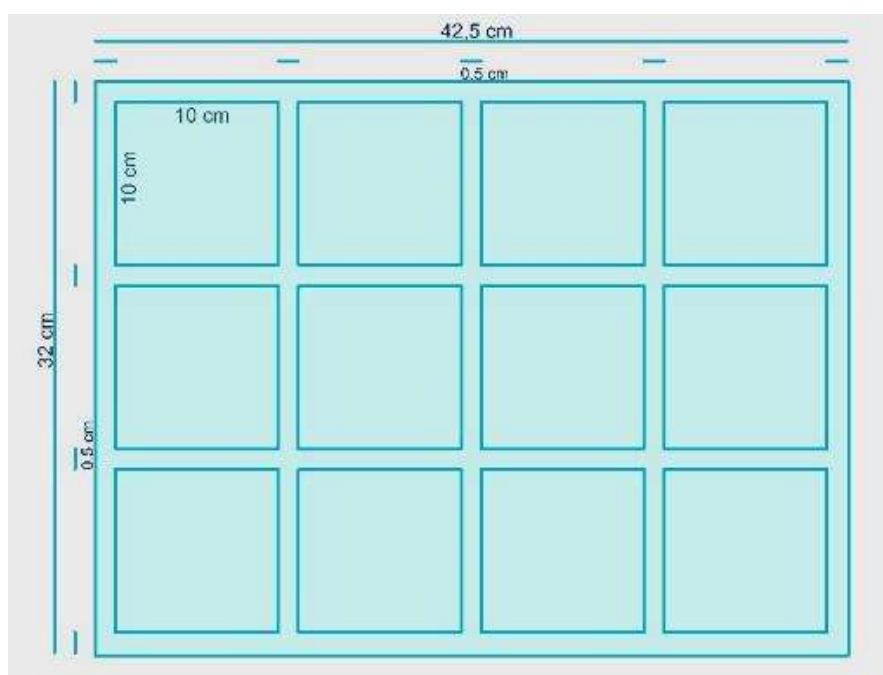
En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la etapa de ingeniería básica del módulo de bioelectricidad.

Dado que, el funcionamiento de las PMFC está ampliamente descrito en la bibliografía, pero no en función de la flora del páramo andino, el equipo de trabajo decidió aplicar una combinación de los métodos heurístico y científico. El diseño de la hipótesis de desempeño y la planificación de la evaluación del mismo, corresponden al método científico, mientras que la selección de la flora se relaciona con la prueba y falla del método heurístico.

El diseño y construcción del módulo incluye cuatro retos: contenedor, flora, electrodos y storage de energía.

## 2.1. Contenedor.

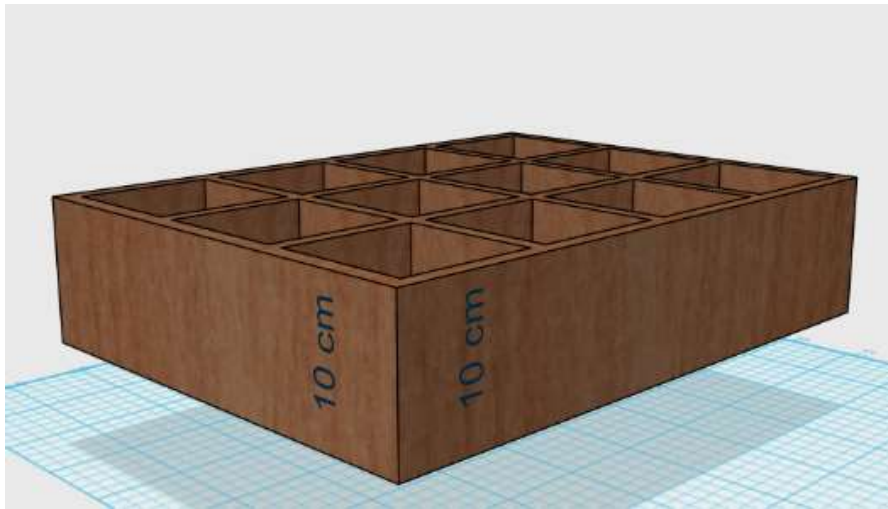
Considerando los resultados de la etapa de prefactibilidad, el contenedor se diseñó y construyó siguiendo un modelo prismático, de 10 cm de arista. Para el modelado del contenedor se empleó el software de diseño 123D Design, aplicativo de software libre y de curva de aprendizaje intuitiva (Autodesk, 2017). Para optimizar recursos en la experimentación de desempeño, se decidió construir un arreglo de contenedores, tal como lo muestra las Fig. 3 y 4.



**Figura 3.** Vista superior del arreglo de contenedores diseñado (123D Design)

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras



**Figura 4.** Vista lateral del arreglo de contenedores diseñado (123D Design)

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

El contenedor se construyó de playwood, de 3 líneas, con un recubrimiento plástico con el fin de alargar la vida útil del mismo. El proceso de construcción se inició trazando las medidas del contenedor en la madera a utilizar, para posteriormente proceder al corte y montaje de la misma. Las Figuras 5, 6 y 7 muestran el proceso de construcción y montaje del contenedor.



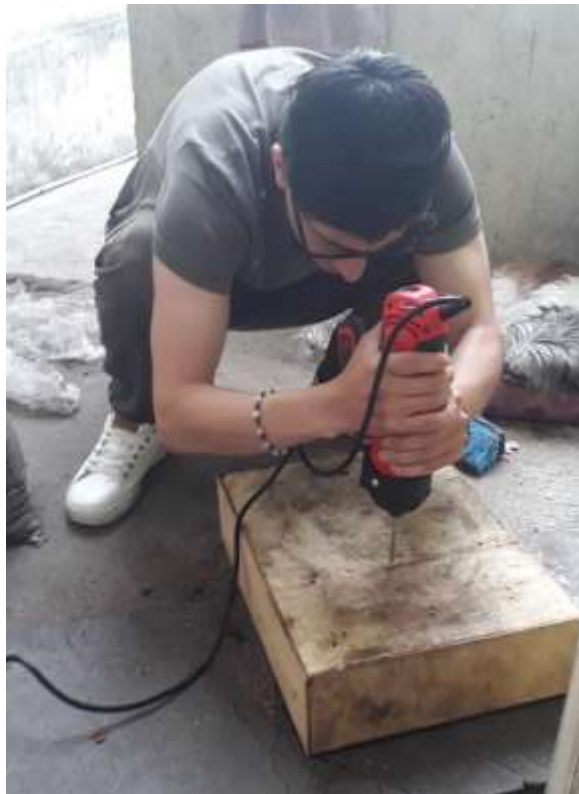
**Figura 5.** Trazado de componentes

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras



**Figura 6.** Corte de componentes.  
**Fuente:** Autoras.  
**Elaboración:** Autoras.



**Figura 7.** Montaje de componentes  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras

Para mantener la vida útil de contenedor, se incluyó una cubierta de plástico que recubre el contenedor para proteger de la humedad.



**Figura 8.** Cubierta de plástico.

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

## **2.2. Flora**

Para este proyecto se eligió como planta experimental el ciprés, considerando los resultados obtenidos en la etapa de prefactibilidad.

## **2.3. Electrodo**

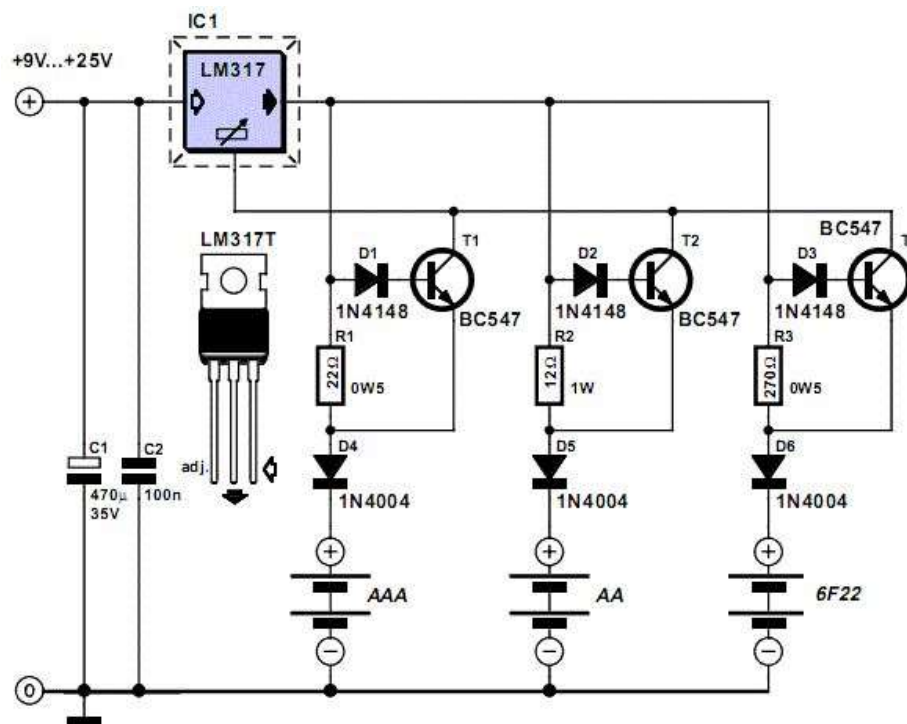
Para el diseño y construcción de los electrodos, se tomó como referencia los resultados de la etapa de prefactibilidad. Para los electrodos se utilizó malla de acero, de 1mm de espesor y de 9 cm de lado, para el cátodo; y, para el ánodo, alambre de cobre, de 1.5mm de diámetro y 9 cm de longitud.

## 2.4. Storage de energía

El storage de energía tiene como objetivo almacenar la carga eléctrica generada por la actividad bioeléctrica de la célula PMFC, para ser aprovechada posteriormente, resolviendo el problema de la corta duración de la corriente eléctrica, detectado en la etapa de prefactibilidad.

Ya que, en la etapa de prefactibilidad, no se profundizó en este componente, fue necesario explorar opciones para almacenamiento. Se identificó 3 opciones, para las cuales se diseñó el circuito impreso utilizando Proteus ISI7. Finalmente, cada circuito fue construido y se comparó el desempeño de cada uno de ellos.

Como **primera opción** se consideró un circuito montado sobre el microesquema LM317 (Ver Fig.9), en configuración de intensidad de corriente constante, pero sin la resistencia fija o variable habitual en el pin ADJ, para determinar la cantidad de intensidad de corriente de salida (Admin, 2018), se decidió implementar una sola etapa, ya que el esquema mostrado funciona para alimentar a tres baterías simultáneamente. El circuito impreso (PCB) del circuito se muestra en la Fig.10.

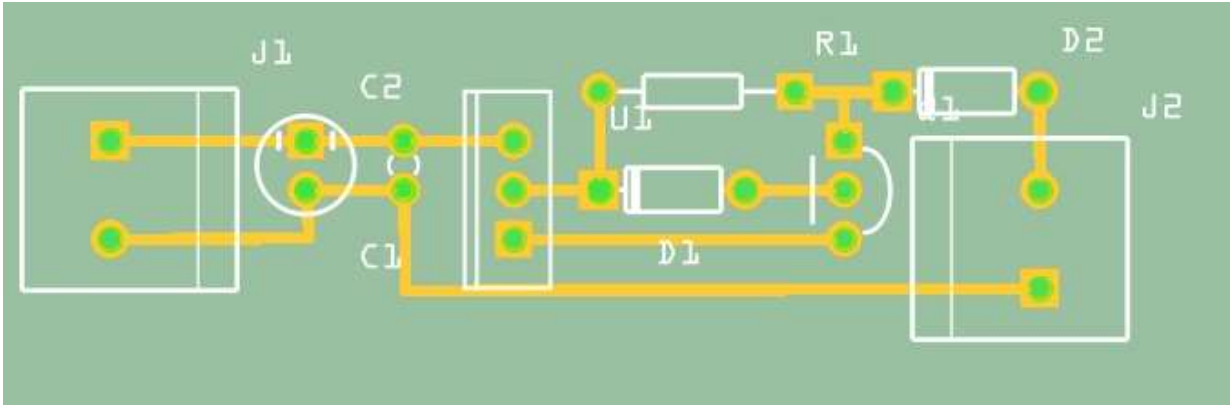


**Figura 9.** Diagrama de circuito de storage de energía montado sobre un microesquema LM317.

**Fuente:** Tomada de (Admin, 2018)

**Elaborado:** Tomada de Tomada de (Paso, 2018)



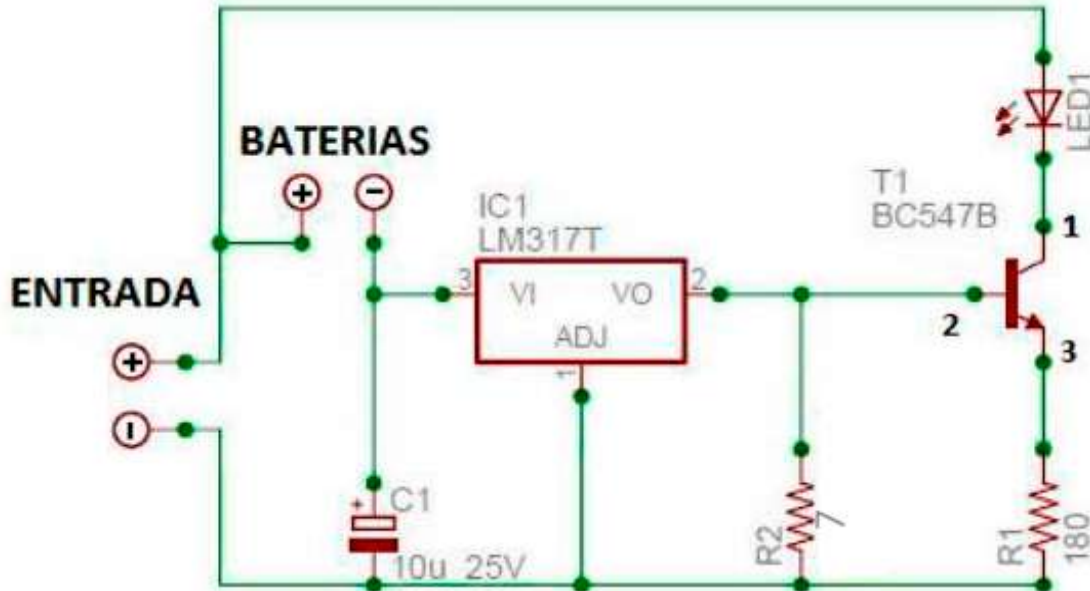


**Figura 10.** PCB del circuito de storage de energía montado sobre un microesquema LM317

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

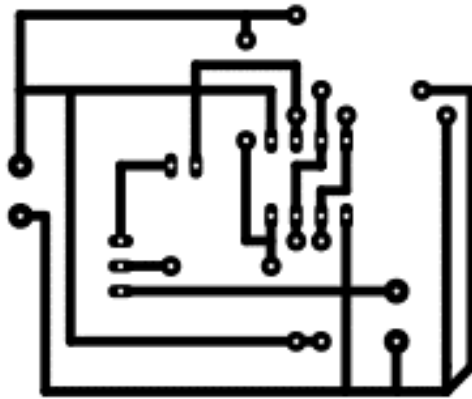
Como **segunda opción**, se consideró un circuito montado sobre el microesquema LM317 (Ver Fig.11), usando un LED de bajo consumo como indicador de carga de la batería. La intensidad de corriente necesaria debe ser del 10% de la capacidad de la batería a utilizarse, mientras que la diferencia de potencial debe ser como mínimo de 1.5 V superior al nominal (Admin, 2018). El PCB se muestra en la Fig.12.



**Figura 11.** Diagrama de storage de energía montado sobre un microesquema LM317.

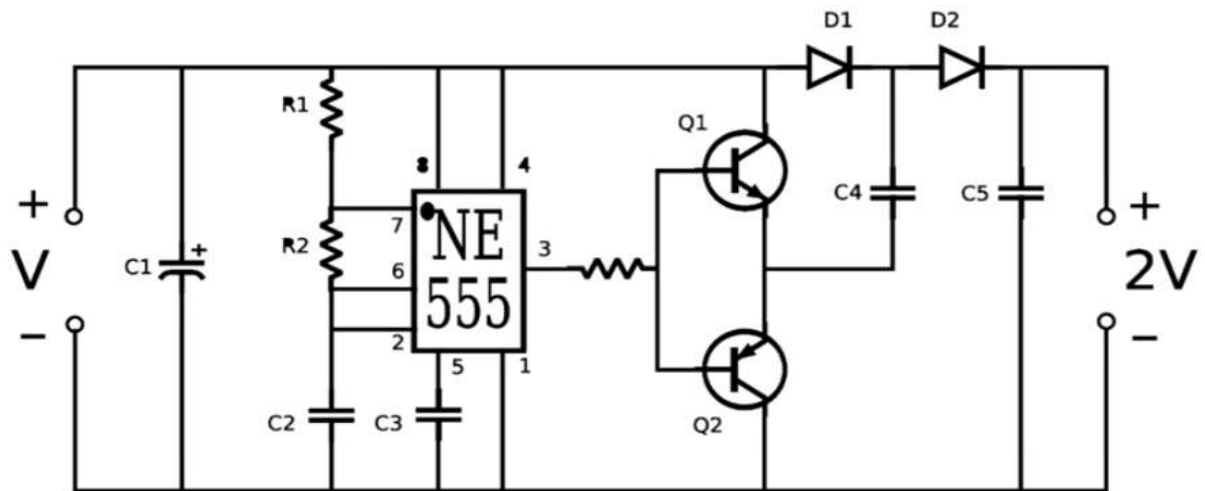
**Fuente:** Tomada de (Admin, 2018)

**Elaborado:** Tomada de (Admin, 2018)

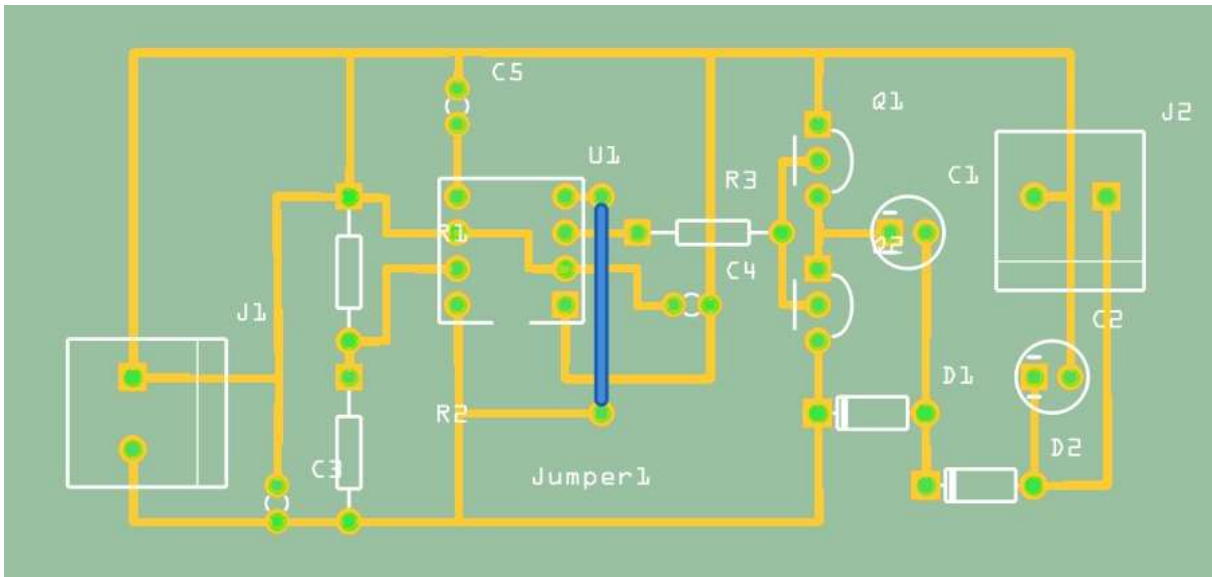


**Figura 12.** PCB del circuito de storage de energía montado sobre un microesquema LM317  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras

Como **tercera opción**, se consideró un circuito doblador de voltaje, utilizando un circuito integrado NE555 (Ver Fig.13), para multiplicar la diferencia de potencial en la salida de la célula, obteniendo la diferencia de potencia e intensidad de corriente necesarias para cargar la batería (Paso, 2018). El PCB se muestra en la Fig.14.



**Figura 13.** Diagrama de circuito doblador de voltaje, utilizando un circuito integrado NE555.  
**Fuente:** Tomada de (Paso, 2018)  
**Elaborado:** Tomada de (Paso, 2018)



**Figura 14.** PCB del circuito doblador de voltaje, utilizando un circuito integrado NE555.

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

## 2.5. Evaluación preliminar de desempeño

En este apartado se muestra los resultados obtenidos al evaluar preliminarmente el desempeño del arreglo de contenedores mostrado en la Fig. 15.



**Figura 15.** Vista superior del arreglo de contenedores PMFC, utilizando ciprés.

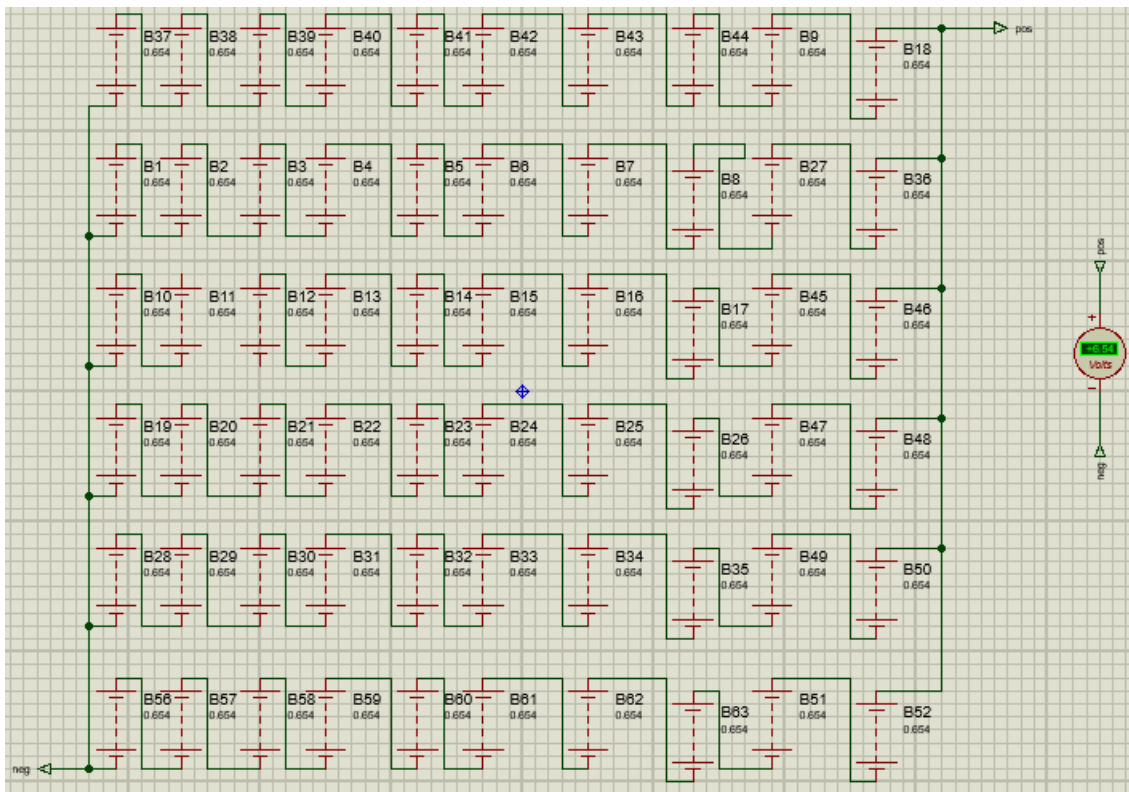
**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

Las primeras mediciones de diferencia de potencial e intensidad de corriente, dieron valores promedios de 0,805 V y 0,033 mA, por cada una de las células. Dado que, la intensidad de corriente medida no era suficiente para alimentar los circuitos de storage de energía, se procedió a realizar una configuración de contenedores serie - paralelo, como se muestra en la Fig. 16. La intención central es convertir a arreglo de contenedores en un arreglo de baterías como el mostrado en la Fig. 17.



**Figura 16.** Vista superior del arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



**Figura 17.** Comportamiento del arreglo de contenedores en conexión serie – paralelo, como un arreglo de baterías. (Proteus ISIS 7)  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras

En el arreglo de contenedores, se probó (prueba real) con 12 y 24 células, obteniendo los resultados mostrados en las Tablas 5 y 6 y Figuras 20 a la 23. La diferencia de potencial en el arreglo de 24 células es el doble del registrado en el arreglo de 12, mientras que la intensidad de corriente eléctrica, no cambia considerablemente. En las figuras 20 y 23, se muestra los resultados de diferencia de potencial, intensidad de corriente eléctrica y potencia. Su análisis muestra que, en el transcurso de los días, se presentan variaciones en la diferencia de potencial que son compensados con variaciones de la intensidad de corriente eléctrica, procurando que la potencia eléctrica permanezca constante.

**Tabla 5.** Diferencia de potencial e intensidad de corriente para el arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 12 células

Especies	Registro	Diferencia de (V) potencial	Intensidad de Corriente (mA)
12	10/2/2019	1,780	0,229
	11/2/2019	1,665	0,263
	12/2/2019	1,585	0,265
	13/2/2019	1,695	0,237

**Fuente:** Autoras

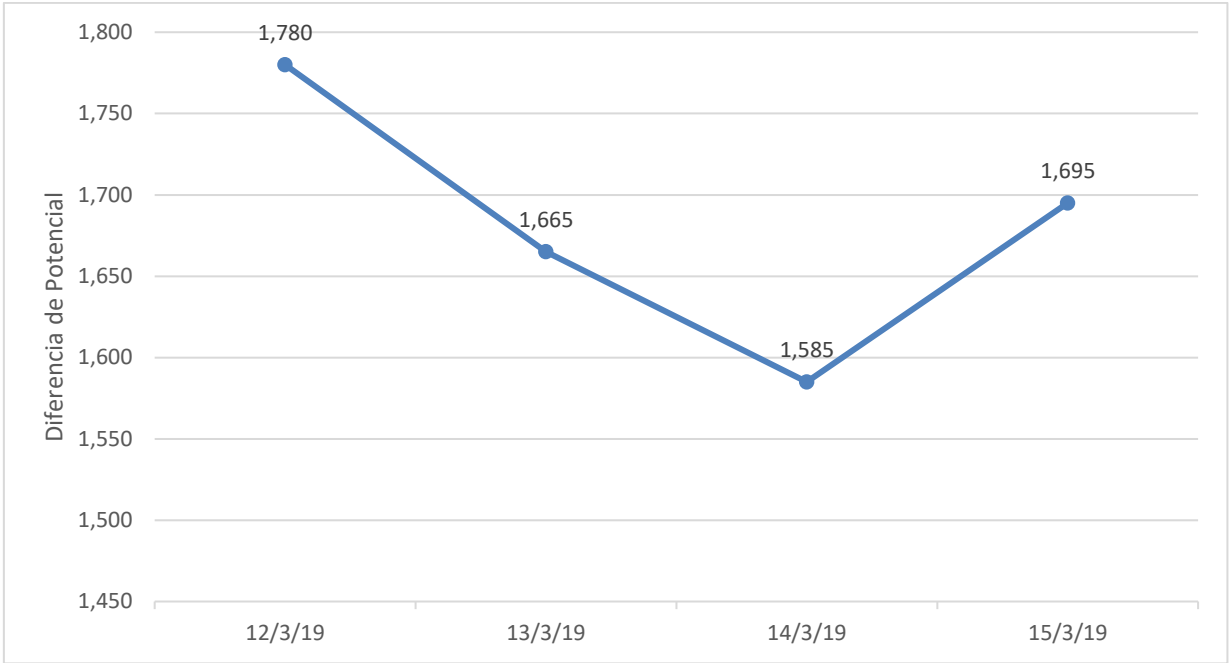
**Elaboración:** Autoras

**Tabla 6.** Diferencia de potencial e intensidad de corriente para el arreglo de contenedores en conexión serie-paralelo, con 24 células

Especies	Registro	Diferencia de potencial (V)	Intensidad de corriente (mA)
24	22/2/2019	3,81	0,293
	23/2/2019	3,98	0,279
	24/2/2019	3,81	0,248
	25/2/2019	3,67	0,288

**Fuente:** Autoras

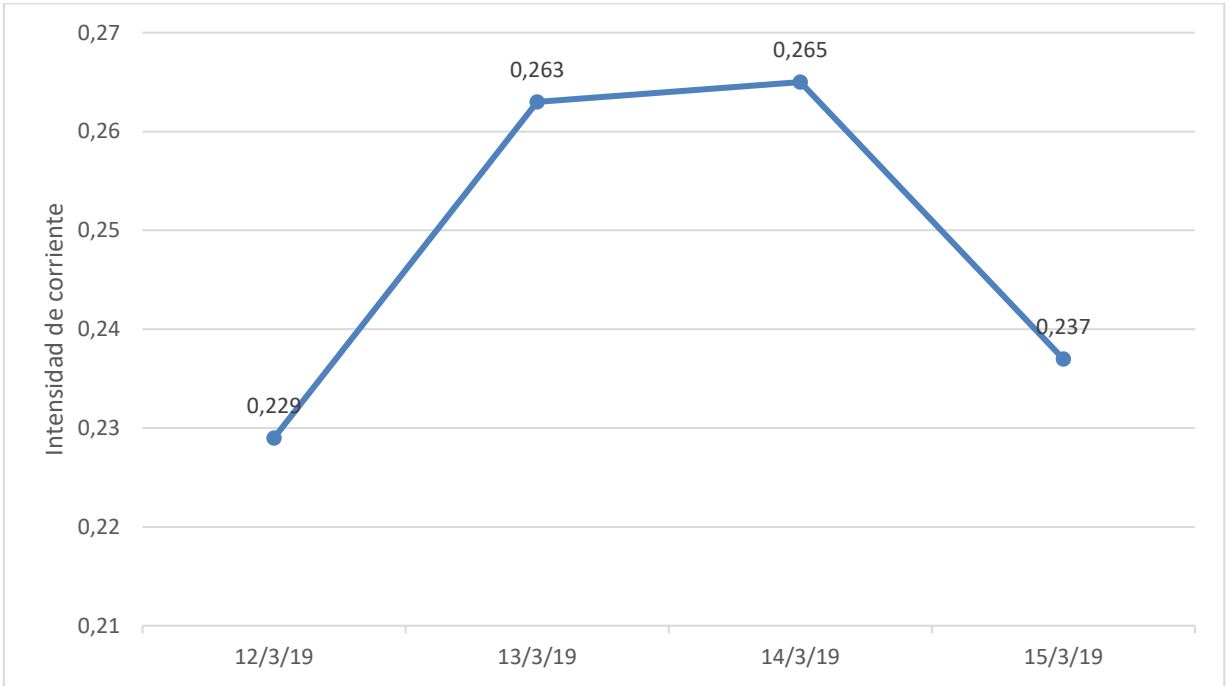
**Elaboración:** Autoras



**Figura 18.** Diferencia de potencial para el arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 12 células

**Fuente:** Autoras

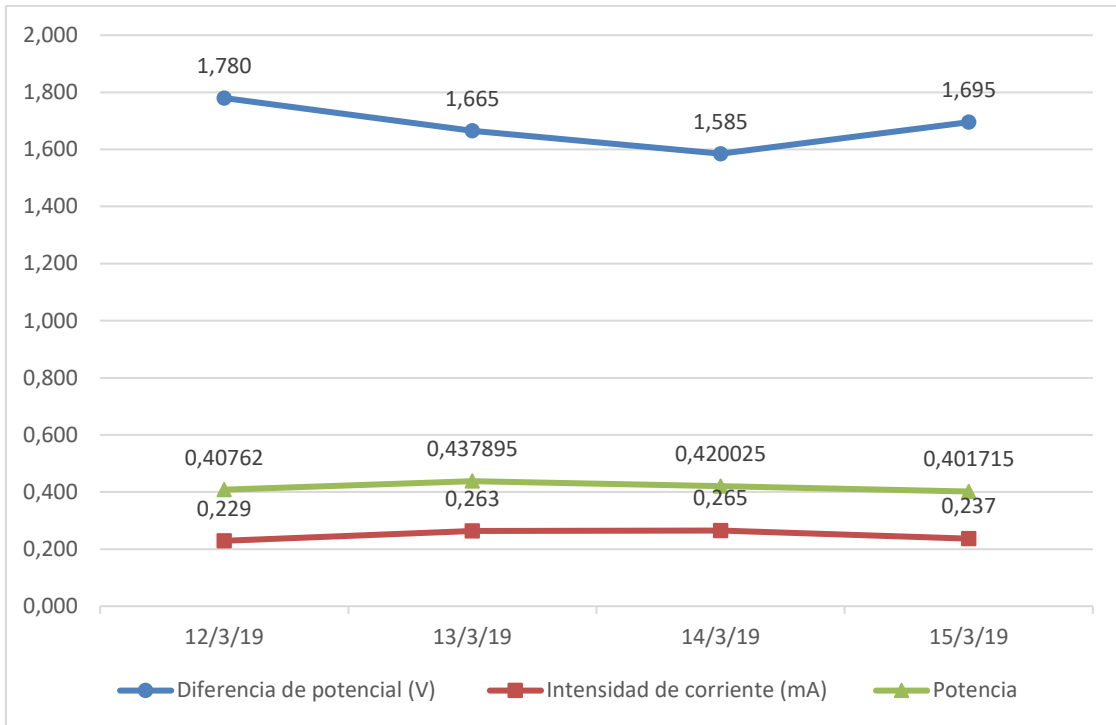
**Elaboración:** Autoras



**Figura 19.** Intensidad de corriente para el arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 12 células

**Fuente:** Autoras

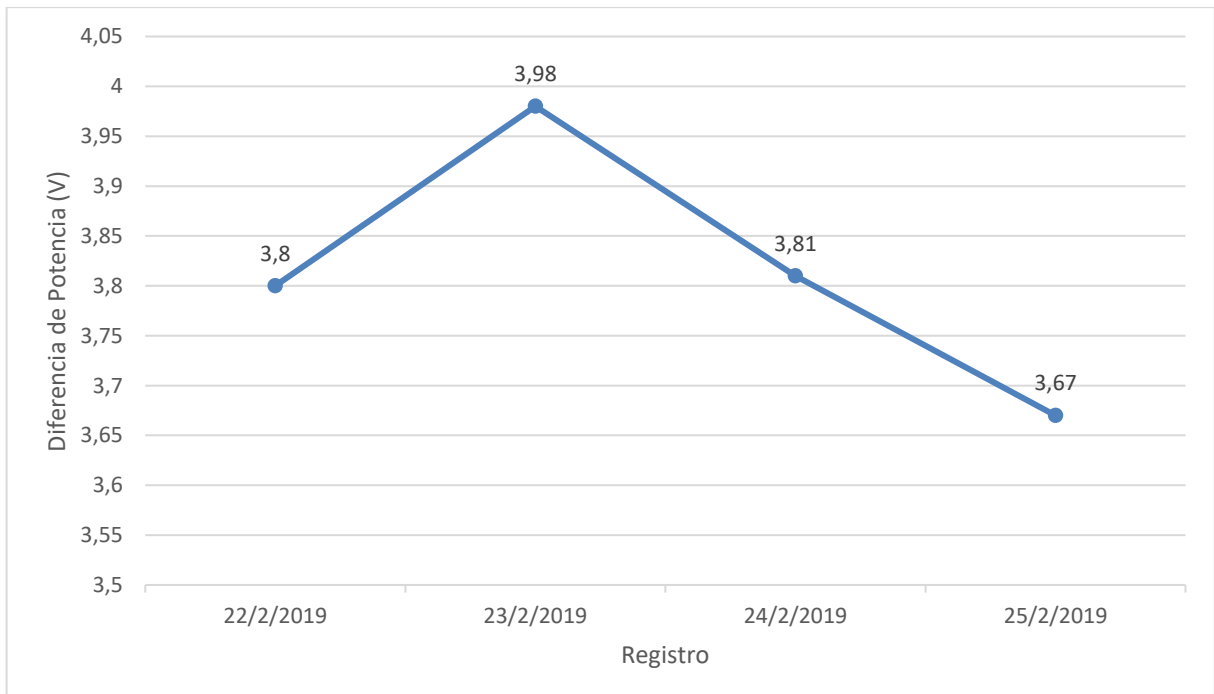
**Elaboración:** Autoras



**Figura 20.** Resultados integrados de desempeño del arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 12 células

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

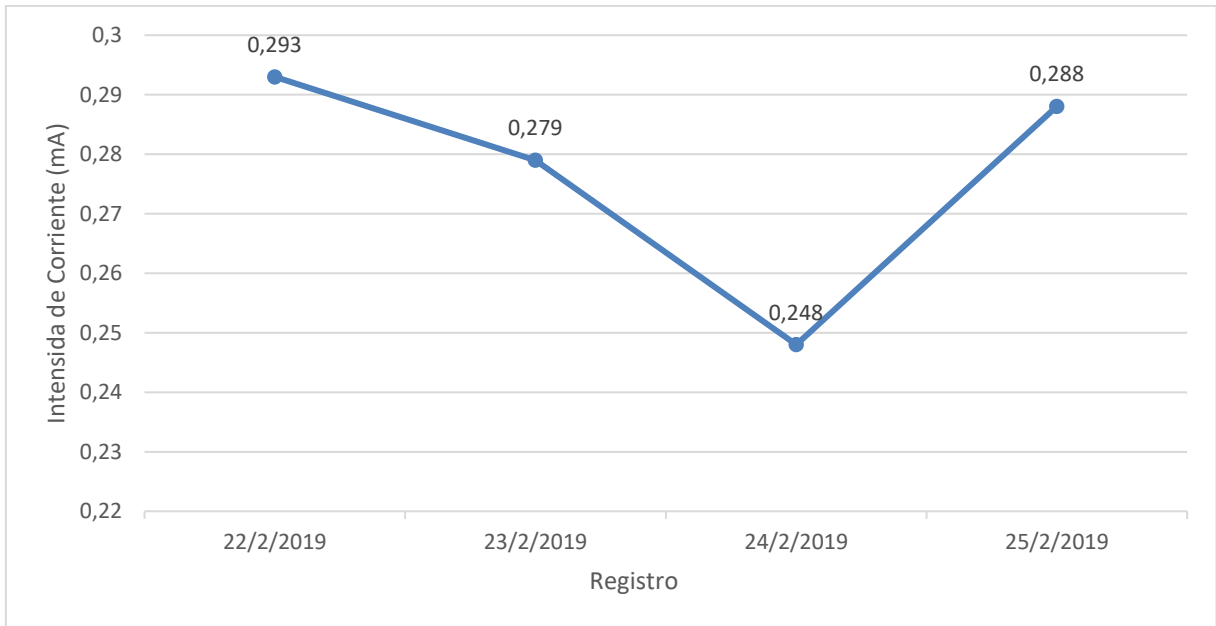


**Figura 21.** Diferencia de potencial para el arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 24 células

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

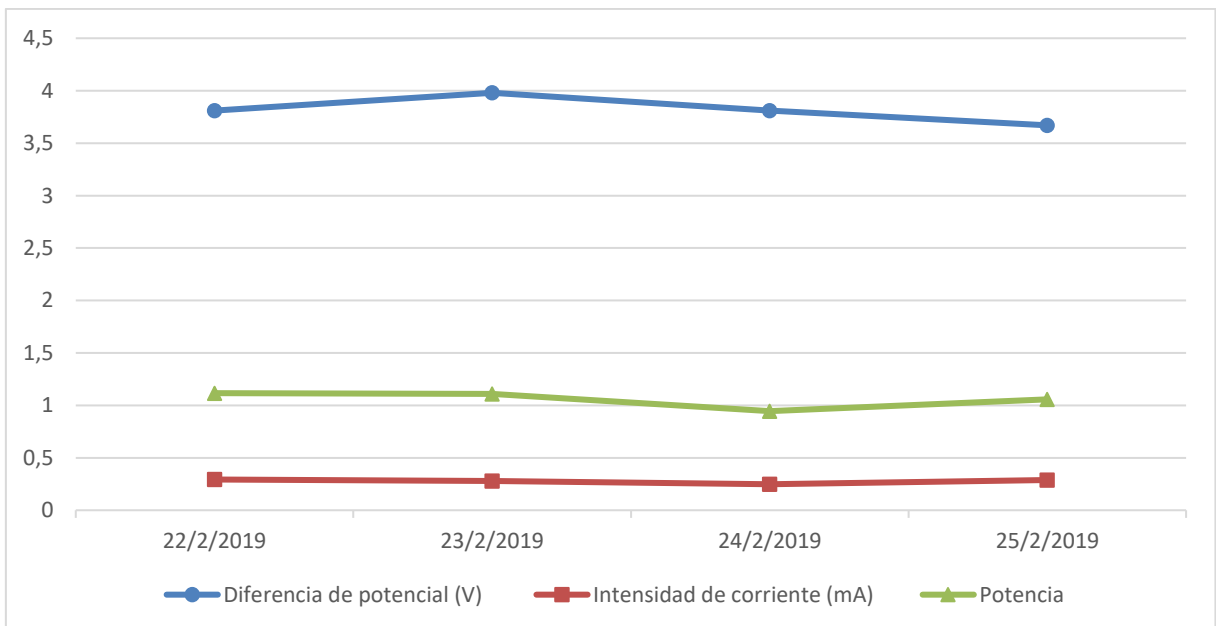




**Figura 22.** Intensidad de corriente para el arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 24 células

Fuente: Autoras

Elaboración: Autoras



**Figura 23.** Resultados integrados de desempeño del arreglo de contenedores en conexión serie - paralelo, con 24 células

Fuente: Autoras

Elaboración: Autoras

Durante la evaluación preliminar del desempeño del arreglo, se detectó una caída de tensión significativa con la conexión del módulo de storage de energía. También se registró que, transcurrido un mes, la diferencia de potencial y la intensidad de corriente eléctrica pasaban de valores promedios de 0.892 V y 0.195 mA a niveles de .08v y 0.01mA, con una tasa de eficiencia del 1.5%. Esto obligó a introducir nuevos retos en la fase de ingeniería de detalle.

### **CAPITULO III**

## **INGENIERÍA DE DETALLE Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO**

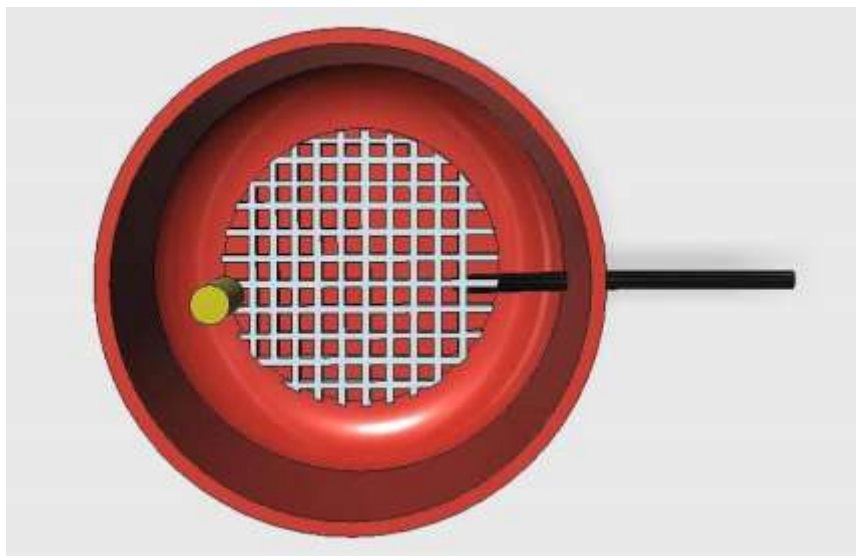
En este capítulo, se describe los resultados obtenidos en la etapa de ingeniería de detalle y evaluación de desempeño. En esta etapa se incluyó el análisis de variables de desempeño fuera de los esperado en la etapa de ingeniería básica, como la pérdida de capacidad de generación con el paso del tiempo y el descenso de la diferencia de potencial eléctrico al conectar el módulo de storage de energía.

### 3.1. Reingeniería del contenedor

Con el paso del tiempo, en contacto con el agua, el playwood usado para la construcción de los contenedores se convirtió en una membrana separadora, generando un efecto capacitivo que afectó la generación. Ante esta situación, se decidió reemplazar el playwood por plástico (Fig. 24), por lo que la forma del contenedor cambió de prismática a cilíndrica, de 5 cm de radio.



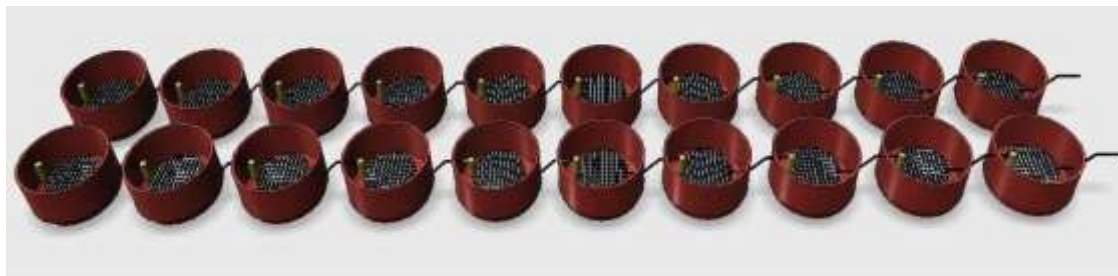
**Figura 24.** Vista lateral del contenedor rediseñado (123D Desing).  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



**Figura 25.** Vista superior del contenedor rediseñado, con los electrodos (123D Desing)  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras

### 3.2. Reingeniería del arreglo de contenedores

En esta etapa, se probó inicialmente, un arreglo de contenedores con conexión en serie, fila por fila, con un total de 60 células, distribuidas en 6 filas (Fig. 26).



**Figura 26.** Vista superior del arreglo de contenedores en conexión en serie (123Desing)

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

Las Tablas 7 y 8, y las Figuras 27 a la 38, muestran la diferencia de potencial entre los electrodos y la intensidad de corriente medidas en las PMFC, en tierra seca. Se realizó una medición diaria, durante 5 días. Los resultados muestran que, la diferencia del potencial eléctrico entre los electrodos mejora considerablemente respecto a los resultados anteriores, pero a intensidad de corriente eléctrica no mejora significativamente. Por otra parte, con el paso de los días, la actividad bioeléctrica de las células se reduce significativamente.

**Tabla 7.** Diferencia de potencial eléctrico (V) entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca.

Registro	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5	Fila 6
9/4/2019	5,31	4,68	5,60	4,50	4,42	4,55
10/4/2019	4,83	4,42	4,97	4,26	4,35	3,52
11/4/2019	4,66	4,5	5,04	4,62	4,55	4,32
30/4/2019	4,05	4,28	4,12	4,56	3,84	4,15
1/5/2019	4,33	4,24	4,56	4,30	4,20	3,57

**Fuente:** Autoras

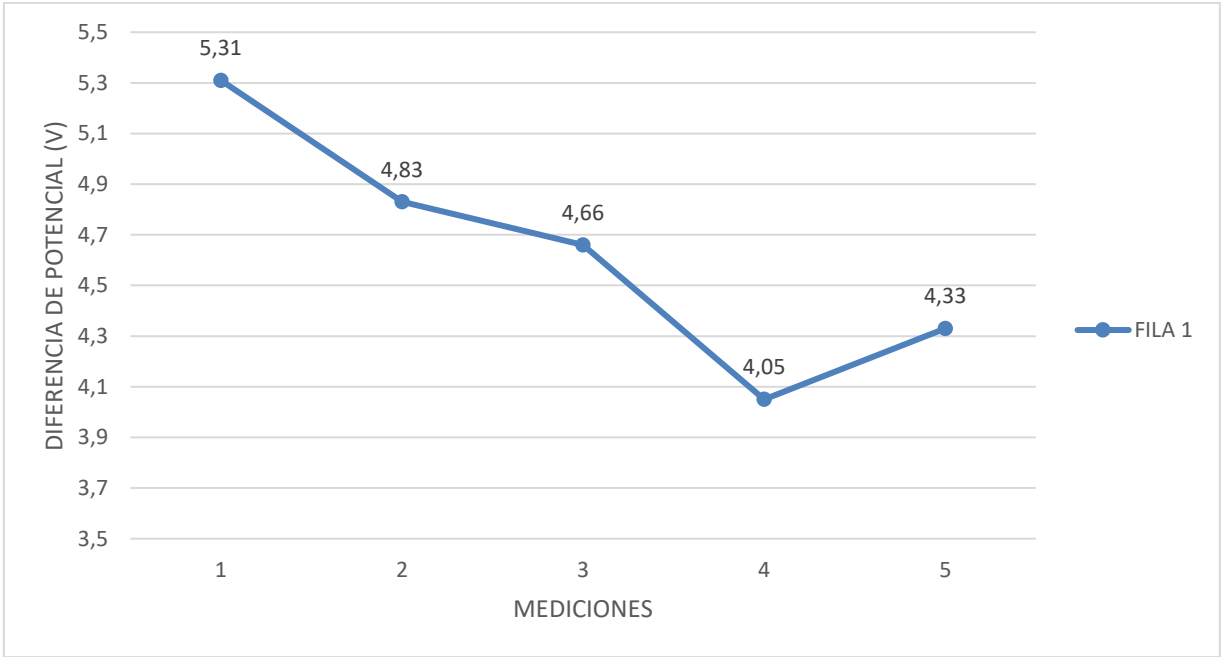
**Elaboración:** Autoras

**Tabla 8.** Intensidad de corriente eléctrica (mA) entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca.

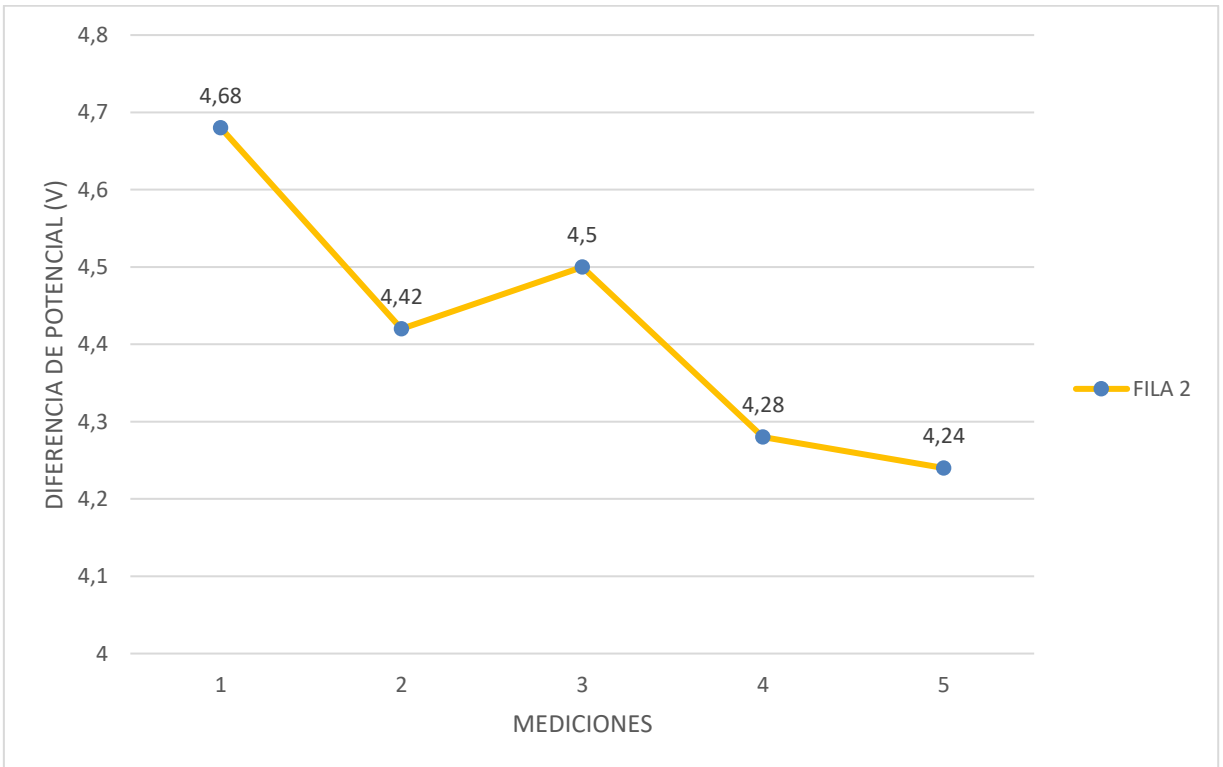
Registro	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5	Fila 6
9/4/2019	0,086	0,057	0,069	0,061	0,012	0,039
10/4/2019	0,030	0,081	0,043	0,055	0,092	0,015
11/4/2019	0,005	0,009	0,013	0,025	0,080	0,020
30/4/2019	0,015	0,019	0,030	0,018	0,020	0,039
1/5/2019	0,013	0,033	0,022	0,016	0,014	0,012

**Fuente:** Autoras

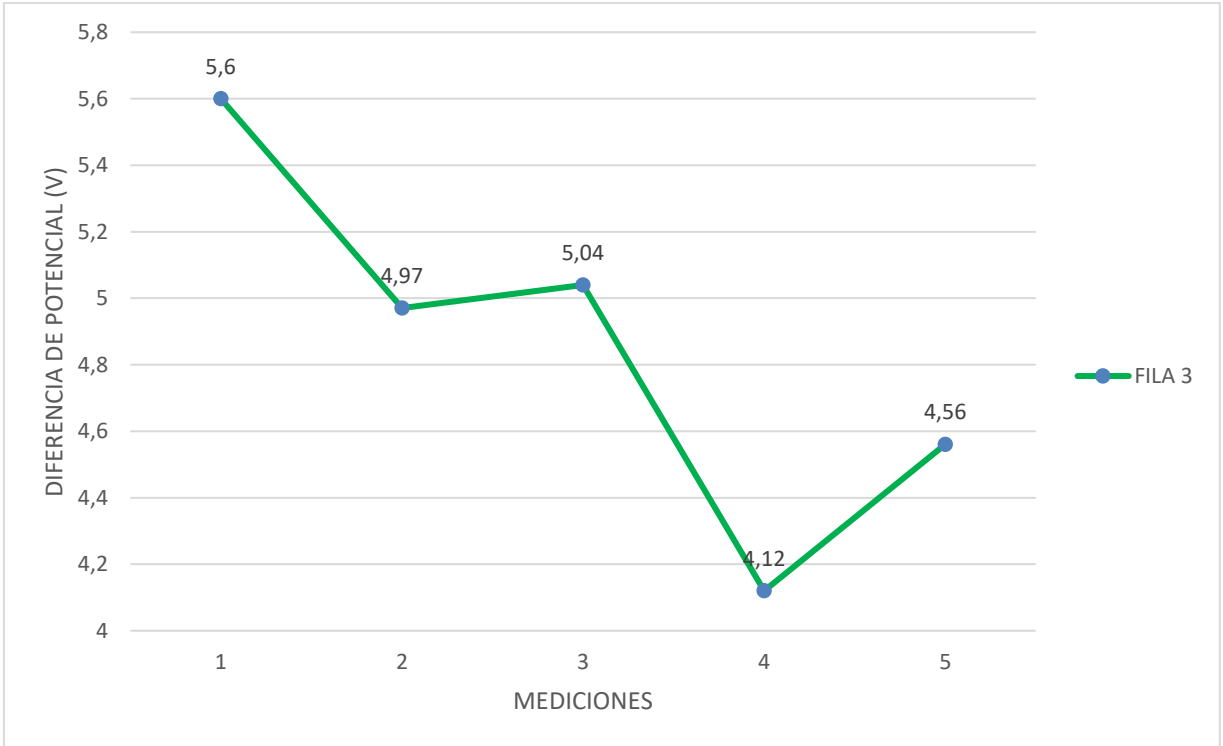
**Elaboración:** Autoras



**Figura 27.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 1  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



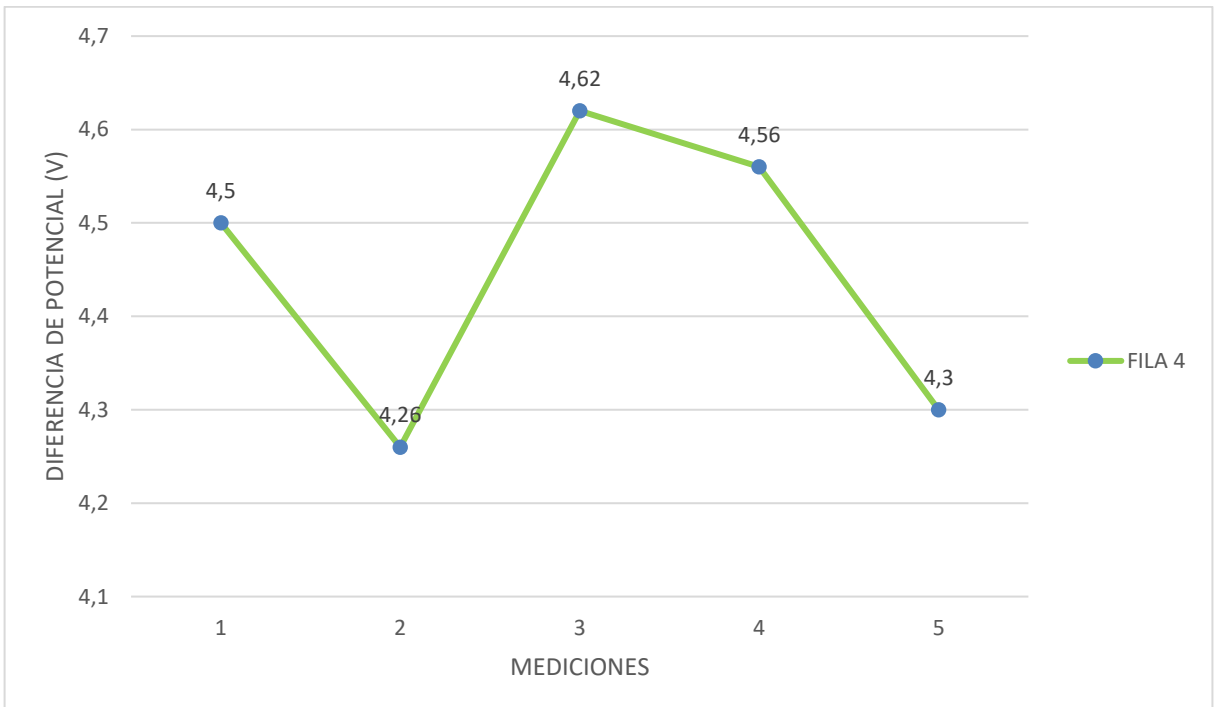
**Figura 28.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 2  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



**Figura 29.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 3

**Fuente:** Autoras

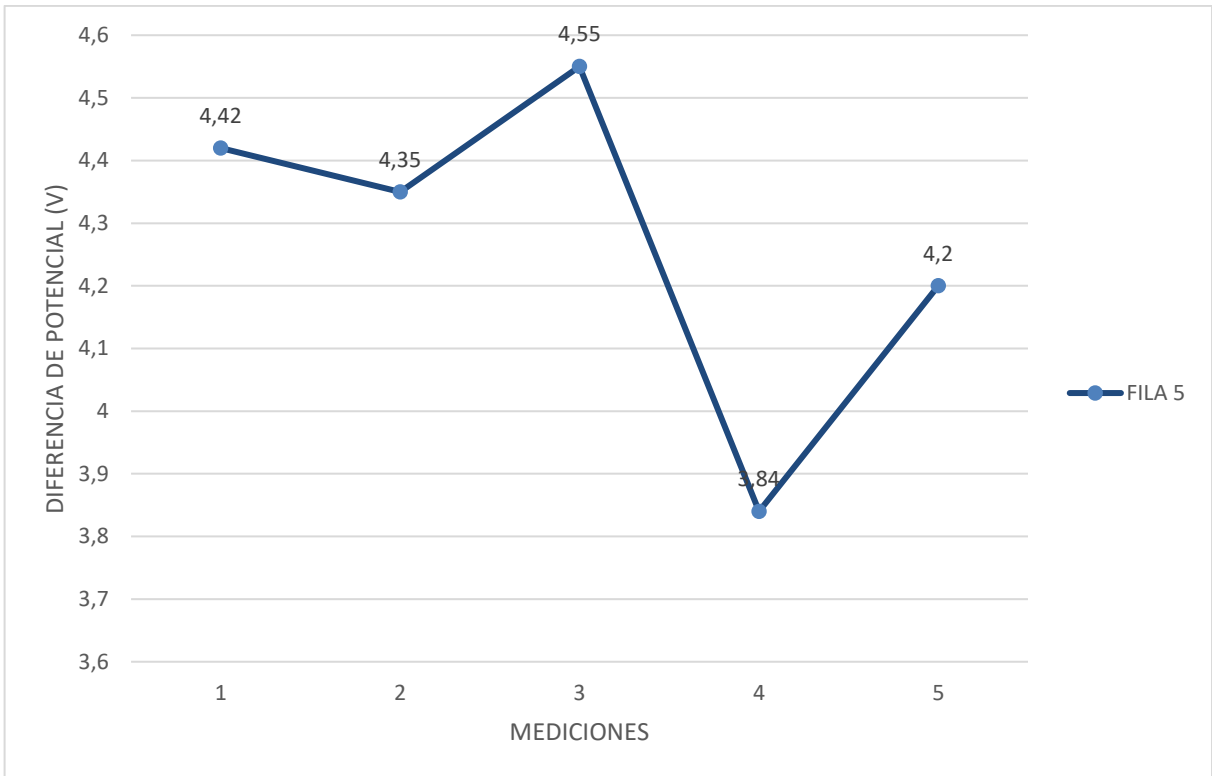
**Elaboración:** Autoras



**Figura 30.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 4

**Fuente:** Autoras

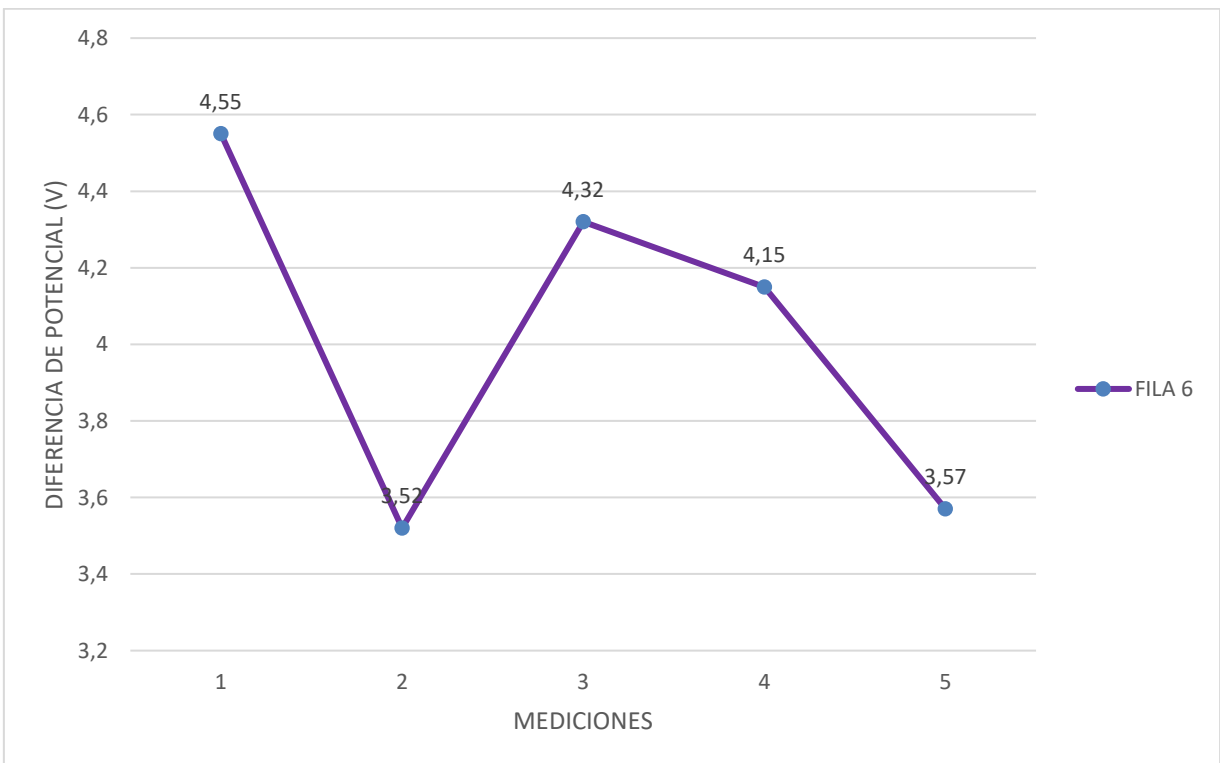
**Elaboración:** Autoras



**Figura 31.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 5

**Fuente:** Autoras

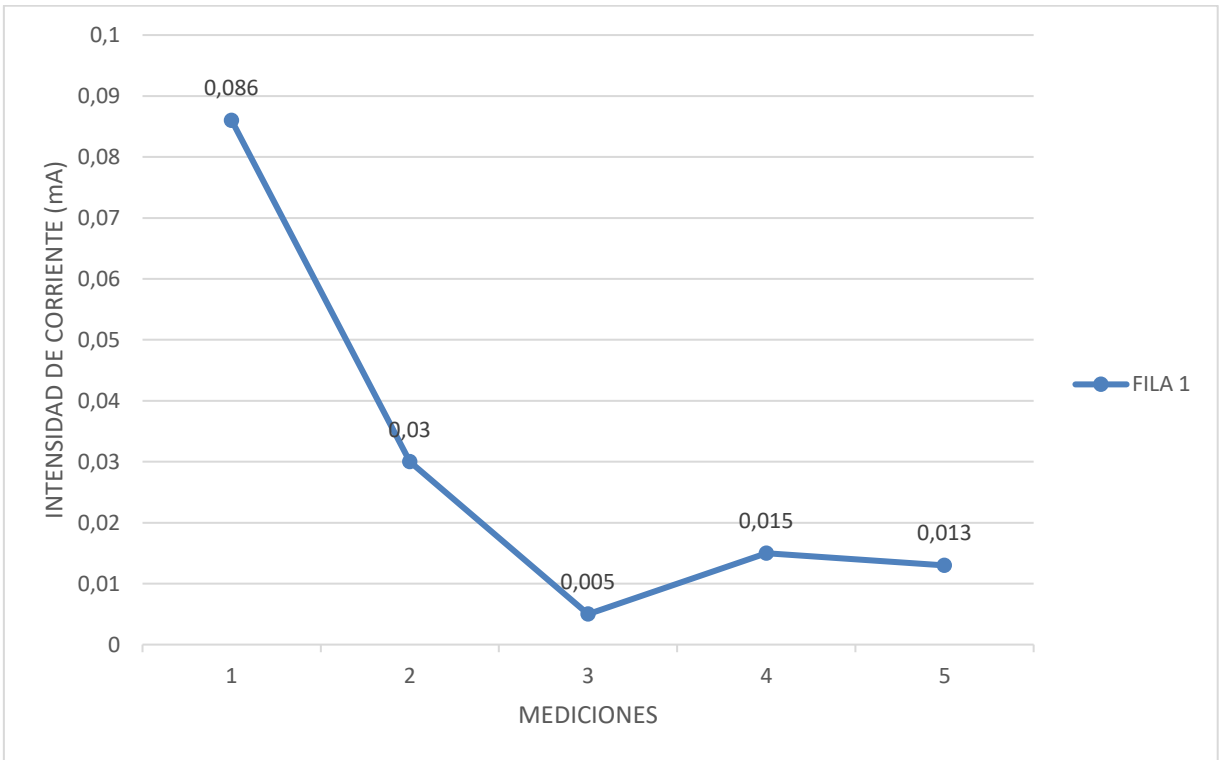
**Elaboración:** Autoras



**Figura 32.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 6

**Fuente:** Autoras

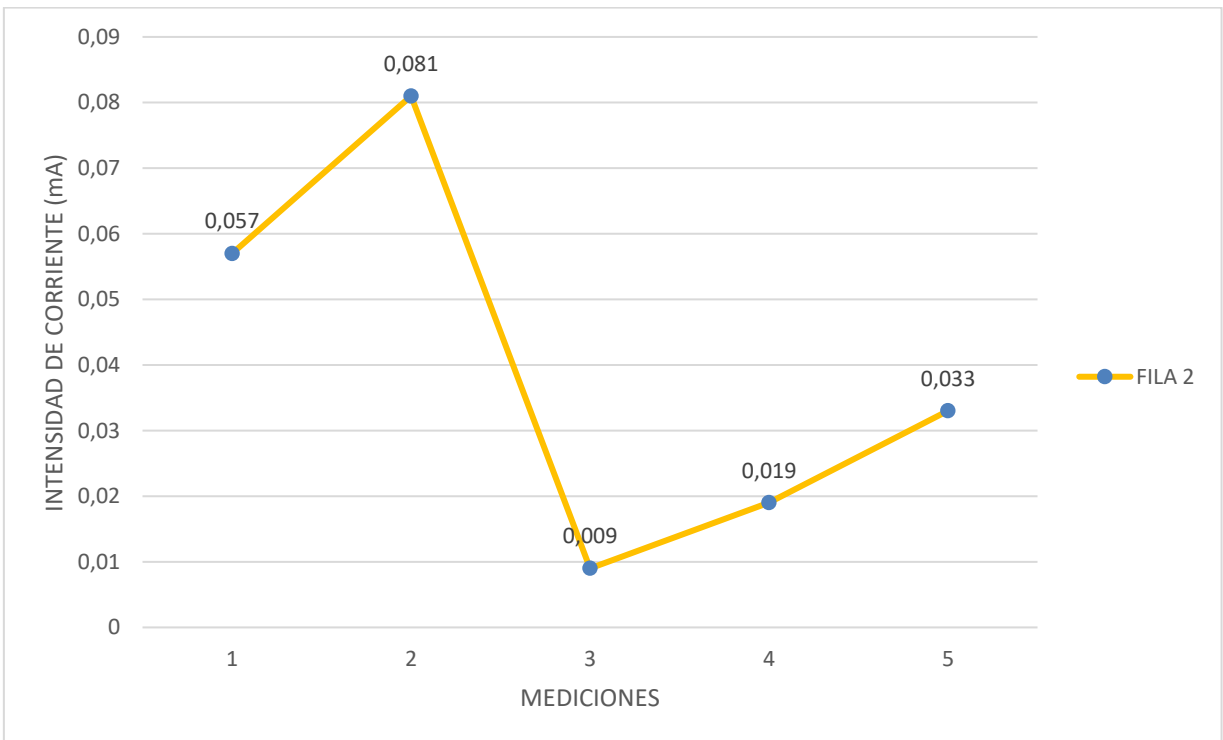
**Elaboración:** Autoras



**Figura 33.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 1.

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

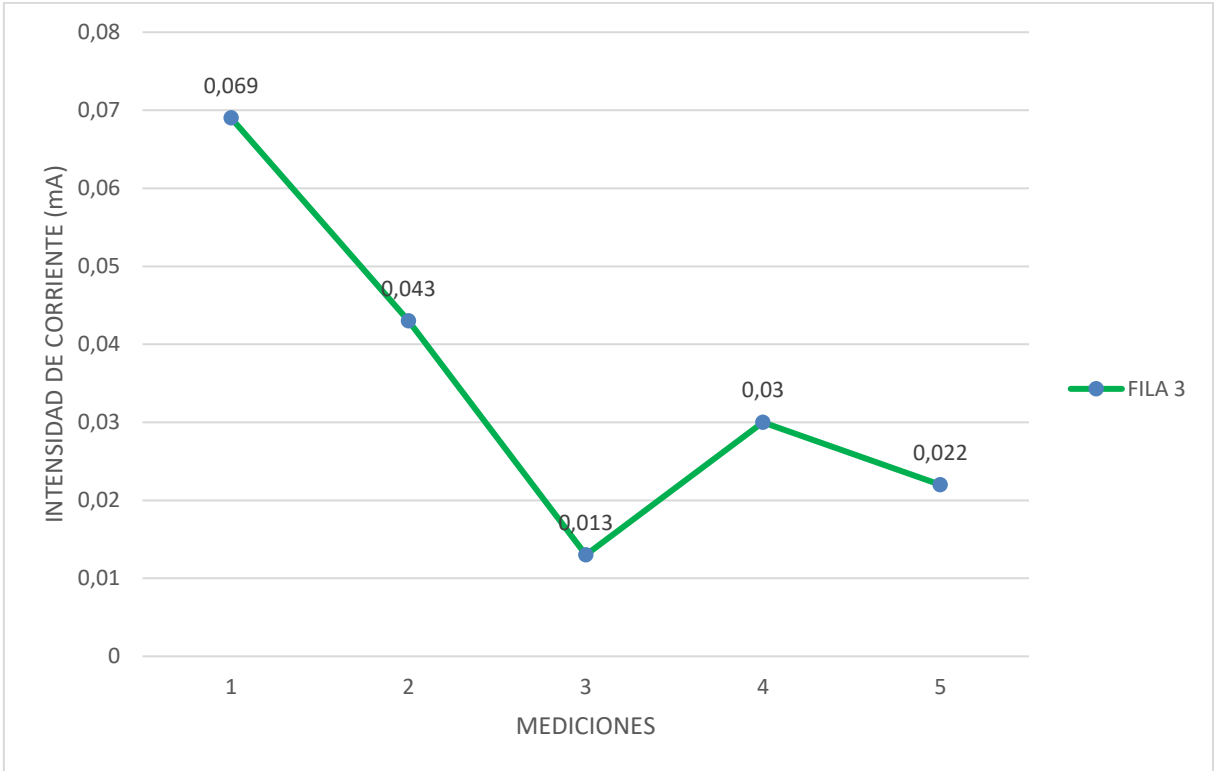


**Figura 34.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 2

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

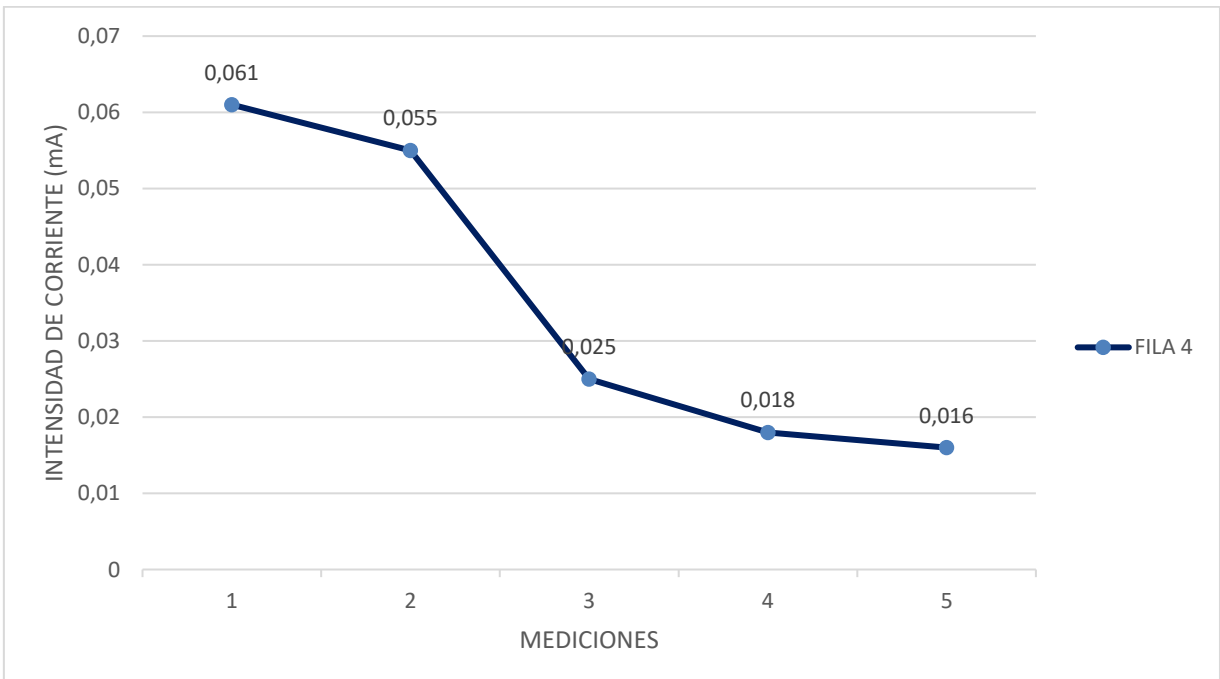




**Figura 35.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 3

**Fuente:** Autoras

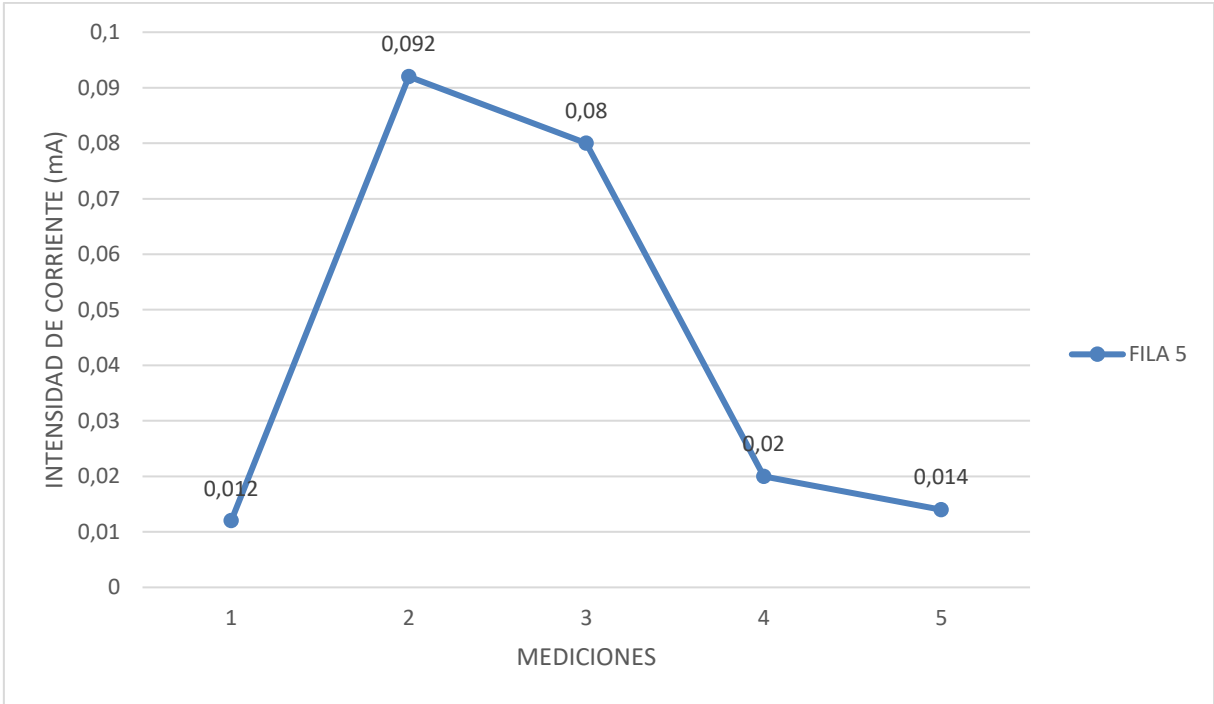
**Elaboración:** Autoras



**Figura 36.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 4

**Fuente:** Autoras

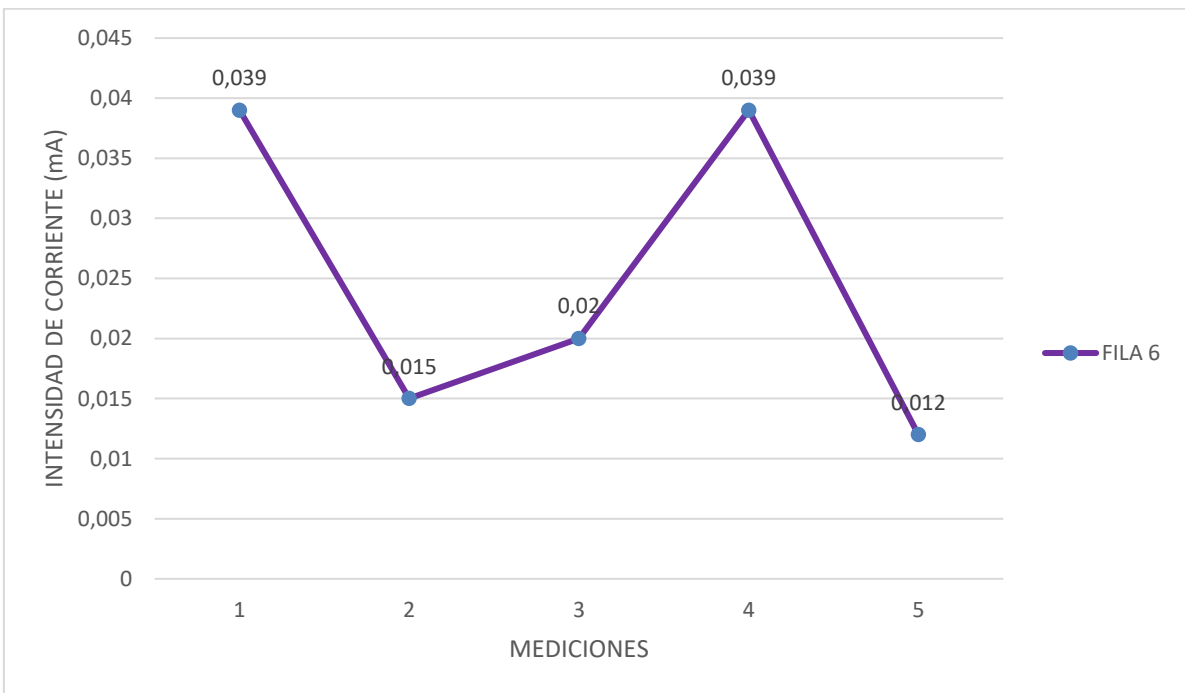
**Elaboración:** Autoras



**Figura 37.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 5

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras



**Figura 38.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, conexión en serie, tierra seca, fila 6

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

Seguidamente, se experimentó con la misma configuración de contenedores, agregándole a la tierra 30 cm<sup>3</sup> de agua. Las Tablas 9 y 10, y, las Figuras 39 a la 50 muestran los resultados obtenidos. La diferencia de potencial no registró un aumento considerable, pero si la intensidad de corriente eléctrica, sobre todo en las mediciones de los últimos días. Esto se debe a que el arreglo se encontraba a la intemperie y en esos días se presentaron lluvias en la ciudad de Loja. Esto permitió concluir que para aumentar la actividad bioeléctrica, se debe mantener la humedad de las células.

**Tabla 9.** Diferencia de potencial eléctrico (V) entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda.

Registro	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5	Fila 6
03/4/2019	4,08	4,27	4,40	4,69	4,49	4,49
12/4/2019	5,00	5,18	5,10	4,72	4,79	4,35
07/5/2019	4,02	4,69	4,77	3,96	4,35	5,36
08/5/2019	5,08	6,21	5,80	4,55	4,92	4,82
09/5/2019	5,02	5,09	5,27	4,56	4,91	4,10
14/5/2019	4,21	5,00	4,24	3,90	4,52	4,46
15/5/2019	4,44	5,09	4,87	4,30	4,53	3,59
16/5/2019	4,44	6,88	4,66	5,33	4,37	4,26

Fuente: Autoras

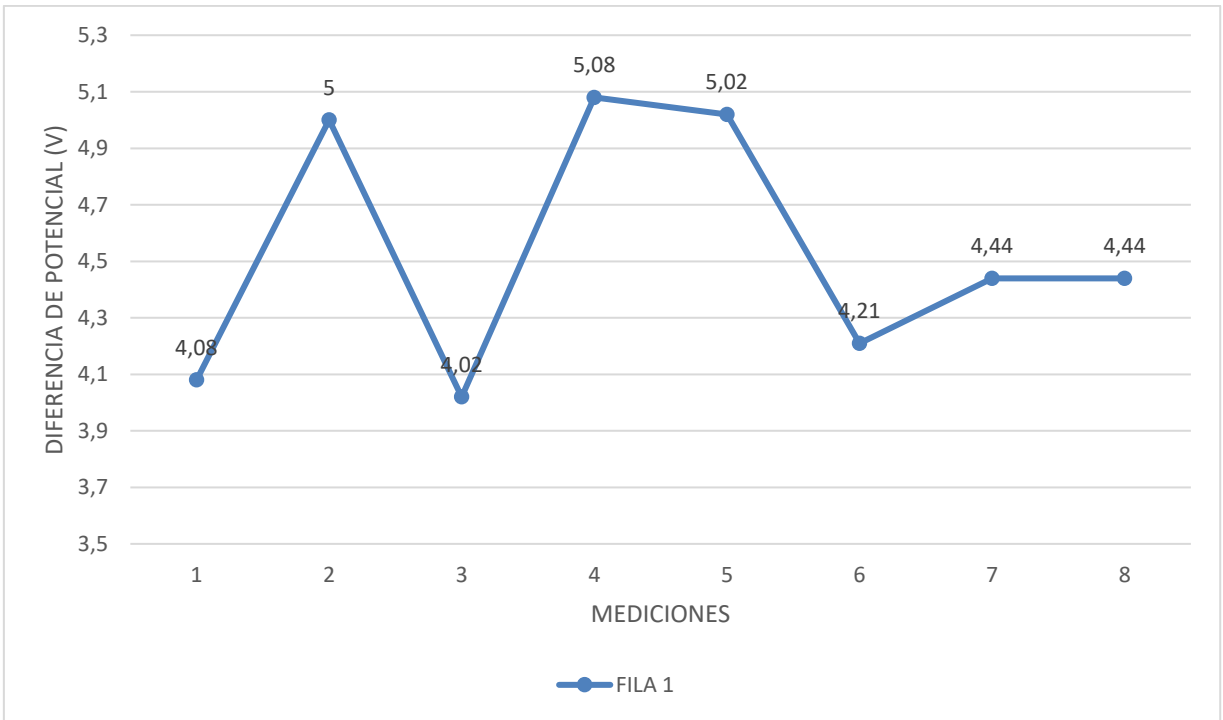
Elaboración: Autoras

**Tabla 10.** Intensidad de corriente eléctrica (mA) en el contenedor, tierra húmeda.

Registro	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5	Fila 6
3/4/2019	0,080	0,150	0,059	0,241	0,092	0,132
12/4/2019	0,037	0,054	0,040	0,049	0,072	0,022
7/5/2019	0,037	0,086	0,055	0,037	0,015	0,032
8/5/2019	0,029	0,057	0,034	0,035	0,023	0,017
9/5/2019	0,021	0,041	0,057	0,030	0,018	0,015
14/5/2019	0,015	0,019	0,019	0,010	0,018	0,014
15/5/2019	0,002	0,039	0,007	0,015	0,011	0,012
16/5/2019	0,014	0,024	0,014	0,015	0,010	0,017

Fuente: Autoras

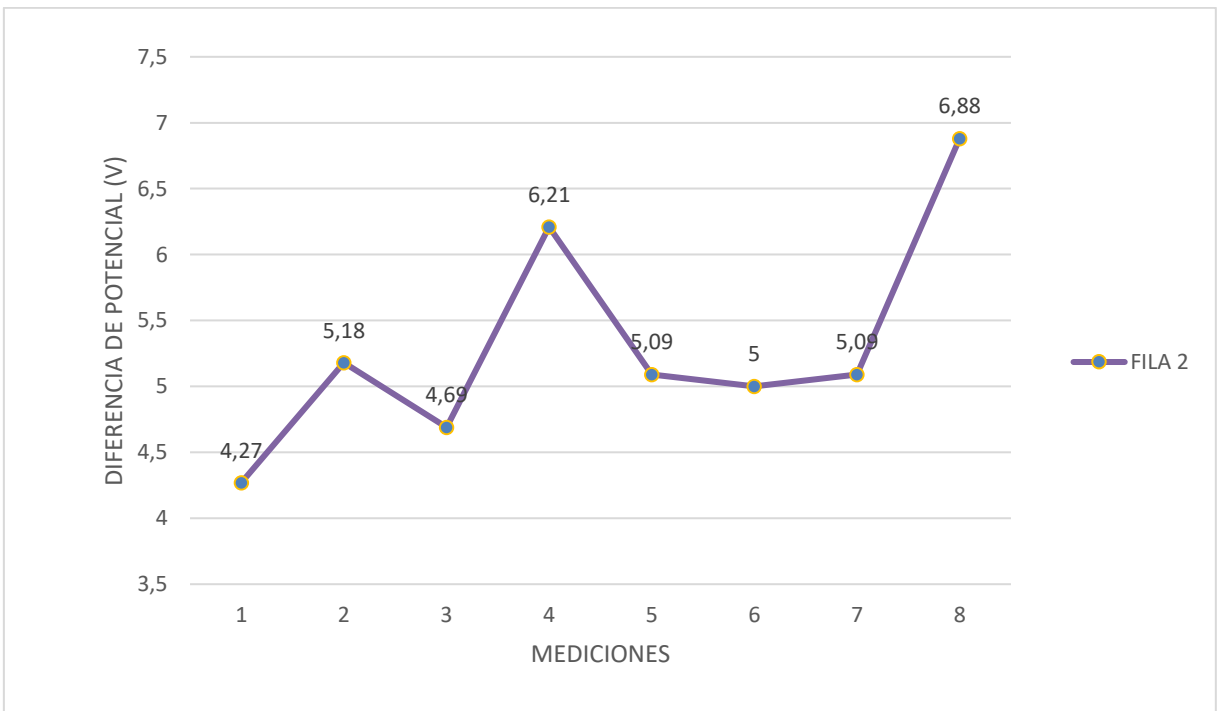
Elaboración: Autoras



**Figura 39.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 1.

**Fuente:** Autoras

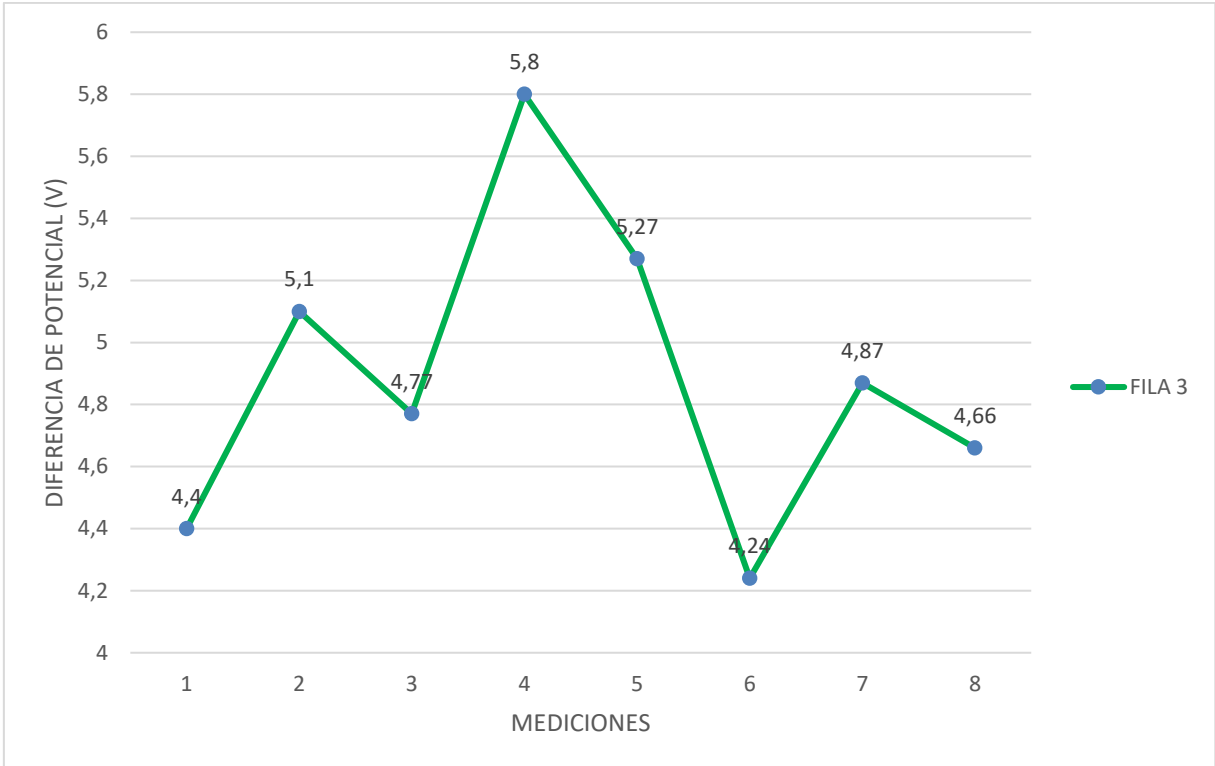
**Elaboración:** Autoras



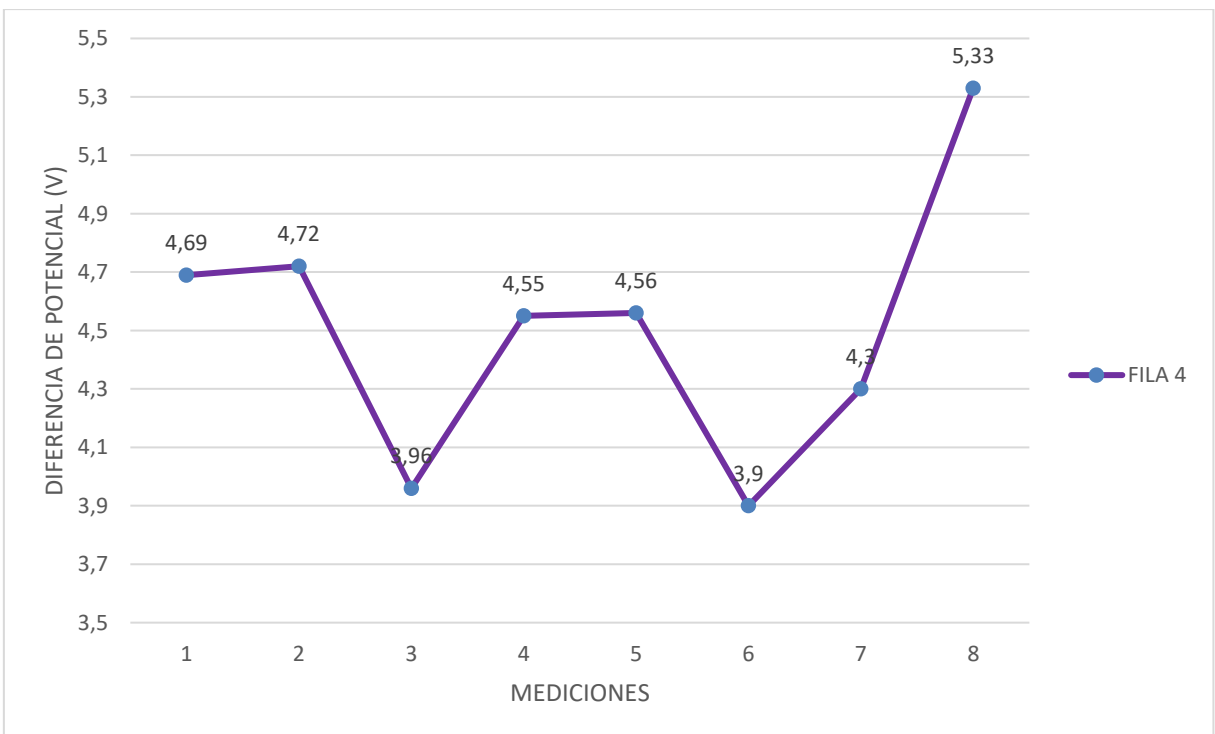
**Figura 40.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 2

**Fuente:** Autoras

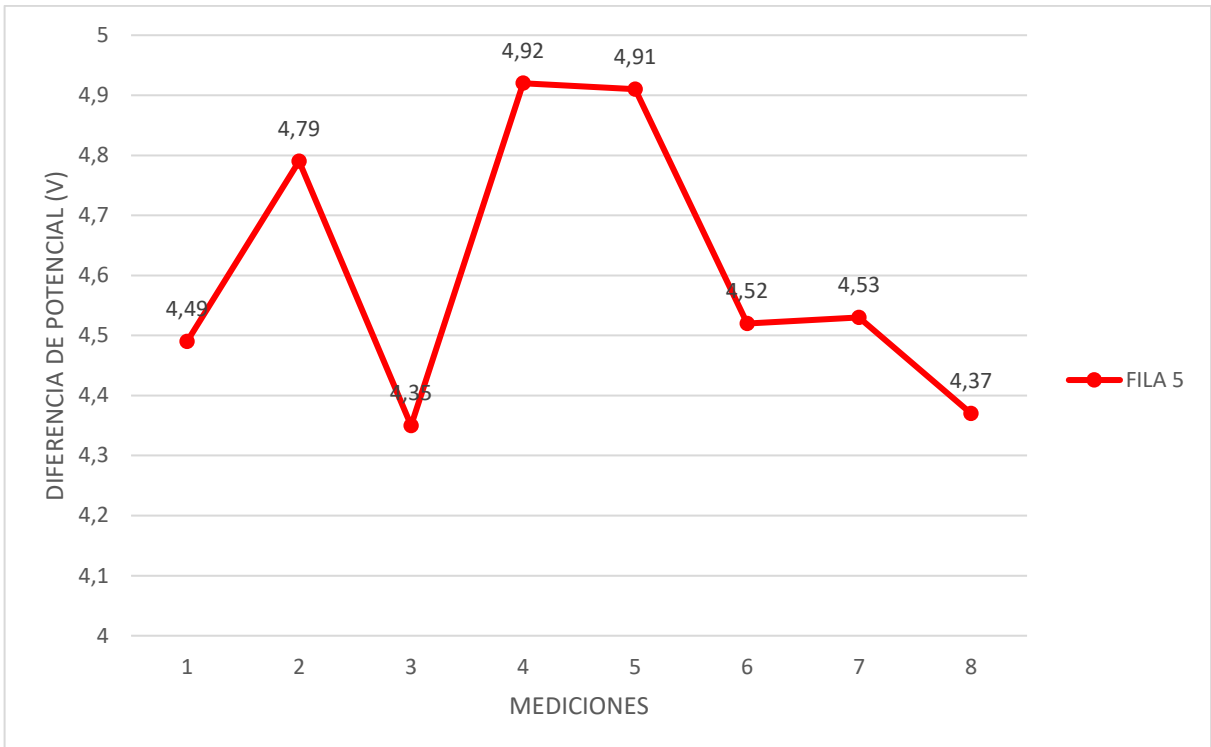
**Elaboración:** Autoras



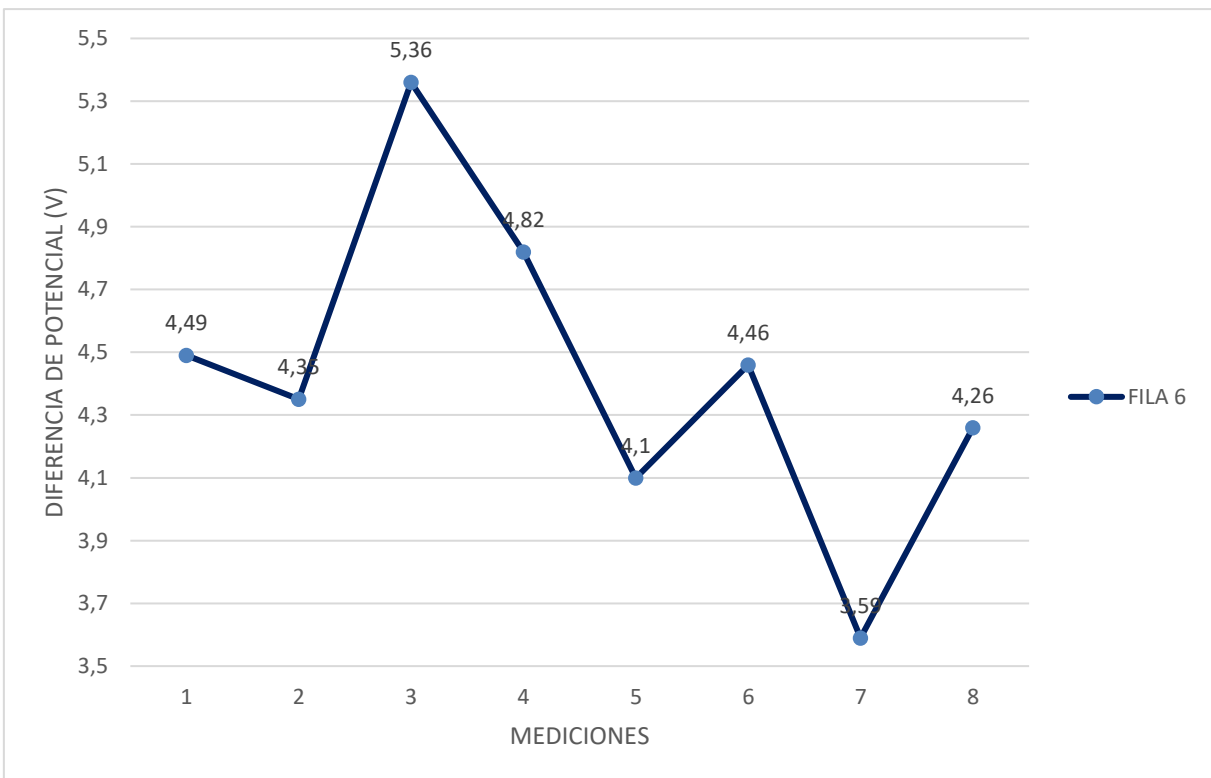
**Figura 41.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 3  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



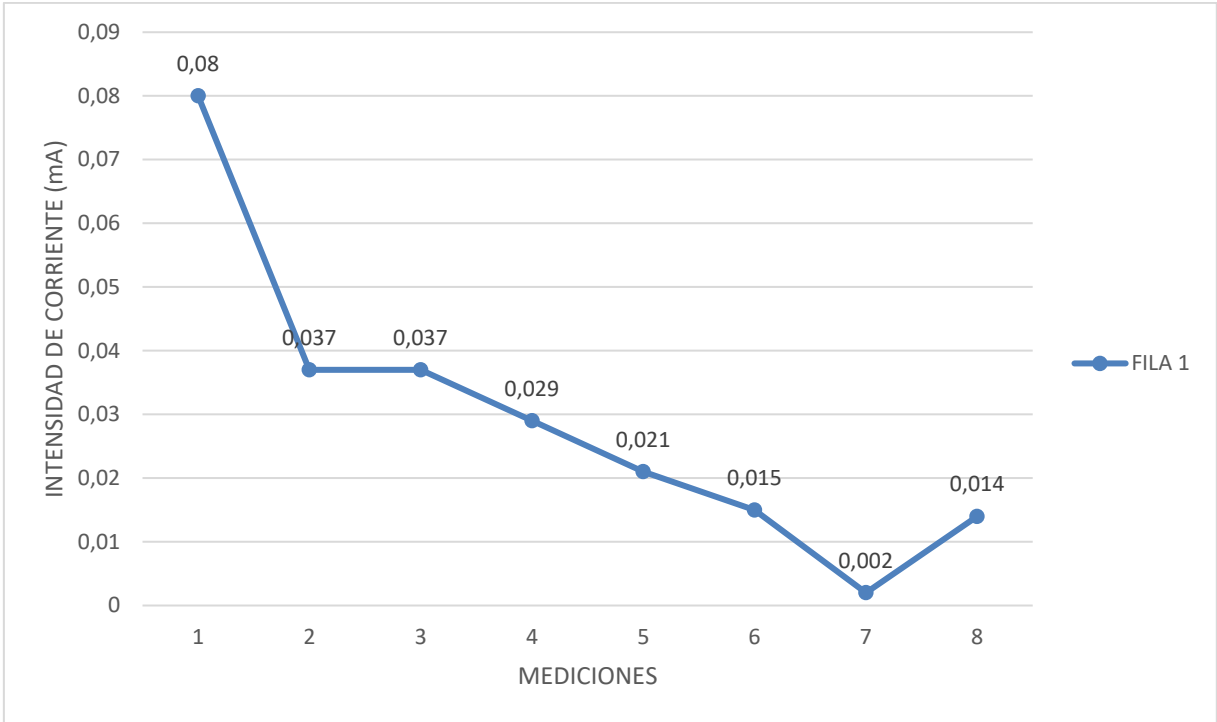
**Figura 42.** Diferencia de potencia eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 4  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



**Figura 43.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 5  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



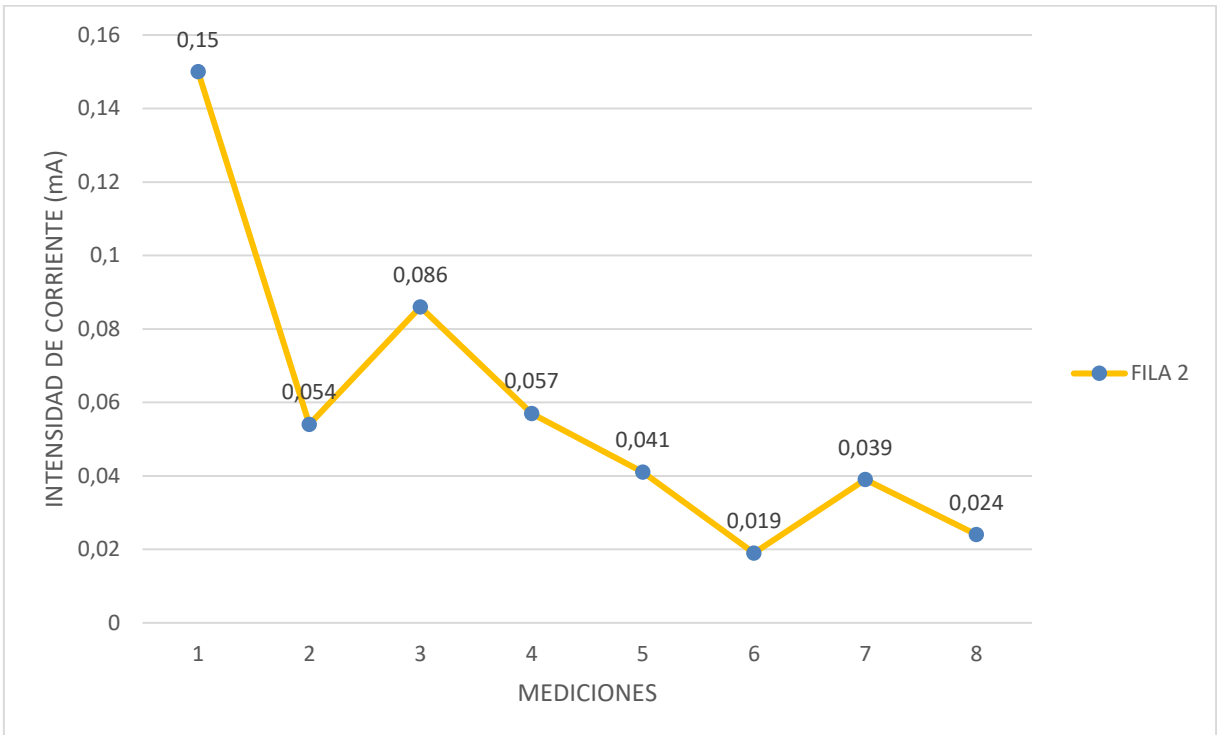
**Figura 44.** Diferencia de potencial eléctrico, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 6  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



**Figura 45.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 1.

**Fuente:** Autoras

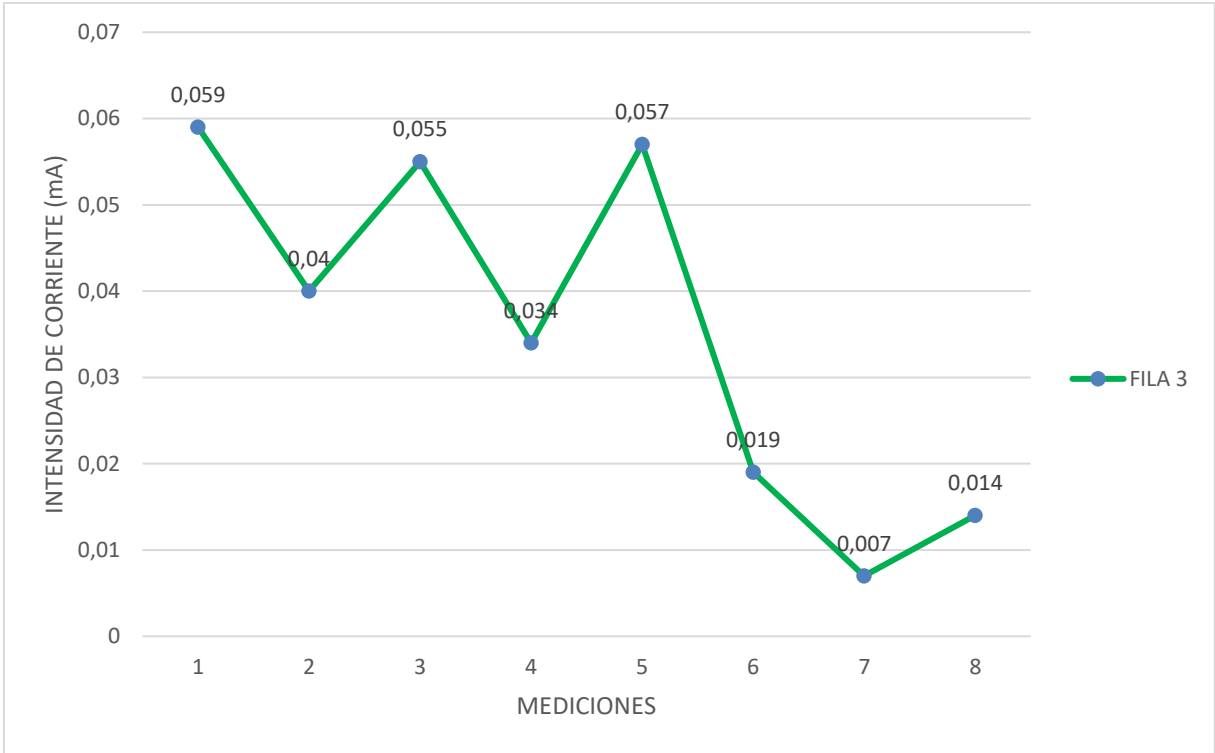
**Elaboración:** Autoras



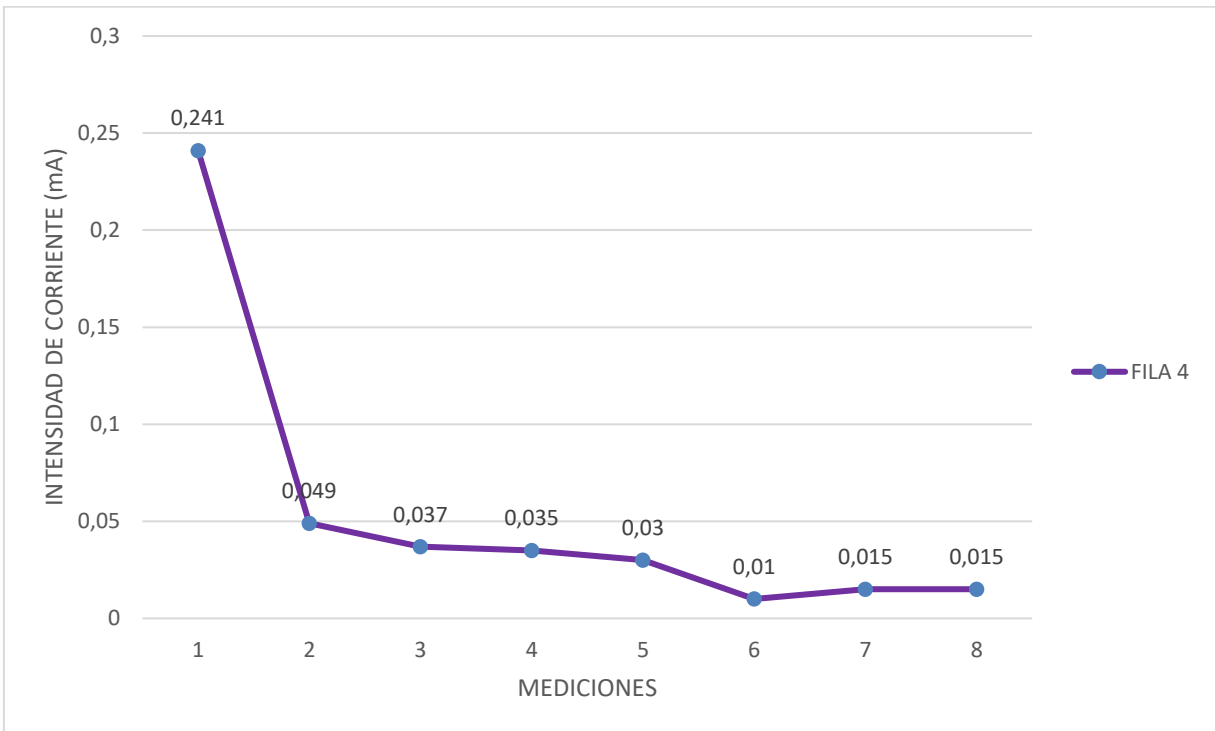
**Figura 46.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 2

**Fuente:** Autoras

**Elaboración:** Autoras

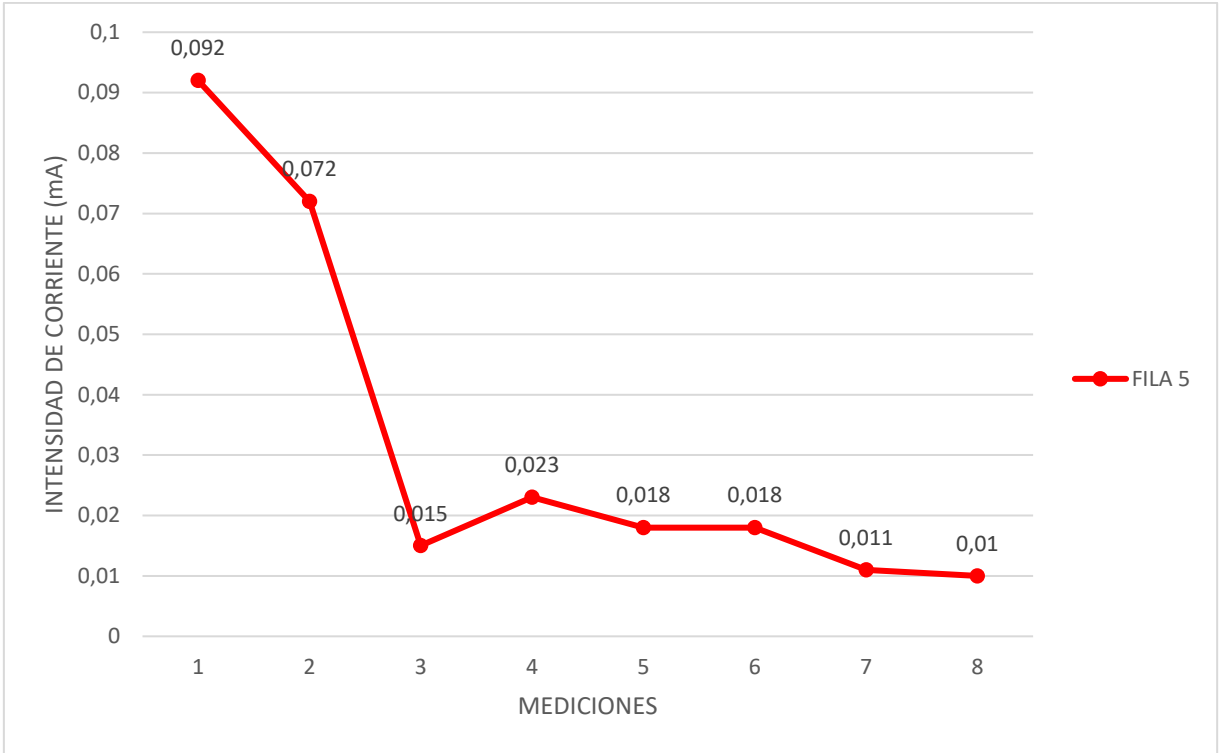


**Figura 47.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 3  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras

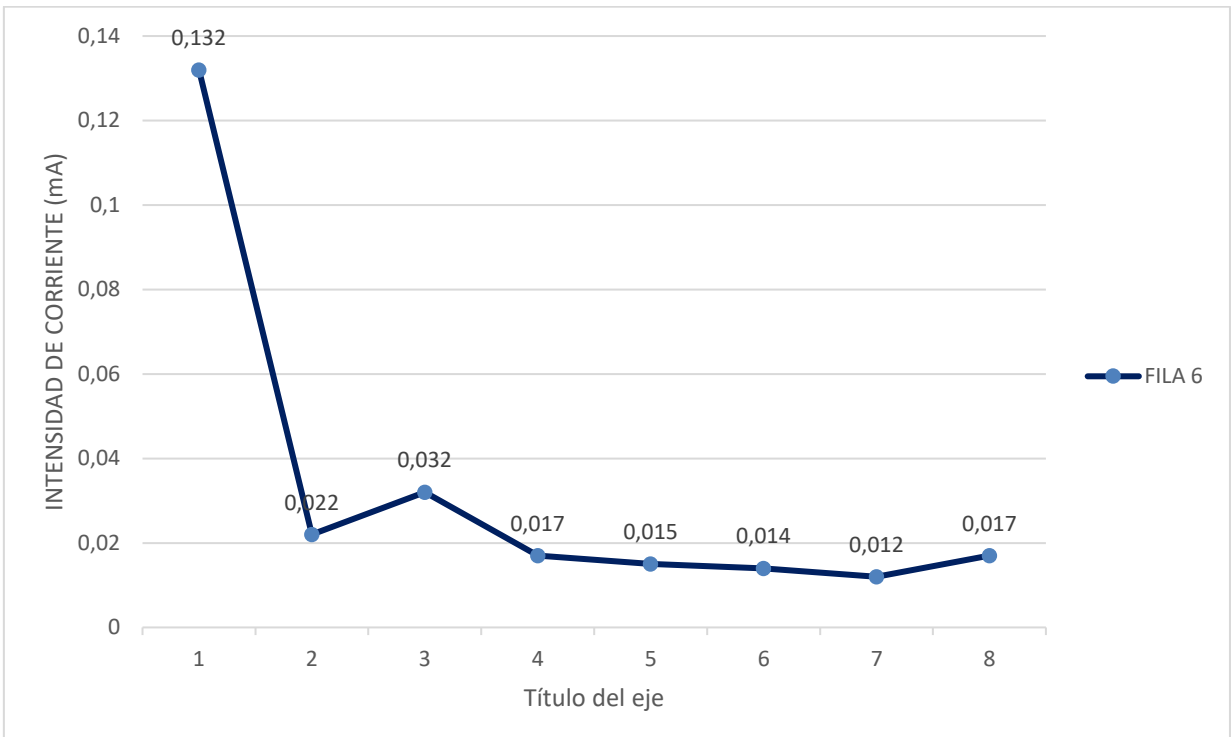


**Figura 48.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 4  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras





**Figura 49.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 5  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



**Figura 50.** Intensidad de corriente eléctrica, entre los electrodos del contenedor, tierra húmeda, fila 6  
**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras

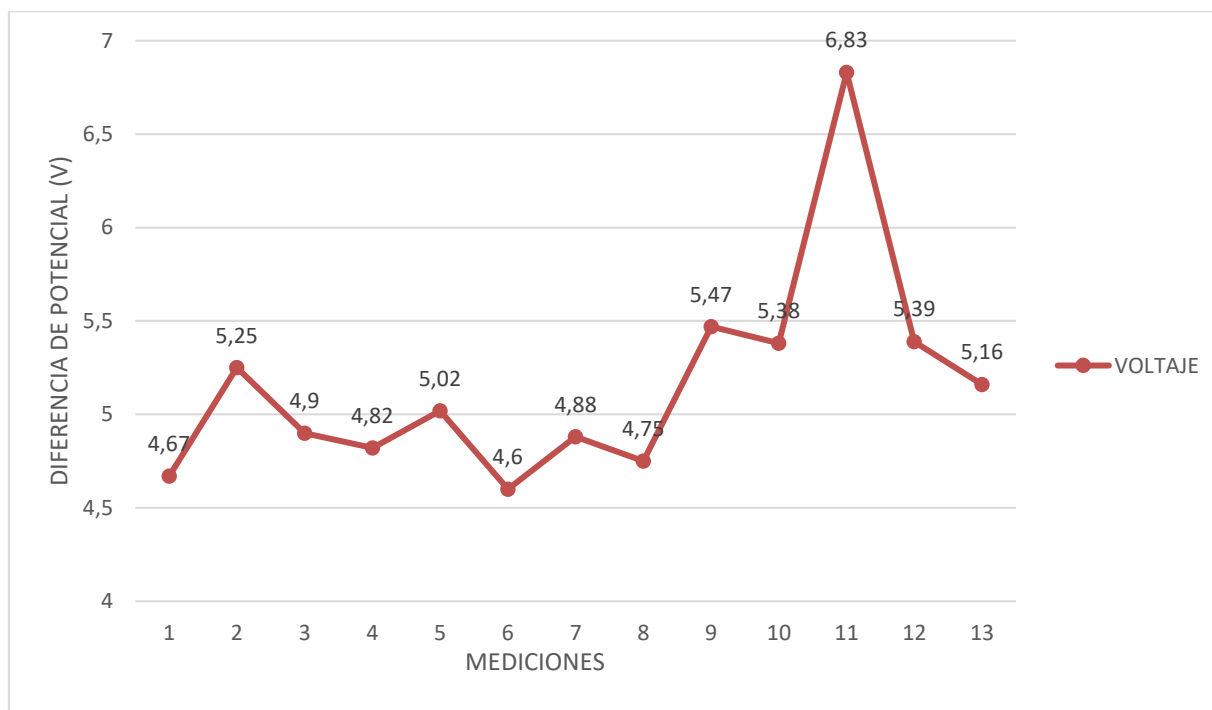
Finalmente, se experimentó con una configuración serie paralelo y una combinación de células húmedas y secas. La Tabla 11 y las Figuras 51 y 52 muestran los resultados obtenidos.

La diferencia de potencial eléctrico entre los electrodos se mantiene, pero la corriente eléctrica aumenta en 10.

**Tabla 11.** Diferencia de potencial eléctrico e intensidad de corriente eléctrica, configuración de contenedores serie – paralelo.

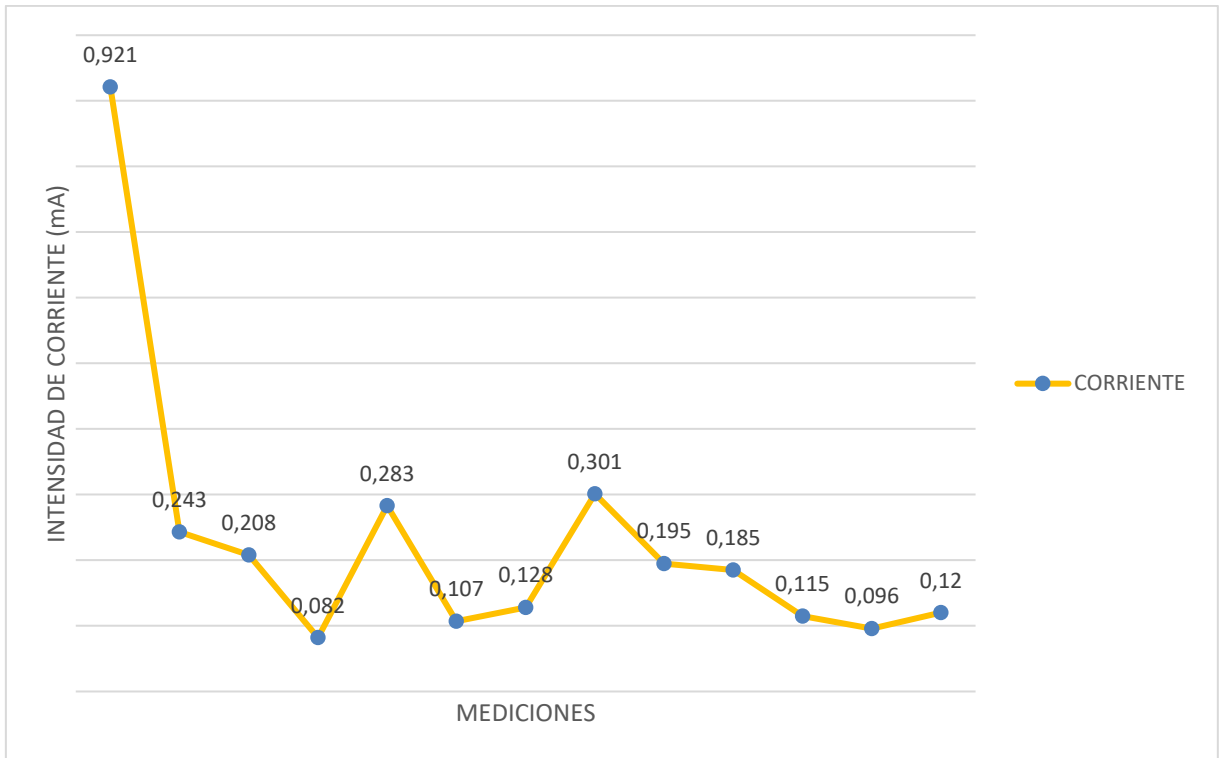
Registro	Diferencia de potencial (v)	Intensidad de corriente (mA)
03/4/2019	4,67	0,921
09/4/2019	5,25	0,243
10/4/2019	4,90	0,208
11/4/2019	4,82	0,082
12/4/2019	5,02	0,283
30/4/2019	4,60	0,107
01/5/2019	4,88	0,128
07/5/2019	4,75	0,301
08/5/2019	5,47	0,195
09/5/2019	5,38	0,185
14/5/2019	6,83	0,115
15/5/2019	5,39	0,096
16/5/2019	5,16	0,120

**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



**Figura 51.** Diferencia de potencial eléctrico, configuración de contenedores serie - paralelo.

**Fuente:** Autoras  
**Elaboración:** Autoras



**Figura 52.** Intensidad de corriente eléctrica, configuración de contenedores serie - paralelo.

**Fuente:** Autoras.

**Elaboración:** Autoras.

Con los cambios introducidos, se pudo superar la variación de la capacidad de generación a lo largo del tiempo en las células. Lo que se pudo corregir es la pérdida rápida de carga, que se presume tiene mayor relación con la capacidad de producción de electrones en las raíces. Este reto deberá ser atendido en trabajos posteriores.

## CONCLUSIONES

- En la etapa de prefactibilidad, para construir los contenedores, se seleccionó el playwood. Las pruebas posteriores, demostraron que este material en contacto con la humedad, se convierte en una membrana separadora, generando un efecto capacitivo, por lo cual fue necesario cambiar este material por plástico, dadas sus características de aislante.
- Las pruebas a detalle demostraron que una arreglo de contenedores, con una conexión en serie- paralelo de 60 contenedores, combinando tierra húmeda y seca, presentó los mejores resultados en términos de diferencia de potencial entre los electrodos e intensidad de corriente eléctrica.
- Por serendipia se demostró el rol fundamental de la humedad del suelo, en la capacidad de generación de las células.
- Lamentablemente, en este proyecto no se ha podido resolver la pérdida rápida de carga al conectar el módulo de storage de energía, asumiendo que esta situación está relacionada con la capacidad de producción de electrones en las raíces.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda que, a futuro, se experimente con opciones para aumentar la liberación de carga eléctrica en las raíces, atendiendo variables que escapan del entendimiento de un ingeniero en electrónica y telecomunicaciones.

## Bibliografía

- Admin. (2018). Baterías de litio. Retrieved from <https://www.bateriasdelitio.net/?p=1220>
- Alzate-Gaviria, L., González, K., Peraza, I., García, O., Domínguez-Maldonado, J., Vázquez, J., . . . Canto-Canché, B. (2010). Evaluación de Desempeño e Identificación de Exoelectrógenos en dos Tipos de Celdas de Combustible Microbianas Con Diferentes Configuración en el Ánodo.
- Autodesk. (2017). Autodesk 123D Design Herramienta de creación y edición 3D gratuita, potente y sencilla para impresoras 3D. Retrieved from <http://www.123dapp.com/design>
- Bretschger, O., Osterstock, J. B., Pinchak, W. E., Ishii, S. i., & Nelson, K. E. (2010). Microbial Fuel Cells and Microbial Ecology: Applications in Ruminant Health and Production Research. *Microbial Ecology*, 59(3), 415-427. doi:10.1007/s00248-009-9623-8
- Brunelli, D., Tosato, P., & Rossi, M. (2016, Oct. 30 2016-Nov. 3 2016). *Microbial fuel cell as a biosensor and a power source for flora health monitoring*. Paper presented at the 2016 IEEE SENSORS.
- Carolina, R. L. S. (2016). *Generación De Bioelectricidad Microbiana Con Estiércol De Ganado Vacuno, Mediante Celdas De Combustible Microbiano, Estación Experimental Tunshi Epoch*. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo.
- Carreon-Bautista, S., Erbay, C., Han, A., & Sanchez-Sinencio, E. (2015). An Inductorless DC&#x2013;DC Converter for an Energy Aware Power Management Unit Aimed at Microbial Fuel Cell Arrays. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(4), 1109-1121. doi:10.1109/JESTPE.2015.2398851
- Deng, H., Chen, Z., & Zhao, F. (2012). *Energy from Plants and Microorganisms: Progress in Plant-Microbial Fuel Cells* (Vol. 5).
- Electrobacters. (2016). Celdas de Combustible Microbiana: Electricidad por desechos orgánicos.
- F., Y., C., W. K., & Y., H. (2015). Energy-Neutral Communication Protocol for Very Low Power Microbial Fuel Cell Based Wireless Sensor Network. *IEEE Sensors Journal*, 15(4), 2306-2315. doi:10.1109/JSEN.2014.2377031
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., . . . Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181-5192. doi:10.1021/es0605016
- Mitchell, C. P. (2000). Development of decision support systems for bioenergy applications. *Biomass and Bioenergy*, 18(4), 265-278. doi:[https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00099-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00099-9)

- Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>
- Paña Vallejo, S. A. (2016). *Identificación y Aprovechamiento de la Cepa Pseudonoma SPP en una celda de combustible microbiano para la producción de bioelectricidad a desarrollarse en el centro de energías alternativas (ESPOCH)*. Escuela Superior Politecnica de Chimborazo Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/7870>
- Paso, E. P. P. a. (2018). Doblador de Voltaje o Tension DC a DC. Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=hbTH6HPik\\_s&t=8s](https://www.youtube.com/watch?v=hbTH6HPik_s&t=8s)
- Piyare, R., Murphy, A. L., Tosato, P., & Brunelli, D. (2017, 9-9 Oct. 2017). *Plug into a Plant: Using a Plant Microbial Fuel Cell and a Wake-Up Radio for an Energy Neutral Sensing System*. Paper presented at the 2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops).
- Rossi, M., Tosato, P., Gemma, L., Torquati, L., Catania, C., Camalò, S., & Brunelli, D. (2017, 27-31 March 2017). *Long range wireless sensing powered by plant-microbial fuel cell*. Paper presented at the Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2017.
- Tecnología, U. d. I. y. (2014). Planta Lampara. Retrieved from <https://www.utec.edu.pe/ingenio-en-accion/plantalamparas-plantas-que-dan-luz>
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86(3), 973-981. doi:10.1007/s00253-010-2440-7
- Ueoka, N., Sese, N., Sue, M., Kouzuma, A., & Watanabe, K. (2016). Sizes of Anode and Cathode Affect Electricity Generation in Rice Paddy-Field Microbial Fuel Cells. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, Vol.06No.01, 6. doi:10.4236/jsbs.2016.61002
- Wang, C.-T., Chen, W.-J., & Huang, R.-Y. (2010). Influence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by *Escherichia coli*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(13), 7217-7223. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.038>
- Wey, T. A., Southcott, M., Jemison, W. D., MacVittie, K., & Katz, E. (2014). Electrical Circuit Model and Dynamic Analysis of Implantable Enzymatic Biofuel Cells Operating In Vivo. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1795-1810. doi:10.1109/JPROC.2014.2355714

## **ANEXOS**



## LM317, NCV317

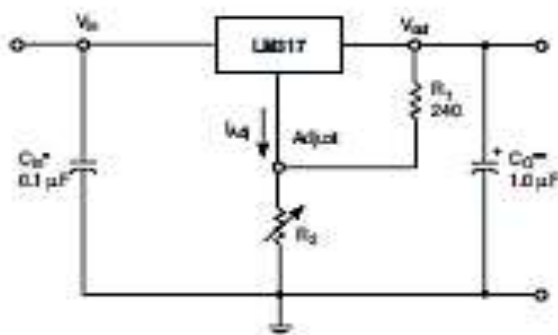
### 1.5 A Adjustable Output, Positive Voltage Regulator

The LM317 is an adjustable 3-terminal positive voltage regulator capable of supplying in excess of 1.5 A over an output voltage range of 1.2 V to 37 V. This voltage regulator is exceptionally easy to use and requires only two external resistors to set the output voltage. Further, it employs internal current limiting, thermal shutdown and safe area compensation, making it essentially blow-out proof.

The LM317 serves a wide variety of applications including local, on card regulation. This device can also be used to make a programmable output regulator, or by connecting a fixed resistor between the adjustment and output, the LM317 can be used as a precision current regulator.

#### Features

- Output Current in Excess of 1.5 A
- Output Adjustable between 1.2 V and 37 V
- Internal Thermal Overload Protection
- Internal Short Circuit Current Limiting Constant with Temperature
- Output Transistor Safe-Area Compensation
- Floating Operation for High Voltage Applications
- Available in Surface Mount D<sup>2</sup>PAK-3, and Standard 3-Lead Transistor Package
- Eliminates Stocking many Fixed Voltages
- Pb-Free Packages are Available



\*  $C_{in}$  is required if regulator is located an appreciable distance from power supply filter.  
 \*\*  $C_O$  is not needed for stability; however, it does improve transient response.

$$V_{out} = 1.25 \text{ V} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = I_{adj} R_2$$

Since  $I_{adj}$  is controlled to less than 100  $\mu\text{A}$ , the error associated with this term is negligible in most applications.

Figure 1. Standard Application



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>



D<sup>2</sup>PAK-3  
 D2T SUFFIX  
 CASE 938

Heatbink surface (shown as terminal 4 in case outline drawing) is connected to Pin 2.



TO-220  
 T SUFFIX  
 CASE 221A

Pin 1 Adjust  
 Pin 2  $V_{out}$   
 Pin 3  $V_{in}$

Heatbink surface connected to Pin 2.

#### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 10 of this data sheet.

#### DEVICE MARKING INFORMATION

See general marking information in the device marking section on page 10 of this data sheet.