

Sistema de control para la recuperación de energía a partir de celdas de combustible microbica
para la alimentación de dispositivos de baja potencia

Bastidas Guerrero Helmer Danilo
Chazatar Guerrero David Sebastián

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto
2022

Sistema de control para la recuperación de energía a partir de celdas de combustible
microbica para la alimentación de dispositivos de baja potencia

Bastidas Guerrero Helmer Danilo
Chazatar Guerrero David Sebastián

Asesor: Carlos Criollo

Informe Final de Trabajo de Grado Presentado al Comité Curricular del Programa de
Ingeniería Electrónica para optar por el título de Ingeniero Electrónico.

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad CESMAG para optar al título de Ingeniero Electrónico.

CARLOS CRIOLLO

Asesor

FRANCISCO ERASO

Jurado

JENNY ALEJANDRA MERA CÓRDOBA

Jurado

San Juan de Pasto, junio de 2022

PÁGINA DE NOTA DE EXCLUSIÓN DE RESPONSABILIDAD INTELECTUAL

“El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusivamente responsabilidad de su autor y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG”

Contenido

Introducción.....	11
1. El Problema de Investigación.....	13
1.1 Objeto o tema de investigación.....	13
1.2 Línea de Investigación.....	13
1.3 Sub-línea de Investigación.....	13
1.4 Descripción o Planteamiento del Problema.....	13
1.5 Formulación del Problema.....	14
1.6 Objetivos.....	14
1.6.1 Objetivo General.....	14
1.6.2 Objetivos Específicos.....	14
1.7 Justificación.....	15
1.8 Delimitación.....	15
2. Tópicos del marco teórico.....	17
2.1 Antecedentes.....	17
2.2 Enunciados de los supuestos teóricos.....	21
2.2.1 Celdas de combustible microbicas.....	21
2.2.2 Sistema de control.....	24
2.2.3 Sistemas de almacenamiento.....	25
2.2.4 Conversor elevador DC-DC Boost.....	26
2.3 Definición de conceptos.....	27
2.3.1 Índices que influyen en el rendimiento de una MFC.....	27
2.4 Hipótesis.....	28
3. Metodología.....	29
3.1 Enfoque.....	29

3.2	Paradigma.....	29
3.3	Método	29
3.4	Tipo de investigación	29
3.5	Diseño de investigación	29
3.6	Población.....	30
3.7	Muestra.....	30
3.8	Técnicas de recolección de información	30
3.9	Instrumentos de recolección de información	30
4.	Resultados.....	32
4.1	Caracterización de la celda de combustible microbica.	32
4.2	Construcción de la celda de combustible microbica.	32
4.2.1	MFC 500 ml.....	32
4.2.2	MFC 300 ml.....	33
4.2.3	MFC 500 ml combinada.	34
4.3	Implementación de la etapa de recuperación de energía.	35
4.3.1	Recuperador de energía.	36
4.3.2	Elevadores de voltaje.....	37
4.3.3	Sistema de control.	37
4.4	Etapa de recolección de información.	38
4.4.1	Comportamiento de la celda de 500 ml.	39
4.4.2	Comportamiento de la celda de 300 ml.	39
4.4.3	Comportamiento de la celda de 500 ml combinada.	39
4.4.4	Algoritmo P&O.	39
4.4.5	Inicialización del algoritmo de recuperación de energía.	40
4.4.6	Etapa de recuperación de energía.	42

4.4.7	Visualización de datos	43
4.5	Resultados del experimento.	43
4.5.1	Medidas en Circuito Abierto	43
4.5.2	Medidas con carga.	45
4.5.3	Circuito recuperador de energía básico.	46
4.5.4	Circuito recuperador de energía mejorado.	49
4.5.5	Interpretación de Datos.....	55
	Conclusiones.....	64
	Recomendaciones	66
	Referencias	67
	Anexos.....	70
	Anexo 1. Inicialización.....	70
	Anexo 2. Código recuperador de energía en Arduino.	72
	Anexo 3. Código recuperador de energía en Matlab.....	75

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Antecedente</i>	17
Figura 2. <i>Celda antecedente.</i>	18
Figura 3. <i>Variables de una MFC.</i>	19
Figura 4. <i>Diagrama de bloques antecedente.</i>	20
Figura 5. <i>Características de los componentes.</i>	21
Figura 6. <i>Celda de combustible micróbica.</i>	22
Figura 7. <i>Sustratos.</i>	23
Figura 8. <i>Modelo sistema de control.</i>	25
Figura 9. <i>Circuito Boost DC-DC.</i>	26
Figura 10. <i>MFC 500 ml doble cámara.</i>	33
Figura 11. <i>MFC 300 ml doble cámara.</i>	33
Figura 12. <i>MFC 500 ml doble cámara combinada.</i>	34
Figura 13. <i>Sistema recuperador de energía.</i>	35
Figura 14. <i>Recuperador de energía.</i>	36
Figura 15. <i>Elevador Boost.</i>	37
Figura 16. <i>Sistema Recuperador de Energía.</i>	38
Figura 17. <i>Inicialización del algoritmo de recuperación de energía.</i>	40
Figura 18. <i>Funciones de encendido.</i>	41
Figura 19. <i>Importar datos.</i>	43
Figura 20. <i>Conexión del recuperador de energía.</i>	47
Figura 21. <i>Comparador de voltaje.</i>	49
Figura 22. <i>Circuito recuperador de energía mejorado.</i>	49
Figura 23. <i>Distribución del circuito recuperador de energía.</i>	50
Figura 24. <i>Sistema recuperador de energía.</i>	51
Figura 25. <i>Sistema de recuperación de energía en funcionamiento.</i>	52
Figura 26. <i>Comportamiento del potenciómetro.</i>	56
Figura 27. <i>Comportamiento Voltaje y Corriente de Entrada.</i>	57
Figura 28. <i>Comportamiento del Voltaje y Corriente Salida.</i>	57
Figura 29. <i>Batería de Litio.</i>	60

Figura 30. *Batería GPS ST310U*. 62

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Registro voltaje día 1 sin carga.</i>	44
Tabla 2. <i>Toma de datos de voltaje sin carga.</i>	44
Tabla 3. <i>Registro voltaje día 1 con carga.</i>	45
Tabla 4. <i>Toma de datos con carga o entrada al controlador.</i>	46
Tabla 5. <i>Cálculo del valor relativo.</i>	54
Tabla 6. <i>Toma de datos salida del controlador.</i>	55
Tabla 7. <i>Cálculo de eficiencias.</i>	58

Introducción

Las celdas de combustible microbicas (MFC) son una tecnología innovadora que ayudará a mitigar algunas problemáticas que vive la sociedad actualmente: una de ellas sería la crisis energética ya que, debido al crecimiento de la población mundial se aumenta el consumo de energías fósiles, lo cual incrementa las emisiones de CO_2 afectando drásticamente el medio ambiente (Martínez Austria, 2001).

La celda de combustible microbica se encarga de producir energía eléctrica mediante la degradación de materia orgánica presente en aguas residuales, el desarrollo de dicha celda puede ser exitoso debido a que en el entorno existe una gran variedad de sustratos y microorganismos empleados como combustible para las MFC (Pant et al., 2010) que se encuentran de forma abundante y natural en material de desecho de rellenos sanitarios, sedimentos de ríos, sedimentos marinos, material orgánico y muchas otras fuentes (Fuentes-Albarrán et al., 2012).

La MFC se compone de un ánodo y un cátodo contenidos en un recipiente apropiado, separados por una membrana conductora cuya función es transportar los electrones producidos en el interior de la celda hacia un sistema de control (Martínez et al., 2015). A lo largo de la investigación se deduce que para alcanzar el máximo punto de transferencia de potencia (MPPT) se contará con un sistema de control gobernado por un microcontrolador, cuya función es acoplar la impedancia de la celda de combustible microbica y el circuito de recuperación de energía para lograr el MPPT deseado, dicha energía pasará por un circuito elevador para así suministrar un potencial estable que puede ser aprovechado en dispositivos de baja potencia o bajo consumo. Un sistema de control eficiente debe contar como mínimo con dos interruptores semiconductores (mosfet, diodo) y también con elementos de almacenamiento de energía (capacitores, baterías, supercondensadores) (H. H. Wang et al., 2017).

Por lo anterior, se implementó un sistema de control cosechador de energía basado en un controlador de histéresis, capaz de recolectar la mayor cantidad de energía entregado por las MFC manteniendo el MPPT durante la vida útil de la celda y a su vez convertir la energía para ser aprovechada en dispositivos de baja potencia. Como dice Meehan et al., (2011) en su investigación “una celda produce menos de 2mA”, en la investigación se conectó cuatro celdas en serie, se obtuvo un voltaje por debajo a los 2v conectado a una carga de $1k\Omega$ obteniendo una corriente promedio menor a 15mA. De acuerdo a los resultados obtenidos si se desea alimentar una carga

que requiera de mayor consumo, se necesita una configuración serie-paralelo capaz de aumentar la potencia producida por las celdas.

De acuerdo a lo anterior, el propósito de la investigación es determinar si la energía suministrada por el recuperador es aprovechable para la alimentación de dispositivos de bajo consumo.

1. El Problema de Investigación

1.1 Objeto o tema de investigación

Sistema de control para la recuperación de energía a partir de una celda de combustible microbica para alimentación de dispositivos de baja potencia.

1.2 Línea de Investigación

Potencia y Energía.

El área de Potencia y Energía del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad CESMAG enfoca su trabajo en el estudio de la generación, transformación, intercambio, transporte, distribución, almacenamiento y consumo de energía eléctrica de manera absoluta o por unidad de tiempo, incluyendo el diseño, análisis, control y optimización de sistemas de electrónica de potencia. Las líneas de investigación incluyen Calidad de la Energía y Energías Alternativas (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015, p. 67).

1.3 Sub-línea de Investigación

Energías Alternativas. Energías Limpias.

Las energías alternativas son aquellas que se obtienen mediante procesos alternativos a los tradicionales (quema de combustibles fósiles o en el caso de Colombia la hidroeléctrica a gran escala), estas se dividen en renovables o limpias, las cuales se obtienen de fuentes naturales capaces de regenerarse de manera más rápida de lo que se consumen o ser virtualmente infinitas; y en no renovables cuya fuente se consume más rápido de lo que se regenera pero que a diferencia las fuentes tradicionales el impacto ambiental es menor (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015, p. 67).

1.4 Descripción o Planteamiento del Problema

Un reto para el siglo 21 es mitigar el efecto invernadero con la implementación de energías alternativas, entre ellas la producción de energía a partir de la degradación de materia orgánica, si no se implementa un sistema de control eficiente capaz de extraer la mayor cantidad de energía producida por las MFC se desaprovecharía el potencial de esta tecnología. Las celdas de

combustible microbiano (MFC microbial fuel cells siglas en inglés) se encargan de oxidar materia orgánica y producir energía eléctrica que será aprovechada en diversas aplicaciones, otro beneficio de las celdas de combustible microbicas es la depuración de aguas contaminadas o residuales. La electricidad producida por estas celdas es continua, pero en cantidades muy pequeñas (Fonseca, 2017) de tal manera que la producción varía en la escala de los mW/m^2 (Du et al., 2007), en ese orden de ideas se requiere un sistema de control capaz de recuperar la energía eléctrica producida por estas celdas.

El sistema de control encargado de recuperar energía de las celdas está conformado por dos interruptores semiconductores (mosfet, diodo), un inductor, un capacitor electrolítico y un microcontrolador encargado de activar y desactivar los interruptores (Park & Ren, 2012a).

Al momento de acondicionar un voltaje, se cuenta con convertidores DC-DC, que son circuitos electrónicos capaces de elevar o reducir un voltaje. Para llevar a cabo la investigación se tuvo en cuenta el conversor de tipo elevador (Boost), el cual a su salida se obtiene un voltaje mayor al de entrada (H. H. Wang et al., 2017). Posteriormente se almacena la energía. Pero se desconoce la eficiencia del sistema de control propuesto para aprovechar la energía generada por la celda, pues los investigadores aún no realizan dicho estudio. Si esta situación continua, se puede desaprovechar la energía producida por la celda.

1.5 Formulación del Problema

¿Cuál es la eficiencia de un sistema de control cosechador de energía producida por una MFC para alimentar dispositivos de baja potencia?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General.

Determinar la eficiencia de un sistema de control cosechador de energía producida por celdas de combustible microbiano.

1.6.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar la celda de combustible microbica para su óptimo funcionamiento.
- Diseñar la etapa de recuperación de energía con el sistema de control para la MFC.

- Implementar el recuperador de energía con sistema de control.
- Evaluar el funcionamiento del recuperador de energía al alimentar dispositivos de baja potencia.

1.7 Justificación

En la actualidad, existe un interés prioritario hacia el medio ambiente, por el cual el ser humano ha reflexionado y comprendido la gran magnitud de beneficios tanto económicos como ecológicos que acarrea la biodiversidad para que se dé un uso realmente favorable para el equilibrio ecológico. La producción de energía es un reto del siglo 21 debido a la escasez de combustibles fósiles, consecuente a esto la producción de energía eléctrica debe ser barata, limpia, renovable y amigable con la naturaleza (Fonseca, 2017). Por consiguiente, las energías renovables tienen un papel muy importante en salvaguardar los recursos naturales y darle su valor como tal; este tipo de generación eléctrica contribuye al desarrollo sustentable para la sociedad como también satisfacer el consumo eléctrico diario.

Actualmente, existen comunidades que no están conectadas de forma directa a una red eléctrica; mediante la implementación de un sistema de control capaz de aprovechar energía de baja potencia se desea encaminar a las comunidades donde no cuentan con un servicio eléctrico a ejecutar dicho sistema y mejorar el confort y la calidad de vida. Dicho sistema de control recupera energía de celdas de combustible microbicas, cuyo funcionamiento consiste en convertir energía química en energía eléctrica por la acción biocatalítica de microorganismos que oxidan sustratos biodegradables presentes en aguas residuales (Hernández et al., 2011).

Una aplicación donde se evidencia la implementación de la tecnología MFC es en el robot Eco Bot II, el cual permite distintas funciones, entre ellas: funciones de movimiento, sensado, procesamiento y comunicación (Du et al., 2007).

1.8 Delimitación

Esta investigación tiene como finalidad implementar un sistema de control que aproveche el potencial generado por un grupo de celdas de combustible microbica, dicha celda se construye en envases plásticos de 500 CC, 25 cm de alto y 5 cm de ancho, además debe contar con un sistema de almacenamiento (condensadores, supercondensadores o baterías), con la finalidad de suministrar energía a dispositivos que se alimenten por debajo de los 500 mW.

El tiempo de desarrollo en esta investigación será aproximadamente de un año, es decir, se inicia en el primer semestre del año 2022, hasta el segundo semestre del mismo año.

2. Tópicos del marco teórico

2.1 Antecedentes

En el futuro, la producción energética mundial estará en manos de aquellos que implementen procesos tecnológicos para obtener energía eléctrica y brinden un aporte a la preservación del medio ambiente, ya que, los combustibles fósiles actuales requieren de procesos industriales que generan gran contaminación, causando daños ambientales lentos e irremediables. En ese orden de ideas, una tecnología innovadora son las celdas de combustible micróbicas, las cuales degradan materia orgánica para producir energía. En relación a lo anterior, Romero et al., (2012) realiza un estudio de las MFC con la familia *Geobacter* y consolida los datos de su investigación en la Figura 1. Cabe resaltar que los resultados obtenidos por el autor son tomados como base para realizar una MFC que será implementada en la investigación, pero no se usará bacterias de la misma familia.

Figura 1.
Antecedente

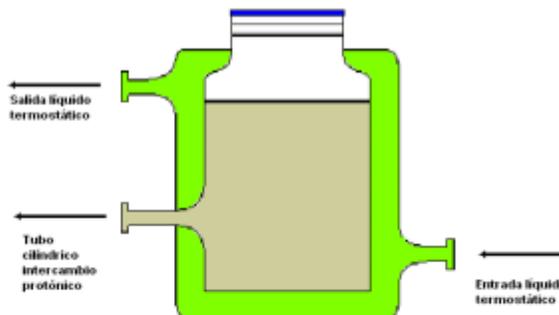
Año	Volumen MFC (mL)	Área Ánodo (cm ²)	Potencial eléctrico (V)	Corriente (mA)	Densidad de corriente (A/m ²)	Tipo de electrodo
2003	450	61.2	0.2	0.4	0.065	Grafito Solido [08]
2006	14	6.45	0.3	0.9	0.7	Fibra de carbono [36]
2006	14	0.8	0.3	0.7	4.6	Fibra de carbono [36]
2006	14	0.8	0.3	0.7	3.1	Grafito Solido [36]
2008	6.4	7.8	0.3	2	3.1	Oro [18]
2009	24	0.071	0.3	10	7.6	Tela de grafito [27]

Tomado de Bacterias, fuente de energía para el futuro, por Romero et al., 2012, p. 126.

Para obtener resultados similares a los de la Figura 1 se debe realizar una caracterización de la celda, elegir los materiales adecuados, fijar las dimensiones de la celda y elegir el tipo de bacterias. Hernández et al., (2011) realiza un montaje de una pila de combustible micróbica y

brinda información detallada sobre los materiales de construcción implementados en su investigación.

Figura 2.
Celda antecedente.



- **Ánodo:** Gránulos de grafito y varilla de carbón.
- **Cátodo:** Platino depositado sobre tela de carbón ($0.3 \text{ mg Pt cm}^{-2}$)
- **Membrana de intercambio protónico:** Nafion[®] 115. Es una membrana de intercambio protónico derivada del ácido perfluorosulfónico, sólida e insoluble en agua. Las membranas son discos de 3,5 cm de diámetro (diámetro exterior del tubo de intercambio protónico) con un espesor de 0,127 mm.

Nota. En la figura se muestra los materiales y la celda resultante implementada por el autor.

Tomado de Montaje y estudio de una pila de combustible depuración simultánea de aguas residuales, por Hernández et al., 2011, p. 6.

Con base a la información suministrada, el autor recomienda usar metales no corrosivos y materiales a base de carbón. Con lo anterior, los investigadores deciden utilizar aluminio y cobre esmaltado para diseñar los electrodos. Cabe resaltar que el esmalte del cobre fue removido para lograr un contacto con el aluminio.

Los autores anteriores realizan diseños de celdas microbicas de una cámara. Realizar este tipo de celdas requiere de un costo elevado por la membrana de intercambio protónico que se debe usar (carbon cloth o nafion). Revelo et al., (2013) recomienda usar celdas de doble cámara; además, resalta el tipo de membranas que se pueden utilizar para el intercambio protónico. Para la investigación se acata la recomendación de usar una celda de doble cámara y una membrana

porosa. Por otro lado, el autor estudia el comporramiento de la celda, variando tanto los sustratos como el tipo de membrana, dicha información la recopila en la Figura 3.

Figura 3.
Variables de una MFC.

Características de la CCM	Bacterias	Sustrato	Tipo de electrodo	DP (mW/m ²)	RI (Ω)	EC (%)	Referencia
Cámara doble, MIP Nafion 117	Lodo anaeróbico	Acetato	Papel carbón (ánodo), platino (cátodo)	7200	960	50 – 80	Oh et al. (2004)
Cámara sencilla, sin membrana	Mezcla de bacterias	Acetato, aguas residuales	Fibra de carbono	6860	235	-	Fan et al. (2008)
Cámara doble, MIP Ultrex	Lodo metanogénico, anaerobio, granular	Glucosa	Varilla de grafito, 5 mm de diámetro	4310	-	-	Rabaey et al. (2004)
Cámara doble, MIC Nafion 117	<i>Geobacter sulfurreducens</i> KN400	Acetato	Varilla de 7.1x10 ⁻⁶ m ² (ánodo), tela de grafito 6.4516 cm ² (cátodo)	3900	0.015 Ω/m ²	-	Yi et al. (2009)
Cámara sencilla, MIP Nafion 115	Lodo de digestor anaeróbico	Glucosa y acetato	Filtro de carbono suspendido en varilla de grafito	3650	27	88±5.7	Borole et al. (2009)
Cámara doble, MIP Ultrex	Cultivo mixto	Glucosa	Grafito plano, 50 cm ²	3600	-	89±4	Rabaey et al. (2003)

Tomado de Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica, por Revelo et al., 2013, p. 23.

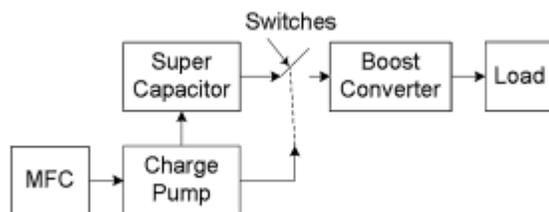
Uno de los beneficios de las MFC es la depuración de aguas residuales. Luo et al., (2010) en su investigación implementa una celda capaz de depurar aguas residuales de coque con presencia de indol. El coque es un combustible obtenido de la destilación seca del carbón mineral, el cual tiene alto poder calorífico. El indol es compuesto inhibidor presente en las aguas residuales de coque. Cabe resaltar que en el documento se menciona una comparación y alimentación con sustratos, en este caso el indol, en la investigación que se está desarrollando no se realizará ninguna comparación entre dos tipos de celda ni tampoco se adicionará sustratos, por lo cual se obtendrá resultados muy alejados de los que el autor obtuvo:

Los experimentos se realizaron en dos tipos de MFC: una MFC de alimentación continua (C-MFC) y una MFC de alimentación por lotes (B-MFC). En el C-MFC, las densidades de potencia máximas alcanzaron 45,4, 51,2 y 2,1 W/m³, respectivamente, a partir del uso de 1000 mg/L de glucosa, una mezcla de 1000 mg/L de glucosa y 250 mg/L de indol, y 250 mg/L de glucosa. L indol como combustible. Al usar 250 mg/L de indol como combustible,

la eficiencia de eliminación de indol fue de hasta el 88 % en 3 h. El aumento de las concentraciones de indol de 250 a 1500 mg/L dio como resultado una disminución de las densidades de potencia máxima de 2,1 a 0,8 W/m³ y tasas de degradación promedio de 41,7 a 8,9 mg/(L·h). En comparación con el C-MFC, el B-MFC aumentó las densidades de potencia máximas de 2,1 a 3,3 W/m³ y la eficiencia coulombica de 0,7% a 81,5%. Los análisis de la comunidad microbiana mostraron que la adición de indol obviamente cambia la comunidad microbiana del electrodo del ánodo, incluidos los cambios de abundancia relativa y la aparición de nuevas especies. Los resultados deberían ser útiles para el tratamiento de aguas residuales que contienen indol (Luo et al., 2010).

Luego de estudiar la potencia producida por la celda se debe realizar un estudio del sistema cosechador de energía, es decir, elegir componentes que sean de bajo consumo para minimizar las pérdidas en los mismos, en ese orden de ideas, Meehan et al., (2011) brinda un diagrama de bloques sobre la distribución del circuito cosechador de energía (Figura 4).

Figura 4.
Diagrama de bloques antecedente.



Nota. La figura muestra un diagrama de bloques utilizando una bomba de carga como recuperador de energía y super condensadores para el almacenamiento antes de ingresar al elevador boost.

Tomado de Energy harvesting with microbial fuel cell and power management system, por Meehan et al., 2011, p. 178.

Con lo anterior, el autor también brinda una lista de los componentes usados en su investigación, los cuales son de bajo consumo y son bastante clave para el diseño de esta investigación. En la Figura 5 se muestra a detalle los componentes, sus rangos de trabajo, marca, referencia. Este estudio fue una buena opción para realizar el cosechador de energía pero Park & Ren, (2012a) dice “ las bombas de carga, no pueden mantener el punto de operación en un nivel de voltaje deseable”, es decir, las bombas de carga no pueden mantener un MPPT deseado.

Figura 5.
Características de los componentes.

Part	Manufacturer	Model Number	Specifications
Charge Pump	Seiko	S-882Z	Input:0.3V, Output 1.8V
Super Capacitor C1	Cooper/Bussman	B0820-2R5225-R	2.2F
N-Channel MOSFET S1	Vishay/Siliconix	SI3460BDV	$V_{GS}:1.5V$, $V_{DS}:20V$, $I_D:8A$, $R_{ON}:0.04\Omega$
P-Channel MOSFET S2	Vishay/Siliconix	SI3499DV	$V_{GS}:-1.5V$, $V_{DS}:-8V$, $I_D:-5A$, $R_{ON}:0.048\Omega$
Booster Converter IC	ST Microelectronics	L6920DB	Input:0.8V, Output:3.3V
Inductor L			2 μ H
Capacitor C2			47 μ F

Tomado de Energy harvesting with microbial fuel cell and power management system, por Meehan et al., 2011, p. 179.

En relación a lo anterior, se investiga más a fondo sobre el diseño de los circuitos cosechadores de energía y la opción definitiva elegida por los investigadores es la mostrada en la Figura 13. Se eligió ese diseño por su fácil implementación, comparte algunos componentes mostrados en la Figura 5 y además utilizan una MFC similar a la implementada en esta investigación.

2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

2.2.1 Celdas de combustible microbicas.

Las MFC o celdas de combustible microbianas, son dispositivos los cuales se encargan de oxidar materia orgánica presente en aguas residuales y producir energía eléctrica. Hernández et al. (2011) afirma: “Una pila de combustible microbiana (MFC) es un dispositivo en el que se convierte energía química en energía eléctrica por la acción biocatalítica de microorganismos que oxidan sustratos biodegradables tales como glucosa, acetatos o materia orgánica presente en aguas residuales” (p.3).

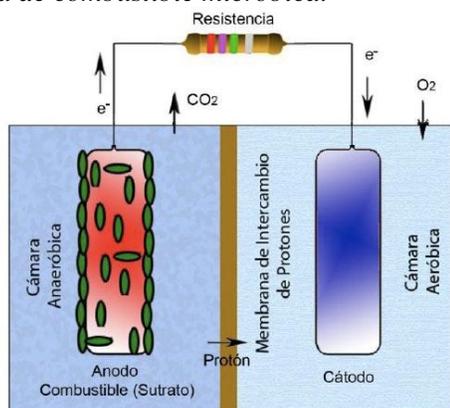
Además, pueden ser utilizadas para el tratamiento de desechos orgánicos, y también como fuente de energías limpias (renovables). Las celdas utilizan como combustible los desechos

comúnmente llamados sustratos para producir energía eléctrica limpia y amigable con el medio ambiente.

Tal como se muestra en la Figura 6 la MFC se compone de dos cámaras que separan el ánodo y cátodo por medio de una membrana selectiva de protones. Bajo condiciones anaeróbicas, la oxidación de materia orgánica presente en los sustratos produce CO_2 , protones y electrones, mientras que bajo condiciones aeróbicas se produce CO_2 y agua. Para la investigación que se lleva a cabo lo más conveniente es mantenerlas bajo condiciones anaeróbicas, así, se obtendrá de las celdas un flujo de electrones (Hernández et al., 2011). La producción de energía dependerá de la cantidad de celdas que se utilicen, ya sean conectadas en serie o paralelo, las condiciones ambientales y las cantidades de sustrato que se agregue a cada celda, así como también de un sistema de control y un circuito elevador, ya que la energía producida por las celdas ronda el orden de los mW. Como consecuencia de esto, aprovechar el flujo de electrones requiere de un electrodo, el ánodo; dicha transferencia de electrones se hace mediante una membrana conductora (carbón cloth) que se encarga de atrapar los electrones producidos por la MFC (Martínez et al., 2015).

Los microorganismos más estudiados de las MFCs son: “Shewanella” y “Geobacter sulfurreducens”. El proceso que estos microorganismos tienen para descomponer la materia orgánica es mediante sus rutas metabólicas para generar energía en forma de Trifosfato de Adenosina (ATP por sus siglas en inglés) (Fonseca, 2017).

Figura 6.
Celda de combustible microbica.



Nota. La figura muestra de manera detallada lo que compone a la celda de combustible microbica. Tomado de Celdas de combustible microbianas (CCMs) Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica, por Revelo et al., 2013.

En un estudio realizado por (Martínez et al., 2015), recomienda utilizar una configuración de tres celdas de combustible microbicas en paralelo, cada una conectada a un convertidor boost y la salida de las mismas se conecta un capacitor que cumple la función de almacenar la energía, de esta manera, suministrarán una tensión 500mV, 300mV y 100mV respectivamente.

Fonseca (2017) recomienda hacer una conexión de aproximadamente 45 celdas (3 en paralelo y 15 en serie), con este arreglo se obtiene 5v y 150mA, aunque no especifica las dimensiones de las celdas utilizadas en su investigación.

Saavedra S., (2012) recomienda adicionar sustratos para aumentar la producción de energía de las celdas de combustible, brinda información sobre los diversos sustratos (g/L), el tipo de bacterias y la producción de corriente que puede entregar cada celda de combustible microbica.

Figura 7.
Sustratos.

Tipo de sustrato	Concentración	Fuente del inóculo	Tipo de MFC	Densidad de corriente (mA/cm ²)
Acetato	1 g/L	Bacteria preacclimatada desde una MFC	Forma cúbica de una cámara con ánodo de cepillo de fibra de grafito (7170 m ² /m ³ volumen del cepillo)	0,8
Arabitol	1220 mg/L	Bacteria preacclimatada desde una MFC	Una cámara con cátodo al aire, (12 mL), ánodo de tela de carbón no a prueba de agua (2 cm ²), cátodo de tela de carbón a prueba de agua (7 cm ²)	0,68
Azo colorante con glucosa	300 mg/L	Mezcla de lodo aeróbico y anaeróbico	Una cámara, cátodo al aire, ánodo de papel de carbono (36 cm ²)	0,09
Carboximetil celulosa (CMC)	1 g/L	Cocultivo de <i>Clostridium cellulolyticum</i> y <i>G. sulfurreducens</i>	Doble cámara con discos de grafito como electrodos (16 cm ²) y catolito de ferricianuro	0,05
Partículas de celulosa	4 g/L	Cultivo puro de <i>Enterobacter cloacae</i>	Tubular en forma de U con ánodo de tela de carbón (1,13 cm ²) y cátodo de fibras de carbón.	0,02
Rastrojos de maíz	1 g/L COD	Aguas residuales domésticas	Una cámara, sin membrana separadora, cátodo al aire, ánodo de papel carbón (7,1 cm ²) y cátodo de tejido de carbón.	0,15
Cisteína	385 mg/L	Muestra de sediment de 30 cm de profundidad	Doble cámara con electrodos de papel carbón (11,25 cm ²)	0,0186

Nota. La tabla anterior muestra una pequeña lista de los sustratos que el autor recomienda para aumentar la producción de energía de las MFC, el tipo de celda que se tiene y el aumento de energía.

Tomado de Diseño de una Celda de Combustible Microbiológica con Uso de Bacterias Oxidantes de Azufre y Hierro, por Rodríguez & Ortiz, 2020.

2.2.2 Sistema de control.

Un sistema de control es aquel que recibe acciones o variables de entrada, y cuya respuesta a dichas entradas son las denominadas variables de salida.

Las acciones externas al sistema de control se dividen en dos grupos, variables de control, las cuales son aquellas que se pueden manipular, y las perturbaciones la cuales son posibles hacerles alguna manipulación o control (Alvarez Brotons, 2004). “La teoría de control moderna se basa en el análisis en el dominio temporal de los sistemas de ecuaciones diferenciales” (Ogata, 2010). Para realizar un correcto análisis de los sistemas de control se debe tener en cuenta algunos términos básicos. Variable controlada o variable manipulada: la variable controlada es la que se mide o controla, mientras que la variable manipulada o señal de control es la encargada de afectar el valor de la variable controlada por medio de un sistema embebido. Planta: se denomina planta a cualquier conjunto de elementos que cumplan una función en específico. Procesos: operación a controlar. Sistemas: conjunto de componentes que actuar unidos para realizar un objetivo en común. Perturbaciones: son señales que afectan negativamente la salida de un sistema (Ogata, 2010).

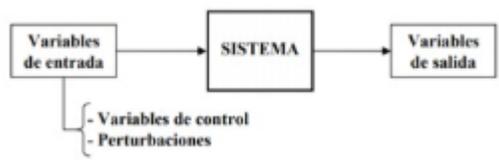
Un sistema de control se caracteriza por la presencia de ciertos elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de implementar un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un control o dominio sobre las variables de salida. Un sistema de control debe cumplir con los siguientes requisitos (Alvarez Brotons, 2004):

- Garantizar una estabilidad y ser robusto a posibles perturbaciones y errores en los modelos.
- Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido. Este criterio consiste en que la acción de control sobre las acciones externas o variables de entrada sea realizable evitando comportamientos anormales e irreales.
- Debe ser fácil de implementar como también fácil de operar en tiempo real con ayuda de un computador.

El sistema de control que se va a implementar recolecta energía de celdas de combustible microbicas, debe contar como mínimo con dos interruptores semiconductores (mosfet, diodo), también con elementos de almacenamiento de energía (capacitores, baterías, supercondensadores) (H. H. Wang et al., 2017), además el sistema de recolección de energía debe ser sostenible,

amigable con el medio ambiente y libre de mantenimiento (Meehan et al., 2011). Para evaluar la eficiencia del sistema de recolección de energía, este debe ser capaz de mantener cargado el acumulador con un voltaje estable, esto se logra mediante un proceso de perturbación y observación o implementando un PID.

Figura 8.
Modelo sistema de control.



Nota. La figura muestra un modelamiento del sistema de control que se implementó en la investigación. Tomado de Control predictivo de canales de riego utilizando modelos de predicción de tipo Muskingum (primer orden) y de tipo Hayami (segundo orden), por Alvarez Brotons, 2004.

2.2.3 Sistemas de almacenamiento.

El almacenar energía hace referencia a todos aquellos métodos que utilizan los seres humanos para mantener la energía en cualquier forma y posteriormente utilizarla en momentos que sea requerida, bien sea en la misma forma energética o en otra diferente. Existen diferentes tipos de almacenar energía según su capacidad:

- Almacenamiento a gran escala (GW) uno de los ejemplos más claros de este tipo está en las centrales hidroeléctricas.
- Almacenamiento en redes (MW) voltajes de inercia superconductores o baterías.
- Almacenamiento para consumidor final (kW) baterías.

La importancia de almacenar energía radica en tres factores primordiales los cuales son la reducción de la diferencia de la curva de demanda energética, la integración de las fuentes de energías limpias y amigables con el medio ambiente y el desarrollo de redes inteligentes (SmartGrid) (Martín Chicharro, 2016).

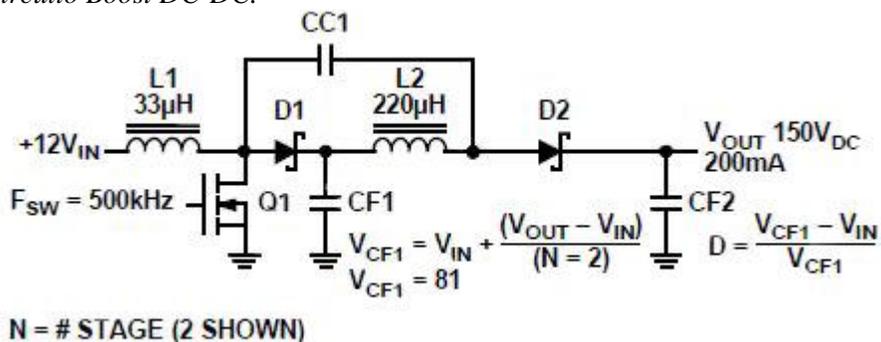
Al momento de almacenar energía se debe seleccionar la tecnología ideal para dicho propósito. Para el desarrollo de la investigación se implementó una batería de litio como dispositivo de almacenamiento de energía. “El funcionamiento de la batería puede ser descrito de la siguiente manera: durante el proceso de carga, un potencial eléctrico oxida los centros metálicos del cátodo y este material otorga algunos de sus iones de litio que viajan por el electrolito hasta

intercalarse en el ánodo (usualmente de grafito), los iones permanecen en el ánodo hasta el proceso de descarga, en donde el material del cátodo se reduce gracias al circuito externo que conduce los electrones, y los iones Li^+ dejan el ánodo para volver a intercalarse en el cátodo”. Esta batería se conecta a la salida del elevador boost. Existen ciertas variables a tener en cuenta: eficiencia, tiempo de descarga, tiempo de respuesta y capacidad de almacenamiento (Morante, 2014).

2.2.4 Conversor elevador DC-DC Boost.

Los convertidores DC-DC son circuitos electrónicos implementados en el acondicionamiento de energía, con capacidades de elevar o reducir el voltaje, uno de ellos es el elevador Boost cuyo esquema se presenta en la Figura 9. El convertidor Boost es un convertidor DC a DC que obtiene a su salida un voltaje mayor con respecto a su entrada. Este elevador se comporta como fuente de alimentación conmutada que se constituye al menos dos interruptores semiconductores (MOS1 y D1) y también cuenta con al menos un elemento para capturar energía (Ld y C1). En algunas ocasiones se le agrega filtros para mejorar su rendimiento. La alimentación de entrada (V_{in}) también puede ser generada de fuentes DC como baterías, paneles solares, celdas de combustible, rectificadores y generadores DC. Como se observa en la Figura 9, el transistor MOSFET tiene la función de un interruptor electrónico con control en la compuerta, dicho dispositivo cuenta con una conmutación que requiere de una señal por modulación de ancho de banda (PWM) para activar y desactivar cualquier sistema de control. El convertidor tipo Boost se encarga de elevar el voltaje de entrada, esta relación se observa en la ecuación (1) (H. H. Wang et al., 2017).

Figura 9.
Circuito Boost DC-DC.



$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1 - D} \quad (1)$$

Donde

Vo: Voltaje de Salida.

Vd: Voltaje de Entrada.

D: Ciclo de trabajo que se aplica al convertidor.

Los más comunes, fáciles y económicos de realizar son el “Joule Thief” y “Boost Converter”, aunque se debe construir con elementos de bajo consumo, es decir, con semiconductores que trabajen con baja potencia. Esto es muy importante al momento de implementarlo en conjunto con la celda de combustible microbica por dos motivos: el primero, que el potencial producido por la MFC no se consuma en su totalidad debido a los elementos aquí presentes y segundo, para evitar una alimentación externa en el circuito final.

Otra recomendación es utilizar el convertidor Boost ya que el Joule Thief requiere de un sistema de conmutación, es decir, activar y desactivar un transistor, generando una pérdida de 30mW aproximadamente. El circuito Boost requiere de un sistema de conmutación, pero es preferible trabajarlo separado.

2.3 Definición de conceptos

2.3.1 Índices que influyen en el rendimiento de una MFC.

Para que una celda de combustible microbica se desempeñe de la mejor manera, se deben evaluar algunos parámetros eléctricos (Revelo et al., 2013). De igual manera, estos parámetros ayudan a estimar la calidad de la energía producida por las MFC, en ese orden de ideas se tiene: Corriente, Potencia (Saavedra S., 2012).

Potencia: cantidad de energía entregada en un determinado tiempo.

$$P = \frac{\Delta E_{celda}^2}{R_{ext}} \quad \text{o} \quad P = V * I \quad (2)$$

P: potencia, R_{ext} : resistencia externa del circuito (carga), ΔE_{celda} : diferencial de potencia (voltaje de la celda), I: intensidad de corriente eléctrica en amperios.

- Potencia de entrada: es la energía suministrada por la MFC en un determinado tiempo.
- Potencia de salida: es la energía entregada por el sistema de control en un determinado tiempo.

- Eficiencia: es la relación entre la cantidad de energía utilizada para una actividad y la prevista para su utilización.
- Cálculo de la Eficiencia: evaluación de potencia de salida con respecto a la entrada (Arze et al., 2006).

$$Eficiencia (\lambda) = \frac{Potencia\ de\ Salida}{Potencia\ de\ Entrada} * 100 = \frac{P_o}{P_i} * 100 \quad (3)$$

2.4 Hipótesis

Es posible evaluar la eficiencia de un sistema de control comparando la potencia de salida con respecto a la de entrada y su producción energética. Al implementar un algoritmo capaz de mantener un máximo punto de transferencia de potencia adaptable y desarrollar un sistema de control de recuperación de energía a partir de una celda de combustible microbica con el fin de aprovechar el máximo potencial producido por la MFC y así alimentar dispositivos de baja potencia se estima una eficiencia mayor al 70%.

3. Metodología

3.1 Enfoque

El enfoque de esta investigación es cuantitativo, ya que las variables que se trabajaron y que son propias del objeto de investigación se miden numéricamente. Se dice que la toma de datos o la medición de variables es de carácter cuantitativo porque asocia un proceso matemático y una observación empírica para demostrar los resultados de manera numérica y gráfica.

Para analizar los fenómenos presentes en la investigación, el enfoque cuantitativo brinda a los investigadores una manera sencilla de inspeccionar los datos que se obtuvieron numéricamente y compararlos con los datos medidos de una variable (eficiencia).

3.2 Paradigma

El paradigma de la investigación es Neopositivista, busca aplicar conocimiento científico, procurar que este exista y sea útil.

3.3 Método

El proyecto de investigación sigue un método científico inductivo y deductivo ya que busca dar respuesta al objeto de investigación partiendo desde la observación y medidas específicas hasta llegar al objetivo general y teorías más amplias.

3.4 Tipo de investigación

Para el proyecto se trabajó con un tipo de investigación descriptiva, gracias a la técnica de medición de datos obtenidos de variables (potencia) se diseñó un sistema de control de recuperación de energía a partir de una MFC lo cual permitió a los investigadores recopilar información que fue fundamental al momento de ejecutar la metodología.

3.5 Diseño de investigación

En esta investigación se analizó la potencia suministrada por la celda de combustible microbica conectada a un sistema de control desarrollado. Se analizó la salida de potencia del

sistema con el fin de optimizar el MPPT del circuito. Se cuenta con un diseño de investigación cuantitativo de tipo experimental porque se aplicaron distintos tratamientos y la misma evaluación a cualquier grupo experimental.

R_1 : Grupo Experimental: celdas de combustible microbicas.

R_2 : Grupo de Control: celdas de combustible microbicas.

X : Tratamiento Experimental: sistema de control de recuperación de energía.

—: Tratamiento Experimental: ausencia de control de recuperación de energía.

$O_1 = O_2$: Evaluación de variable: eficiencia.

R1 X O1

R2 – O2

3.6 Población

Para llevar a cabo la investigación se trabajó con una población basado en sistemas de control de recuperación de energía para celdas de combustible microbicas.

3.7 Muestra

Sistema de control de recuperación de energía para celdas de combustible microbicas.

3.8 Técnicas de recolección de información

Para el desarrollo del proyecto de investigación la mejor manera de recolectar información es mediante observación cuantitativa, de tal modo que la medición de las variables del objeto de investigación arroje datos que puedan ser corroborados mediante procesos matemáticos. Con base a los datos adquiridos a lo largo de la investigación la variable a medir es la potencia, por otro lado, se obtendrá resultados de variables que intervienen en el sistema de control (Potencia, Voltaje, Corriente, Resistencia) de tal manera que analice la energía en un determinado tiempo. Estas técnicas permiten a los investigadores obtener resultados confiables al momento de aplicar el sistema de control.

3.9 Instrumentos de recolección de información

Para la medición de las variables del objeto de investigación se utilizó dos multímetros, uno configurado para medir corriente y el otro para medir voltaje, mediante una fórmula matemática

que relacione ambos parámetros se obtendrá lo deseado. Para almacenar los datos adquiridos en el proyecto de investigación existen programas básicos y sofisticados que ayudan a los investigadores en este aspecto, se utilizarán hojas de cálculo y Matlab. Las hojas de cálculo de Excel son ideales y muy fáciles de usar, así como también muy versátiles. Si se desea un programa que brinde conceptos y aspectos ingenieriles lo correcto sería usar Matlab. Esto se hace con el fin de comparar el modelo práctico y matemático obtenido con la ayuda de las técnicas de recolección de información.

4. Resultados

4.1 Caracterización de la celda de combustible microbica.

La caracterización de la celda de combustible microbica consiste en indagar su voltaje y corriente de operación, esto con el fin de conocer si la celda está capacitada para encender un transistor MOSFET y dar inicio al proceso de recuperación de energía.

La celda de combustible microbica implementada consta de dos cámaras, una anaeróbica y otra aeróbica, separadas por una membrana de intercambio iónico, en cada cámara se introduce un electrodo que puede ser de grafito, aluminio, cobre o platino con el fin de recolectar la energía producida.

Para las cámaras tanto anaeróbica como aeróbica de cada celda se usó botellas plásticas de 500 ml; la cámara aeróbica contiene solución salina al 0.9% y la anaeróbica contiene material orgánico. La membrana de intercambio iónico fue fabricada con tubo de PVC de $\frac{1}{4}$ y codos, internamente se adiciona un ingrediente de cocina conocido como agar-agar o gelatina vegetal, se disolvieron tres gramos en un litro de agua. Tanto como para ánodo como para cátodo, se usó cable de cobre de 30 cm unidos a una placa de aluminio de 17cm x 3cm x 0.0075cm. Para el material orgánico de tres celdas se usó 100 gramos de banano, para las tres celdas restantes se combinó 70 gramos de banano y 30 gramos de remolacha.

4.2 Construcción de la celda de combustible microbica.

4.2.1 MFC 500 ml.

Se construyó una celda de combustible microbica con doble cámara. Se utilizaron envases plásticos de 500 ml para cada una de las cámaras, separados por una membrana de intercambio iónico que se constituye de un tubo de PVC de $\frac{1}{4}$, 10 cm de largo y dos codos, internamente se encuentra la membrana construida de agar-agar o gelatina vegetal. Para los electrodos se utilizaron láminas de aluminio de 17 cm entrelazadas con alambre de cobre de 30 cm.

La celda está compuesta por una cámara aeróbica y una anaeróbica. En la Figura 9 la cámara aeróbica está situada la derecha y a la izquierda se observa la cámara anaeróbica. En la cámara aeróbica o cátodo se agregaron 500 ml de solución salina al 0.9% y en la cámara anaeróbica o ánodo se agregaron una mezcla de 500 ml de agua con material orgánico (banano), como se ve en la Figura 10.

Figura 10.
MFC 500 ml doble cámara.

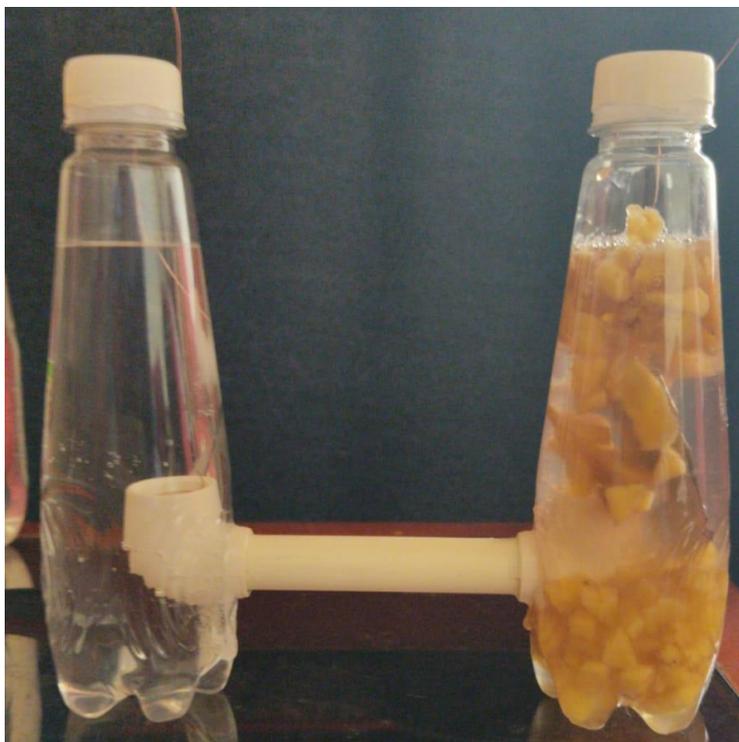


4.2.2 MFC 300 ml.

Se construyó una celda de combustible microbica con doble cámara. Se utilizaron envases plásticos de 300 ml para cada una de las cámaras, separados por una membrana de intercambio iónico que se constituye de un tubo de PVC de $\frac{1}{4}$, 10 cm de largo y dos codos, internamente se encuentra la membrana construida de agar-agar o gelatina vegetal. Para los electrodos se utilizaron láminas de aluminio de 15 cm entrelazadas con alambre de cobre de 20 cm.

La celda está compuesta por una cámara aeróbica y una anaeróbica. En la cámara aeróbica o cátodo se agregó 300 ml de solución salina al 0.9% y en la cámara anaeróbica o ánodo se agregaron 300 ml de agua con material orgánico (banano), como se ve en la Figura 11.

Figura 11.
MFC 300 ml doble cámara.



4.2.3 MFC 500 ml combinada.

Se construyó una celda de combustible microbica con doble cámara. Se utilizaron envases plásticos de 500 ml para cada una de las cámaras, separados por una membrana de intercambio iónico que se constituye de un tubo de PVC de $\frac{1}{4}$, 10 cm de largo y dos codos, internamente se encuentra la membrana construida de agar-agar o gelatina vegetal. Para los electrodos se utilizaron láminas de aluminio de 17 cm entrelazadas con alambre de cobre de 30 cm.

La celda está compuesta por una cámara aeróbica y una anaeróbica. En la cámara aeróbica o cátodo se agregó 500 ml de solución salina al 0.9% y en la cámara anaeróbica o ánodo se agregó una mezcla de 500 ml de agua con material orgánico (banano y remolacha), como se ve en la Figura 12.

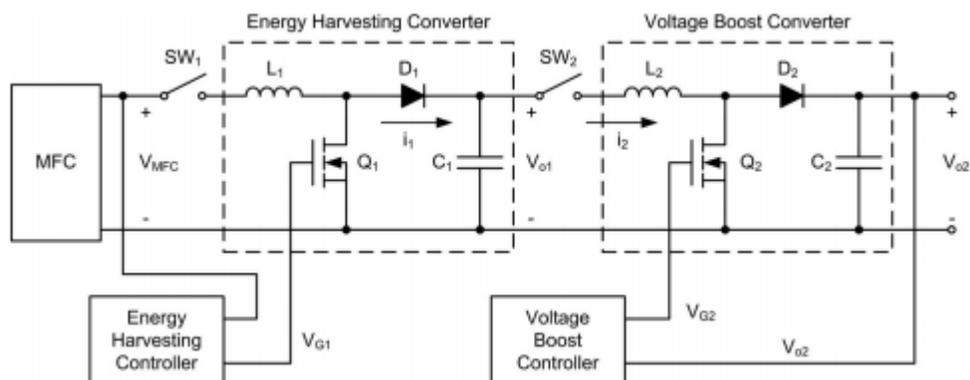
Figura 12.
MFC 500 ml doble cámara combinada.



4.3 Implementación de la etapa de recuperación de energía.

Para realizar la etapa de recuperación de energía se debió elegir un sistema de control adecuado para aprovechar el máximo potencial de la MFC y un circuito encargado de elevar el voltaje que se extraiga de la MFC. En ese orden de ideas, se deben elegir componentes de baja potencia para que el sistema de control funcione correctamente de lo contrario la MFC no podría realizar el “swicheo” del sistema de control, ni tampoco se obtendrá el voltaje necesario para encender el elevador Figura 13.

Figura 13.
Sistema recuperador de energía.

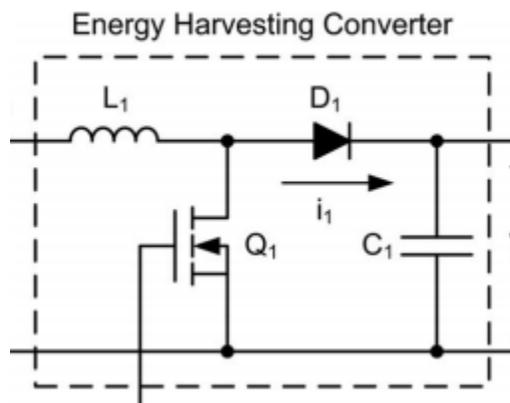


Nota. En la figura se muestra el diagrama de conexiones para el circuito recuperador de energía. Tomado de Hysteresis controller based maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cells, por Park & Ren, 2012b.

4.3.1 Recuperador de energía.

Los componentes seleccionados fueron los utilizados en un controlador cosechador de histéresis como se muestra en la Figura 14, donde Q_1 es un transistor MOSFET SI3460 (Vishay), D_1 es un diodo 1N5711 (Schottky), L_1 es un inductor CST206-1A de 14mH, C_1 condensador electrolítico de $330\mu F$ (Park & Ren, 2012b).

Figura 14.
Recuperador de energía.

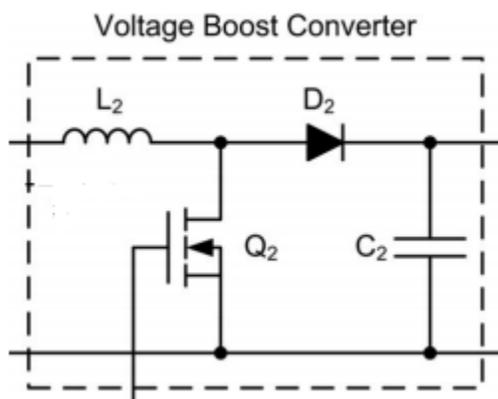


Nota. Se muestra la conexión del circuito recuperador de energía. Adaptado de Hysteresis controller based maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cells, por Park & Ren, 2012b.

4.3.2 Elevadores de voltaje.

Se utilizó un elevador de voltaje tipo boost con un rango de entrada desde 0.7V hasta 5V, de conversión de 96%, indicador de trabajo y tamaño pequeño. En la Figura 15, se muestra la conexión del elevador, que posee un diodo de potencia (D_2) SS14, el que soporta hasta 28V y 1A, una bobina de potencia L_2 de $47\mu H$, un capacitor electrolítico C_2 de $100\mu F$ a 16V y un integrado Q_2 CE8301.

Figura 15.
Elevador Boost.



Nota. Se muestra la conexión del circuito elevador de voltaje tipo Boost. Adaptado de Hysteresis controller based maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cells, por Park & Ren, 2012b.

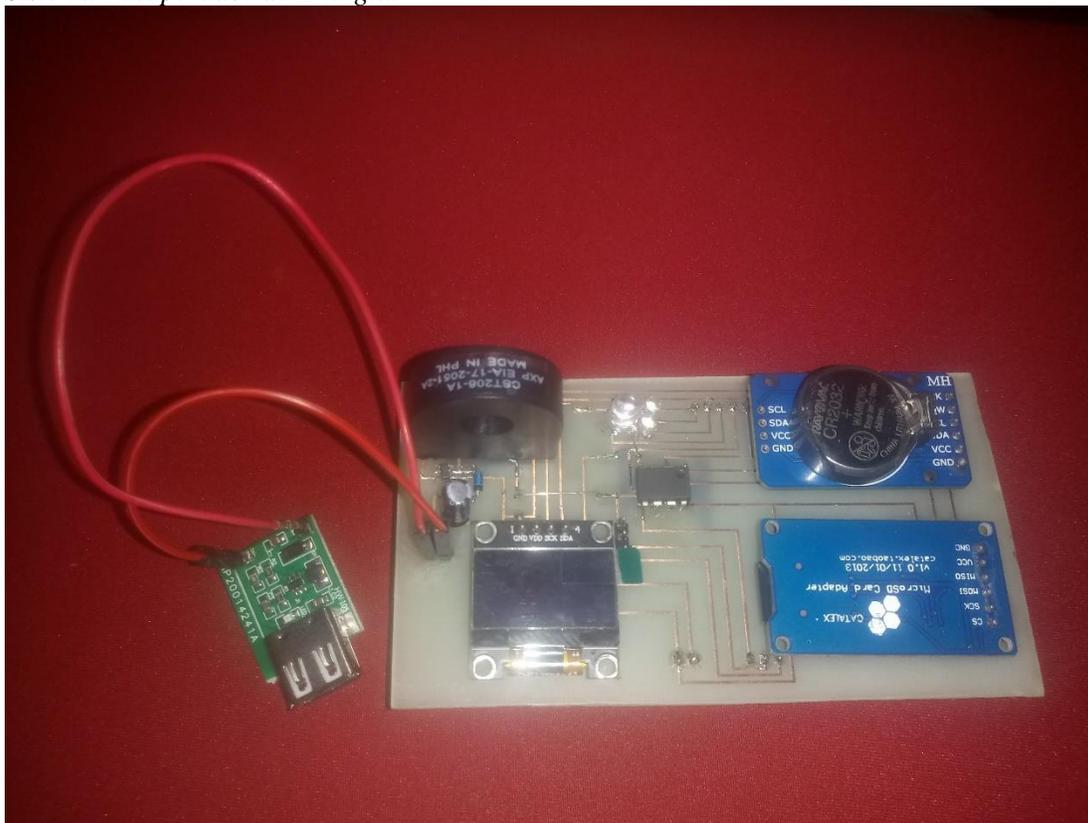
4.3.3 Sistema de control.

Para mejorar el rendimiento de las MFC se debe aplicar un control capaz de mantener estable el Máximo Punto de Transferencia de Potencia (MPPT) que, a diferencia de trabajar con una resistencia fija, este sistema de control proporciona mejor tiempo de respuesta y rendimiento a largo plazo (Park & Ren, 2012b).

En la Figura 13, en la parte inferior izquierda el “Energy Harvesting Controller” se trabajó con un algoritmo perturbar y observar (P&O) aplicado a una celda fotovoltaica al cual se le modificó los parámetros del circuito y la programación, para adaptarlo a las condiciones de las celdas de combustible micróbica que se implementó en la investigación.

En la Figura 16 se evidencia el circuito resultante obtenido del diagrama de conexiones de la Figura 13.

Figura 16.
Sistema Recuperador de Energía.



Nota. En la figura se muestra el circuito físico implementado para la recuperación de energía. En la parte superior derecha se encuentra el Módulo Reloj de Tiempo Real, en la parte inferior derecha el Módulo Micro SD, en la parte inferior izquierda la pantalla OLED, en la parte superior izquierda la conexión de la Figura 14 el circuito recuperador de energía y el circuito al lado izquierdo de la pantalla es el elevador Boost.

4.4 Etapa de recolección de información.

Se realizó una toma de datos para verificar el comportamiento y duración de la celda, es decir, su variación de voltaje y vida útil, esto se hace con cada una de las celdas mencionadas en el apartado Construcción de la celda de combustible micróbica.

Por otro lado, se realizó la programación en Arduino para la obtención de datos de la MFC, mediante la lectura del puerto análogo y la conversión análogo digital (ADC) del dato obtenido, las mediciones se realizaron a temperatura ambiente. La placa utilizada es la Mega 2560. Los datos

se guardan en memoria Micro SD y se organizan por fecha y hora gracias al módulo DS3231 reloj de tiempo real.

4.4.1 Comportamiento de la celda de 500 ml.

Al cabo de 15 minutos de construida la celda, se tomó la medida de voltaje de la celda de 500 ml en circuito abierto, la cual arrojó un voltaje de 100 mV. Pasado una semana el voltaje disminuyó considerablemente hasta caer a 61 mV, esto sucedió porque el material orgánico se estaba degradando y se acumuló CO_2 . Después de 10 días la celda solamente produjo 41 mV por lo cual los investigadores decidieron cambiar las dimensiones de la celda.

Un factor importante que arrojó la investigación es que al presentar perturbaciones como vibraciones disminuye el voltaje entre un 10% y 12%.

4.4.2 Comportamiento de la celda de 300 ml.

Se midió el voltaje al cabo de 20 minutos de terminada la celda. El primer valor de voltaje medido en circuito abierto fue de 37 mV. Después de 24 horas el voltaje medido fue de 65 mV.

Al ver una notable variación en el voltaje de las dos celdas al pasar tan poco tiempo, se decide congelar la celda de 300 ml con el fin de alargar su vida útil y reducir las emisiones de CO_2 . Al cabo de 24 horas se tomó una nueva medida de voltaje la cual empezó desde 89 mV y subió hasta 0,1 V. Se deja la celda nuevamente en el congelador y se toma una nueva medida de voltaje 2 días después, produciendo hasta 0,128 V.

De acuerdo a investigaciones previas, la remolacha es considerado como material orgánico para ser utilizado como combustible, por lo cual se fabrica una nueva celda con material orgánico diferente.

4.4.3 Comportamiento de la celda de 500 ml combinada.

Al cabo de 30 minutos de construida la celda, el primer valor medido de voltaje en circuito abierto fue de 106 mV; de inmediato fue llevada a refrigeración.

Con base a las celdas que se construyeron anteriormente, los cambios que se realizaron, las condiciones a las que fueron expuestas y el valor de voltaje medido en ese instante se obtuvo una estimación del máximo valor que fue de 235mV.

4.4.4 Algoritmo P&O.

Antes de ejecutar el algoritmo perturba y observar (P&O) se declara las variables que se van a medir en cero, luego se analiza el voltaje de la celda y se lo asigna como voltaje anterior. Seguido a ello se examina la resistencia del potenciómetro digital y se aplica la relación de *Voltaje/Resistencia* para obtener la corriente, dicha corriente será la corriente anterior. En ese orden de ideas la potencia anterior se obtiene de la relación *Voltaje * Corriente*. El algoritmo P&O está basado en monitorear cada cierto tiempo cual es el valor de la potencia, si el valor de esta es mayor al valor que tenía anteriormente, se verifica el valor del voltaje, si es mayor al valor anterior de este mismo el algoritmo incrementara la salida PWM o por lo contrario disminuye este impulso del microcontrolador, en este caso sería el del Arduino. El aumento o disminución del PWM se verá reflejado en la función que se ejecuta en el MOSFET, es decir, a mayor frecuencia PWM la compuerta del MOSFET se mantiene cerrada, por lo tanto, habrá una circulación de corriente en el circuito para que la bobina almacene energía. A menor frecuencia PWM la compuerta del MOSFET se abre y libera la corriente almacena en la bobina hacia el condensador.

4.4.5 Inicialización del algoritmo de recuperación de energía.

Como se mencionó al inicio del capítulo, el controlador implementado en la investigación es Arduino, por lo tanto, se programó un algoritmo recuperador de energía el cual sigue un paso a paso de instrucciones lógicas con el fin de recuperar el mayor potencial de la celda, esto se logró evaluando el voltaje de la celda y enviando instrucciones al sistema de control. Principalmente, se incluyen las librerías de comunicación SPI, los módulos Micro SD y Reloj de tiempo real, potenciómetro digital y pantalla OLED, luego se define la ruta para la pantalla y se crea una variable para las dimensiones y comunicación de la misma. Se crea el archivo de almacenamiento y se ajusta los pines para el reloj como predeterminado, seguido a ello se asigna los pines al potenciómetro digital. Luego, se crean las variables controladas. Como se muestra en la Figura 17.

Figura 17.

Inicialización del algoritmo de recuperación de energía.

```

#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <DigiPotX9Cxxx.h>
#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

#define SCREEN_ADDRESS 0x3C

Adafruit_SSD1306 display = Adafruit_SSD1306(128, 64, &Wire);

File myFile;
RTC_DS3231 rtc;
DigiPot pot(2,3,4);

float voltageValue = 0;
float voltMax = 0;
float voltMin = 0;
float error = 0.001;
float VRef;
float Potencia = 0;

int VMFCINT;
float VMFC;

```

Seguido a ello se da paso a ejecutar las funciones de encendido del Arduino, el “Void Setup” que se ejecuta una única vez cuando se conecta el controlador a una fuente. Se da inicio a la comunicación serial a 9600 baudios, se asigna los pines 5, 6 y 7 como salidas, se inicia el módulo Micro SD a 53 baudios, el reloj y la pantalla oled, luego se escribe un mensaje en la pantalla y se realiza una verificación si dentro del módulo se encuentra la Micro SD; de ser así, se crea un archivo donde se escribirán los datos, luego se asigna nombre a cada columna y se cierra el archivo, en la pantalla se visualiza este proceso. Si lo anterior no presenta ninguna falla, en la pantalla se visualizará la fecha y hora actualizadas. Al conectar el reloj por primera vez se debe descomentar la línea 63 “rtc.adjust” para ajustar automáticamente la fecha (Anexos

Anexo 1). Lo anterior se evidencia en la Figura 18.

Figura 18.

Funciones de encendido.

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  SD.begin(53);
  delay(100);
  rtc.begin();
  delay(100);
  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
  display.clearDisplay();
  display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
  display.setTextSize(1,2);
  display.setCursor(33,20);
  display.print("Uni Cesium");
  display.setTextSize(1,2);
  display.setCursor(30,40);
  display.print("Control MPC");
  display.display();
  delay(2000);

  myFile = SD.open("Voltaje.csv", FILE_WRITE);
  if (myFile) {
    display.clearDisplay();
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
    display.setTextSize(1,2);
    display.setCursor(20,20);
    display.print("Archivo Nuevo");
    display.setTextSize(1,2);
    display.setCursor(20,40);
    display.print("Escribiendo...");
    display.display();
    myFile.println("Hora, Fecha, Voltaje, Corriente, Potencia, Corriente Carga");
    myFile.close();
    delay(1500);
  }
  //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
}

```

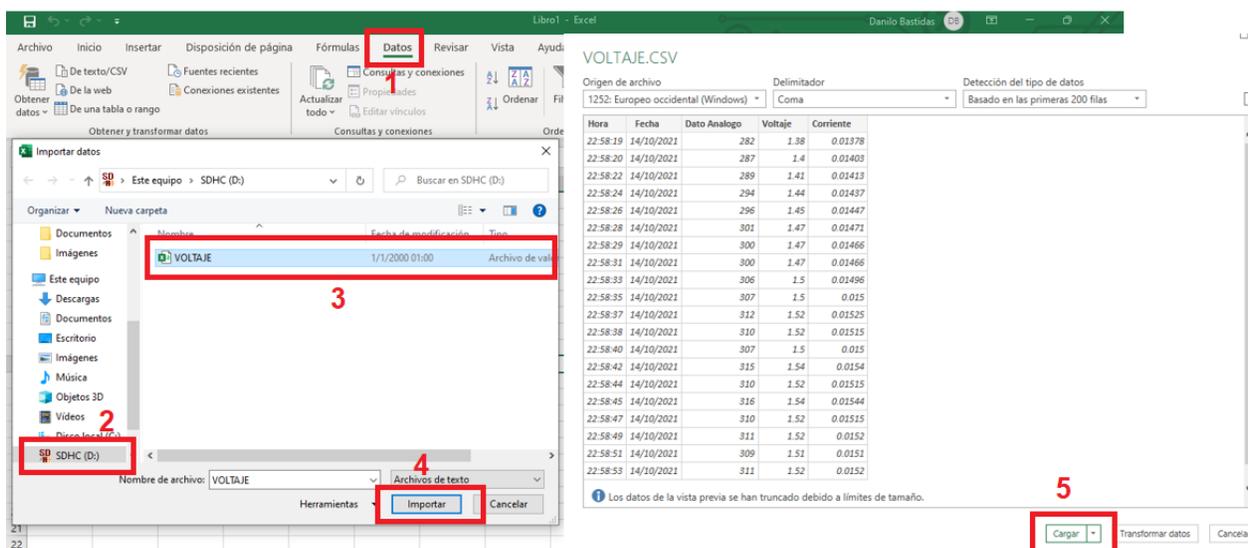
4.4.6 Etapa de recuperación de energía.

Después de ejecutar las funciones de encendido e inicializar los módulos se debe ejecutar el “Void Loop”, un bucle que marca el inicio del programa. En el “Void Loop” se crea el archivo en la memoria Micro SD con el nombre ‘Voltaje.csv’ y se programa para escribir. Luego se realiza una condición para comprobar si se creó el archivo correctamente, de ser así se inicia el programa, de lo contrario se visualiza un mensaje de error. Al abrir el archivo, se lee el dato análogo del puerto A0 del Arduino y se realiza la conversión AD, posteriormente se visualiza el valor del dato análogo y su equivalente en milivoltios; después de realizar las operaciones necesarias se aplica el algoritmo P&O. Lo anterior se guarda en la SD en el siguiente orden: hora y fecha, voltaje, corriente, potencia, corriente de carga. Se repite la operación cada 5 segundos. Para guardar en la SD se debe cambiar la palabra “Serial” por “myFile”. Este procedimiento se lo evidencia en el Anexo 2 desde la línea 74 hasta la 167.

4.4.7 Visualización de datos.

Para visualizar los datos guardados en la Micro SD, desde un computador se debe abrir previamente Excel e importar los datos desde la ubicación del archivo “Voltaje.csv” en la memoria SD, para versiones actualizadas de Office se presiona “Cargar” y los datos se organizan automáticamente. Seguir los pasos de la Figura 19.

Figura 19.
Importar datos.



Nota. El archivo creado cuando se inicia el algoritmo recuperador de energía puede ser en formato texto o como una extensión para Excel, en este caso, se utilizó la extensión de Excel para facilitar el procesamiento de la información más adelante.

4.5 Resultados del experimento.

Las condiciones ambientales a las cuales se exponen las celdas son bastante importantes para garantizar su productividad y su vida útil. En este estudio se evidenció una mejora cuando se congelo las celdas, de esta manera se logra una degradación lenta. Al momento de trabajar con ellas fueron expuestas a temperatura ambiente (18 °C a 24 °C), total oscuridad y sin perturbaciones externas (vibraciones). Bajo estas condiciones, las celdas implementadas entregaron su máximo potencial, el suficiente para satisfacer las necesidades de la investigación.

4.5.1 Medidas en Circuito Abierto

Los datos de voltaje que se presentan a continuación corresponden a las medidas tomadas durante dieciséis días. Se registraron las mediciones cada quince minutos para no ocupar demasiado espacio en la memoria ya que el ciclo completo en Arduino tarda aproximadamente 5 o 7 segundos. Con lo anterior, los datos de cada día se los registro en la Tabla 2. Se inicia la toma de datos conectando cuatro celdas en serie al puerto análogo del Arduino Mega2560 para monitorear el estado de las mismas, esto se realizó sin conectarle ninguna carga el día 18 de diciembre de 2021, registrando el primer voltaje en 1.17V, como se muestra en la Tabla 1. Las celdas se encuentran a temperatura ambiente, en completa oscuridad y sin estar expuestas a fuentes de calor u otro tipo de perturbaciones.

Tabla 1.
Registro voltaje día 1 sin carga.

Hora	Fecha	Dato Análogo	Voltaje (V)
09:45:52	13/12/2021	239	1.17
10:01:57	13/12/2021	238	1.16
10:17:03	13/12/2021	238	1.16
10:30:08	13/12/2021	239	1.17
10:47:14	13/12/2021	239	1.17

Nota. En la tabla se presenta una muestra de los datos tomados el primer día de pruebas con las celdas conectadas en serie y sin conectarles una carga.

Tabla 2.
Toma de datos de voltaje sin carga.

Fecha	Dato Análogo	Voltaje (V)
13/12/2021	239	1.1693
14/12/2021	234	1.1452
15/12/2021	233	1.1392
16/12/2021	231	1.1279
17/12/2021	229	1.1186
18/12/2021	228	1.1149
19/12/2021	225	1.104

20/12/2021	224	1.0941
21/12/2021	222	1.0877
22/12/2021	213	1.0452
23/12/2021	212	1.0408
24/12/2021	211	1.0358
25/12/2021	200	0.9806
26/12/2021	199	0.9757
27/12/2021	199	0.9728
28/12/2021	198	0.9713

Nota. En la tabla se presenta el promedio de voltajes de cada uno de los días que permaneció conectado el sistema recuperador de energía a las cuatro celdas en serie.

Las mediciones de la Tabla 2 se realizaron en circuito abierto, es decir, sin carga.

4.5.2 Medidas con carga.

Los datos de la Tabla 4 corresponden al promedio de cada uno de los dieciséis días que se tuvo conectadas las celdas junto con una carga al Arduino Mega2560 para verificar el comportamiento de las mismas. El día 11 de enero de 2022 se realizó nuevamente una medición de datos con las mismas cuatro celdas en serie y las condiciones mencionadas en 4.5.1, pero ahora se conecta con una resistencia de $1k\Omega$ en paralelo a las celdas, esto se hace con el fin de poner a prueba las celdas, es decir, que se genere una corriente en el circuito y verificar si las celdas son capaces de encender el transistor mosfet para iniciar con el proceso de recuperación de energía. El primer voltaje que se obtuvo fue de 1.06V como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.
Registro voltaje día 1 con carga.

Hora	Fecha	Dato Análogo	Voltaje(V)
10:16:17	11/1/2022	216	1.06
10:32:23	11/1/2022	216	1.06
10:46:28	11/1/2022	216	1.06
11:01:34	11/1/2022	216	1.06
11:16:39	11/1/2022	216	1.06

Nota. En la tabla se presenta una muestra de los datos tomados el primer día de pruebas con las celdas conectadas en serie y con una carga de $1k\Omega$.

Tabla 4.
Toma de datos con carga o entrada al controlador.

Fecha	Dato Análogo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
11/1/2022	217	1.0656	0.0010656	1.14E-03
12/1/2022	212	1.0411	0.0010411	1.08E-03
13/1/2022	211	1.0401	0.0010401	1.08E-03
14/1/2022	201	0.9877	0.0009877	9.76E-04
15/1/2022	197	0.9673	0.0009673	9.36E-04
16/1/2022	194	0.9515	0.0009515	9.05E-04
17/1/2022	190	0.93	0.00093	8.65E-04
18/1/2022	189	0.9239	0.0009239	8.54E-04
19/1/2022	185	0.906	0.000906	8.21E-04
20/1/2022	184	0.903	0.000903	8.15E-04
21/1/2022	175	0.8589	0.0008589	7.38E-04
22/1/2022	174	0.8585	0.0008585	7.37E-04
23/1/2022	170	0.8349	0.0008349	6.97E-04
24/1/2022	168	0.8251	0.0008251	6.81E-04
25/1/2022	154	0.7566	0.0007566	5.72E-04
26/1/2022	153	0.7525	0.0007525	5.66E-04

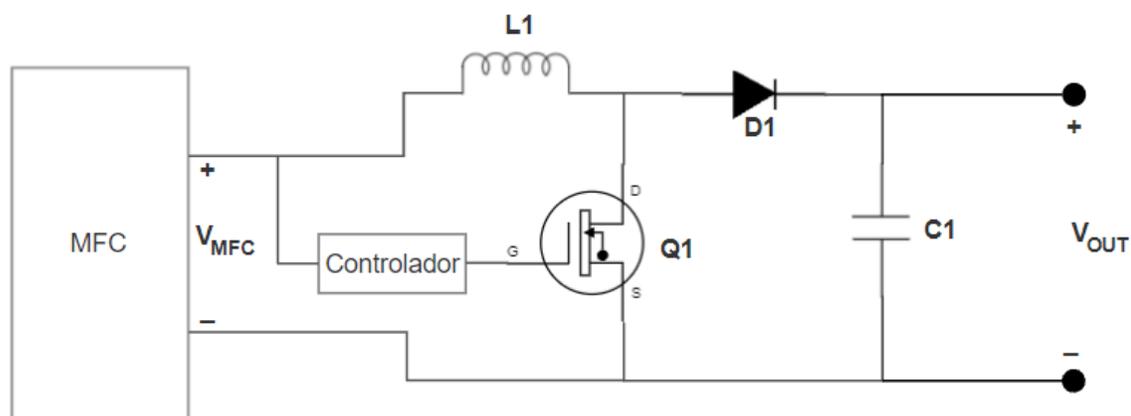
Nota. En la tabla se presenta el promedio de voltajes de cada uno de los días que permaneció conectado el sistema recuperador de energía a las cuatro celdas en serie. A la salida de las celdas se conectó una carga de $1k\Omega$.

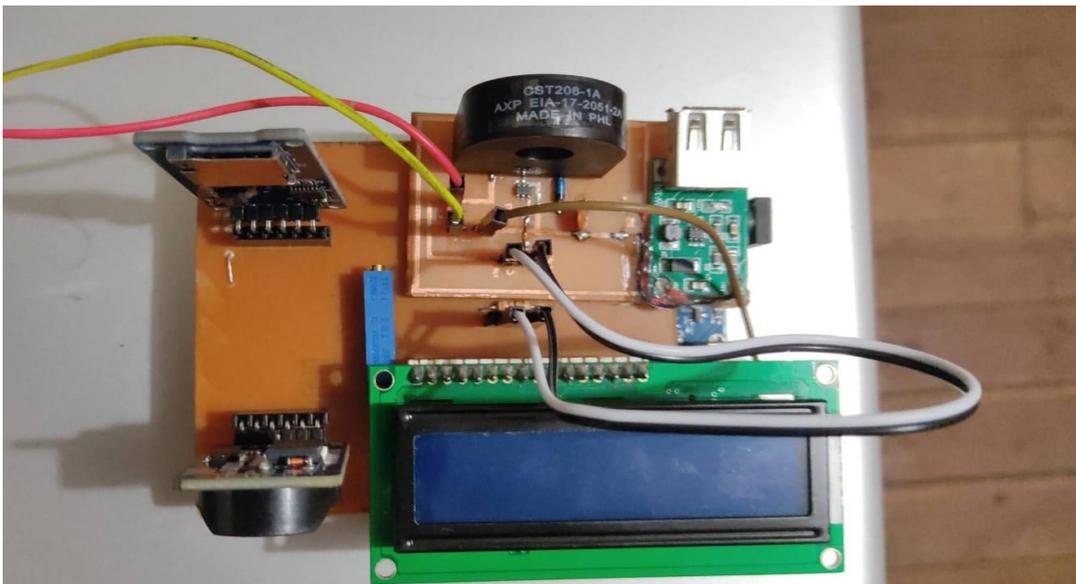
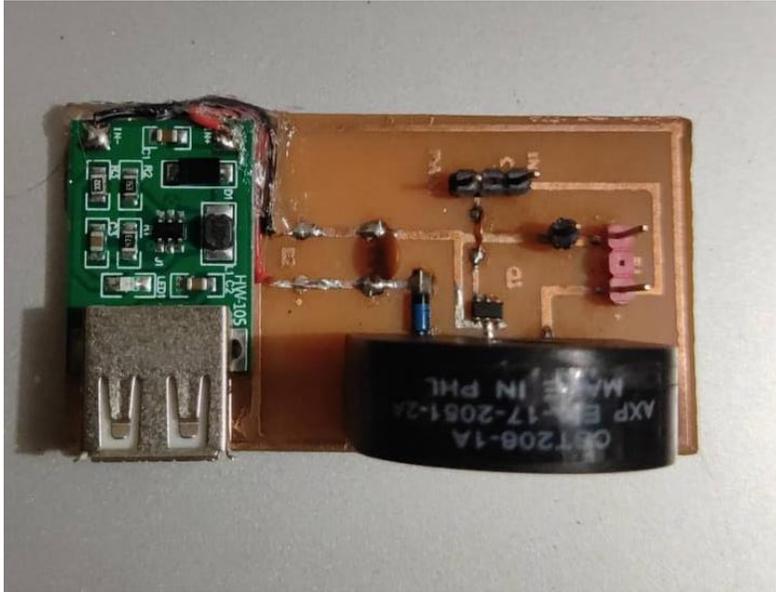
La Tabla 4 muestra las mediciones que se realizaron conectando las celdas con una carga de $1k\Omega$ en paralelo a la salida. Esto se puede entender también como los valores que se registran a la entrada del controlador.

4.5.3 Circuito recuperador de energía básico.

Se diseñó el recuperador de energía basado en un circuito “Energy Harvesting” (Park & Ren, 2012b) gobernado por una placa Arduino Mega y utilizando un algoritmo P&O. En la Figura 20 se muestra la conexión del circuito implementado. El circuito consta de un transistor MOSFET SI3460 (Q1), una bobina CST206-A de 14mH (L1), un diodo 1N5711 (D1) y un capacitor electrolítico de 10uF a 50V (C1), en paralelo a C1 se debe conectar el circuito elevador de voltaje (Boost). Dentro del algoritmo P&O se realiza una toma de datos y se evalúa el comportamiento de la celda y el circuito en general para obtener una señal PWM a la salida encargada de controlar el estado del MOSFET. Como se muestra en la Figura 20, la celda alimenta la bobina y el transistor. El voltaje que sale de la celda es la señal de entrada al controlador, NO es la alimentación del controlador. La salida del controlador es la encargada de cambiar el estado del transistor, es decir, encender o apagar dicho transistor.

Figura 20.
Conexión del recuperador de energía.





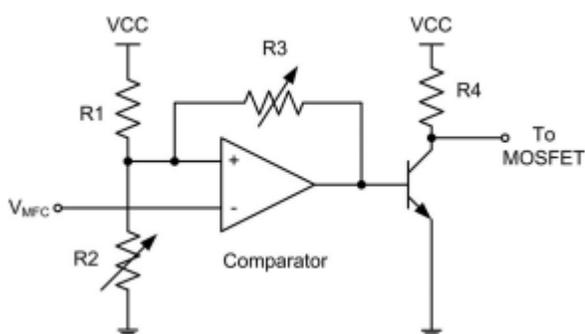
El circuito recuperador de energía implementado no brindó los resultados deseados, puesto que se omitió un paso, realizar la comparación del voltaje de la celda y un voltaje de referencia similar al de la celda por fuera del controlador. Se corrigió mediante programación dicho proceso, pero se produjo una confusión dentro del microcontrolador, afectando así la salida del PWM y por consiguiente afectando el “swicheo” en el transistor.

4.5.4 Circuito recuperador de energía mejorado.

Para mejorar el circuito recuperador de energía mencionado en 4.5.3 se adicionó un comparador, el cual evalúa el voltaje de la celda y un voltaje de referencia. En la Figura 21 se muestra la conexión del comparador implementado, donde V_{cc} es el voltaje de referencia obtenido de una salida análoga del Arduino, $R1$ y $R4$ son resistencias, $R3$ y $R2$ son potenciómetros digitales de $100k\Omega$ y $5k\Omega$ respectivamente y un comparador LMC7215 (Park & Ren, 2012a), pero los investigadores realizaron una adaptación de los valores para satisfacer la problemática presentada por la celda utilizada en la investigación.

Figura 21.

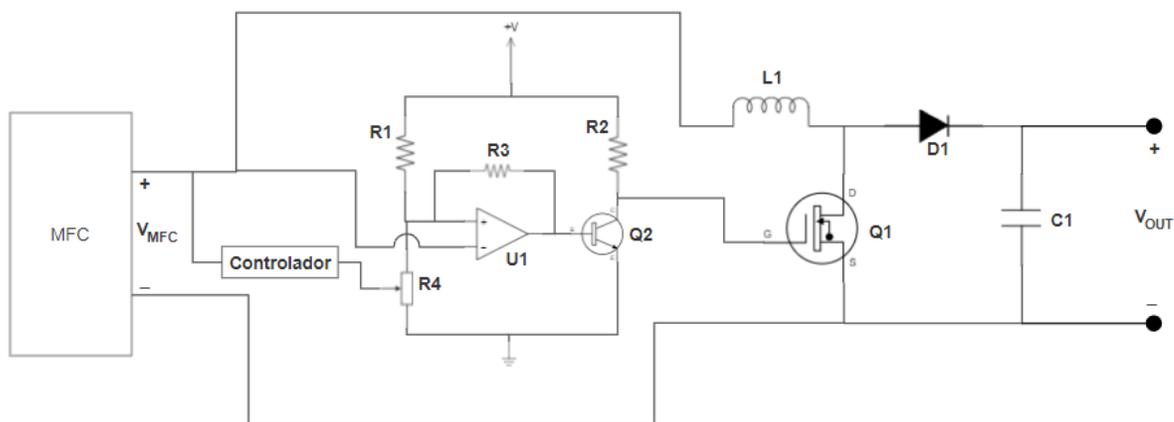
Comparador de voltaje.



Nota. La figura muestra el comparador de voltaje implementado en la investigación para mejorar los resultados del circuito recuperador de energía implementado. Tomado de Hysteresis-controller-based energy harvesting scheme for microbial fuel cells with parallel operation capability, por Park & Ren, 2012a.

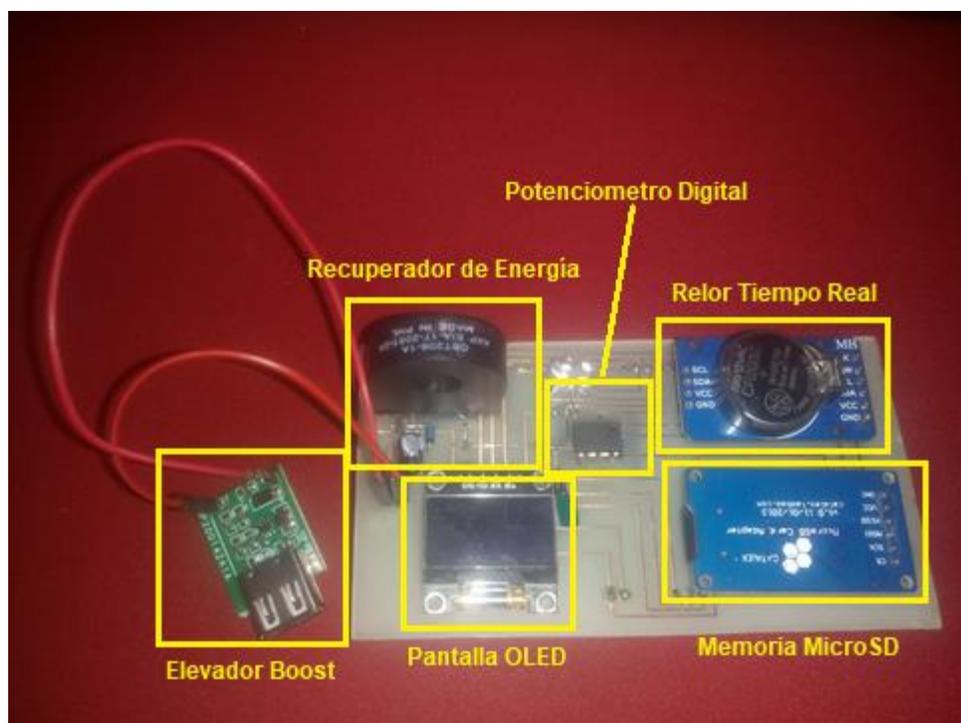
Figura 22.

Circuito recuperador de energía mejorado.



En la Figura 22 y Figura 23 se muestra la conexión del circuito recuperador de energía definitivo, como se mencionó anteriormente los componentes del recuperador son los mismos, únicamente se adicionó el comparador con los siguientes ajustes: R_1 y R_2 son resistencias de 220Ω , R_3 resistencia de $1k\Omega$, R_4 potenciómetro digital X9C104 de $100k\Omega$, U_1 comparador LMC7215 y Q_2 transistor 2N2222. Para alimentar el potenciómetro digital y el comparador se utilizó la salida de voltaje del Arduino de 3.3 V. El voltaje que entra al controlador no es para alimentarlo, es la señal que se evaluó. El voltaje que entra a R_1 y R_2 es el voltaje de referencia que entrega el controlador después de evaluar el voltaje de la celda. El sistema funciona en conjunto, realizando la comparación del voltaje y evaluando el estado de la celda; cuando el voltaje de la celda es menor que el de referencia se disminuyen los pasos en el potenciómetro digital, es decir, se reduce la resistencia y cuando el voltaje de la celda es mayor al de referencia se agregan pasos al potenciómetro o se aumenta la resistencia. El transistor a la salida del comparador está conectado de tal manera que aumente el voltaje que entra al mosfet para activarlo o desactivarlo.

Figura 23.
Distribución del circuito recuperador de energía.



La Figura 23 muestra la distribución del circuito recuperador de energía implementado en la investigación. En la parte derecha, se tiene el módulo encargado de la adquisición de datos como hora, fecha (Reloj Tiempo Real DS3231) y el módulo Micro SD de almacenamiento de datos. En la parte central superior se encuentra el recuperador de energía de la Figura 22 descrito en 4.3.1. En la parte izquierda está el elevador Boost descrito en 4.3.2.

Para verificar el funcionamiento del recuperador en conjunto con la celda, se deben monitorear las acciones realizadas en el potenciómetro digital y el estado del transistor mosfet; como las señales que se encargan de activar o desactivar estos dos componentes son digitales, se guarda estas señales en un puerto digital del Arduino para graficarlas más adelante.

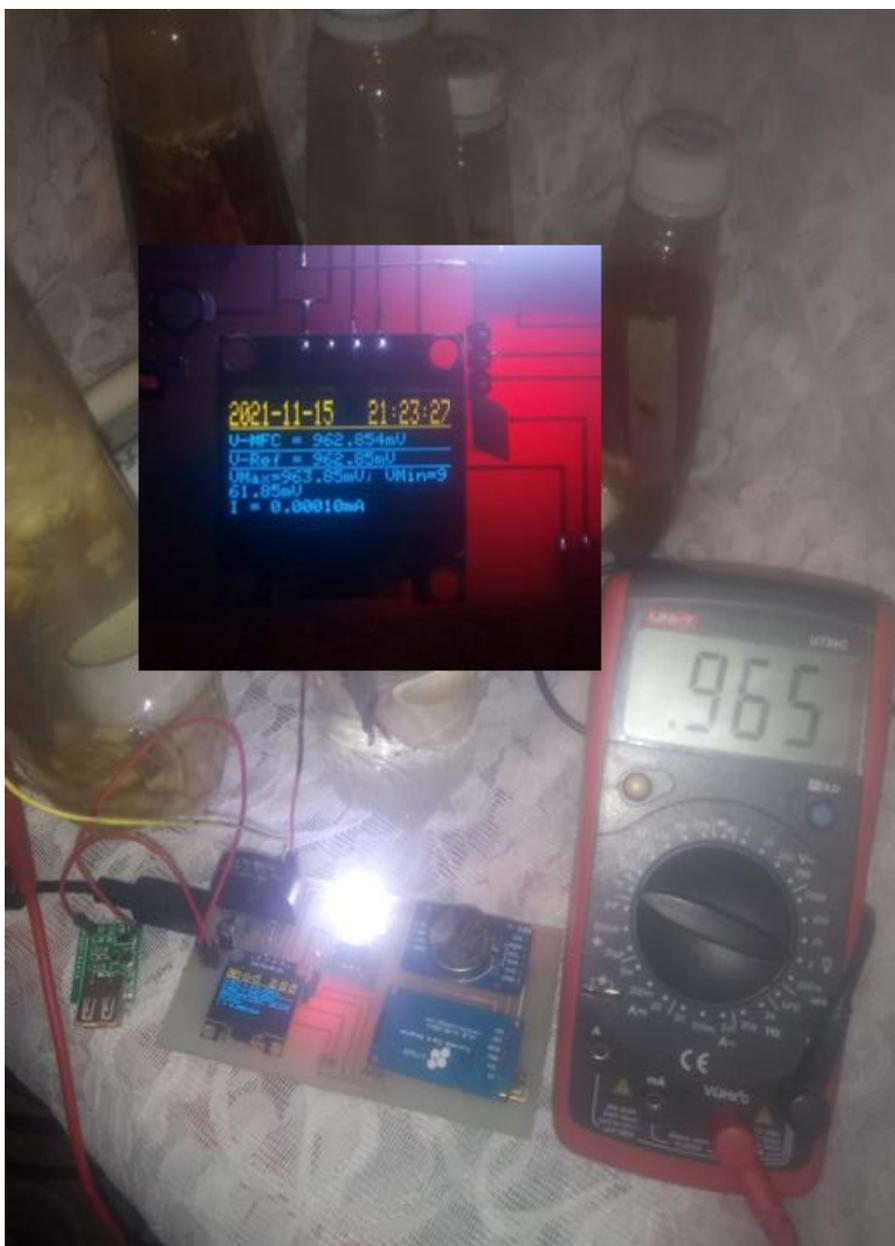
Por otro lado, se hace un estudio del voltaje y la corriente que se logra recuperar de las celdas, esto con el fin de verificar que tan útiles serán al momento de conectarlas a una carga. Dicha carga será representada con componentes de baja potencia y también con elementos que requieran ser cargados.

Figura 24.
Sistema recuperador de energía.



Nota. Sistema recuperador de energía conectado a las MFC para iniciar el proceso de recolección. Además, se conecta un multímetro directamente a las celdas configuradas en serie, teniendo un voltaje inicial de 0.966V que será comprobado por el circuito recuperador de energía.

Figura 25.
Sistema de recuperación de energía en funcionamiento.



En las figuras anteriores se muestra el circuito recuperador de energía conectado a la fuente, en este caso las celdas de combustible micróbicas. En la Figura 24 una imagen clara del sistema antes de ponerlo en funcionamiento; la conexión del multímetro se hace directamente en la celda, esto con el fin de verificar que el voltaje medido por el recuperador sea el voltaje entregado por la celda. En la Figura 25 el sistema está en funcionamiento y listo para registrar datos, pero se observa que el voltaje leído por el multímetro es diferente al mostrado en la pantalla, o sea, el medido por el controlador, en ese orden de ideas se debe calcular el error relativo de la medición del voltaje

obtenido por el recuperador con respecto al leído por el multímetro. Con lo anterior, los investigadores desean conocer el error relativo a la entrada del controlador.

Para calcular el error relativo se debe calcular el error absoluto. El error absoluto es la media de los valores obtenidos después de realizar una cantidad de mediciones en iguales condiciones (Blandon Santana & Mosquera A., 2005). Estos datos se organizan en una tabla junto con las veces que se repite cada medición, así:

Tabla 5.
Cálculo del valor relativo.

Medida (X_i)	Frecuencia (f_i)	($X_i * f_i$)	$\varepsilon_a = \bar{X} - X_i$
0.9128 V	1	0.9128	0.0556
0.9328 V	2	1.8656	0.0356
0.9428 V	4	3.7712	0.0256
0.9528 V	20	19.056	0.0156
0.9628 V	9	8.6652	0.0056
0.9728 V	34	33.0752	-0.0044
0.9828 V	29	28.5012	-0.0144
0.9928 V	1	0.9928	-0.0244
	100	0.9684	0.01185

Nota. La Tabla 5 es la base para calcular el error relativo, pero únicamente muestra datos de un día. Como la toma de datos se llevó a cabo durante varios días se repitió el mismo procedimiento con los datos recopilados de cada día. En la primera columna muestra las medidas que se realizaron, la segunda columna la frecuencia con que se repite cada medida, la tercera columna es el producto de la medida con la frecuencia. La columna cuatro es el error absoluto de cada medida, resultado de la resta de la media con respecto a los valore medidos.

De acuerdo a lo anterior, el error absoluto de las mediciones es $\varepsilon_a = 0.01185$ y se expresa 0.9684 ± 0.01185 .

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{\bar{X}} * 100\%$$

$$\varepsilon_r = \frac{0.01185}{0.9684} * 100\%$$

$$\varepsilon_r = 1.2236 \%$$

Con los datos calculados anteriormente, el error relativo del recuperador de energía con respecto al multímetro es de 1.22 %.

4.5.5 Interpretación de Datos

Con los datos recopilados durante dieciséis días se realizó el análisis de la calidad de energía que entregan las MFC.

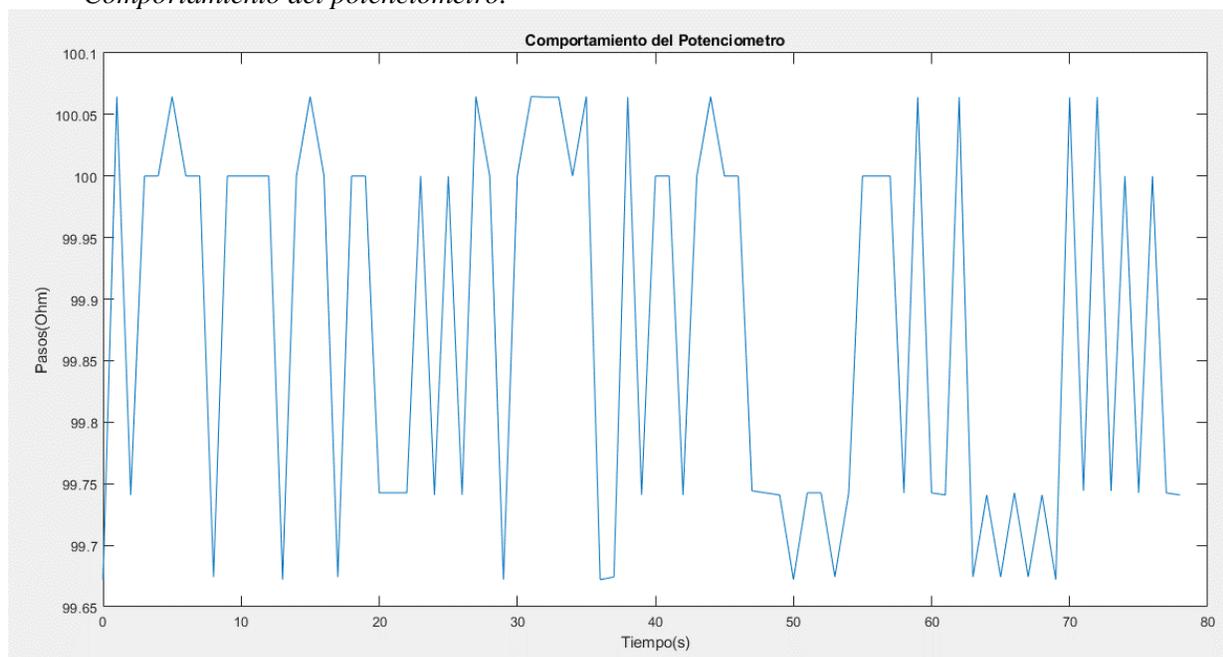
Tabla 6.
Toma de datos salida del controlador.

Fecha	Dato Análogo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
11/1/2022	198	0.9684	0.0009684	9.38E-04
12/1/2022	193	0.9439	0.0009439	8.91E-04
13/1/2022	192	0.9429	0.0009429	8.89E-04
14/1/2022	182	0.8905	0.0008905	7.93E-04
15/1/2022	178	0.8701	0.0008701	7.57E-04
16/1/2022	174	0.8543	0.0008543	7.30E-04
17/1/2022	170	0.8328	0.0008328	6.94E-04
18/1/2022	169	0.8267	0.0008267	6.83E-04
19/1/2022	165	0.8088	0.0008088	6.54E-04
20/1/2022	164	0.8058	0.0008058	6.49E-04
21/1/2022	155	0.7617	0.0007617	5.80E-04
22/1/2022	155	0.7613	0.0007613	5.80E-04
23/1/2022	150	0.7377	0.0007377	5.44E-04
24/1/2022	148	0.7279	0.0007279	5.30E-04
25/1/2022	134	0.6594	0.0006594	4.35E-04
26/1/2022	134	0.6553	0.0006553	4.29E-04

Nota. La tabla muestra el promedio de los voltajes recopilados en cada día durante los dieciséis días que duro el experimento.

Todos los datos que se han obtenido son procesados por Matlab, aquí, se podrá obtener imágenes claras de la forma en que se comportó el sistema recuperador de energía durante este tiempo. A continuación, se muestran las gráficas obtenidas y la explicación de las mismas:

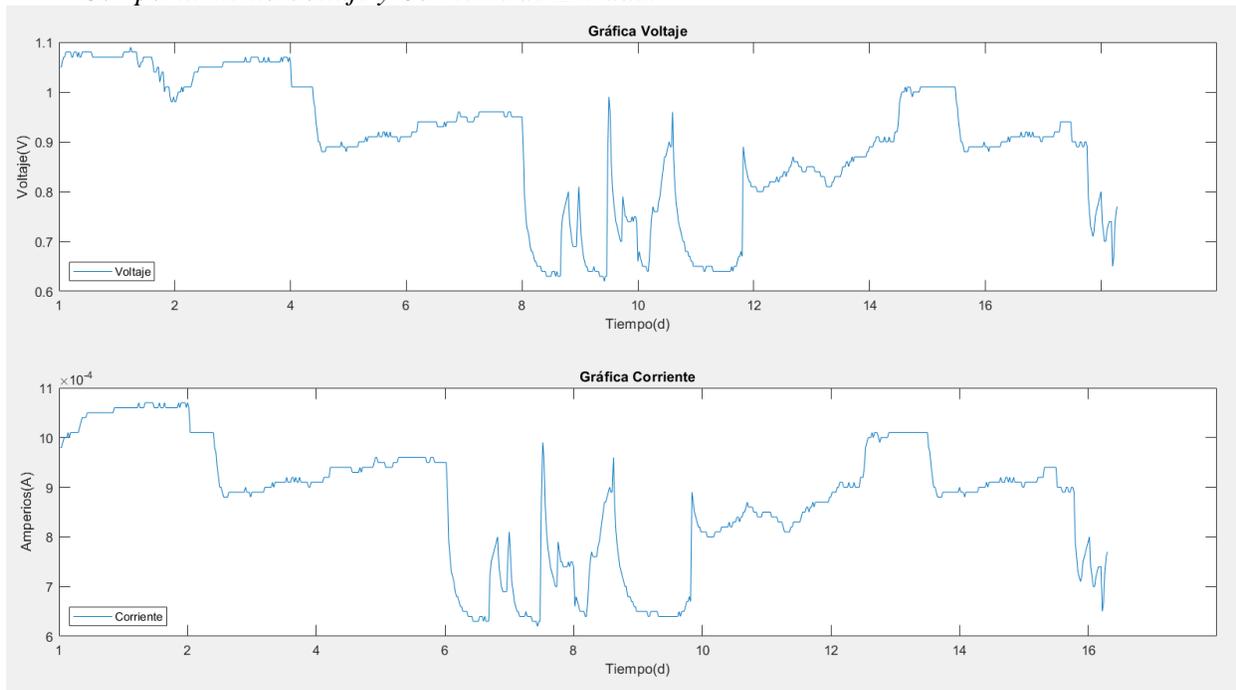
Figura 26.
Comportamiento del potenciómetro.



Nota. La gráfica indica el comportamiento del potenciómetro, es decir, la variación de la resistencia para ajustar el MPPT de la celda. Se utilizaron únicamente 80 datos recopilados de un día para graficar y entender el funcionamiento.

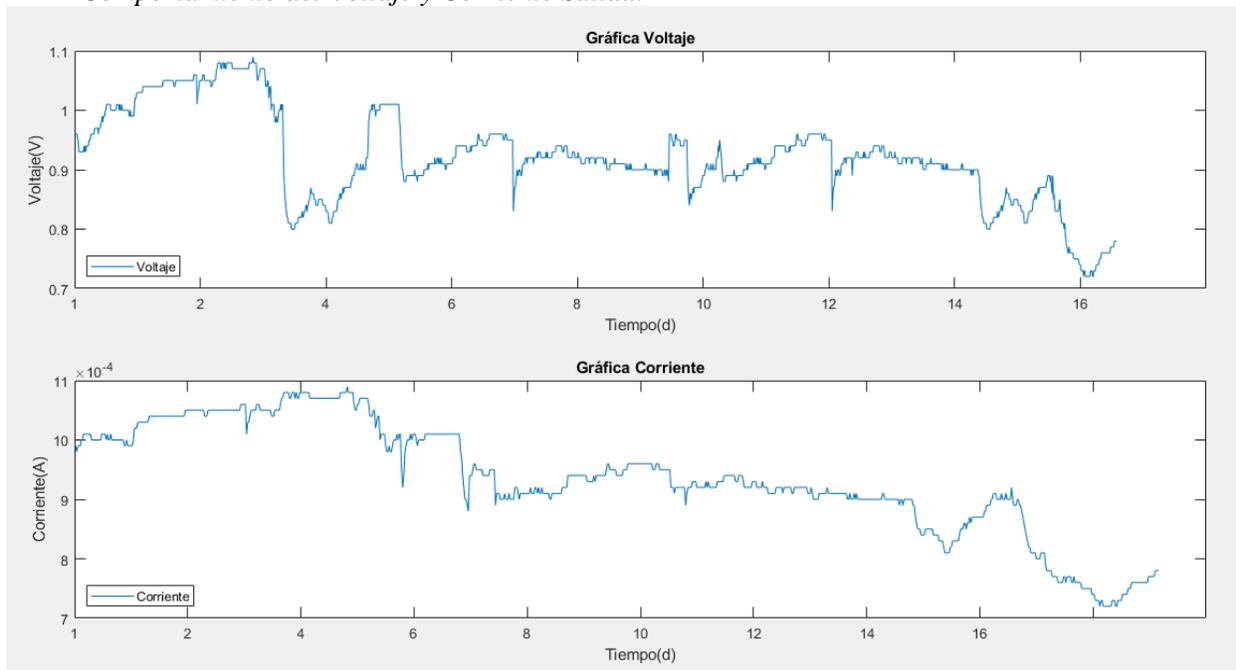
En la Figura 26 se observa el comportamiento del potenciómetro digital, un elemento indispensable que varía su resistencia luego de evaluar el estado de la celda. Dicho potenciómetro dispone de 100 pasos y cada paso corresponde a aumentar o disminuir su valor interno, para obtener la resistencia de cada paso se debe dividir el valor del potenciómetro entre el número de pasos que muestra el datasheet, en este caso, $100k\Omega$ entre 100 pasos para un total de $1k\Omega/paso$. La relación que tiene los pasos del potenciómetro con respecto al MPPT es que al aumentar la resistencia hay un mayor consumo de corriente por lo tanto se le exige a la celda entregar su máximo potencial. Teniendo claro lo anterior, la gráfica revela una muestra del valor de operación del potenciómetro en un determinado tiempo, los puntos máximos indican que la celda se encuentra en su mejor estado y puede entregar su máximo voltaje, cuando el valor de la resistencia disminuye indica que se reevalúa la celda para conocer su nuevo voltaje máximo y se ajusta la resistencia para extraer el máximo potencial que puede entregar la celda en ese instante.

Figura 27.
Comportamiento Voltaje y Corriente de Entrada.



Nota. La figura muestra el voltaje y la corriente de entrada del controlador durante los 16 días que se llevó a cabo la toma de datos.

Figura 28.
Comportamiento del Voltaje y Corriente Salida.



Nota. La figura muestra el voltaje y la corriente a la salida del controlador durante los 16 días que se llevó a cabo la toma de datos.

En la Figura 27 se muestran los datos del voltaje entregado por la celda y la corriente que se genera en la misma, esto se entiende también como el voltaje y corriente de entrada al controlador.

En la Figura 28, en la parte superior se evidencia el comportamiento del voltaje, se puede ver claramente que se parte desde 0.96 V aproximadamente, corroborando el voltaje que se muestra en la Figura 25. En la parte inferior se puede ver el comportamiento de la corriente a la salida del controlador, cabe resaltar que estas mediciones son antes del elevador boost.

Con los datos obtenidos anteriormente se calcula la eficiencia del sistema de control. Arze et al., (2006) dice que para aplicar la fórmula de la eficiencia se debe evaluar el comportamiento de un objeto de estudio. En esta investigación se realizó una comparación de la potencia de salida (Tabla 6) con respecto a la entrada (Tabla 4) de cada uno de los días que se tomó los datos. En ese orden de ideas, se calcula la eficiencia del primer día y se tiene en cuenta el mismo procedimiento para los días siguientes, en la Tabla 7 se evidencia los cálculos de cada uno de los días, así:

$$(\lambda) = \frac{P_o}{P_i} * 100$$

$$(\lambda) = \frac{P_o}{P_i} = \frac{0.000937799}{0.001135503} * 100 = 82.59 \%$$

Tabla 7. Cálculo de eficiencias.

Fecha	Potencia de salida (W)	Potencia de entrada (W)	Eficiencia (%)
11/1/2022	0.000937799	0.001135503	82.59
12/1/2022	0.000890947	0.001083889	82.20
13/1/2022	0.000889060	0.001081808	82.18
14/1/2022	0.000792990	0.000975551	81.29
15/1/2022	0.000757074	0.000935669	80.91
16/1/2022	0.000729828	0.000905352	80.61
17/1/2022	0.000693556	0.000864900	80.19
18/1/2022	0.000683433	0.000853591	80.07

19/1/2022	0.000654157	0.000820836	79.69
20/1/2022	0.000649314	0.000815409	79.63
21/1/2022	0.000580187	0.000737709	78.65
22/1/2022	0.000579578	0.000737022	78.64
23/1/2022	0.000544201	0.000697058	78.07
24/1/2022	0.000529838	0.000680790	77.83
25/1/2022	0.000434808	0.000572444	75.96
26/1/2022	0.000429418	0.000566256	75.83

Para saber que tan eficiente resulta el sistema de control se realiza un promedio de todos los días, es decir, de la Tabla 7 se promedia los valores de la columna Eficiencia, para lo cual se obtiene un valor de 79.65 %.

Después del controlador, tanto el voltaje como la corriente se ven afectados por el consumo de los componentes propios del sistema implementado, a pesar de que son de bajo consumo. Si se compara la Figura 27 y la Figura 28, que corresponden a las gráficas de voltaje y corriente de entrada y salida del controlador correspondientemente, se ve claramente que los valores disminuyen. Pero, realizando un análisis de estas gráficas, el controlador cumple con su propósito, que es mejorar estas señales a su salida, es decir, se muestra una estabilización tanto del voltaje como de la corriente, a pesar que con el pasar de los días el potencial de la celda disminuye.

Se conecta al sistema una pila recargable y se realizan mediciones de corriente, monitoreando así el estado de la pila (Tabla 6), con el fin de conocer el tiempo que tardará en cargar y establecer una relación para obtener la carga máxima.

Jaume Martínez (2017) realiza la estimación de carga de una batería: “El voltaje por celda de la familia de litio oscila entre los 3,3 y los 3,7 V, lo que permite diseñar baterías con una única celda. Estas baterías no requieren mantenimiento y tienen una ratio de autodescarga muy bajo. Para estimar el tiempo que se necesita para cargar la batería se implementa la ley de Peukert. La ley de Peukert consiste en una relación entre el estado de carga de una batería y su ratio de descarga, a mayor ratio de descarga, menor capacidad de la batería.”

La ecuación de Peukert es la siguiente:

$$C_p = I^k \cdot t \quad (4)$$

Siendo:

C_p : Capacidad de la batería descargándola a 1 amperio (h)

I : Corriente de descarga real (A).

t : Tiempo de descarga real (h).

k : Constante de Peukert (adimensional)

La fórmula anterior se la puede reformular considerando que H es el tiempo en el que se descarga la batería obteniendo así la siguiente formula:

$$t = H \left(\frac{C}{I \cdot H} \right)^k \quad (5)$$

Para saber la capacidad de una batería y cuanto se puede almacenar para posteriormente descargar en una medida de (Ah), pues dicho valor se calcula mediante la implementación de la siguiente formula:

$$C = \int_{t_1}^{t_2} I \cdot dt \quad (6)$$

La ecuación (6) se la puede aplicar de manera general, y sirve tanto para calcular la capacidad en carga y descarga. También se puede implementar las curvas de carga y descarga con la finalidad de definir el funcionamiento y prestación de una batería.

En relación con lo anterior, para estimar el tiempo de carga de una batería se determinó la capacidad de la batería en Ah, se considera que la batería se encuentra descargada completamente, de igual manera se debe conocer la corriente que suministra el cargador, en este caso el sistema recuperador de energía. Finalmente se asocia el tiempo de carga al dividir la capacidad de la batería entre la capacidad del cargador, así:

$$t_{carga} = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{capacidad del cargador}}$$

Para hacer la estimación de la carga se toma como ejemplo la batería de la Figura 29 con los siguientes datos 3.7V y capacidad de carga 850mAh.

Figura 29.
Batería de Litio.



$$t_{carga} = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{capacidad del cargador}} = \frac{0.85 \text{ Ah}}{0.000815 \text{ A}} \cong 1042 \text{ horas} \cong 43 \text{ días}$$

Al reemplazar los datos en la ecuación, se tiene que la batería se cargará completamente en 1042 horas aproximadamente, es decir, 43 días.

Figura 30.
Batería GPS ST310U.



Se realizó el mismo procedimiento para verificar el tiempo de carga de una batería de menor consumo que se encuentra en un sistema de posicionamiento global (GPS) ST310U. De acuerdo al fabricante, la batería puede durar como mínimo seis horas enviando reportes cada tres minutos (Kim, 2019), entendido esto se obtuvo lo siguiente:

$$t_{carga} = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{capacidad del cargador}} = \frac{0.22 \text{ Ah}}{0.000815 \text{ A}} \cong 270 \text{ horas} \cong 11 \text{ días}$$

Conectando la batería de la Figura 30 al sistema de control implementado en la investigación se logra una carga máxima en 11 días. Con respecto al fabricante, el dispositivo ST310U consume la carga de la batería en seis horas, lo cual no sería favorable si se desea tener el dispositivo en funcionamiento por más tiempo. Para disminuir el tiempo de carga de estos dispositivos se debe cambiar el tipo de celdas, por unas que entreguen mayor corriente o utilizar un arreglo que favorezca a la corriente de salida del sistema.

Con los datos obtenidos a lo largo de la investigación, el sistema de control es eficiente porque se extrae la mayor cantidad de potencia de las celdas, los componentes utilizados son de bajo consumo y no afectan la recuperación de la energía ya que no presenta pérdidas significativas.

Teniendo en cuenta las condiciones en que se desarrolló la investigación, el tipo de celdas utilizadas, los materiales de construcción del sistema de control. Es decir, se llevó a cabo fuera de un laboratorio, de manera casera, implementando celdas de tipo orgánico y desarrollando un

sistema de control limitado, orientando la investigación hacia la eficiencia. En ese orden de ideas, se concluye que el sistema recuperador de energía es eficiente y totalmente funcional ya que logro recuperar el mayor potencial producido por las celdas en todo momento, además, se realizó la comparación entre la densidad de potencia a la salida del recuperador implementado con respecto al documento base y se obtuvo una eficiencia del 79.56 %, pero la corriente suministrada por las celdas trae como consecuencia una carga lenta en dispositivos que tengan mayor capacidad de carga de batería.

Para finalizar se aclara que la investigación está enfocada en la evaluación del sistema cosechador de energía, más no en el estudio de la celda, en ese orden de ideas, el sistema de control implementado en la investigación es eficiente y funciona óptimamente, pero al estar conectado a unas celdas cuya producción es baja, no se aprecia con mayor claridad el rendimiento del sistema de control. En comparación con otra investigación los resultados del experimento son favorables para los investigadores.

Conclusiones

- El cálculo de la eficiencia del sistema recuperador de energía fue calculado mediante el análisis de la potencia, es decir, en qué porcentaje la potencia de salida mejora con respecto a la de entrada. En ese orden de ideas, se obtiene una eficiencia del controlador de 79.65%, que teniendo en cuenta las condiciones en las que se desarrolló la investigación, se obtuvo resultados de acuerdo a la hipótesis de investigación.
- El recuperador de energía se comportó de manera óptima, esto se puede ver al comparar la salida con respecto a la entrada. En la entrada del recuperador se obtiene valores de las variables de estudio muy dispersos, pero a la salida del controlador la corriente es la que más evidencia una mejora, siendo una señal más estable, aunque sigue estando en una escala muy baja.
- La variedad de celdas que se pueden construir con base a las bacterias es bastante amplia y es muy importante saber qué tipo de celda se desea construir, lo más recomendable es optar por una celda orgánica y con disponibilidad de bacterias. En Colombia, se encuentra una variedad muy conocida y a su vez fácil de usar, el *Geobacter*, Romero et al. (2012) tras estudios investigativos muestra una pequeña lista de la ubicación de las bacterias a lo largo del país.
- Para un mayor desempeño de las celdas se debe agregar sustratos que mejore la producción de energía, Pant et al. (2010) brinda una lista detallada del tipo de sustrato y el aumento en la eficiencia de las MFC.
- Una celda orgánica es la mejor opción por su fácil tratamiento y la facilidad de conseguir su alimento, en comparación con las *G. sulfurreducens* que producen energía a partir de metales pesados como el plomo transformándolos a metales neutros y se las encuentra en los sedimentos de los ríos (UNAM, 2019), otro tipo son las bacterias generadoras de electricidad a partir del aire en presencia de humedad (BBC News, 2020). Al utilizar una celda que se encarga de degradar materia orgánica se debe tener en cuenta que la materia utilizada sea baja en azúcar para evitar una degradación acelerada.

- La recuperación de energía se vio afectada por las dimensiones de las celdas, al utilizar una MFC de tamaño pequeño, la potencia suministrada fue baja y los resultados se vieron reflejados en la aplicación, demostrando una carga lenta en la batería implementada.
- El sistema de control propuesto fue construido con elementos de bajo consumo, por lo que se evidencio una perdida baja en los componentes. Esto fue favorable para aprovechar el máximo potencial entregado por la celda. Además, los cambios que se realizaron en el sistema hicieron que se capte mejor la potencia de la celda transformándola a una forma aprovechable.
- El funcionamiento en conjunto del recuperador de energía y el elevador boost es el adecuado para cargar un dispositivo de bajo consumo, pero cabe resaltar que al estar conectado a una fuente que no suministra un potencial alto, el tiempo de carga será muy extenso, eso dependerá de la capacidad de almacenamiento del dispositivo. El tiempo de carga es directamente proporcional a la capacidad de almacenamiento, es decir, entre mayor capacidad de almacenamiento, mayor será el tiempo de carga y viceversa.
- El diseño del sistema de control es practico, porque los componentes implementados para el cosechador de energía son SMD, es decir, las dimensiones de los elementos están en escala milimétrica. Ahora bien, el sistema de control junto con el elevador y los módulos son prácticos al momento de su manipulación porque no requieren de mucho espacio. Por otro lado, el tamaño de las celdas impide su movilidad porque se vería afectada la producción energética y la vida útil de las celdas, en ese orden de ideas la producción de energía disminuye si se producen perturbaciones y la vida útil de las celdas se vería comprometida ya que se afectaría su infraestructura.
- Al retirar el esmalte presente en el cobre utilizado para los electrodos, presentó una pequeña corrosión al estar sumergido en un fluido. Esto libera iones de cobre siendo tóxico para las bacterias y afectando su vida útil.

Recomendaciones

Para complementar el estudio realizado en la investigación se pone en conocimiento del lector algunos aspectos importantes que lo llevarán a profundizar en una investigación futura:

- El intercambio iónico o protónico que se realiza debe ser de la manera más limpia posible, es decir, evitar que haya pérdidas por impedancia alta, pérdidas por sulfatación, pérdidas por materiales tóxicos, en ese orden de ideas se eligió una membrana de intercambio protónico con un puente salino. Como dice Medina & Zapata (2017) en su investigación: posee una baja permeabilidad al paso de protones en comparación con otras membranas, pero posee una gran disponibilidad en el mercado, además de su bajo costo. Por otro lado, emplear materiales conductores con baja impedancia o que brinde una excelente conductividad también influye en el intercambio iónico, para la investigación se usó aluminio y cobre, materiales altamente oxidantes y tóxicos. Se recomienda usar plata u oro, ferrita, grafito, carbón o fibra de carbono para los electrodos. Finalmente, variar los porcentajes del puente salino, es decir, aumentar o disminuir la cantidad de gramos de soluto y los mililitros de solvente.
- A pesar de extraer un voltaje pequeño de la celda, gracias a una adecuada configuración se logró obtener más de 1V, es por eso por lo que se recomienda utilizar elementos de baja potencia o de bajo consumo, pero con un rango de trabajo bastante amplio, es decir, que su límite de operación sea superior al voltaje que entrega la celda. Como fue el caso del diodo 1N5711 que se vio afectado al superar su rango de voltaje.
- Para una futura investigación se podría implementar un elevador DC-DC distinto al elevador Boost, cuyas características y parámetros varíen el voltaje obtenido de las celdas de combustible microbiano, un claro ejemplo podría ser un ladrón de julios cuyas características y funcionamiento son distintas a un elevador Boost.

Referencias

- Alvarez Brotons, X. (2004). Control predictivo de canales de riego utilizando modelos de predicción de tipo Muskingum (primer orden) y de tipo Hayami (segundo orden). *Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona - Enginyeria de Camins, Canals i Ports*, 2240, 5–12.
- Arze, C., Birbuet, J., Curi, C., Duran, P., Espinosa, C., Guamán, D., Lora, S., Espinosa, A., Romero, C., Ruiz, A., Velazco, F., & Zapata, J. (2006). *Método para evaluar la eficiencia de los procesos productivos*. January 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4310.1206>
- BBC News, M. (2020). *Las bacterias que pueden producir electricidad del aire*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-51548249>
- Blandon Santana, A., & Mosquera A., I. D. (2005). *Planimetría*. 0. <https://bdigital.uniquindio.edu.co/handle/001/5932>
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25(5), 464–482. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>
- Fonseca, R. (2017). *Implementación de un circuito de cosecha y almacenamiento de energía eléctrica producida por celdas microbianas Ricardo Esteban Fonseca Ortega Ricardo Esteban Fonseca Ortega*.
- Fuentes-Albarrán, C., Del Razo, A., Juárez, K., & Alvarez-Gallegos, A. (2012). Influence of NaCl, Na₂SO₄ and O₂ on power generation from microbial fuel cells with non-catalyzed carbon electrodes and natural inocula. *Solar Energy*, 86(4), 1099–1107. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.12.011>
- Hernández, F., Perez, A., Sanchez, S., & Lozano, L. (2011). *Montaje Y Estudio De Una Pila De Combustible Depuración Simultánea De Aguas Residuales*. March 2015.
- Jaume Martínez, B. (2017). Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas. *Etseib*, 53. http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/104855/TFG_Jaume_Martinez_Metodos_de_estimacion_del_estado_de_carga_de_baterias_electroquimicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Kim, J. (2019). Operation Manual ST310U. *Thorlabs*, 100(January), 1–40.
- Luo, Y., Zhang, R., Liu, G., Li, J., Li, M., & Zhang, C. (2010). Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1–3), 759–764. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.100>
- Martín Chicharro, G. J. (2016). PPT: Sistemas De Almacenamiento De Energía. *Presentation*, 1–133.
- Martínez Austria, P. F. (2001). Paradigmas emergentes para el manejo del agua en el siglo XXI. *Ingeniería Hidráulica*, XVI(1973), 127–143.
- Martínez, D., Dallago, E., Liberale, A., & Molognoni, D. (2015). A power management system for the parallel connection of microbial fuel cells with different electrical characteristics. *Proceedings of the 6th European Fuel Cell - Piero Lunghi Conference, EFC 2015, December*.
- Medina, S., & Zapata, M. (2017). EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y DISMINUCIÓN DE DQO EN AGUA RESIDUAL SINTÉTICA MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS A ESCALA LABORATORIO. *Solid State Ionics*, 2(1), 1–10. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167273817305726><http://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-01772-1><http://www.ing.unitn.it/~luttero/laboratoriomateriali/RietveldRefinements.pdf><http://www.intechopen.com/books/spectroscopic-analyses-developme>
- Meehan, A., Gao, H., & Lewandowski, Z. (2011). Energy harvesting with microbial fuel cell and power management system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(1), 176–181. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2054114>
- Morante, J. R. (2014). *El almacenamiento de electricidad*.
- Ogata, K. (2010). Análisis y diseño de sistemas de control por el método del lugar de las raíces. In *Ingeniería de control moderna*. www.pearsoneducacion.com
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533–1543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>
- Park, J. Do, & Ren, Z. (2012a). Hysteresis-controller-based energy harvesting scheme for microbial fuel cells with parallel operation capability. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(3), 715–724. <https://doi.org/10.1109/TEC.2012.2196044>

- Park, J. Do, & Ren, Z. (2012b). Hysteresis controller based maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 205, 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.053>
- Programa de Ingeniería Electrónica, U. (2015). *Proyecto Educativo del Programa*. <http://noticias.unicesmag.edu.co/grupo-de-investigacion-rampa/>
- Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Informacion Tecnologica*, 24(6), 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>
- Rodríguez, A., & Ortiz, M. (2020). *Baterías de ion litio: presente y futuro*. 165–178. <https://unlp.edu.ar/frontend/media/81/35081/a05b0f92e176924a0a8a841528d0df88.pdf>
- Romero, A., Vásquez, J., & González, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Tecnura*, 16, 117–142.
- Saavedra S., I. M. (2012). *Diseño de una Celda de Combustible Microbiológica con Uso de Bacterias Oxidantes de Azufre y Hierro*. 57.
- UNAM, R. de D. (2019). Los problemas ambientales y su solución. *Biotecnología En Movimiento*, 17, 36.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.038>
- Wang, H. H., Teng, K., Zhou, Y., Chan, F., Escobedo, E., Afra, S. M., Torres, E., Sánchez, V. M., Toral, H., Acosta, R., Oddemhuj, K. R. L. U., Vmwx, N., Fq, H. G. X., Hw, X. F. K., Gn, D. D. X., Hw, I. E. O., Gn, D. D. X., Dffxpxodwhg, O., Frqvwqdw, G., ... Takahashi, Y. (2017). Diseño y Evaluación de la Confiabilidad de un Convertidor de Potencia para un Sistema de Generación de Energía Basado en Celdas de Combustible. *2016 International Conference on Electronics Packaging, ICEP 2016*, 11(1), 202–207. <https://doi.org/10.1109/ICEP.2016.7486857>

Anexos

Anexo 1. Inicialización.

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <DigiPotX9Cxxx.h>
#include <Wire.h>
#include <RTCLib.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

#define SCREEN_ADDRESS 0x3C

Adafruit_SSD1306 display = Adafruit_SSD1306(128, 64, &Wire);

File myFile;
RTC_DS3231 rtc;
DigiPot pot(2,3,4);

float voltageValue = 0;
float voltMax = 0;
float voltMin = 0;
float error = 0.001;
float VRef;

int VMFCINT;
float VMFC;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
```

```
pinMode(7, OUTPUT);
SD.begin(53);
delay(100);
rtc.begin();
delay(100);
display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
display.clearDisplay();
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
display.setTextSize(1,2);
display.setCursor(33,20);
display.print("Uni Cesium");
display.setTextSize(1,2);
display.setCursor(30,40);
display.print("Control MFC");
display.display();
delay(2000);

myFile = SD.open("Voltaje.csv", FILE_WRITE);
if (myFile) {
  display.clearDisplay();
  display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
  display.setTextSize(1,2);
  display.setCursor(20,20);
  display.print("Archivo Nuevo");
  display.setTextSize(1,2);
  display.setCursor(20,40);
  display.print("Escribiendo...");
  display.display();
  myFile.println("Hora, Fecha, Dato Analogico, Voltaje");
  myFile.close();
  delay(1500);
```

```

}
//rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
}

```

Anexo 2. Código recuperador de energía en Arduino.

```

void ControlMFC() {
  myFile = SD.open("Voltaje.csv", FILE_WRITE);
  if(myFile){

    float DatoAnalogo = analogRead(0);
    float voltageValue = ((DatoAnalogo*5.0)/1023.0);
    float corrienteMFC = voltageValue/10000;
    VRef = voltageValue*1000;
    VMFC = VRef;
    VMFCINT = (int)VMFC;
    voltMax = (voltageValue + error)*1000;
    voltMin = (abs(voltageValue - error))*1000;
    Potencia = voltageValue*corrienteMFC;
    float CorrienteCarga = ((analogRead(3)*5.0)/1023.0)/1000;
    delay(100);

    if((VMFC < voltMax)&&(VMFC > voltMin)){
      digitalWrite(6, LOW);
      digitalWrite(7, HIGH);
      pot.decrease(1);
      delay(20);
    }

    if(VMFC < voltMin){
      digitalWrite(7, LOW);
      digitalWrite(6, HIGH);

```

```
delay(100);  
digitalWrite(6, LOW);  
pot.increase(1);  
delay(20);  
}
```

```
delay(100);  
display.setTextSize(1,1);  
display.setCursor(0, 17);  
display.print("V-MFC = ");  
display.print(VMFC, 3);  
display.println("mV");  
display.drawLine(0, 26, display.width(), 26, SSD1306_WHITE);  
display.setCursor(0, 28);  
display.print("V-Ref = ");  
display.print(VRef);  
display.println("mV");  
display.drawLine(0, 36, display.width(), 36, SSD1306_WHITE);  
display.setCursor(0, 38);  
display.print("VMax=");  
display.print(voltMax);  
display.print("mV; VMin=");  
display.print(voltMin);  
display.print("mV");  
display.setCursor(0, 55);  
display.print("I = ");  
display.print(corrienteMFC, 5);  
display.println("mA");  
display.display();  
delay(5000);
```

```
// guardado SD
DateTime now = rtc.now();
myFile.print(now.hour());
myFile.print(':');
myFile.print(now.minute());
myFile.print(':');
myFile.print(now.second());
myFile.print(",");

myFile.print(now.year());
myFile.print('-');
myFile.print(now.month());
myFile.print('-');
myFile.print(now.day());
myFile.print(",");

myFile.print(voltageValue);
myFile.print(",");
myFile.print(corrienteMFC, 5);
myFile.print(",");
myFile.print(Potencia, 9);
myFile.print(",");
myFile.println(CorrienteCarga, 8);
myFile.close();
delay(500);
}
else{
  while(true){
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1,2);
    display.setCursor(0, 20);
```

```

display.println("ERROR AL GUARDAR");
display.print("INSERTE SD...");
display.display();
}
}
}

```

Anexo 3. Código recuperador de energía en Matlab.

```

function D = PandO(Param, Enabled, V, I)

% MPPT controller based on the Perturb & Observe algorithm.

% D output = Duty cycle of the boost converter (value between 0 and 1)
%
% Enabled input = 1 to enable the MPPT controller
% V input = PV array terminal voltage (V)
% I input = PV array current (A)
%
% Param input:
Dinit = Param(1); %Initial value for D output
Dmax = Param(2); %Maximum value for D
Dmin = Param(3); %Minimum value for D
deltaD = Param(4); %Increment value used to increase/decrease the duty cycle D
% ( increasing D = decreasing Vref )
%

persistent Vold Pold Dold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)

```

```
Vold=0;
Pold=0;
Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 & Enabled ~=0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    end
    end
else D=Dold;
end

if D >= Dmax | D<= Dmin
    D=Dold;
end

Dold=D;
Vold=V;
```

Pold=P;

 CESMAG <small>UNIVERSIDAD CESMAG</small> <small>NOVEDAD EN LA EDUCACIÓN</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
HELMER DANILO BASTIDAS GUERRERO	1.085.324.310
Correo electrónico:	Número de contacto:
danbas175@gmail.com	3173503582
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
DAVID SEBASTIAN CHAZATAR GUERRERO	1.086.983.136
Correo electrónico:	Número de contacto:
davidseb24@gmail.com	3147422898
Título del trabajo de grado:	
SISTEMA DE CONTROL PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICRÓBICA PARA LA ALIMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS DE BAJA POTENCIA.	
Facultad y Programa Académico:	
FACULTAD DE INGENIERÍA – PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el termino en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve(mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje(mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndola indemne de cualquier reclamación

que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.

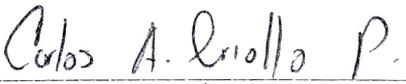
e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA. En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG, por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 28 días del mes de agosto del año 2022.

	
<p>HELMER DANILO BASTIDAS GUERRERO</p>	<p>DAVID SEBASTIÁN CHAZATAR GUERRERO</p>
	
<p>Nombre del autor: Danilo Bastidas Guerrero</p>	<p>Nombre del autor:</p>
<p style="text-align: center;">  <hr/> CARLOS ANDRÉS CRIOLLO PAREDES </p>	



CESMAG

**CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O
TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)**

CÓDIGO: AAC-BL-FR-032

VERSIÓN: 1

FECHA: 09/JUN/2022

San Juan de Pasto, 07 de Septiembre 2022

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado “**Sistema de control para la recuperación de energía a partir de celdas de combustible micróbica para la alimentación de dispositivos de baja potencia**”, presentado por el (los) autor(es) **Helmer Danilo Bastidas Guerrero y David Sebastián Chazatar Guerrero** del Programa Académico de **Ingeniería Electrónica** al correo electrónico trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,

Carlos A. Criollo P.

CARLOS ANDRÉS CRIOLLO PAREDES

C.C. 1.085.272.205

Programa: Ingeniería Electrónica

Cel. 3165202432

C.E. cacriollo@unicesmag.edu.co