



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C  
Posgrado en Ciencias en Energías Renovables

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA  
ELECTRÓNICA PARA LA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA  
DE ULTRA BAJA POTENCIA EN EL TRATAMIENTO DE  
LAS AGUAS RESIDUALES”

Tesis que presenta

RAFAEL ANGEL DACOSTA ROCHE

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍAS RENOVABLES

Mérida, Yucatán, México

2021



### DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: \_\_\_\_\_



Ing. Rafael Angel Dacosta Roche

Mérida, Yucatán, México, a 26 de noviembre de 2021

*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.  
POSGRADO EN CIENCIAS EN ENERGIA RENOVABLE*



**RECONOCIMIENTO**

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Rafael Angel Dacosta Roche titulado **“Diseño e implementación de una tarjeta electrónica para la recolección de energía de ultra baja potencia en el tratamiento de las aguas residuales”**, fue realizado en la Unidad de Energía Renovable, en el laboratorio de Bioenergía del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección de la Dra. Liliana Alzate Gaviria y la Co-directora M.C. Mercedes Canasí Piñeiro (adscrita a ISPJAE, Facultad de Ingeniería Eléctrica), perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias en Energía Renovable de este Centro.

Atentamente



---

Dra. Cecilia Hernández Zepeda  
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 7 de marzo de 2022

## AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca otorgada para la realización de este proyecto (CVU/1014508).

A las instalaciones de laboratorio de Bioenergía del CICY, donde fue posible desarrollar todo el trabajo experimental asociado a esta investigación.

A mis directores de tesis:

- A la Dra. Liliana Alzate Gaviria, por ayudarme a ser mejor cada día, confiar en mí y brindarme la oportunidad de trabajar en un proyecto aplicable a la sociedad.
- A la M. en C. Mercedes Canasí Piñeiro, por estar pendiente del trabajo a pesar de la distancia, por sus excelentes consejos de programación y por su apoyo incondicional en el avance de la investigación.

A mis asesores:

- A la Dra. Galdy Hernández Zárate, por su enorme paciencia y amables enseñanzas en los temas bioquímicos.
- Al Dr. Víctor Manuel Ramírez Rivera, por sus lecciones y aportes al desarrollo e implementación de la tarjeta electrónica.

Al personal técnico académico en general:

- En especial al M. en C. Jorge Arturo Domínguez Maldonado, por ofrecerme su valioso tiempo y experiencia con las celdas de combustible microbianas.
- Al Dr. Raúl Tapia Tussell y al Dr. Edgar Olguín Maciel, por sus orientaciones en la organización metodológica del proyecto y por brindarme apoyo cuando más lo necesitaba.
- Al grupo de trabajo que fue creado en el Laboratorio de Bioenergía, sin su ayuda, hubiera sido imposible llegar a los resultados obtenidos en tan poco tiempo.

A mis amigos por el apoyo emocional y el ánimo brindado, de una forma u otra, siempre estuvieron presente.

De manera especial quiero agradecer a mi hermosa familia y a mi novia, que fueron el motor impulsor de mis constantes esfuerzos.

## ÍNDICE

LISTADO DE TABLAS .....	iv
LISTADO DE FIGURAS .....	v
RESUMEN .....	viii
ABSTRACT .....	ix
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	3
ANTECEDENTES .....	3
1.1    Las aguas residuales .....	3
1.1.1    Tratamiento .....	3
1.1.2    Panorama mundial y situación actual en México.....	6
1.1.3    Energía contenida en el AR .....	7
1.2    Celdas de combustible microbianas.....	7
1.2.1    Principio de funcionamiento y estructura de una CCM.....	8
1.2.2    Materiales anódicos y catódicos .....	11
1.2.3    Sustratos .....	12
1.2.4    Eficiencia y rendimiento de las CCM.....	15
1.2.5    Microorganismos exoelectrógenos.....	20
1.2.6    Escalabilidad.....	22
1.3    Sistemas de recolección de energía .....	23
1.3.1    Circuitos basados en condensadores conmutados .....	25
1.3.2    Convertidores basados en inductores y transformadores.....	26
1.3.3    Seguimiento del punto de máxima potencia.....	27
1.3.4    Almacenamiento de la energía .....	28
1.3.5    Recolección de energía proveniente de múltiples fuentes .....	30
1.3.6    Gestión energética.....	31
1.4    Sistema de recolección de energía existente (PATENTE No. 374146). .....	32
1.4.1    Justificación del nuevo diseño .....	38

HIPÓTESIS .....	39
OBJETIVO GENERAL.....	39
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	39
CAPÍTULO 2.....	40
MATERIALES Y MÉTODOS .....	40
2.1 Procedimientos .....	40
2.1.1 Biorreactor .....	41
2.1.2 Fuente controlada.....	43
2.1.3 Sistema de medición por muestreo analógico.....	46
2.1.4 Caracterización del SRE1 .....	48
2.1.5 Diseño e implementación del SRE2.....	48
2.1.6 Pruebas realizadas a los SRE .....	49
CAPÍTULO 3.....	52
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	52
3.1 Caracterización del SRE1 .....	52
3.1.1 Funcionamiento e insuficiencias .....	52
3.2 Pruebas realizadas al SRE1 .....	54
3.2.1 Eficiencia eléctrica .....	54
3.2.2 Eficiencia en el tratamiento del ARS .....	58
3.3 Diseño e implementación del SRE2.....	61
3.3.1 Selección del nuevo esquema de recolección.....	61
3.3.2 Selección del interruptor analógico .....	63
3.3.3 Selección del convertidor CC-CC.....	64
3.3.4 Selección del microcontrolador .....	66
3.3.5 Diseño del circuito, programación y ensamble del prototipo.....	67
3.4 Pruebas realizadas al SRE2 .....	73
3.4.1 Eficiencia eléctrica .....	73
3.4.2 Eficiencia en el tratamiento del ARS .....	77
3.5 Comparativa .....	80
CONCLUSIONES.....	85

PERSPECTIVAS.....	86
REFERENCIAS.....	87
ANEXOS .....	97

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1. Procesamiento de las AR.....	4
Tabla 1.2. Características de la composición del AR dependiendo de su origen.....	13
Tabla 1.3. DQO removida en las AR.....	15
Tabla 1.4. CCM de una o dos cámaras, con cátodo aireado, diferentes configuraciones y materiales en su composición.....	19
Tabla 2.1. Composición del ARS.....	43
Tabla 3.1. Cálculos energéticos en el SRE1.....	57
Tabla 3.2. Características del SRE1.....	61
Tabla 3.3 Parámetros y eficiencias reportadas.....	62
Tabla 3.4. Estudios previos que incluyen convertidores en su esquema de recolección.....	65
Tabla 3.5. Convertidores comerciales más utilizados en los SRE.....	66
Tabla 3.6. Microcontroladores implementados en circuitos de ultra baja potencia.....	67
Tabla 3.7. Cálculos energéticos en el SRE2.....	76
Tabla 3.8. Características del SRE2.....	80
Tabla 3.9. Estudios similares que implementan SRE aplicados a las CCM.....	82

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Procesos de tratamiento de las AR en una PTAR a gran escala.....	5
Figura 1.2. Representación esquemática de una CCM de dos cámaras y membrana de intercambio catiónico. ....	9
Figura 1.3. Arquitectura de las CCM. ....	10
Figura 1.4. Configuraciones básicas de las CCM. A) Cámara sencilla, B) Doble cámara, C) Multicámara con MIA y MIC. ....	11
Figura 1.5. Relación de los materiales anódicos con el desempeño de una CCM.....	12
Figura 1.6. Potenciales para las diferentes uniones respecto al potencial de hidrógeno (temperatura 303 K y pH neutro, si no se especifica). ....	17
Figura 1.7. Curva de polarización y potencia de una CCM. La corriente $I_{sc}$ corresponde a una carga con resistencia cero o cortocircuito mientras que $V_{opt}$ es la tensión de trabajo óptima, en el cual la celda entrega la máxima potencia ( $P_{max}$ ). ....	18
Figura 1.8. Mecanismos para la transferencia de electrones.....	21
Figura 1.9. Microorganismos en CCM y su densidad de potencia generada. ....	22
Figura 1.10. Inversión de potencial en las CCM. ....	23
Figura 1.11. Esquema de un sistema de recolección de energía. CC-CC: Corriente Continua – Corriente Continua, MPPT: Seguimiento del punto de máxima potencia.....	25
Figura 1.12. Configuración con topología de condensadores conmutados.....	26
Figura 1.13. Ejemplo de una configuración de topología Boost.....	26
Figura 1.14. Ejemplo de una configuración de topología basada en transformadores .....	27
Figura 1.15. Relación entre la corriente, la tensión y la potencia, para diferentes fuentes de recolección de energía. ....	28
Figura 1.16. Diagrama gráfico comparativo de diversos dispositivos para el almacenamiento de energía eléctrica. ....	29
Figura 1.17. Arquitectura Power ORing, utilizada en la recolección de energía de múltiples fuentes.....	31
Figura 1.18. Diagrama representativo del SRE1. ....	33
Figura 1.19. SRE1, vista superior y posterior. ....	34
Figura 1.20. Distribución de terminales del integrado NX3L2467 .....	35
Figura 1.21. Diagrama de flujo del programa que ejecuta el microcontrolador .....	37

Figura 2.1. Organigrama de la metodología planteada.....	40
Figura 2.2. Biorreactor a escala piloto.....	41
Figura 2.3. Estructura y composición de las CCM utilizadas. ....	42
Figura 2.4. Circuito equivalente de una CCM.....	44
Figura 2.5. Fuente controlada: a) Diagrama eléctrico; b) Implementación.....	45
Figura 2.6. Diseño del circuito driver en Proteus 8. ....	47
Figura 2.7. Diseño experimental para las pruebas en los SRE.....	49
Figura 2.8. Esquema para la medición de eficiencia en tarjetas de ultra bajo consumo. ....	50
Figura 3.1. Efecto de la caída de potencial de las CCM en el desempeño del SRE1. ....	53
Figura 3.2. Forma de onda de las corrientes de entrada y salida en un ciclo de recolección de la tarjeta existente. a) Corriente que se extrae de las CCM; b) Corriente de carga en la batería. ....	55
Figura 3.3. Forma de onda de los potenciales de entrada y salida en un ciclo de recolección de la tarjeta existente. a) Tensión de los condensadores en serie; b) Tensión de la batería. ....	56
Figura 3.4. Corriente consumida de la batería en un ciclo.....	57
Figura 3.5. Distribución de la energía en el SRE1.....	58
Figura 3.6. Relación de las mediciones diarias de AGV y DQO con el SRE1.....	59
Figura 3.7. Forma de onda de las mediciones eléctricas realizadas a las CCM. a) Tensión de circuito abierto (Voc); b) Corriente de cortocircuito (Icc).....	60
Figura 3.8. Arquitectura de SRE con múltiples fuentes de entrada.....	62
Figura 3.9. Distribución de terminales del integrado NX3L4051. ....	64
Figura 3.10. Modelo y dimensiones del SRE2.....	69
Figura 3.11. Diagrama de conexiones del SRE2.....	69
Figura 3.12. Diagrama de flujo que ejecuta el programa en el SRE2. ....	70
Figura 3.13. Simulación y depuración del control en Proteus 8. ....	71
Figura 3.14. Diagrama representativo del SRE2. ....	72
Figura 3.15. Prototipo del SRE2.....	73
Figura 3.16. Forma de onda de las corrientes de entrada y salida en un ciclo de recolección del SRE2. a) Corriente que se extrae de las CCM; b) Corriente de carga en la batería. ....	74
Figura 3.17. Forma de onda de los potenciales de entrada y salida en un ciclo de recolección del SRE2. a) Tensión de las CCM; b) Tensión de la batería. ....	75
Figura 3.18. Corriente que se consume de la batería en un ciclo.....	76
Figura 3.19. Distribución de la energía en el SRE2.....	77
Figura 3.20. Relación de las mediciones diarias de AGV y DQO utilizando el SRE2. ....	78

Figura 3.21. Forma de onda de las mediciones eléctricas realizadas a las CCM. a) Tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ); b) Corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ).....79

## RESUMEN

Las celdas de combustible microbiana, por sus características, pueden degradar la materia orgánica presente en las aguas residuales y transformarla directamente en energía eléctrica. El proyecto consiste en actualizar una tarjeta electrónica de ultra baja potencia ya existente y patentada, con topología de primera generación utilizada en instalaciones de tratamiento de aguas residuales domésticas, la cual presentaba problemas de autonomía y funcionamiento, alcanzando en condiciones ideales un máximo de 42% de eficiencia eléctrica. Por ello, se propuso la construcción de un sistema de recolección de energía con topología de tercera generación, que fue evaluado bajo las mismas condiciones de laboratorio que el sistema de recolección existente. Los parámetros principales medidos en esta investigación fueron: la eficiencia eléctrica del circuito a 0.5 mW de potencia de entrada y el tratamiento realizado al agua residual sintética, con concentraciones iniciales de 1.2 g/L en términos de demanda química de oxígeno, lográndose una eficiencia eléctrica de 55% y una reducción de materia orgánica de 77.27%. En relación a la tarjeta existente, se obtuvo una mejora considerable reduciendo las pérdidas por efecto joule en un 44%, aumentando la eficiencia eléctrica en un 13%, la autonomía en un 12% y la energía recolectada de las celdas en un 20%. En el caso del tratamiento del agua residual sintética los resultados fueron similares, observándose una diferencia de solo un -2.53%. A pesar de los logros de la investigación, se rechaza la hipótesis planteada en la misma, ya que finalmente no se pudo alcanzar el 60% de eficiencia eléctrica esperada con el nuevo diseño.

## ABSTRACT

Microbial fuel cells, due to their characteristics, can degrade organic matter present in wastewater and transform it directly into electrical energy. The research was based on updating an already existing and patented first-generation topology ultra-low power electronic card, used in domestic wastewater treatment, this card presented autonomy and operation problems, reaching a maximum of 42% electrical efficiency under ideal conditions. Because of this, the construction of a third generation topology energy harvesting system was proposed, which was tested under the same laboratory conditions as the existing harvesting system. The main parameters measured in this research were: the electrical efficiency at 0.5 mW input power and the treatment of the synthetic wastewater, with initial concentrations of 1.2 g/L in terms of chemical oxygen demand, achieving electrical efficiency of 55% and a reduction of the organic matter of 77.27%. Regarding the existing card, a considerable improvement was obtained, reducing the losses of the joule effect by 44%, electrical efficiency was increased by 13%, autonomy by 12% and the energy obtained from the cells by 20%. In the case of wastewater treatment, the results were similar, observing a difference of only -2.53% compared to the available energy collection system. Despite the achievements of the research, the hypothesis raised is rejected, since the 60% of electrical efficiency expected with the new design could not be achieved.

## INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda de energía ante la disminución del suministro de combustibles fósiles puede inferir en una crisis energética mundial con importantes repercusiones en el medio ambiente y la salud humana [1]. Actualmente, el 85.5% de la energía total es generada por combustibles fósiles y las principales desventajas de estos son la contaminación ambiental y su escasez. En las últimas décadas, ha crecido el interés en el uso de sistemas alternativos de energías renovables que sean ambiental y económicamente sostenibles [2]. La creciente crisis energética, la rápida urbanización, el aumento de la población y la industrialización tienen un enorme impacto en la contaminación ambiental, en especial, la contaminación de las aguas. A nivel mundial alrededor del 80% del agua contaminada utilizada en las unidades de fabricación se descarga directamente en diferentes cuerpos de agua, como ríos, lagos y océanos sin previo tratamiento [3]. En México, en el año 2016 se reportó por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) que el 53% de las aguas municipales y el 34.91% de las aguas residuales industriales generadas, no recibieron tratamiento [4].

Las Aguas Residuales (AR) pueden ser utilizadas como una fuente renovable para la generación de energía. Las tecnologías basadas en los sistemas bioelectroquímicos son consideradas como una alternativa prometedora por su papel en la eliminación de contaminantes y la generación de electricidad. Esto es posible, debido al metabolismo de los microorganismos presentes en la misma materia orgánica de los residuos [1]. Las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) son una tecnología emergente que se utiliza para tratar las AR, funcionan como biorreactores, donde las bacterias son utilizadas como electrocatalizadores para convertir la biomasa residual presente en las AR en bioenergía [5].

Un sistema bioelectroquímico basado en CCM puede funcionar, si completa un ciclo bioquímico de oxidación-reducción, en el cual los electrones transferidos fluyen o se extraen de la celda a través de un dispositivo eléctrico como una resistencia o un condensador. En la actualidad, es posible aprovechar la energía que aportan estos dispositivos de una manera más eficiente, haciendo uso de un Sistema de Recolección de Energía (SRE). Los SRE son circuitos que suplen la diferencia de potencial que existe entre la fuente y la carga, sin embargo, requieren energía para su funcionamiento. Estos pueden modificar la impedancia interna para optimizar la recolección de electrones transferidos por la celda y posibilitan que la energía aportada por estas fuentes pueda ser almacenada, reutilizada por el circuito o utilizada para otros fines. En las CCM

la energía se encuentra estrechamente relacionada con la actividad de los microorganismos, es por eso que el desempeño que puedan tener los SRE influye de manera positiva en el tratamiento de las AR [6].

En el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) se lleva a cabo un proyecto que comenzó en el año 2006, el cual consiste en el tratamiento de AR domésticas utilizando CCM [7]. Se ha demostrado la funcionalidad de estos sistemas en diversos estudios donde los niveles de remoción superan el 70% de la materia orgánica total en términos de Demanda Química de Oxígeno (DQO) [7]. No obstante, el SRE utilizado, debido a su topología, tiene como principal limitante que no se encuentra preparado para afrontar variaciones o dificultades que presente el biorreactor de CCM durante su funcionamiento [8].

En la actualidad, el desarrollo alcanzado por los SRE apunta a tecnologías más eficientes e inteligentes que incorporan sistemas flexibles. La utilización de convertidores de Corriente Continua (CC), el arranque en frío y el seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia son algunas de las ventajas que aportan las nuevas generaciones [9].

Todo lo anterior justifica, la necesidad de desarrollar una nueva línea de investigación como parte del proyecto que sostiene el Laboratorio de Bioenergía del CICY, de forma tal que se disponga de un sistema electrónico para la recolección de energía actualizado, que sea autónomo, eficiente y adaptable a las diversas circunstancias de operación. Para lograr este cometido, es necesario realizar una exploración de los parámetros que puedan influir en la optimización del proceso; como topologías, consumo energético, autonomía, tiempos de operación y eficiencia eléctrica [10].

# **CAPÍTULO 1**

## **ANTECEDENTES**

### **1.1 Las aguas residuales**

Las aguas negras o AR son aquellas cuya calidad ha sido afectada negativamente por la actividad humana [8]. La generación de AR está directamente relacionada con la población [4]. Debido al crecimiento y desarrollo tecnológico de la sociedad actual, particularmente en sectores como la energía, la salud, el transporte y la infraestructura, el volumen de generación de AR también se incrementa [5]. Las AR se dividen en dos grupos según su procedencia, AR municipales y AR industriales. Las primeras, proceden de hogares, comercios, hospitales, y se colectan en los sistemas de alcantarillado sanitario municipal, mientras que las AR industriales, son aquellas generadas en diversos procesos productivos [4].

#### **1.1.1 Tratamiento**

El tratamiento de las AR es fundamental para evitar la contaminación de las masas de agua (ríos, lagos, océanos), este proceso permite su reincorporación a los mantos acuíferos o a los sistemas de agua potable. Existe una variedad de tratamientos, los cuales se presentan en la Tabla 1.1; los tratamientos se pueden clasificar por la cantidad y tipos de residuos contenidos en las aguas [8].

Tabla 1.1. Procesamiento de las AR.

Procesos	Tratamientos	Función
Asentamiento de sólidos.	<p><u>Primarios</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sedimentación</li> <li>• Decantación</li> <li>• Lagunas de estabilización</li> </ul>	<p>Son procesos físicos que se encargan de remover las grasas, los aceites y los sólidos de mayor tamaño [11]. Ajustan el pH del agua y remueven contaminantes orgánicos particulados e inorgánicos [8].</p>
Tratamiento biológico de la materia orgánica disuelta	<p><u>Secundarios</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lodos activados</li> <li>• Lagunas aireadas</li> <li>• Filtros biológicos</li> <li>• Reactores anaerobios de flujos ascendente (RAFA)</li> <li>• CCM</li> </ul>	<p>Son procesos biológicos (aerobios o anaerobios) en los que actúan microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica presente en las AR [4], con la finalidad de remover contaminantes orgánicos coloidales y disueltos [8].</p>
Microfiltración y desinfección	<p><u>Terciarios</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desinfección</li> <li>• Filtración química</li> </ul>	<p>Son procesos adicionales para la remoción de nutrientes (nitrato y fósforo) y de manera avanzada en la desinfección de las AR mediante la eliminación de patógenos con cloro, ozono o luz ultravioleta [4]. Su función es remover contaminantes orgánicos disueltos, iones, bacterias y virus.</p>

Los tratamientos se realizan de forma individual, dependiendo de la procedencia del AR, y se aplican las tecnologías necesarias para cada tipo, devolviendo a las mismas, las características químicas requeridas para poder ser vertidas nuevamente a los diversos cuerpos de agua [4]. La no realización de este proceso tiene importantes implicaciones ambientales, económicas y de salud, mediante la transmisión de enfermedades [12]. Hay muchas formas de realizar el tratamiento de las AR, no obstante, el método más utilizado a gran escala, son las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) (Figura 1.1).

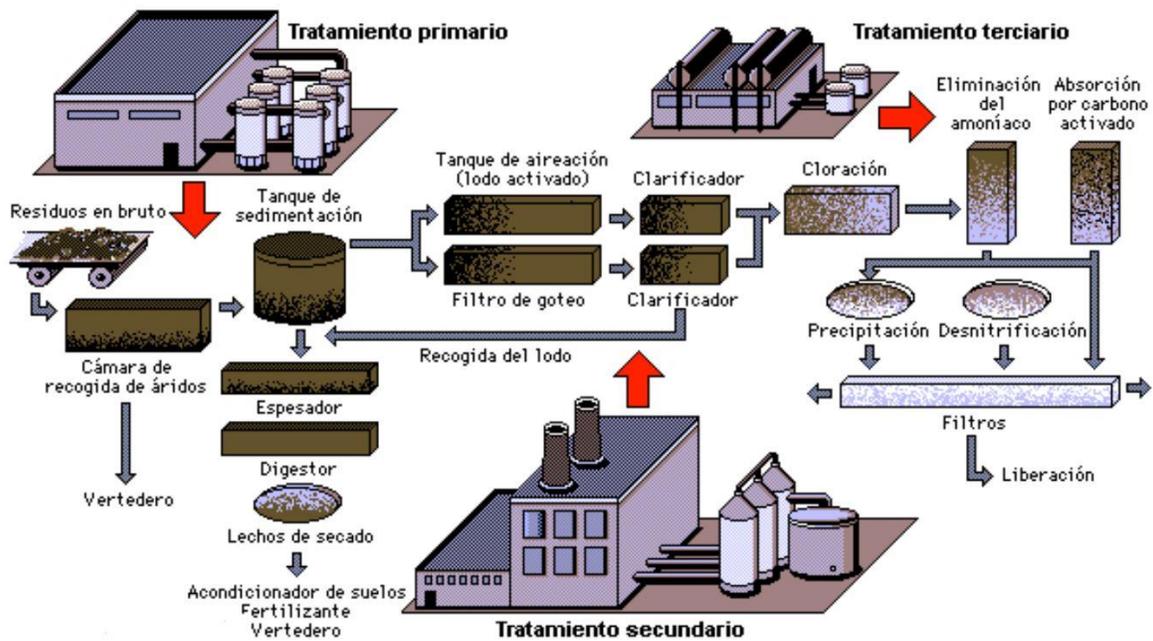


Figura 1.1. Procesos de tratamiento de las AR en una PTAR a gran escala (Microsoft, [8]).

Aunque la contaminación del agua es un problema evidente, no es el único. En el tratamiento de las AR por los métodos convencionales, es necesario la utilización de grandes cantidades de energía. Dicha energía, proviene en su gran mayoría de las centrales térmicas, que dependen totalmente de los combustibles fósiles, lo cual provoca de forma paralela emisiones de CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero. Estas emisiones son responsables en gran parte del cambio climático [5].

### 1.1.2 Panorama mundial y situación actual en México

La producción de AR y sus impactos en la sociedad son cuestiones delicadas en el escenario global [5]. Se estima que una cuarta parte de la población mundial carece de acceso al agua potable. Casi el 80% del agua contaminada utilizada en las unidades de fabricación se descarga directamente en las corrientes de AR y entra en diferentes cuerpos de agua sin previo tratamiento [3]. Según las estadísticas presentadas por la base de datos AQUASTAT en el año 2010, se utilizaron 4,001 km<sup>3</sup> de agua en todo el mundo, de esta cantidad el 31% se comparte entre el sector industrial y el doméstico y el 69% corresponde al sector agrícola [6]. Es decir, un volumen considerable que luego resulta en la generación de cantidades similares de AR. Esto plantea un reto para el tratamiento sostenible y la recuperación de agua utilizable.

Si se realiza un análisis de la situación a nivel mundial, el 80% de los ríos de China se encuentran contaminados por la falta de tratamiento de las AR. De igual manera, este problema afecta a los Estados Unidos, que con un 40% de sus ríos contaminados tienen que prohibir a sus habitantes y turistas, la pesca y el baño en estos cuerpos de agua [8]. En lo que respecta a gastos e inversiones en este sector, en el año 2015, América del Norte utilizaba aproximadamente 25 mil millones de dólares para mantener la infraestructura del agua [13].

En México, los costos generados por la contaminación del agua se estiman en 57 mil millones de pesos anuales (0.3% del PIB), mientras que el monto asociado a los daños ambientales asciende a 900 mil millones (5% del PIB). Según informes oficiales, en México el 57% de las AR municipales colectadas se consideran como tratadas [8]. En lo que respecta a las AR industriales, según el informe sobre la situación del subsector de agua potable, alcantarillado y saneamiento del 2017 y los datos publicados por la CONAGUA en el año 2016, solo se sometieron a tratamiento un 34.91% de las AR generadas [4]. A todo esto, se le suma que más de la mitad de las plantas de tratamiento municipales presentan una calificación de mala a pésima en su funcionamiento y las PTAR que responden al sector industrial solo trabajaron al 85.2% de la capacidad instalada [4]. México ha hecho esfuerzos recientes, como la puesta en marcha de nuevas plantas de tratamiento, con la finalidad de aumentar el porcentaje de AR tratadas, pero los resultados aún son insuficientes [8].

### **1.1.3 Energía contenida en el AR**

La materia orgánica biodegradable presente en las AR, son portadoras de energía [12], que al ser sometidas a procesos anaerobios, generan biogás, que puede captarse y utilizarse como fuente de energía en el proceso de tratamiento. Sin embargo, en las PTAR se consume más energía en el proceso, de lo que puede recuperarse [4]. El tratamiento de las AR requiere aproximadamente de 0.5 a 2 kWh/m<sup>3</sup> dependiendo del proceso y de la calidad del agua tratada. Se estima que las AR contienen entre 3 y 10 veces la energía requerida para su tratamiento [14]. Si se pudiera recuperar esta energía, además de hacer la infraestructura del agua autosustentable, sería viable inyectar un excedente favorable a la red eléctrica. Las tecnologías actuales para el tratamiento de las AR no son muy efectivas desde un punto de vista económico y energético. El establecimiento de una PTAR implica un alto costo de inversión y requiere mucha energía para su mantenimiento y operación. Los tratamientos químicos de las AR son procesos rápidos a diferencia de los procesos biológicos, pero crean problemas ambientales [5].

En la actualidad se realizan investigaciones con el objetivo de disponer de nuevas tecnologías o tecnologías más eficientes para tratar las AR, que sean de bajo costo, menos intensivas en energía y respetuosas con el ambiente. La sociedad se enfrenta al desafío de una demanda energética en ascenso junto con un deterioro ambiental creciente, que en el mejor de los casos puede atenuarse si se reduce el consumo global de energía. A medida que la urbanización se acelera al ritmo del crecimiento poblacional, se esperan mayores consumos de agua y por lo tanto mayor generación de aguas residuales. Los enfoques novedosos para el tratamiento de los desechos orgánicos y las AR ofrecen una oportunidad de reducir el impacto energético y obtener beneficios del mismo [15].

## **1.2 Celdas de combustible microbianas**

Las CCM son dispositivos que pueden transformar un sustrato biodegradable en electricidad. Son denominados como nuevos tipos de biorreactores, que emplean biopelículas electrogénicas para producir energía electroquímica [11]. Las CCM, basan su funcionamiento en la actividad metabólica de los microorganismos presentes en el sustrato biodegradable. Actualmente son utilizadas: en la captura de carbono, la biorremediación, la biodetección, la producción de biohidrógeno, la desalinización y el tratamiento de las AR [5]. En este contexto representan una

solución tridimensional a los problemas de contaminación ambiental, consumo de energía y costos de tratamiento.

Esta tecnología presenta ciertas ventajas sobre otras formas de generación de energía a partir de la materia orgánica [16]:

1. Permite tener altas eficiencias en la conversión directa del sustrato a electricidad.
2. Operan eficientemente a temperatura ambiente e incluso a bajas temperaturas.
3. No consumen energía en aireación (en el caso de las CCM que emplean cátodo expuesto al aire).
4. Tienen el potencial de ser aplicadas en áreas remotas sin necesidad de una infraestructura eléctrica.
5. Dado que involucran procesos anaerobios, la producción de biomasa es mínima comparada con tecnologías aerobias.
6. Diversas AR pueden ser empleadas como combustible.

### **1.2.1 Principio de funcionamiento y estructura de una CCM**

En una configuración estándar, las CCM se dividen en tres componentes principales, como se muestra en la Figura 1.2, una cámara anódica anaeróbica, una cámara catódica (acuosa) y un separador que conecta las dos cámaras, que debe garantizar el intercambio de protones (en este caso) [12, 16]. En la cámara anódica ocurre la oxidación de la materia orgánica presente en el sustrato, donde un electrodo (generalmente inerte), de mayor área superficial figura como ánodo y aceptor final de electrones de los microorganismos exoelectrógenos que allí se desarrollan formando una biopelícula. El metabolismo microbiano oxidativo en esta cámara produce protones ( $H^+$ ),  $CO_2$  y electrones ( $e^-$ ) [11]. La reducción del aceptor de electrones terminal tiene lugar en el cátodo, generalmente separado del ánodo por una Membrana de Intercambio Catiónico (MIC) [17]. El papel de la membrana, es separar físicamente los dos procesos redox, evitando así que el aceptor de electrones reaccione directamente con el donante. De esta manera permite el transporte de cargas entre los dos compartimentos, manteniendo la electroneutralidad del sistema. El paso de los electrones es posible mediante la utilización de un circuito que interconecta eléctricamente ambos electrodos. Éste no permite que las reacciones metabólicas se completen, de tal forma que los electrones intermedios se extraen de la célula para producir trabajo eléctrico [16]. La velocidad de transferencia de electrones anódicos depende de los

procesos metabólicos de las especies microbianas empleadas y de su capacidad para utilizar ciertos sustratos [5]. Los protones se difunden a través del electrolito en el ánodo y aceptan los electrones en el cátodo al pasar la membrana de intercambio. De esta manera, en la cámara catódica, ocurre la reacción de reducción de oxígeno a  $\text{OH}^-$  o  $\text{H}_2\text{O}$ .

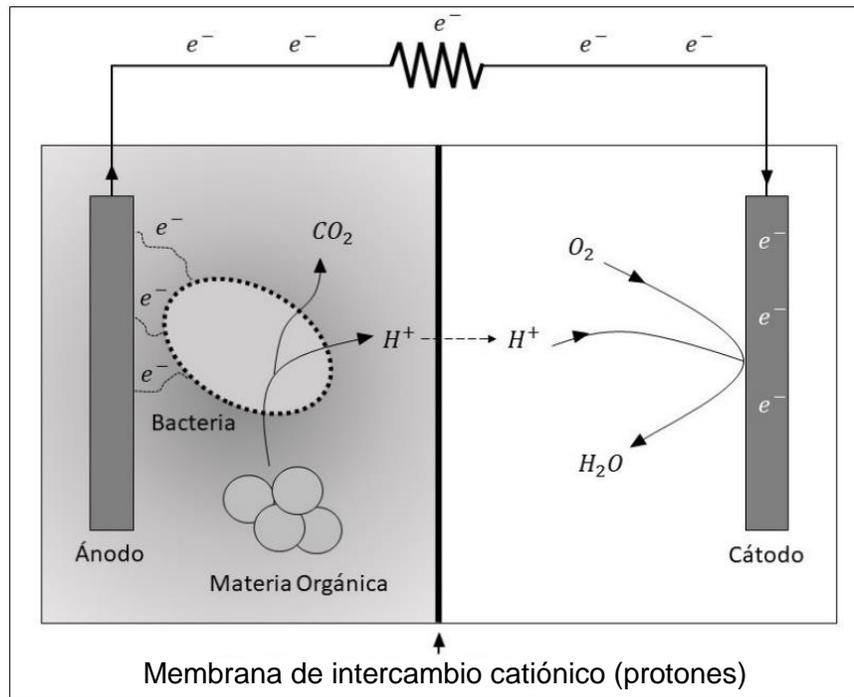


Figura 1.2. Representación esquemática de una CCM de dos cámaras y membrana de intercambio catiónico (adaptación [5]).

La arquitectura de las CCM es muy diversa debido a las posibles aplicaciones en el laboratorio y en el campo. Se han estudiado ampliamente en una variedad de configuraciones diferentes [12]. Las CCM pueden estar formados por una sola, doble o multicámara y pueden incluir o no membranas separadoras (Figura 1.3) [16].

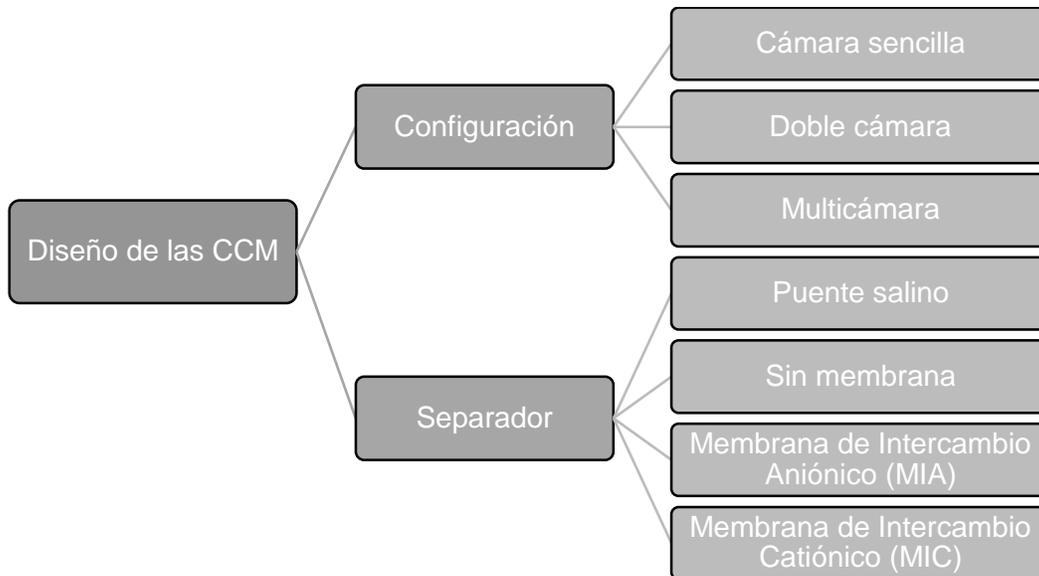


Figura 1.3. Arquitectura de las CCM (adaptación [18]).

**Cámara sencilla:** Este es un diseño compacto que consta de un solo compartimento, que incluye el ánodo y el cátodo, de esta manera se elimina la necesidad de la cámara catódica mediante la exposición del cátodo directamente al aire (Figura 1.4 A) [12]. En esta configuración, los electrodos pueden encontrarse o no separados por una MIC, la cual suele ser prensada directamente sobre el cátodo [16]. Este diseño reduce la distancia entre el ánodo y el cátodo por lo que disminuye la resistencia interna de la CCM, siendo mayor la densidad de potencia generada [19]. Se ha reportado que esta configuración ofrece un diseño simple, rentable y produce energía de una manera más eficiente que las celdas de doble cámara [16].

**Doble cámara:** Esta configuración de CCM consta de dos compartimentos (Figura 1.4 B)), la cámara anódica y la cámara catódica (acuosa) separadas por una MIC o por un puente salino [5]. La cámara del ánodo se mantiene libre de oxígeno para producir el proceso de descomposición anaerobia. Las CCM de doble cámara tipo H son las más conocidas para experimentos a escala laboratorio, debido a su configuración práctica. Este diseño produce bajas densidades de potencia debido a la alta resistencia interna que causa la membrana y la distancia entre los electrodos [16].

**Multicámara:** Las CCM de triple cámara se utilizan comúnmente en la desalinización del agua [3]. Como se muestra en la Figura 1.4 C), están compuestas por un compartimento anódico donde la actividad de los microorganismos permite la transferencia de electrones al ánodo, una

cámara de desalinización intermedia limitada por una MIC y una Membrana de Intercambio Aniónico (MIA) y un compartimento catódico donde se reduce el oxígeno. La fuerza osmótica generada por el campo eléctrico difunde las sales disueltas desde la cámara central hacia ambas membranas [16].

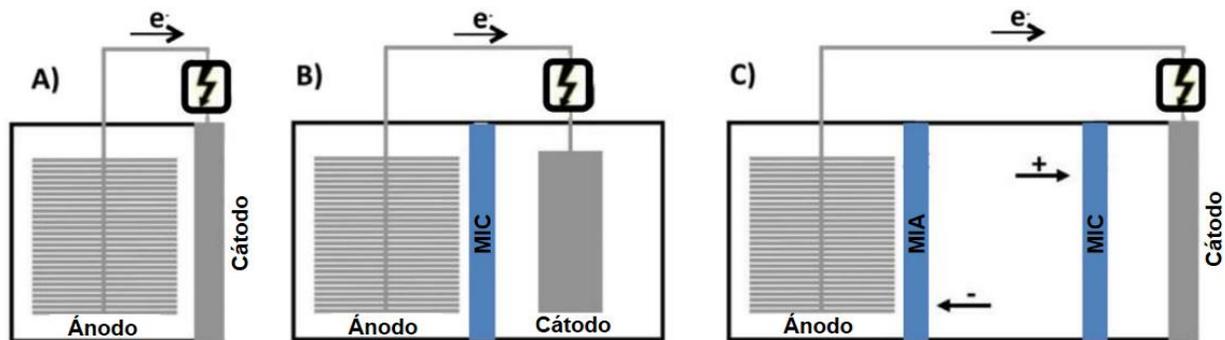


Figura 1.4. Configuraciones básicas de las CCM. A) Cámara sencilla, B) Doble cámara, C) Multicámara con MIA y MIC [16].

## 1.2.2 Materiales anódicos y catódicos

Tanto los materiales anódicos como los catódicos deben ser excelentes colectores de carga y en el caso del ánodo debe presentar una matriz sólida que favorezca la unión de la biopelícula microbiana [20]. Por lo general, los materiales más utilizados son a base de carbono y acero inoxidable. Debido a que son más económicos, tienen mayor área superficial, menor resistencia eléctrica y son biocompatibles con la mayoría de microorganismos [21]. Se han reportado una gran variedad de materiales de electrodos, a base de carbono, para su uso en configuraciones de CCM; estos incluyen varillas de grafito, fieltros, telas y mallas [20].

En la cámara anódica para optimizar las interacciones de la biopelícula microbiana con el anolito y la oxidación de la materia orgánica, los ánodos deben ocupar el mayor volumen posible; Las formas específicas están destinadas a maximizar las superficies de contacto con la materia orgánica en la solución [12]. Un estudio reciente realizado por Bao Yu (2020) demostró la influencia de las características de los materiales anódicos en el desempeño de una CCM [22]. Como materiales utilizó fieltro de grafito (FG), fibra de carbón activado (FCA), tela de carbón (TC), papel grafito (PG) y una lámina de aluminio (LA) (Figura 1.5). Los resultados en este

experimento demostraron mayores densidades de potencia y niveles de tensión para el FG, siendo un material con excelentes características como electrodo anódico. El área superficial que posee la forma de este material supera con creces al PG, se observa gráficamente en el desempeño de los mismos. Por otra parte, debido a la alta conductividad que ofrece el aluminio fue otro de los materiales que presentó una buena respuesta, aunque la utilización de este elemento a largo plazo se ve afectada por la corrosión [22].

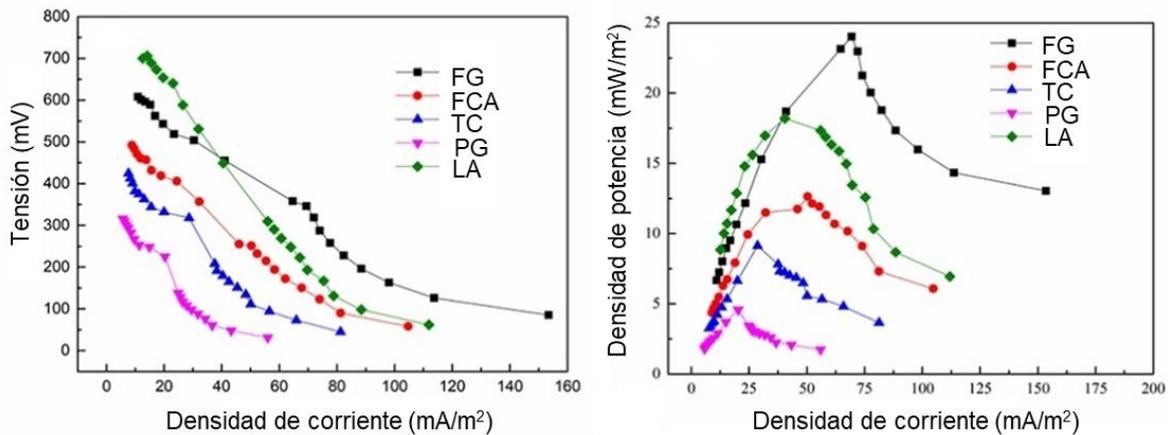


Figura 1.5. Relación de los materiales anódicos con el desempeño de una CCM [22].

### 1.2.3 Sustratos

Los mecanismos por los cuales son liberados los electrones al electrodo en las CCM permiten comprender el funcionamiento de estos dispositivos [20]. Los microorganismos pueden utilizar la cadena respiratoria en un metabolismo oxidativo y transferir electrones al ánodo cuando existen potenciales anódicos elevados; en cambio, si disminuye el potencial del ánodo significa que probablemente los electrones se transfieren a otros aceptores (sulfato, nitrato, entre otros) y en ausencia de este potencial, ocurre la fermentación [17]. La producción de una matriz polimérica compleja por acción de los microorganismos depositados en una superficie (biótica o abiótica) se le denomina biopelícula [20].

En las CCM el sustrato constituye el combustible a partir del cual se genera la energía [12]. Para la producción de electricidad con las CCM pueden ser utilizados una amplia variedad de sustratos como: acetato o butirato, glucosa, sacarosa, cisteína, glicerol, hasta sustratos complejos como las AR domésticas, biomasa lignocelulósica y AR industriales [5]. El sustrato no se limita

únicamente a la composición de los microorganismos en el ánodo (biopelícula), sino también al rendimiento total de la celda, que incluye la densidad de potencia y la eficiencia coulombica. Estadísticamente las AR están compuestas por un 99% de agua y un 1% de sólidos en suspensión, coloidales y sólidos disueltos [13]. Aunque la composición depende de la fuente donde se generan (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Características de la composición del AR dependiendo de su origen [13].

Fuentes	Características
Doméstica	Excretas humanas (microorganismos patógenos), nutrientes y materia orgánica. También puede contener contaminantes emergentes (por ejemplo, productos farmacéuticos, fármacos y disruptores endocrinos)
Municipal	Amplia gama de contaminantes, como microorganismos patógenos, nutrientes y materia orgánica, metales pesados y contaminantes emergentes.
Urbano	Una gama muy amplia de contaminantes, incluidos productos de combustión incompletos (por ejemplo, hidrocarburos aromáticos policíclicos y carbón / hollín negro de la combustión de combustibles fósiles), caucho, aceite de motor, metales pesados y basura orgánica / no degradable, entre otros.
Agrícola	Microorganismos patógenos, nutrientes de fertilizantes aplicados a los suelos y pesticidas e insecticidas derivados de las prácticas agrícolas.
Industrial	Dependen del tipo de industria.

Las tecnologías de las CCM son un enfoque prometedor y completamente diferente para el tratamiento de las AR. Además de capturar energía en este proceso, también se obtienen subproductos de valor agregado de los residuos, como por ejemplo: biofloculantes, bioplásticos, biohidrógeno, metano, biosurfactantes y muchos otros productos, resultado de utilizar AR como sustrato [5].

La versatilidad de las CCM radica en su diseño y en la posibilidad de acoplarse a una gran variedad de sustratos [12]. Las investigaciones abordan trabajos que buscan generar energía eléctrica y producir hidrógeno directamente a partir de residuos orgánicos complejos, como los

derivados en la producción de alimentos y cerveza; también a partir de desechos domésticos, de la industria química, de animales, de la industria de tintes y de rellenos sanitarios, por mencionar algunos. En este contexto, se han hecho pruebas con varios sustratos y se ha logrado la eliminación eficiente del carbono orgánico total, como glucosa, acetato, butirato, cisteína, proteínas y lignocelulosa, entre otros [14]. La implementación de las CCM en el tratamiento de las AR ha demostrado resultados favorables en términos de la eliminación de DQO. Se han realizado pruebas mejorando la densidad de potencia en las CCM, la eficiencia coulombica y la efectividad de la concentración de sustratos en la velocidad de carga, entre otros parámetros [5]. Para el cálculo porcentual de la remoción en términos de DQO se utiliza la Ecuación (1).

$$DQO (\%) = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \times 100\% \quad (1)$$

Donde,  $DQO (\%)$  es el porcentaje de remoción de materia orgánica,  $DQO_i$  es la concentración inicial de materia orgánica degradable y la  $DQO_f$  es la concentración final después del tratamiento [23].

Como se puede observar en la Tabla 1.3, la remoción de materia orgánica en términos de DQO supera el 70% para todos los estudios. Las ventajas de la utilización de esta tecnología para el tratamiento de las AR son evidentes. Aunque no se muestran las configuraciones de las CCM utilizados en cada investigación, el papel que juega el diseño, los materiales empleados y los microorganismos que intervienen en el proceso constituyen la base de estos resultados [12]. Un estudio realizado por Yun-Yeong Lee *et al.*, [24], reportó que la generación de electricidad en las CCM de doble cámara fue superior a la de las CCM de una sola cámara. Sin embargo, la eficiencia en la remoción de materia orgánica en términos de DQO, de estas últimas, fue mayor un 40% para el mismo sustrato [24].

Tabla 1.3. DQO removida en las AR.

Sustrato	DQO removida (%)	Estudio
AR doméstica y proveniente de un hospital	86.0	[25]
Residuos de una planta que procesa derivados del maíz	70.0	[26]
AR de un molino de arroz	96.5	[27]
Agua Residual Sintética (ARS)	90.0 – 95.0	[28]
AR que contienen colorantes (residuos químicos)	92.1 – 94.8	[29]
AR industrial	77.0	[30]
Residuos de una planta de encurtidos	88.0	[31]

Otra de las características de las CCM, es su capacidad para eliminar metales pesados en las AR. La mayoría de las bacterias, tiene la capacidad de aceptar electrones de los electrodos; estas se conocen como electrótrofas. Estos organismos muestran un gran potencial para la eliminación de metales pesados en las AR. El nivel de concentración de estos elementos en los residuos es un problema que afecta y causa enfermedades a los organismos vivos. Aunque, la eliminación de metales pesados en las AR no es un proceso simple, los diseños de las CCM muestran un gran potencial para eliminar o reducir sus concentraciones [5]. Un ejemplo lo constituye la investigación realizada por Touach *et al.*, [30]. Como resultado de este trabajo lograron eliminar  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Sb}^{3+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , y  $\text{Fe}^{3+}$  del AR; siendo el mayor porcentaje de eliminación para el cadmio.

#### 1.2.4 Eficiencia y rendimiento de las CCM

El rendimiento y la eficiencia de las CCM generalmente se evalúa en términos de parámetros eléctricos (densidad de potencia, densidad de corriente, diferencia de potencial y resistencia interna) y eficiencia de biodegradación (eliminación de compuestos orgánicos). La eficiencia coulombica (Ecuación (2)), es el parámetro que combina los dos anteriores: la relación entre la cantidad de electrones recolectados como equivalentes actuales y totales contenidos en la materia orgánica disponible para el metabolismo oxidativo microbiano, generalmente medido como (DQO) [16].

$$EC = \frac{M \int_0^t i(t) dt}{Fb\Delta S V} \times 100\% \quad (2)$$

Donde,  $EC$  es la eficiencia coulombica de forma porcentual,  $i(t)$  es la corriente que se extrae de la CCM al colocar una carga externa,  $F$  es la constante de Faraday (96485 C/mol),  $b$  es el número de moles de electrones producidos por una mol de sustrato,  $\Delta S$  es la concentración de materia orgánica removida en términos de DQO (g/L),  $V$  es el volumen del líquido (L) y  $M$  es el peso molecular del sustrato (g/mol) [14].

Por otra parte, el potencial generado por una CCM se encuentra determinado principalmente por factores biológicos. En una CCM, los microorganismos tardan en colonizar el electrodo y fabricar enzimas o estructuras necesarias para transferir electrones fuera de la célula, de esta manera, cada microorganismo puede variar su desempeño en la celda [32]. Existen límites para las tensiones máximas que se pueden generar, en función de la termodinámica para los donantes (la composición del sustrato) y aceptores (oxidantes) de electrones [12]. Mediante la expresión de Nernst, es posible realizar los cálculos pertinentes para la obtención del potencial teórico que puede alcanzar la celda:

$$E_{fem} = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln(Q) \quad (3)$$

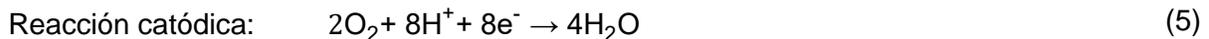
Donde  $E^0$  es la fuerza electromotriz de celda estándar,  $R = 8.31447 \frac{J}{mol \cdot K}$  la constante de los gases,  $T$  la temperatura absoluta (K),  $n$  el número de electrones transferidos,  $F = 96,485 \frac{C}{mol}$  es la constante de Faraday y  $Q$  el cociente de reacción.

En la Figura 1.6 se muestra un resumen realizado por Virdis *et al.*, [17], en donde presentaron la relación existente entre los pares redox y potenciales obtenidos en algunas reacciones para las CCM.

Reacciones redox	$E^0$
$6\text{CO}_2 + 24\text{H}^+ + 24\text{e}^- \rightarrow \text{Glucose} + 6\text{H}_2\text{O}$	$-0.43 \text{ V}^a$
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$-0.42 \text{ V}^a$
$\text{NAD}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADH}$	$-0.32 \text{ V}^a$
$2\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{Acetate} + 2\text{H}_2\text{O}$	$-0.28 \text{ V}^a$
$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{S}$	$-0.28 \text{ V}^a$
$\text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$	$-0.22 \text{ V}^a$
$\text{Pyruvate}^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Lactate}^-$	$-0.19 \text{ V}^a$
$\text{FAD}^+ + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{FADH}_2$	$-0.180 \text{ V}^d$
$\text{Fumarate}^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Succinate}^{2-}$	$+0.03 \text{ V}^a$
$\text{Cytochrome b (Fe}^{3+}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Cytochrome b (Fe}^{2+})$	$+0.035 \text{ V}^a$
$\text{Ubiquinone} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ubiquinone H}_2$	$+0.11 \text{ V}^a$
$\text{Cytochrome c (Fe}^{3+}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Cytochrome c (Fe}^{2+})$	$+0.25 \text{ V}^a$
$\text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	$+0.350 \text{ V}^b$
$\text{Fe(CN)}_6^{3-} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe(CN)}_6^{4-}$	$+0.36 \text{ V}^c$
$\text{Cytochrome a (Fe}^{3+}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Cytochrome a (Fe}^{2+})$	$+0.39 \text{ V}^a$
$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	$+0.433 \text{ V}^b$
$\text{NO}_2^- + 8\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{NH}_4^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	$+0.440 \text{ V}^d$
$\text{NO}_3^- + 6\text{H}^+ + 5\text{e}^- \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	$+0.74 \text{ V}^a$
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	$+0.76 \text{ (pH} = 2)^a$
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$+0.82 \text{ V}^a$
$\text{NO} + \text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow 0.5\text{NO} + 0.5\text{H}_2\text{O}$	$+1.175 \text{ V}^b$
$0.5\text{N}_2\text{O} + \text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 0.5\text{H}_2\text{O}$	$+1.355 \text{ V}^b$

Figura 1.6. Potenciales para las diferentes uniones respecto al potencial de hidrógeno (temperatura 303 K y pH neutro, si no se especifica) [17].

En una CCM como la representada en la Figura 1.2, si se opera a 25 °C y se utiliza acetato como sustrato en la cámara anódica, en una disolución con un pH neutro, las reacciones que ocurren en los electrodos se muestran a continuación [16]:



$$\Delta G = -847.60 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}; E_{\text{fem}} = 1.10 \text{ V} \quad (6)$$

El potencial máximo a circuito abierto que puede alcanzar una CCM con estas características es de 1.10 V. De la Ecuación (3) se puede determinar que otros de los factores que afectan el rendimiento de las CCM lo constituyen, la temperatura y el pH del sustrato [1]. Estas variables

pueden ser controladas al igual que la impedancia que ofrecen los elementos que componen las CCM [16]. Las CCM comúnmente en la práctica, alcanzan una tensión de trabajo máxima que oscila entre 0.3 V y 0.7 V [12]. La tensión es una función de la carga en el circuito externo y la corriente que circula por la misma (Figura 1.7) y la relación entre estas variables se hace mediante la Ley de Ohm (Ecuación (7)) [16]. Esta expresión indica que la tensión máxima que puede propiciar una CCM es cuando la carga se encuentra desconectada y el circuito se abre (resistencia infinita, corriente cero).

$$V = IR \tag{7}$$

Donde,  $V$  es el potencial de la celda en volts,  $I$  la corriente en amperes y  $R$  la carga resistiva en ohm.

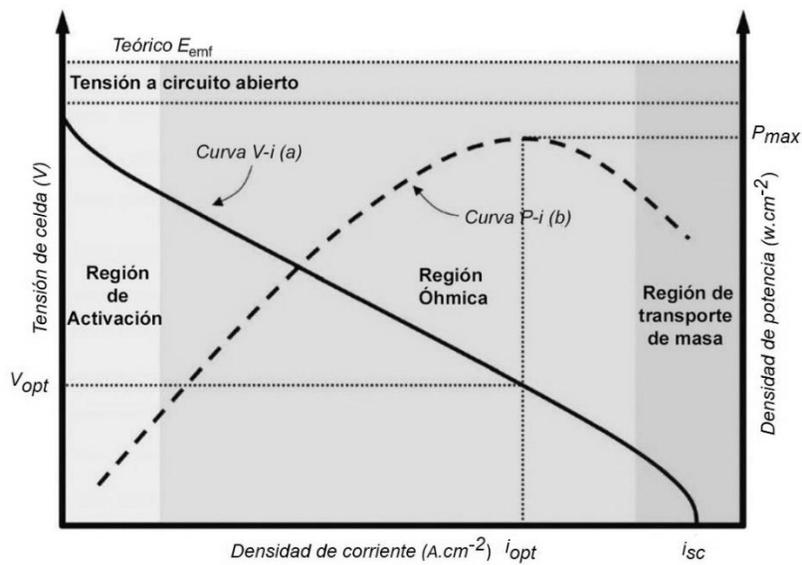


Figura 1.7. Curva de polarización y potencia de una CCM. La corriente  $I_{sc}$  corresponde a una carga con resistencia cero o cortocircuito mientras que  $V_{opt}$  es la tensión de trabajo óptima, en el cual la celda entrega la máxima potencia ( $P_{max}$ ) [17].

La potencia que puede entregar una CCM se define como el producto de la corriente aportada por el potencial de la celda. Esta corriente se encuentra limitada principalmente por la impedancia interna de la celda y por la resistencia externa que figura como carga [12]. En la literatura científica los autores muestran la potencia obtenida por las celdas en función del área superficial de los electrodos en  $W/m^2$  (ánodo o cátodo) o del volumen total del reactor en  $W/m^3$ . Esto se conoce como la densidad de potencia normalizada en función de las características de las CCM [12]. En el año 2016 un estudio realizado por Ren *et al.*, [33] reportó el mayor rendimiento para una CCM con electrodos a base de carbono de  $5.61 W/m^2$  ( $11,200 W/m^3$ ), esto se puede comparar con el promedio nacional de energía solar de los EE.UU [20]. A continuación, en la Tabla 1.4 se muestra la relación entre la estructura y materiales utilizados contra potenciales y densidades de potencia obtenidos para diferentes estudios.

Tabla 1.4. CCM de una o dos cámaras, con cátodo aireado, diferentes configuraciones y materiales en su composición [3].

<b>Composición de las CCM.</b>	<b>Potencial con carga resistiva (mV)</b>	<b>Densidad de potencia (mW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estudio</b>
Electrodos de Tela de Carbón (TC) (7 x 5 cm). (DC)	154 ± 20	42	[34]
Ánodo de 5 x 5 cm (TC) y Cátodo de 5 x 5 cm (TC) cubierto con Pt. (DC)	726	392 ± 15	[35]
Placas de grafito planas (6.5 x 4 x 0.3 cm). (DC)	400 ± 15	161	[36]
Placas de grafito planas (12 x 4 x 0.5 cm). (DC)	422	230	[37]
Papel de carbón activado con Pt (25 cm <sup>2</sup> ) (CS)	490.8	239.4	[38]
TC activado con Pt (CS)	762	382.5	[39]

(CS) CCM de cámara sencilla.

(DC) CCM de doble cámara.

### 1.2.5 Microorganismos exoelectrógenos

La mayoría de los microorganismos, utilizan el proceso de respiración celular para convertir la energía bioquímica en moléculas de Adenosina Trifosfato (ATP, por sus siglas en inglés). Este proceso implica una cadena de reacciones, a través de un sistema de proteínas transportadoras de electrones, en los cuales éstos se transfieren a un aceptor final de electrones [40]. En el proceso de obtención de energía, algunas bacterias como *Shewanella oneidensis* y *Geobacter sulfurreducens* utilizan mecanismos que pueden transferir de forma extracelular los electrones en la respiración [41]. Los estudios hasta la fecha proponen tres mecanismos (Figura 1.8):

1. El primer mecanismo propone la transferencia directa de electrones entre los portadores de electrones en la bacteria y el aceptor de electrones sólidos. Este mecanismo está respaldado por la presencia de citocromos de membrana externa que pueden interactuar directamente con la superficie sólida para llevar a cabo la respiración [42]. Las bacterias que utilizan este mecanismo requieren contacto directo con el aceptor de electrones sólido por lo que no pueden formar una biopelícula [11].
2. El segundo mecanismo propone la presencia de un mediador de electrones soluble: un compuesto que transporta a los electrones mediante difusión, desde las bacterias hasta la superficie del electrodo, en un proceso cíclico de oxidación-reducción. De esta manera, el microorganismo puede respirar sin estar en contacto directo con el electrodo. Las bacterias pueden producir compuestos que actúan como transportadores de electrones, como melanina, fenazinas, flavinas y quinonas [40].
3. El tercer mecanismo propone un componente sólido, que es parte de la estructura de la biopelícula extracelular y además figura como conductor al paso de los electrones, desde la bacteria a la superficie sólida. Este mecanismo se fundamenta en el posible papel de los pili celulares como nano cables, que se caracterizan por su capacidad para conducir electrones [43].

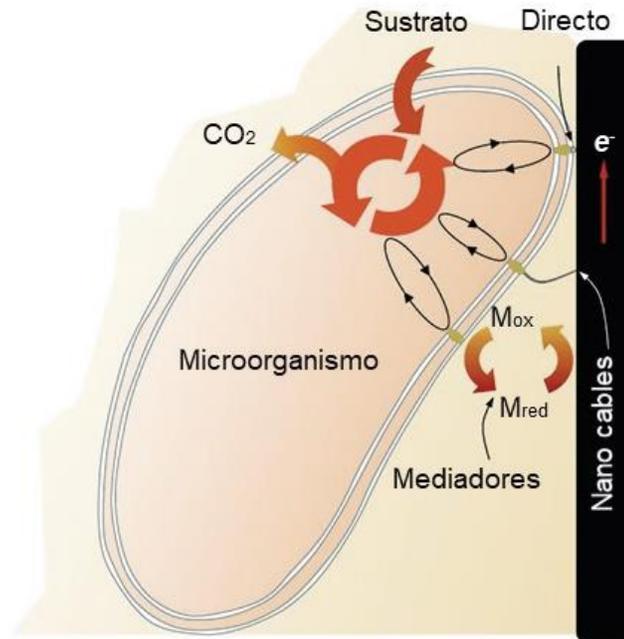


Figura 1.8. Mecanismos para la transferencia de electrones [20].

En una CCM los microorganismos exoelectrógenos son los que deben participar directamente en la formación de la biopelícula y en la producción de electricidad [21]. Como inóculo para las CCM se pueden emplear cultivos de una especie microbiana o cultivos mixtos.

- Aislados: Los géneros *Geobacter* y *Shewanella* son los más estudiados en cuanto al mecanismo de transferencia de electrones y su capacidad de oxidar completamente un compuesto orgánico [3]. Sin embargo, la diversidad de microorganismos usados es amplia, destacando por ejemplo, el empleo de arqueas y levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* en la cámara anódica [32].
- Cultivos mixtos: Una opción ampliamente usada debido a los reducidos costos de obtención es el empleo de cultivos mixtos porque estos generan altos potenciales y su tratamiento es menos exigente [3]. En los consorcios anódicos, las bacterias más comunes pertenecen a los géneros *Shewanella*, *Geobacter* y *Pseudomonas*, destacándose las especies *S. putrefaciens*, *P. aeruginosa*, *G. sulfurreducens* y *G. metallireducens* [20]. De acuerdo con la literatura (Figura 1.9), los máximos valores de densidad de potencia han sido producidos con cultivos mixtos o con las especies *Geobacter sulfurreducens* y *Shewanella putrefaciens* de forma aislada [32].

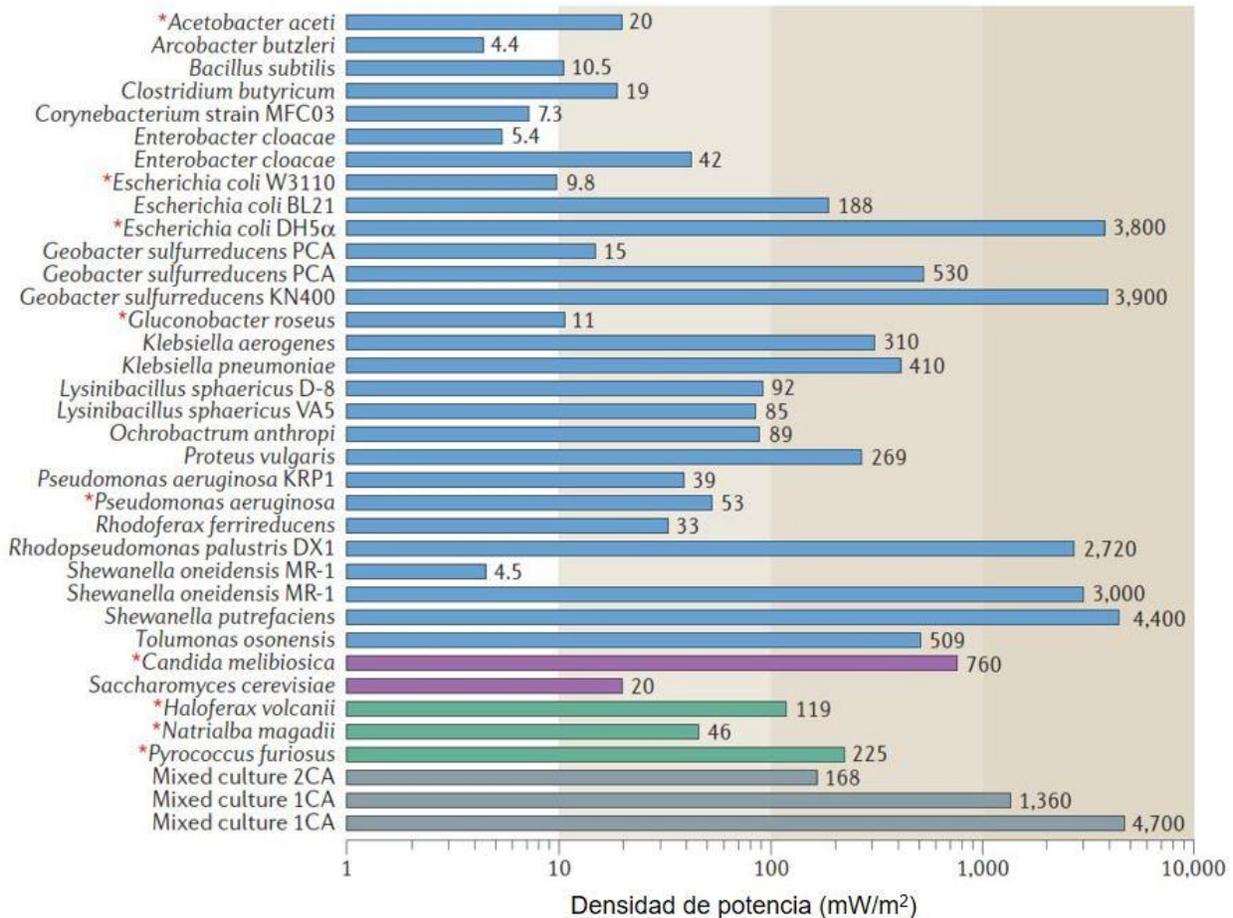


Figura 1.9. Microorganismos en CCM y su densidad de potencia generada [32].

## 1.2.6 Escalabilidad

La aplicación de las CCM en el tratamiento de las AR representa una alternativa medio ambiental y constituye una fuente de energía renovable, sin embargo, tienen como principal limitante que la energía que producen es muy poca, lo que restringe sus aplicaciones [44]. Se han realizado investigaciones con el objetivo de amplificar la energía que pueden aportar estos dispositivos. Si se tratase de aumentar el área superficial del ánodo, las resistencias de los elementos que conforman dicho electrodo aumentarían en proporción, por lo que existe un problema de escalabilidad [45]. Por otra parte, debido a que una sola CCM produce un nivel de tensión bajo, es posible aumentar el potencial si se realizan arreglos en serie con estas, sin embargo, el nivel de tensión esperado puede no corresponder a la suma del potencial individual de cada CCM a

causa del fenómeno de inversión de potencial (Figura 1.10). Este problema fue investigado por Oh *et al.*, [46] en el cual utilizaron dos CCM conectadas en serie con acetato como sustrato y oxígeno en el aire como aceptor de electrones. Al comienzo, las dos celdas produjeron la misma cantidad de potencia, pero pasado el tiempo, una celda produjo un nivel de tensión más bajo, lo que provocó que la tensión de esta celda se invirtiera reduciendo el potencial final de la serie. Se demostró que la causa de este fenómeno se debe a la baja actividad de los microorganismos en el sustrato, lo que puede provocar una desigualdad energética en las CCM conectadas en serie [46].

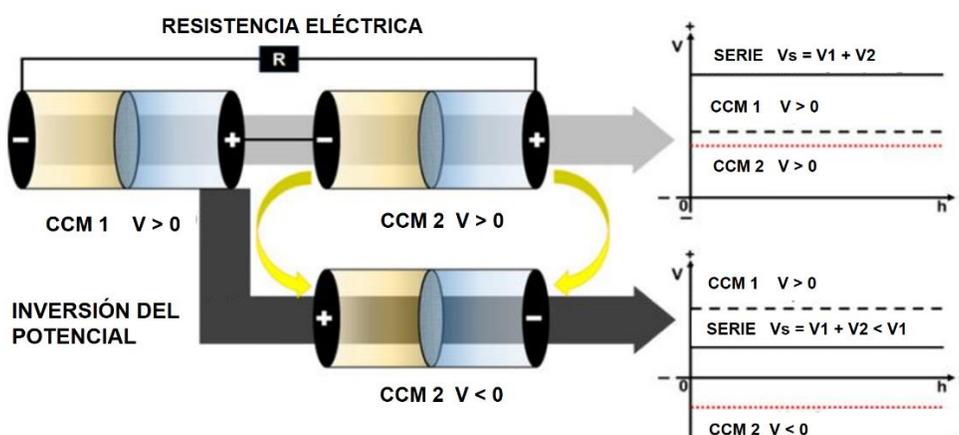


Figura 1.10. Inversión de potencial en las CCM (adaptación [47]).

Con el objetivo de mitigar este efecto se han propuesto diversas soluciones: utilizar balanceadores de tensión capacitivos [48], realizar combinaciones serie/paralelo [49], conectar resistencias de derivación entre las conexiones seriadas [50] y utilizar circuitos especializados para la recolección de energía [47]. Siendo estos últimos, por su versatilidad, los más utilizados en la actualidad.

### 1.3 Sistemas de recolección de energía

La recolección de energía de ultra-baja potencia se puede denominar como la conversión de energía ambiental en energía eléctrica [51]. La cosecha de este tipo de energía normalmente puede realizarse a partir de la energía solar, magnética, térmica, la bioquímica y la biológica en pequeñas celdas fotovoltaicas, en sensores de captura de ondas electromagnéticas, generadores termoeléctricos, en sensores bioelectroquímicos o en celdas de combustible

respectivamente [52] (Figura 1.11). Las características de este tipo de fuentes es que tienden a ser no reguladas, intermitentes, alternas o directas y de magnitudes muy pequeñas [51]. En este contexto surgen los SRE, como dispositivos adaptados para atrapar pequeñas variaciones de energía, aportadas por las fuentes de ultra baja potencia. En este proceso, el control del sistema se encarga de almacenar la energía en dispositivos de gran densidad energética: condensadores, ultra condensadores y baterías electroquímicas o de estado sólido. Los SRE llevan implícito un cierto grado de electrónica, atendiendo a las necesidades de la recolección y la eficiencia de la misma, como pueden ser: convertidores conmutados, transformadores, osciladores, microcontroladores, conmutadores y rectificadores [53].

Los SRE pueden utilizarse en una amplia gama de aplicaciones como fuentes de energía autónomas en circuitos eléctricos de bajo consumo, como es el caso de sensores biológicos, implementos deportivos, implantes médicos, dispositivos para la comunicación inalámbrica, entre otras prestaciones [9]. En la actualidad, los dispositivos destinados para estos fines, se pueden clasificar atendiendo a la topología que implementen sus convertidores y a las técnicas de control que se apliquen sobre los mismos (gestión energética), de esta manera, se dividen en tres generaciones.

Primera generación: Los sistemas basados en condensadores conmutados (bombas de carga capacitiva), son de las configuraciones más sencillas existentes.

Segunda generación: Los sistemas basados en inductores (convertidores de impulso *Boost*) o en transformadores (amplificadores aislados).

Tercera generación: Los sistemas de segunda generación que integran técnicas de Seguimiento del Punto de Máxima de Potencia (MPPT, por sus siglas en inglés).

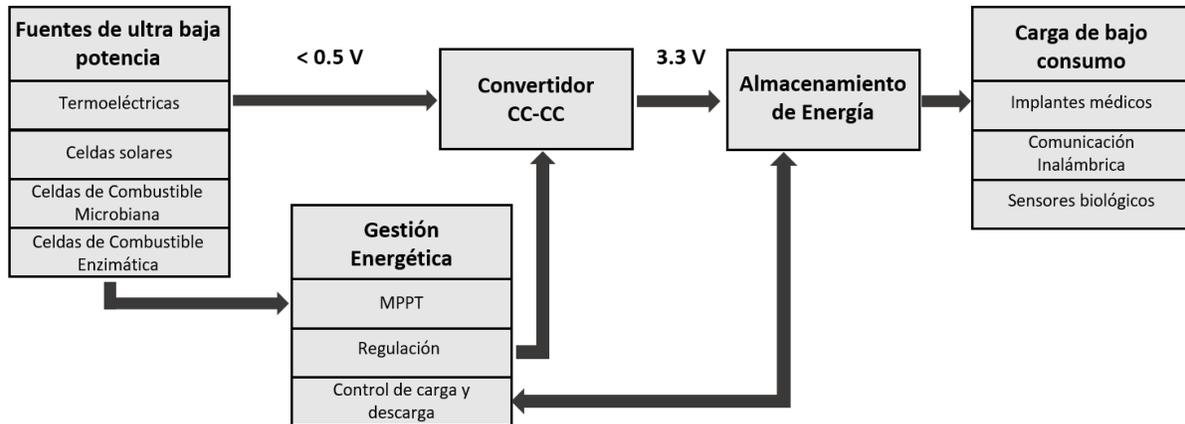


Figura 1.11. Esquema de un sistema de recolección de energía. CC-CC: Corriente Continua – Corriente Continua, MPPT: Seguimiento del punto de máxima potencia (adaptación [9]).

### 1.3.1 Circuitos basados en condensadores conmutados

Una bomba de carga típica (comercial) puede elevar la tensión de 0.3 V a 1.8 - 2.4 V como máximo. Lo cual, es una desventaja, ya que la mayoría de los dispositivos requieren como mínimo 3.3 V para su funcionamiento [54]. El principio de funcionamiento de un circuito de condensadores conmutados es aumentar la tensión, alternando los condensadores conectados en serie o paralelo o utilizando una señal de reloj para incrementar la tensión en condensadores sucesivos (Figura 1.12). Una ventaja importante de esta topología es la capacidad de admitir tensiones de entrada más bajas en comparación con otros convertidores. Esta ventaja se explota especialmente durante el arranque, instante en el cual comienza el proceso de recolección de energía. Por otro lado, estos convertidores necesitan dispositivos de control, los cuales requieren para su activación niveles de tensión elevados y se proporcionan generalmente desde un circuito adicional [9]. La mayoría de los circuitos que implementan esta topología, presentan un tamaño reducido. Esto se debe a que no utiliza elementos inductivos en su composición, lo cual permite un diseño más compacto, aunque el nivel de potencia de salida es limitado.

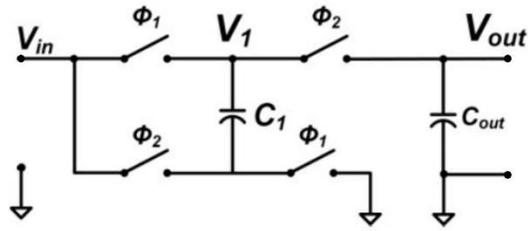


Figura 1.12. Configuración con topología de condensadores conmutados. Donde  $\phi_N$  son interruptores controlados y  $C_N$  condensadores polarizados (adaptación [9]).

### 1.3.2 Convertidores basados en inductores y transformadores

Si se comparan estos convertidores con los de la primera generación, tienen un 40% más de transferencia energética que sus antecesores [9]. Es decir, pueden suministrar mayores tensiones de salida en igualdad de condiciones. Uno de los requisitos de este circuito es que la tensión de entrada mínima debe ser mayor o igual a 0.7 V. Los convertidores de impulso basados en inductores (Figura 1.13) proporcionan funcionalidad de aumento de la tensión. En cambio, debido a los bajos potenciales de ( $V_{in}$ ), se requiere acondicionar la señal de entrada [54] y utilizar técnicas de ahorro de energético. Estas últimas, incluyen modulación de frecuencia pulsada (PFM, por sus siglas en inglés) para reducir las pérdidas por conmutación, operación de modo de ráfaga para disminuir el tiempo de conducción, y operación en modo de conducción discontinua (DCM, por sus siglas en inglés), el cual asegura disminuir las pérdidas en el circuito en el instante que ocurre la amplificación. Estos circuitos en general requieren de una lógica y un control complejo [9].

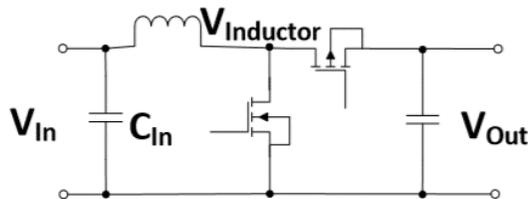


Figura 1.13. Ejemplo de una configuración de topología *Boost* [9].

Los convertidores basados en transformadores incluyen una alta relación de transformación (por lo general 1:100), lo que permite aumentar la tensión en el devanado secundario [55]. La principal

atracción de esta configuración, es que puede propiciar un arranque en frío en el primer instante de la recolección. Esto es debido a que utilizan un por ciento de la energía de la fuente para su funcionamiento, motivo por el cual, el devanado secundario del transformador de la Figura 1.14 se encuentra conectado directamente a ( $V_s$ ). Sin embargo, esta topología presenta una desventaja, a medida que la tensión de la fuente aumenta ( $V_s$ ), ocurre de igual forma en el devanado secundario ( $L_1$ ). Esta sobretensión propicia una disminución considerable en la energía colectada, que unido al consumo de un circuito adicional para el control, reduce la eficiencia del convertidor [9].

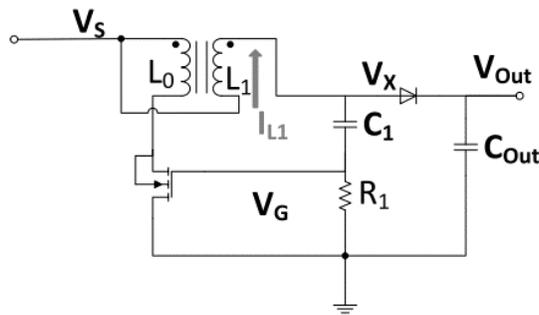


Figura 1.14. Ejemplo de una configuración de topología basada en transformadores [9].

### 1.3.3 Seguimiento del punto de máxima potencia

Actualmente, esta técnica es la más implementada en los SRE por su versatilidad y ventajas en la transferencia energética. Los dispositivos de tercera generación optimizan los puntos de funcionamiento de los convertidores en función de la corriente extraída [54]. La técnica MPPT se utiliza en las fuentes de ultra baja potencia para garantizar la máxima transferencia de energía disponible [52]. Es un algoritmo matemático que muestrea la salida de la celda y simula la impedancia necesaria a la que ocurre dicho fenómeno. Esto solo es posible mediante el uso de convertidores y microcontroladores, donde puede ajustarse el ciclo de trabajo para sincronizar en este instante la fuente con la carga [9]. En la Figura 1.15 se muestran las curvas de polarización para una celda solar de ultra baja potencia y una CCM. Se representa la relación que existe entre la corriente y la tensión a medida que la carga conectada entre sus terminales va cambiando. El parámetro  $I_{cc}$  corresponde a la corriente máxima que puede entregar el dispositivo en condiciones de cortocircuito y  $V_{oc}$  es la tensión máxima que puede aportar la celda en circuito abierto (sin carga). En ambos casos se puede apreciar un punto sobre la curva (PV) alrededor del cual se entrega la máxima potencia disponible (MPP, por sus siglas en inglés).

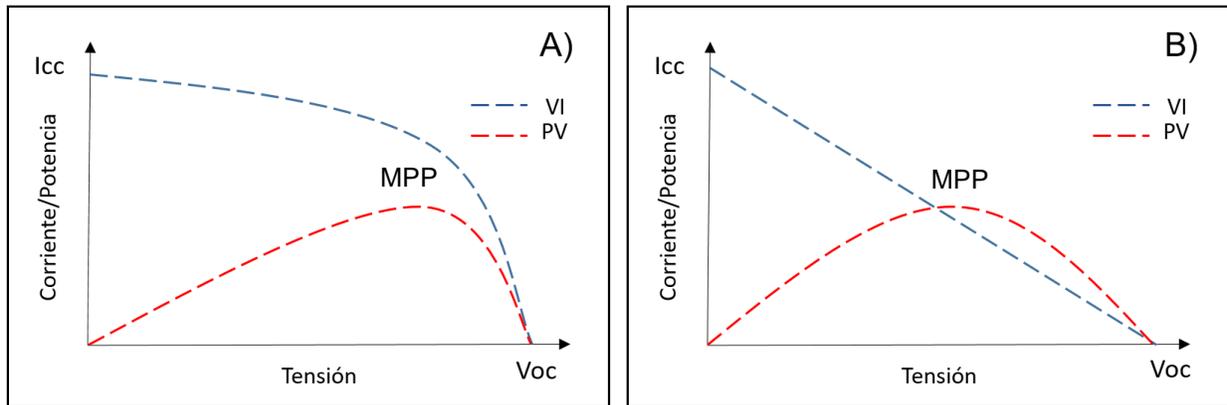


Figura 1.15. Relación entre la corriente, la tensión y la potencia, para diferentes fuentes de recolección de energía. A) Celda Solar, B) CCM, las curvas IV (corriente/tensión) y PV (potencia/tensión) [9].

### 1.3.4 Almacenamiento de la energía

Para superar la diferencia energética existente entre la fuente y la carga es necesario almacenar la energía recolectada. Existe una gran variedad de dispositivos que pueden llevar a cabo esta tarea. Como, por ejemplo: las baterías electroquímicas reversibles, que son económicas, fáciles de adquirir y de incorporar a un diseño. Sería la opción más llamativa, de cumplir con la demanda energética y condiciones de operación de un producto. La resistencia interna de una batería consiste en dos componentes: la resistencia eléctrica u óhmica y la resistencia iónica. La resistencia eléctrica es una medida de la oposición al flujo de corriente en el circuito eléctrico, mientras que la resistencia iónica es una medida de la oposición al flujo de corriente debido a factores internos como el área de la superficie de los electrodos y la conductividad electrolítica [56].

Otras alternativas son: los ultra condensadores, las baterías de estado sólido o una combinación de las mismas [57]. Los componentes de almacenamiento de energía existentes se comparan en función de su idoneidad para su aplicación en los sistemas de recolección de energía (Figura 1.16). Un ultra condensador puede llegar a realizar hasta 10 millones de ciclos de carga y descarga a diferencia de las baterías que apenas alcanzan los 1000 ciclos. Estos dispositivos, pueden cargarse en tiempos muy cortos y a cualquier tensión (mientras no superen la tensión

máxima permisible), además se pueden almacenar con cualquier estado de carga, sin llegar a deteriorarse. También pueden recibir pulsos de energía sin que ello afecte a su vida útil, como ocurre en el caso de las baterías. Otro dato interesante es que los ultra condensadores pueden trabajar a -40 °C, mientras que las baterías fallan a temperaturas inferiores a -10 °C. Las limitantes de los ultra condensadores frente a las baterías es su elevado precio y sus bajos niveles de tensión [58].

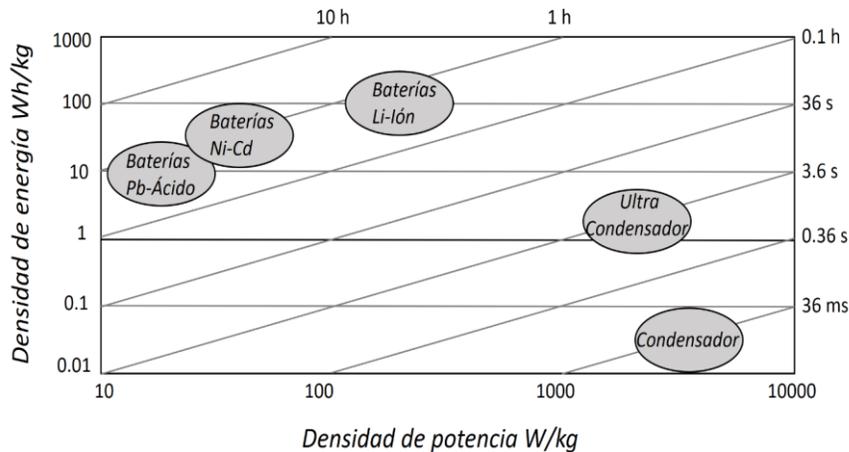


Figura 1.16. Diagrama gráfico comparativo de diversos dispositivos para el almacenamiento de energía eléctrica. En el eje horizontal se representa la densidad de potencia (W/kg), en el eje vertical se representa la densidad de energía (Wh/kg), las líneas diagonales representan el tiempo de descarga (suponiendo una potencia constante de 1 W). Todos los ejes se representan en escala logarítmica [58].

La autonomía de un elemento almacenador se puede calcular mediante la Ecuación (8), haciendo una relación directa entre la energía que puede propiciar este dispositivo y el consumo de potencia activa asociado a la carga conectada en sus terminales.

$$Autonomía (s) = \frac{V_a (V) * Q_a (As)}{P_c (W)} \quad (8)$$

Donde  $V_a$  y  $Q_a$  son la tensión en voltios y la carga eléctrica del elemento almacenador en amperes por segundos respectivamente.  $P_c$  representa la potencia activa que se consume y la *Autonomía*, en este caso, constituye el tiempo en segundos que el dispositivo almacenador puede sostener la carga.

### 1.3.5 Recolección de energía proveniente de múltiples fuentes

En los sistemas de recolección, debido a la intermitencia de las fuentes de energía de ultra baja potencia, en muchas ocasiones se busca multiplexar en el tiempo diferentes señales de entrada. Esto otorga mayor flexibilidad a la conversión energética y aumenta el rendimiento del dispositivo. Una manera simple y efectiva de recolectar energía proveniente de múltiples fuentes es a través de una arquitectura *Power ORing* [59]. Esta estructura (Figura 1.17) ofrece un enfoque modular, capaz de soportar un número arbitrario de subsistemas de recolección conectados en paralelo a través de diodos y con técnicas de seguimiento de máxima potencia para cada uno de forma individual. Sin embargo, la utilización de los diodos en este esquema hace imposible la transferencia de energía de fuentes de ultra baja potencia como son las CCM. El diodo presenta una caída en polarización directa ( $V_{\lambda}$ ) superior a los 200 mV [60] lo que representa casi un 40% de la tensión de una CCM promedio [12]. Un circuito MPPT independiente para cada fuente aumenta significativamente el tamaño y el costo de la aplicación, además de una sobrecarga apreciable en su consumo de energía [59]. Una posible solución consiste en eliminar los bloques MPPT y controlar el convertidor CC-CC, de tal manera que la tensión en el condensador de almacenamiento ( $V_{sc}$ ), garantice la máxima transferencia de energía desde la conexión en paralelo de los sistemas individuales. Sin embargo, esto se produce a expensas de perder la eficiencia para el seguimiento de cada fuente de manera particular, especialmente para una gran cantidad de entradas [61]. Esta estrategia funciona bien para fuentes complementarias (como transductores solares y termoeléctricos), donde generalmente no se espera que entreguen simultáneamente una cantidad significativa de energía. Este esquema ofrece un bajo rendimiento en escenarios donde múltiples fuentes heterogéneas están entregando al mismo tiempo niveles de energía diferentes pero comparables.

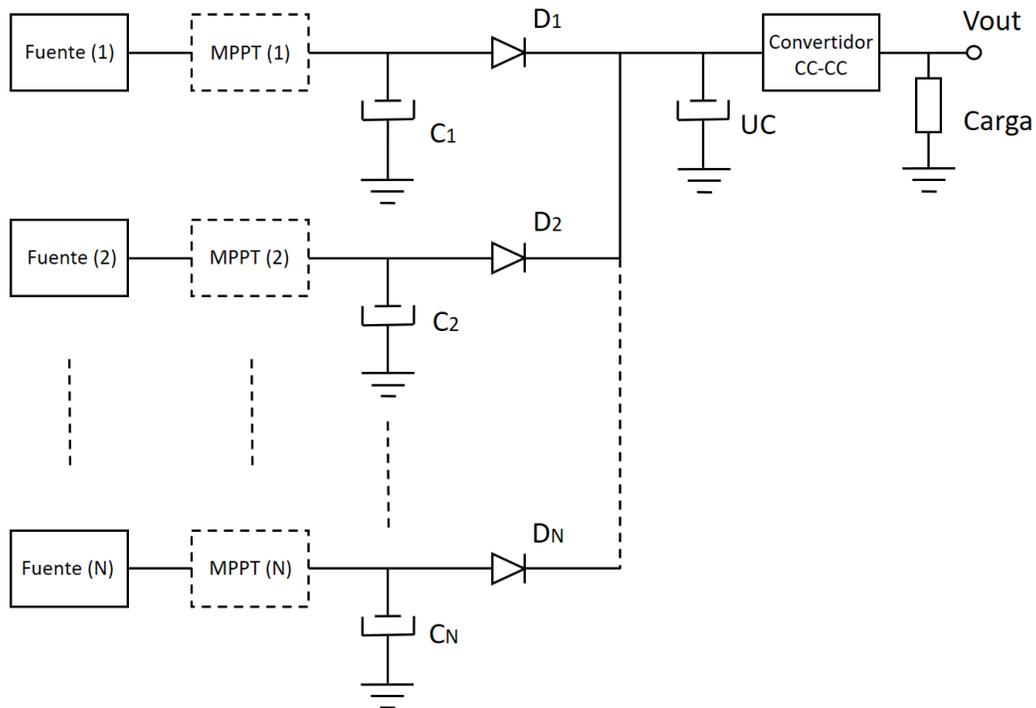


Figura 1.17. Arquitectura *Power ORing*, utilizada en la recolección de energía de múltiples fuentes [59]. Donde C (condensadores); UC (Ultra condensador); D (diodos); Vout (Tensión de salida); N (índice que denota valor numérico determinado).

### 1.3.6 Gestión energética

Los principales desafíos de un SRE se encuentran centrados en la gestión y la distribución de la energía. Un circuito autosustentable no depende de una fuente secundaria (dispositivo de almacenamiento de energía), que propicie alimentación al sistema en los primeros ciclos de la recolección [9]. Son pocos los circuitos resonantes que no necesitan de esta energía adicional, pero como consecuencia, los sistemas de recolección de este tipo son mucho menos eficientes [54]. La eficiencia en los SRE se determina como la relación existente entre la energía consumida y la recolectada [9]. La obtención de mayores cantidades de energía en los sistemas de tercera generación, depende de la implementación de técnicas MPPT más eficientes. Además, los SRE deben tener un gasto energético reducido, es por esto que se construyen sobre la base de componentes de calidad y bajo consumo, trabajan con altas velocidades y tiempos mínimos de activación. Por otro lado, en el instante en el cual no se cosecha energía, la almacenada debe suplir el consumo del SRE en estado de espera y el relacionado con la carga [52].

#### 1.4 Sistema de recolección de energía existente (PATENTE No. 374146).

El sistema de recolección de energía existente (SRE1), tiene como topología básica una bomba de carga capacitiva, clasificando así, en la primera generación de estos dispositivos. Consiste en un circuito electrónico de 8 x 11 cm (ver Figura 1.18 y Figura 1.19) compuesto por un módulo de condensadores (1) y (2), un microcontrolador ATMEGA 328P-PB (3), un módulo de interruptores analógicos (4), (5), (6) y (7), terminales de conexión para una batería de 2.4 V (8), terminales de interconexión con las fuentes de ultra baja potencia (9), un módulo de programación y operación (10) y un diodo led indicador y balanceador de carga (11). El principio de funcionamiento es el siguiente: El microcontrolador (3) (ver Figura 1.18) envía una señal ( $K1 = V_{cc}$ ) al módulo de interruptores (4) para conectar en paralelo el módulo de condensadores (1) a las fuentes de ultra baja potencia y de esta forma comenzar la recolección. En una segunda etapa, se procesa una señal ( $K1 = Gnd$  y  $K2 = V_{cc}$ ) en el módulo de interruptores (4) y (5). Se configura la conexión del módulo de condensadores (1) en serie, de forma tal, que se amplifique el potencial acumulado individualmente por cada condensador en (2). Al mismo tiempo, si la tensión recolectada es suficiente, la energía se almacena en la batería. El diodo led (11) es activado mediante una señal ( $K3 = V_{cc}$ ) en cada ciclo de recolección [62].

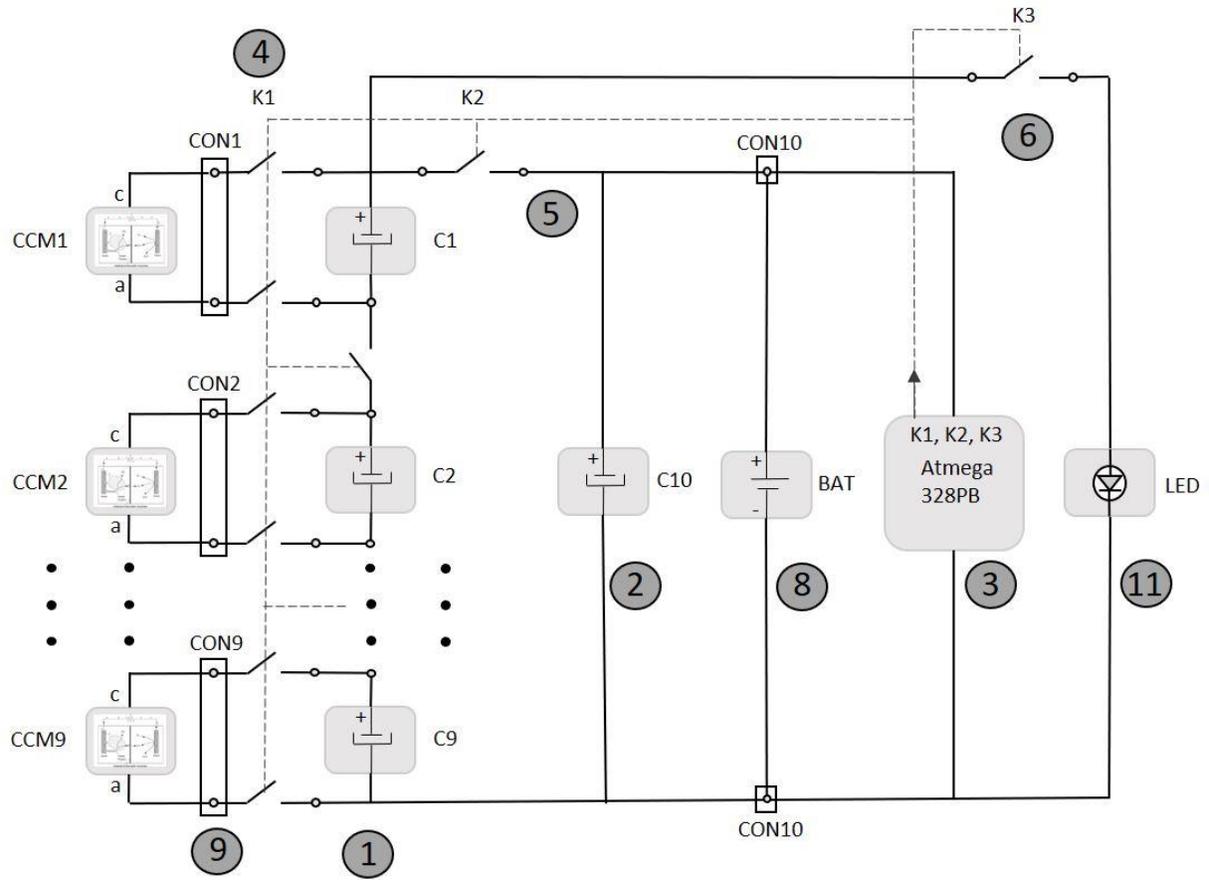


Figura 1.18. Diagrama representativo del SRE1 (adaptación [62]).

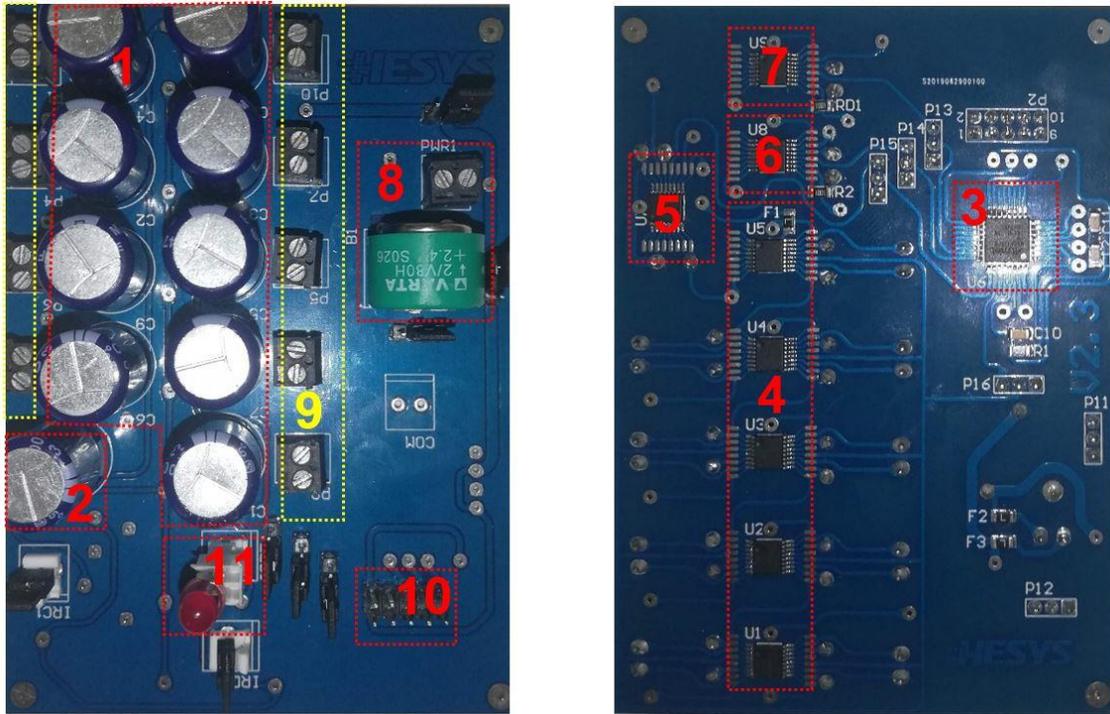


Figura 1.19. SRE1, vista superior y posterior.

**Módulo de condensadores:** El SRE1 está previsto para el trabajo con nueve CCM o fuentes de energía de ultra baja potencia. El circuito consta de nueve condensadores electrolíticos (ver Figura 1.19) de  $4700 \mu\text{F}$  6.3 V (1) que son los encargados de almacenar la energía proveniente de las mismas de forma individual. Un décimo condensador (2) (con las mismas características de los restantes) conectado en paralelo con la batería (8) se encarga de filtrar el potencial acumulado en la segunda etapa de conmutación [62].

**Terminales de interconexión con las fuentes de ultra baja potencia:** Se utilizan nueve terminales de interconexión de dos polos (ver (9) en la Figura 1.19), uno para cada fuente. En esta configuración, el sistema mantiene aislada las celdas de manera independiente, lo cual es necesario, debido al efecto de inversión de potencial que ocurre cuando las CCM se conectan en serie [53].

**Batería:** La energía que se recolecta de las fuentes de ultra baja potencia se almacena en una batería Varta de Ni-Mh 2.4 V 80 mAh.

Módulo de interruptores analógicos: Se utilizan en todo el circuito ocho interruptores analógicos del tipo NX3L2467. Cada uno con dos módulos (1 – 2 / 3 – 4) del tipo simple polo doble tiro y dos terminales para la habilitación de forma independiente (“S1” y “S2”) como se observa en la Figura 1.20. Su principal característica es que presentan una impedancia muy baja en la conmutación ( $R_{on} = 0.7 \Omega$ ) además que el consumo máximo en operación cuando son alimentados con 2.4 V se encuentra alrededor de los 320 nA. Otra de las características que lo hacen muy interesante es el rango de tensión de funcionamiento, siendo este de 1.4 V a 4.3 V [63] lo que permite flexibilidad en la recolección.

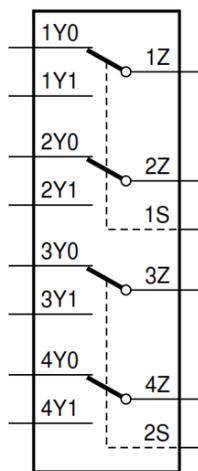


Figura 1.20. Distribución de terminales del integrado NX3L2467 [63].

Microcontrolador: El procesador de 8 bits pertenece a la familia AVR, es de la serie ATMEGA 328-PB. El mismo está diseñado sobre la base de optimizar el consumo del integrado en relación con la velocidad de procesamiento. Cuenta con 8 canales de conversión analógica digital (ADC, por sus siglas en inglés) de 10 bits, dos puertos series programables (*USART*), cinco temporizadores y contadores dos de 8 bits y tres de 16 bits. Además, cuenta con un reloj interno calibrado de 8 MHz y veintisiete terminales de entrada y salidas programables. El rango de alimentación es excelente, el mismo puede funcionar de 1.8 V a 5.5 V lo que lo hace ideal para el sistema de recolección donde los niveles de tensión por lo general son bajos. El consumo indicado por el fabricante en estado activo a 1.8 V, 1 MHz y 25 °C es de solo 0.24 mA, lo cual representa otra de sus características más interesantes [64].

Diagrama de flujo del programa: El ATmega 328PB tiene programado tres rutinas sencillas de tiempos fijos, que incluyen la configuración del módulo de capacitores en paralelo con las fuentes y luego en serie con la batería y el diodo led estabilizador. El objetivo es habilitar la conmutación de los interruptores en dos pasos. A continuación, la Figura 1.21 muestra el diagrama de flujo de las instrucciones que ejecuta el microcontrolador. Al ser un programa compacto tiene como ventaja principal que la velocidad de ejecución puede ser alterada para reducir el consumo del microcontrolador, pero cabe destacar que en estos sistemas el tiempo de operación influye en la eficiencia del mismo.

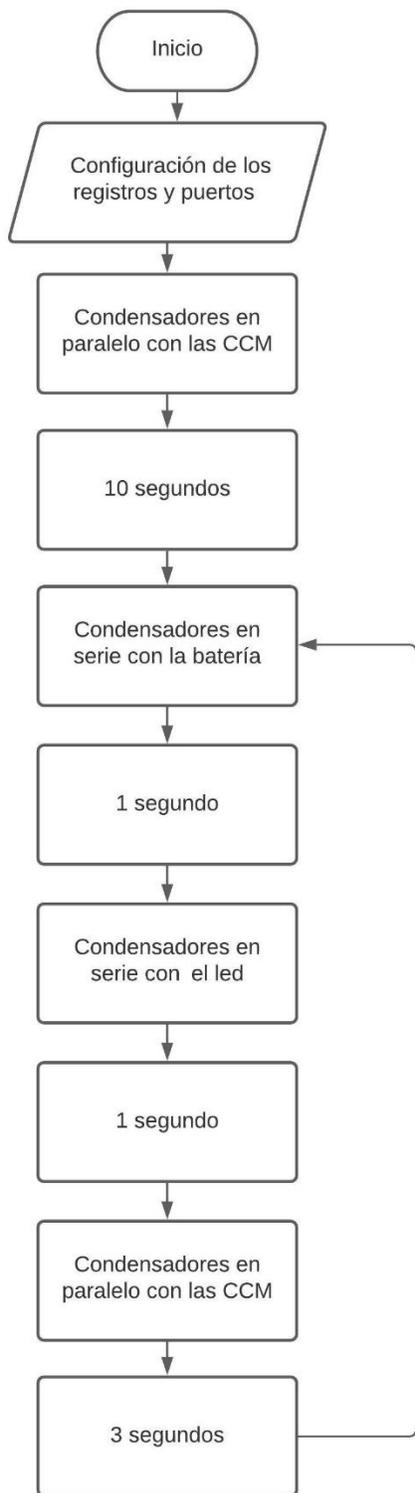


Figura 1.21. Diagrama de flujo del programa que ejecuta el microcontrolador (adaptación [62]).

#### 1.4.1 Justificación del nuevo diseño

Se puede decir que la topología del SRE1, constituye una limitante en el desempeño del mismo. Las bombas de cargas capacitivas tienen la desventaja que, si una de las fuentes o condensadores implicados en la recolección pierde el contacto o queda inutilizable, el circuito queda abierto y no se amplifica la tensión, este fenómeno fue planteado por Khaled *et al.*, [65] en su investigación con balanceadores de tensión capacitivos. El SRE1 trabaja individualmente con nueve fuentes de ultra baja potencia (ánodo y cátodo) [62], lo que implica un cableado excesivo, trae consigo resistencias de contacto en los terminales y con estas, pérdidas por efecto joule [66]. Otro punto de interés es el programa que ejecuta el microcontrolador, el cual, solo utiliza un 20% de los recursos que posee este integrado [64]. Los tiempos de operación no fueron calculados adecuadamente y se tienen pérdidas energéticas en intervalos vacíos, además de la energía que ya se disipa en el diodo led, encargado de equilibrar la recolección [62]. Por otra parte, el almacenamiento de la carga en la batería corresponde al potencial de la suma de las nueve fuentes de ultra baja potencia. El nivel de tensión esperado, depende del estado de las CCM y de las pérdidas por conmutación de los interruptores NX3L2467. La tensión generada en la segunda etapa de recolección debe ser superior al potencial existente en la batería, de otro modo no ocurre una transferencia exitosa de carga [62]. Por estas razones se justifica el diseño de un SRE de nueva generación, que se adapte a los parámetros eléctricos de las CCM y optimice las características del SRE1.

## **HIPÓTESIS**

Si el sistema de recolección de energía existente se diseña a partir de topologías de segunda o tercera generación, es posible mejorar su desempeño actual y aumentar la eficiencia eléctrica a un 60%.

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un SRE que permita obtener un desempeño superior al sistema existente, en cuanto operación, autonomía y eficiencia energética en el proceso de tratamiento de las aguas residuales domésticas.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los parámetros de funcionamiento del sistema existente para establecer una base comparativa.
- Evaluar y proponer un SRE basado en convertidores de corriente continua.
- Seleccionar el procesador, así como otros dispositivos que permiten implementar la estrategia de control sobre el convertidor propuesto.
- Elaborar un programa que pueda establecer una gestión energética adecuada y verificar su correcto funcionamiento.
- Construir un prototipo de un SRE, que permita validar resultados, al efectuar una comparación cualitativa y cuantitativa con sistema existente.

## CAPÍTULO 2

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1 Procedimientos

Este trabajo, debido a sus características se compuso de tres etapas sucesivas: una que correspondió a la preparación de la instrumentación y los materiales: un biorreactor, una fuente controlada y un sistema de medición; una segunda etapa en donde se caracterizó y se determinó los parámetros de funcionamiento del SRE1 y una tercera etapa, en donde se diseñó e implementó un nuevo sistema de recolección de energía (SRE2) a nivel prototipo (Figura 2.1). En estas últimas etapas, las pruebas realizadas a los SRE (Eficiencia eléctrica y tratamiento del ARS) permitieron obtener los datos necesarios para comparar estos sistemas.

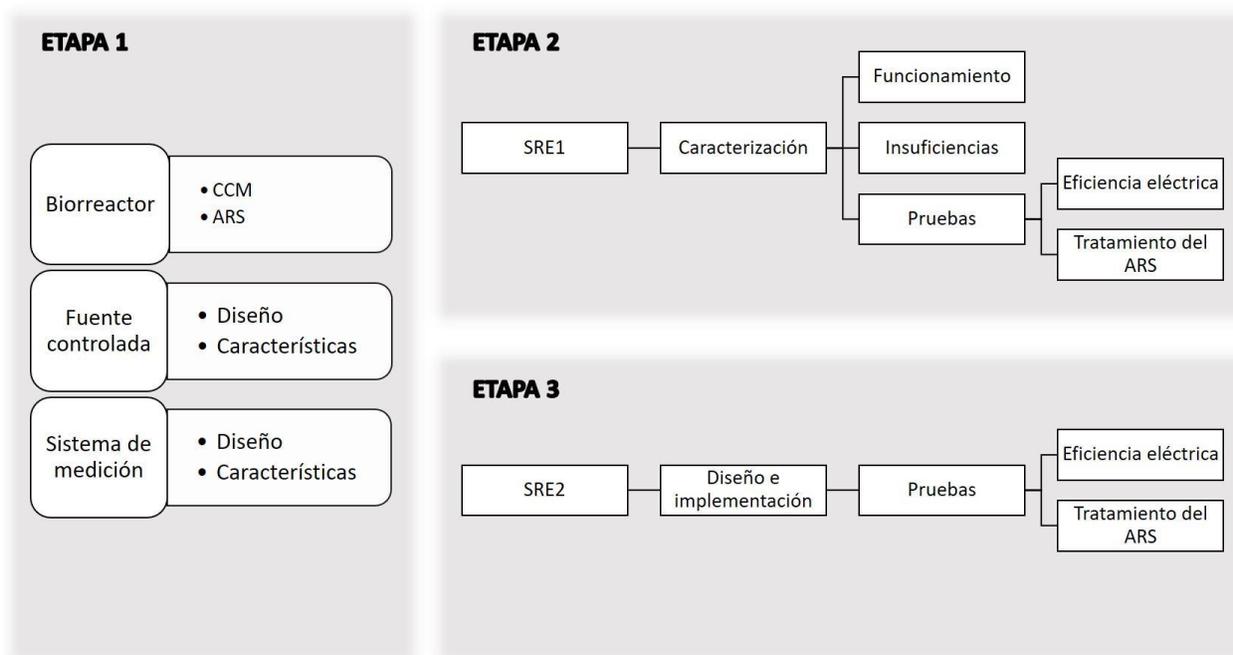


Figura 2.1. Organigrama de la metodología planteada.

### 2.1.1 Biorreactor

Un biorreactor a escala piloto con capacidad de trabajo para 80 L de ARS (Figura 2.2), conformado por nueve CCM, se utilizó en las pruebas realizadas a los SRE. Las CCM utilizadas (Figura 2.3) están compuestas por un conjunto de piezas fabricadas de policloruro de vinilo (PVC, por sus siglas en inglés), que conforman el ánodo y la cámara catódica en una sola estructura cilíndrica y por acrilonitrilo butadieno estireno (ABS, por sus siglas en inglés), el soporte de la membrana [67]. El cátodo se encuentra expuesto al aire y está compuesto por un conjunto de electrodos de membrana: Nafion® 117 activado (10 cm de diámetro) y tela de carbón (6.5 cm de diámetro) con tinta catalítica (10 mg/cm<sup>2</sup>) compuesta por una solución de Nafion® al 5% (1 mL), alcohol isopropílico (1.2 mL) y carbón vulcan XC-72 (120 mg) [68]. Por otro lado, el ánodo está conformado por carbón granular activado teniendo como colector una malla de acero inoxidable T-316 de 400 x 400 [69]. Las cámaras anódicas de las nueve CCM se encuentran sumergidas en su totalidad en el contenedor y una capa de poliuretano expandido reduce el contacto del ARS con el aire. Como inóculo para este sustrato se utilizó sedimento marino con una concentración de 25.0 g/L, que corresponde a una colonia mixta de microorganismos [70] y como fuente de carbono, glucosa [68]. Los componentes que constituyen el ARS, así como sus proporciones, se encuentran enumerados en la Tabla 2.1.

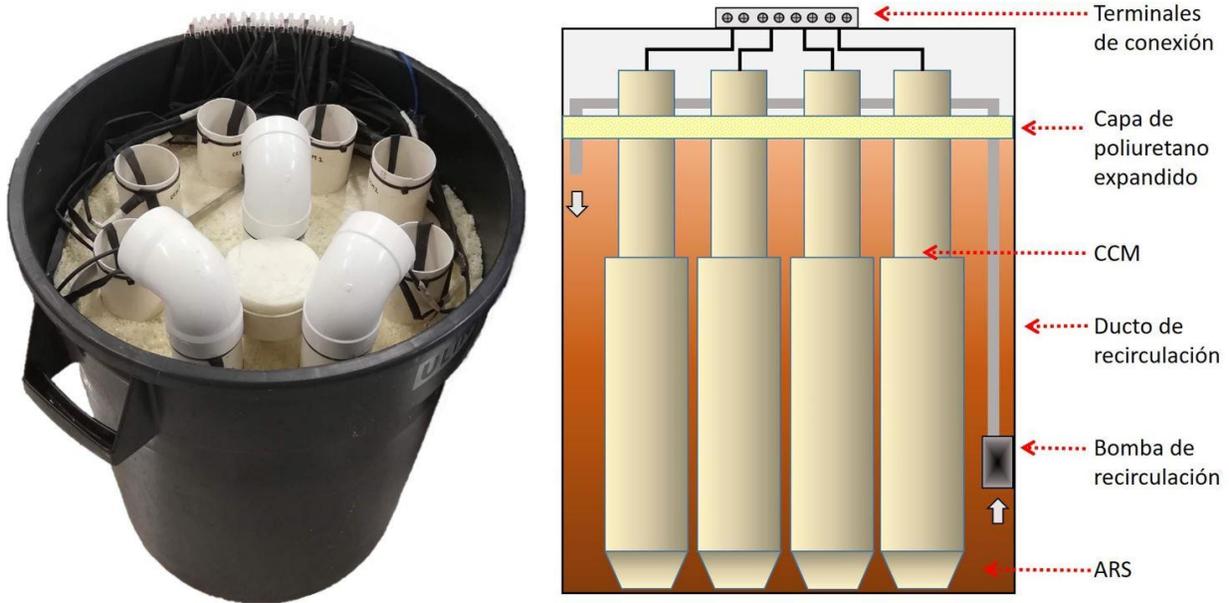


Figura 2.2. Biorreactor a escala piloto.



Figura 2.3. Estructura y composición de las CCM utilizadas (adaptación [7]).

Tabla 2.1. Composición del ARS (adaptación [68]).

No.	Componente	Cantidad
1	$Na_2CO_3$	1 g/L
2	$NaHCO_3$	1 g/L
3	$K_2HPO_4$	0.6 g/L
4	$NH_4Cl$	1 g/L
5	$CH_3COOH$	0.47 mL/L
6	$C_{12}H_{22}O_{11}$	1.2 g/L
7	$H_2O$	80 L

### 2.1.2 Fuente controlada

Para realizar las pruebas de eficiencia eléctrica en los SRE se utilizó un modelo electrónico ajustable de nueve celdas como fuente controlada (Figura 2.4). La eficiencia de un SRE varía en diferentes rangos de operación y se calcula evaluando la razón entre la energía que se aprovecha y la que se recolecta [71]. En este caso, se necesitaron parámetros de entrada (tensión y corriente) y salida controlados (carga conectada) [71], aspecto que no puede ser posible con las CCM debido a su inestabilidad frente a las perturbaciones [67]. El SRE1 está preparado para trabajar con nueve CCM [62], por lo que se diseñó un circuito que se adaptara al funcionamiento real de las celdas y a su vez fuera posible ajustar sus parámetros de salida, como  $I_{cc}$  y  $V_{oc}$ . Para implementar un circuito electrónico con estas características se utilizó como base el diseño planteado por Alaraj *et al.*, [72]. El circuito equivalente que permite modelar dinámicamente el potencial de una CCM, se muestra en la Figura 2.4.

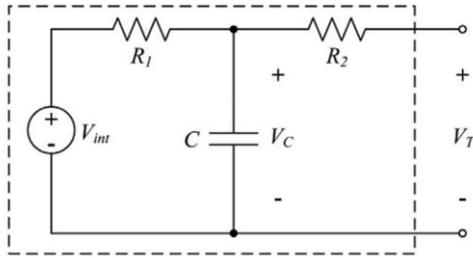


Figura 2.4. Circuito equivalente de una CCM [72].

La tensión interna  $V_{int}$  del circuito equivalente, es también conocida como la tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ ). Para encontrar el valor de  $R_2$  (Ecuación (9)), se conectó una resistencia de  $550 \Omega$  a la CCM y se midió tanto la tensión  $V_T^-$  como la corriente de salida  $I_T^-$ . Luego, el circuito se abrió y se midió nuevamente la tensión en los terminales  $V_T^+$ . El superíndice (-) y (+) denota la medición justo antes y después de la apertura del circuito, respectivamente. Se supone que la capacitancia es lo suficientemente alta como para que la tensión en los terminales de salida esté razonablemente cerca del potencial en el condensador justo después de abrir el circuito [72]. La resistencia  $R_2$  se calculó como:

$$R_2 = \frac{V_C - V_T^-}{I^-} = \frac{V_T^+ - V_T^-}{I^-} \quad (9)$$

Teniendo en cuenta que en una CCM la resistencia externa es igual a la resistencia interna en el MPP [72]. La resistencia interna total  $R_{int}$  se calculó mediante la Ecuación (10):

$$R_{int} = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (10)$$

Donde  $V_{MPP}$  e  $I_{MPP}$  son la tensión y la corriente en el punto de máxima transferencia de potencia. De esta manera el valor de la resistencia  $R_1$  se calculó sustrayendo  $R_2$  de la resistencia interna total:

$$R_1 = R_{int} - R_2 \quad (11)$$

El condensador de derivación  $C$  se calculó utilizando los valores de  $V_{int}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  y los resultados de circuito abierto. Se midió la tensión inicial en el condensador  $V_c(0)$  al conectar una carga a los terminales de la CCM, luego, cuando se abrió el circuito la tensión comenzó a aumentar gradualmente y transcurrido un tiempo  $t$  (en segundos) se midió el valor de circuito abierto que corresponde a  $V_c(t)$ . Con esas medidas y despejando en la Ecuación (12) se obtuvo la capacidad del condensador de derivación.

$$V_c(t) = V_{int} + V_c(0)e^{-\left(\frac{1}{CR_1}\right)t} - V_{int}e^{-\left(\frac{1}{CR_1}\right)t} \quad (12)$$

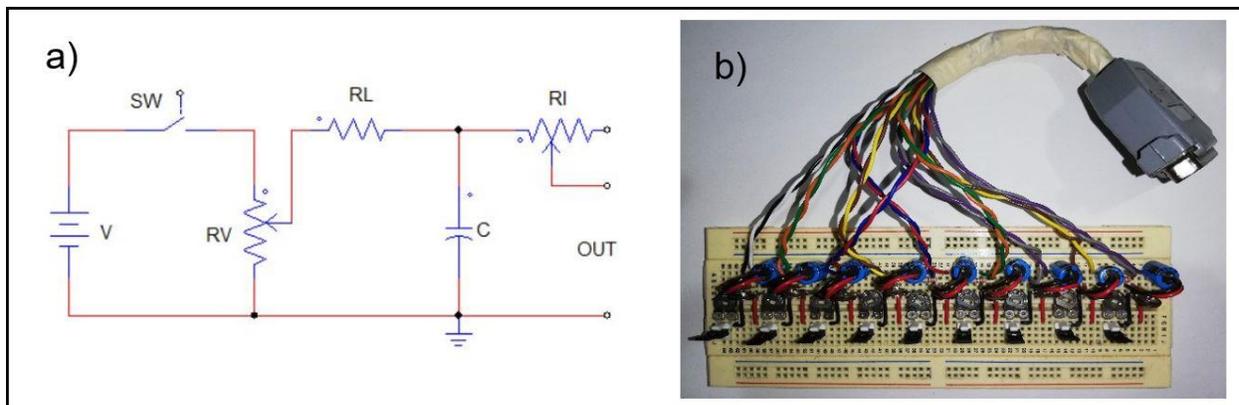


Figura 2.5. Fuente controlada: a) Diagrama eléctrico; b) Implementación.

### 2.1.3 Sistema de medición por muestreo analógico

Se utilizó un sistema de medición por muestreo analógico de cuatro canales, basado en la tesis de Rodrigo et al., [67] y el libro *Data Acquisition* [73], con el que se obtuvieron los valores de tensión y corriente en los SRE para realizar el cálculo de eficiencia eléctrica en estos dispositivos [71]. El diseño de un circuito *driver* para una tarjeta de *Arduino UNO* (Figura 2.6) se realizó en la plataforma de desarrollo *Proteus 8*, el mismo incorporó cuatro amplificadores de corriente de la serie INA190-A5 ( $GAIN = 500$ ) y un interruptor analógico de la serie NX3L2467 para un cambio de escala en la medición de este parámetro. Las ventajas de utilizar un *Arduino UNO* es que es económico, fácil de programar y cuenta con seis canales de conversión análoga digital. Para las mediciones de corriente con los amplificadores, se utilizaron dos resistencias de derivación de 1 y 0.33 ohm, una para la escala de 10 mA y otra para la escala de 30 mA respectivamente. El cálculo de estos componentes se realizó mediante la Ecuación (13) que brinda el fabricante [74].

$$V_{OUT} = (R_{SENSE} \times I_{LOAD} \times GAIN) + V_{REF} \quad (13)$$

Donde,  $V_{OUT}$  es la tensión de salida del amplificador,  $R_{SENSE}$  la resistencia de derivación,  $I_{LOAD}$  la corriente a medir,  $GAIN$  la ganancia del amplificador y  $V_{REF}$  la tensión de referencia.

Se preparó para medir dos canales de tensión con escala de 0 a 5 V (4.8 mV/bit) y dos de corriente con escala de 0 a 30 mA (9.7  $\mu$ A/bit) El instrumento fue diseñado para realizar una transferencia de información con un ordenador por comunicación serie a 115200 baudios, lo que equivale a un muestreo de las señales cada 2 ms. De esta manera permitió almacenar la información y visualizar en tiempo real las formas de onda de las diferentes señales muestreadas.

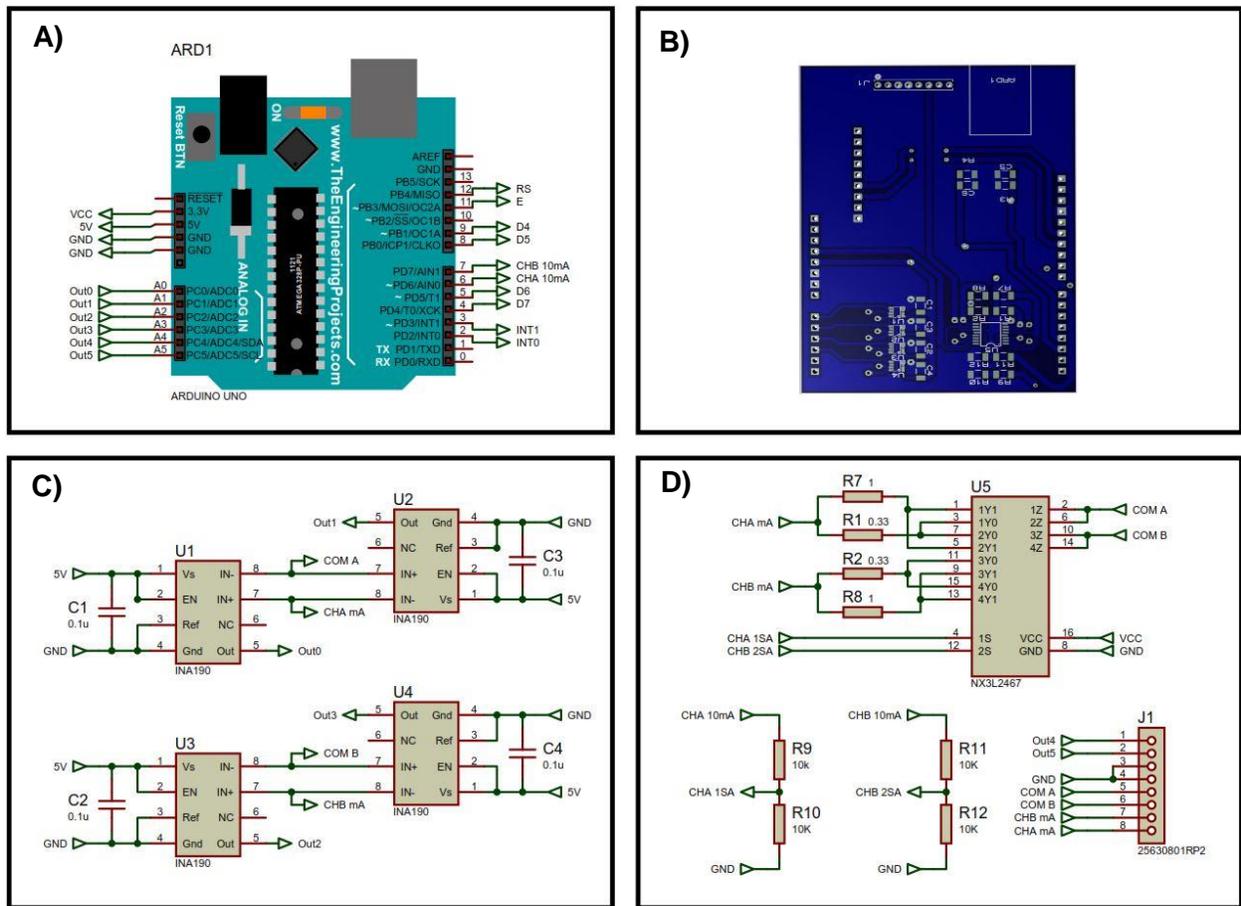


Figura 2.6. Diseño del circuito *driver* en *Proteus 8*. A) Tarjeta de *Arduino UNO*; B) Modelado del circuito *driver*; C) Amplificadores operacionales para la medición de corriente; D) Interruptor analógico para el cambio de escala del instrumento.

#### **2.1.4 Caracterización del SRE1**

Se realizó una caracterización del sistema actual, en donde se efectuaron las pruebas necesarias para determinar su funcionamiento, la eficiencia eléctrica, el desempeño en el tratamiento del ARS, las principales insuficiencias del diseño y las posibles soluciones a estas, con el objetivo principal de no introducirlas en la nueva propuesta.

La prueba de funcionamiento consistió en la conexión del SRE1 con el biorreactor de CCM durante 5 horas de operación. Se utilizó el sistema de medición por muestreo analógico cada 2 ms para monitorizar dos parámetros de la tarjeta: la tensión en la segunda etapa de recolección (condensadores en serie) y la tensión en la batería de almacenamiento. Paralelo a esto, cada hora de la prueba se desconectó el SRE1 del biorreactor para obtener los potenciales de circuito abierto de cada una de las CCM mediante un multímetro FLUKE (Mod. 83 V).

#### **2.1.5 Diseño e implementación del SRE2**

El diseño del SRE2 se realizó siguiendo la metodología descrita por Sarpeshkar *et al.*, [10]. Un análisis de los estudios previos en la recolección múltiple de energía, permitió seleccionar un esquema de recolección apropiado para el trabajo con nueve fuentes de ultra baja potencia, que pudiera incorporar un sistema de retroalimentación por conversión análoga digital y técnicas MPPT para optimizar el proceso de recolección [75]. Se realizó una búsqueda y selección de los componentes que conforman el circuito: esto atendiendo a un consumo energético bajo ( $\leq 240 \mu\text{A}$ ), niveles de tensión de alimentación en un rango entre 1.4 V – 5 V, resistencias en estado activo  $\leq 0.7 \Omega$  y velocidades de trabajo relativamente altas ( $\geq 1 \text{ MHz}$ ). Se elaboró una gestión energética apropiada a la recolección múltiple de energía, para esto se diseñó un diagrama de flujo que permitió analizar los diferentes escenarios del SRE2 desde una perspectiva más amplia. Se llevó a cabo la interconexión de los componentes que previamente fueron seleccionados en la etapa de diseño. Se incluyó en el microcontrolador, un código programa que se creó en la plataforma de desarrollo *Arduino IDE 1.8.12*, atendiendo la gestión energética ya implementada con el objetivo de lograr una eficiencia eléctrica en el sistema superior al 60%.

### 2.1.6 Pruebas realizadas a los SRE

Se llevaron a cabo dos pruebas en los SRE: una a evaluar los procesos eléctricos y otra, los procesos bioelectroquímicos en el tratamiento del ARS. En la Figura 2.7 se muestra gráficamente cómo fueron llevadas a cabo.

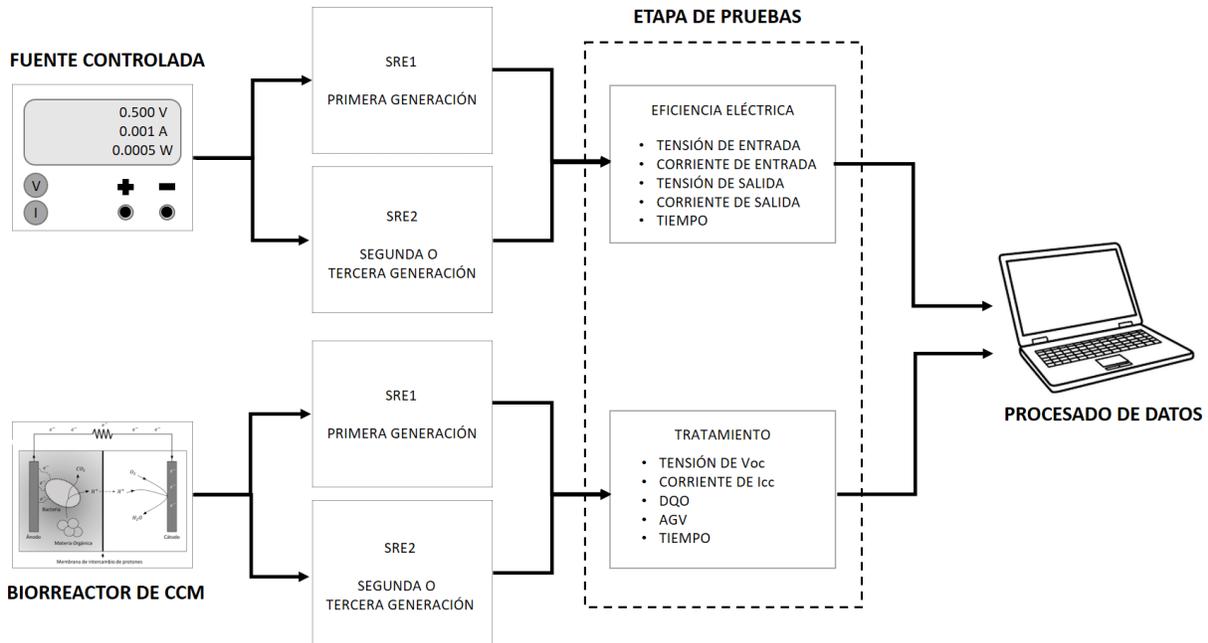


Figura 2.7. Diseño experimental para las pruebas en los SRE.

**Eficiencia eléctrica:** Se calculó obteniendo la energía que se recolecta de la fuente y la energía que se aprovecha (carga de la batería) en los SRE. La metodología utilizada es la que plantea Chris Glaser *et al.* para realizar pruebas en circuitos de ultra baja potencia (Figura 2.8) [71]. Como fuente de alimentación controlada se utilizó un dispositivo conformado por 18 resistencias ajustables de 1 k $\Omega$ , 9 resistencias de 220  $\Omega$  y 9 condensadores de derivación de 330  $\mu$ F, que modelaba eléctricamente a nueve CCM [72]. En la ejecución de estas pruebas el módulo se ajustó para entregar tensiones de trabajo  $V_{oc} = 0.5$  V y corrientes  $I_{cc} = 1$  mA. La obtención de la corriente y la tensión en los sistemas de recolección, tanto en la entrada (energía recolectada de la fuente controlada) como en la salida (carga de la batería), fue posible a través un sistema medición por muestreo analógico cada 2 ms, que capturó simultáneamente estos valores. A partir

de las mediciones se obtuvieron otros parámetros de interés como el consumo de energía, las pérdidas asociadas al control y la autonomía de los circuitos evaluados [71].

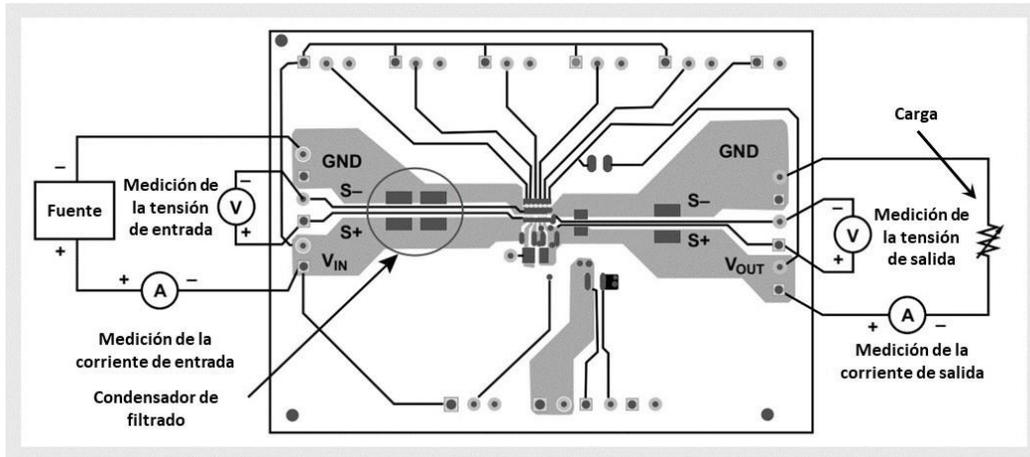


Figura 2.8. Esquema para la medición de eficiencia en tarjetas de ultra bajo consumo [71].

Tratamiento del ARS: Se preparó para cada prueba 80 L de ARS de igual composición. Las CCM tuvieron un período de estabilización de dos semanas en el biorreactor, tiempo suficiente para la formación de la biopelícula en los electrodos anódicos de estas celdas [68]. Para lograr homogeneidad en el ARS se utilizó una bomba de recirculación de 4.2 W, 240 L/h, la cual estuvo en funcionamiento 2 h diarias [76]. Se realizó un monitoreo continuo cada 24 horas de la concentración de materia orgánica disponible en términos de DQO, así como de los parámetros de las CCM [68]: tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ), los cuales fueron medidos con un multímetro FLUKE (Mod. 83 V). La obtención de las resistencias totales de las celdas, se calculó mediante la Ecuación (14) realizando mediciones en la carga y descarga de un condensador de 330  $\mu$ F, 16V para cada CCM individualmente [77].

$$R_{int} = -\frac{t}{C \times \ln\left(\frac{V_c}{V_{oc}} - 1\right)} \quad (14)$$

Donde,  $t$  es el tiempo que transcurre hasta la apertura del circuito,  $C$  es la capacidad del condensador en Faradios,  $V_c$  es el potencial del condensador en el instante  $t$  y  $V_{oc}$  es el potencial

a circuito abierto de la CCM (nota: el condensador debe de estar completamente descargado al iniciar la prueba para evitar incluir  $V_c(0)$  [66].

Medición de la DQO: La metodología para la determinación de este parámetro, fue realizada con base al manual de análisis del agua HACH [78].

Se empleó un digestor HACH (Mod. DBR 200) a 150 °C. De una muestra de 100 mL de ARS previamente homogenizada, se colectó una submuestra de 200 µL, la cual se agregó en un ángulo de 45 ° en el reactivo de digestión, teniendo cuidado de no tocar los bordes del frasco. Una vez que el digestor alcanzó la temperatura fijada, la celda de digestión se cerró y se agitó ligeramente antes de colocarla durante 120 minutos en el equipo. Pasado este tiempo, se esperó que la temperatura alcanzara los 120 °C para extraer la celda. Aún caliente se invirtió el frasco de la muestra varias veces y luego se dejó enfriar en ausencia de luz hasta que alcanzó la temperatura ambiente. Con un paño húmedo y otro seco se limpiaron bien las celdas de digestión, tanto de la muestra como del blanco, antes de colocarlas en el espectrofotómetro HACH (Mod. DR 3900). Se calibró el instrumento con el blanco y luego se colocó la muestra para determinar los mg/L de materia orgánica en términos de DQO.

Medición de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV): Se realizaron mediciones en el sustrato, las cuales brindaron una percepción indirecta de la actividad microbiana y la cantidad de materia orgánica que podía ser transformada directamente en energía por los microorganismos. La medición de este parámetro se realizó mediante el método de Nordmann (1977) [79].

Se extrajo 20 ml de ARS en un vaso de precipitado (volumen de la muestra (A)), del cual, se determinó el pH de la muestra (pH inicial) utilizando el instrumento HACH (Mod. HQ40D). Sobre una placa de calentamiento con agitador magnético CIMAREC (Mod. SP131325) se agitó la muestra lentamente a temperatura ambiente. Se introdujo el electrodo para medir pH y haciendo uso de una bureta de 25 mL, se tituló la muestra con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.1 N) hasta alcanzar pH = 5 (punto de referencia). Posteriormente se continuó con la titulación de pH = 5 hasta pH = 4.4, en este punto se registró el volumen (mL) requerido de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.1 N) (volumen de titulación (B)). Finalmente se utilizó la Ecuación (15) para determinar la concentración de AGV en mg/L.

$$AGV = \left( \frac{20}{A} \times B \times 1.66 - 0.15 \right) \times 500 \quad (15)$$

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Caracterización del SRE1

##### 3.1.1 Funcionamiento e insuficiencias

El gráfico de la Figura 3.1 a) muestra los potenciales de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) para cada una de las CCM que conforman el biorreactor utilizado. Se puede observar que, durante el transcurso de la prueba, las CCM experimentaron una caída de tensión comprendida entre 20.9 y 36.6% respecto a su valor inicial. Otros autores como y Rodrigo *et al.*, [67] y Phrasad *et al.*, [75] han reportado este efecto el cual se debe a la fase de estabilización de las CCM (biopelícula en formación o el tipo de sustrato). El SRE1 incluye en su topología una bomba de carga capacitiva, muy utilizada debido a su simplicidad y ventajas económicas sobre otros diseños [80, 65, 48]. Sin embargo, el propio Khaled *et al.*, [65] y Costilla *et al.*, [77] describieron que estos circuitos necesitan del funcionamiento de todas las celdas y condensadores implicados en el SRE debido a que de otra manera el circuito pierde funcionalidad. El SRE1 no se encuentra exento de dicho fenómeno y si el potencial de la segunda etapa de recolección no supera el potencial de la batería de almacenamiento, la energía no se transfiere de las CCM hacia esta, lo que provoca que el circuito trabaje de manera ineficiente.

Durante las dos primeras horas de este experimento, se observó que la tensión en la segunda etapa del SRE1 ( $V_{ccm}$ ) igualaba y superaba ligeramente el potencial de la batería ( $V_{bat}$ ) (Figura 3.1 b)), no siendo así en el tiempo restante de la prueba (Figura 3.1 c)). En este último periodo la corriente consumida por el circuito ascendió a 80  $\mu A$ , lo que representa un aumento de cuatro veces el consumo en operación normal. Esta insuficiencia en el SRE1 se debe a que la tarjeta no incluye un sistema de retroalimentación, que impida la conexión de los condensadores con la batería en caso de que no se cumpla este requisito. A pesar de que este problema reduce la autonomía de la tarjeta, no afecta al trabajo que realizan las CCM ya que de igual manera la energía se disipa en un diodo led [62].

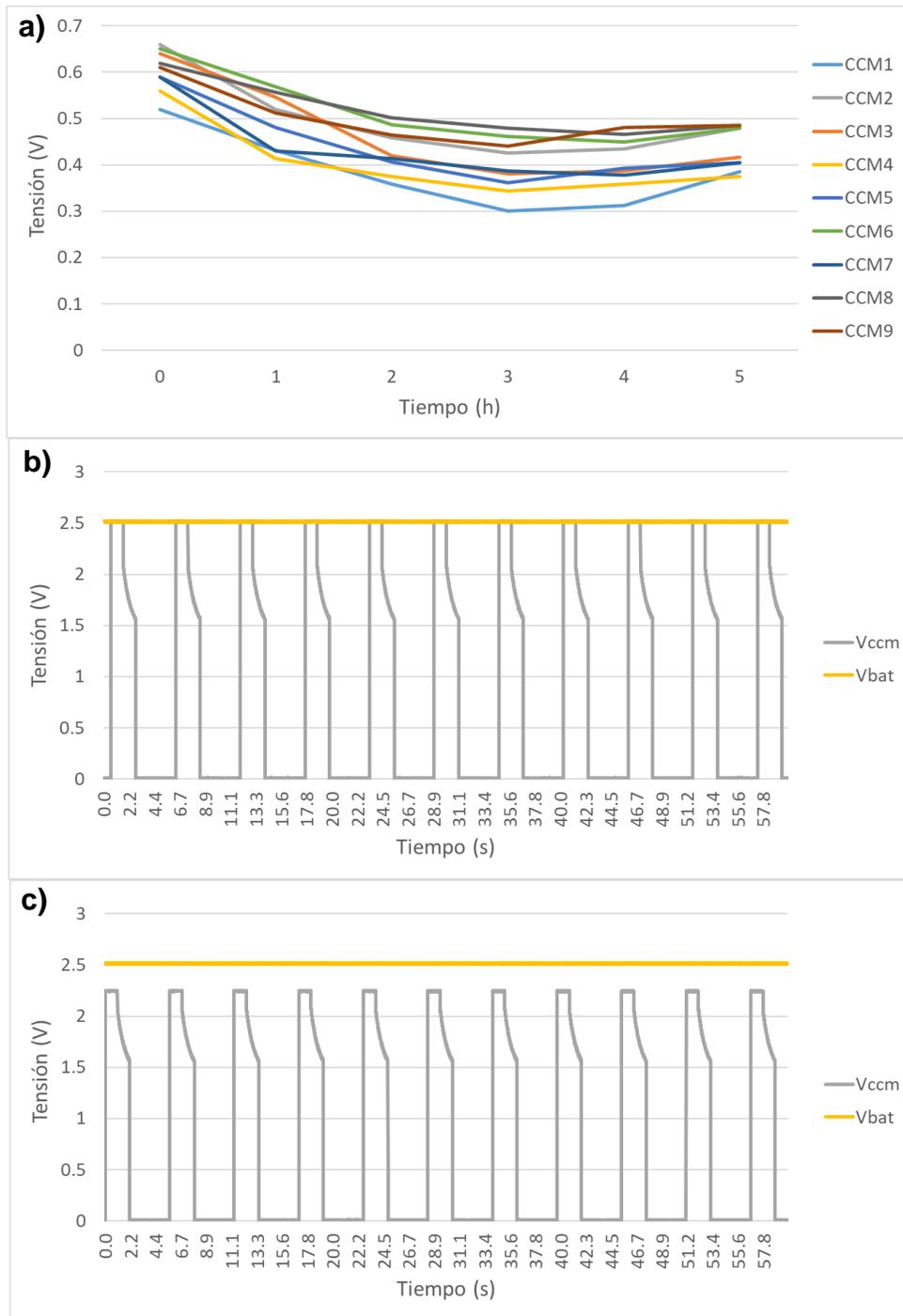


Figura 3.1. Efecto de la caída de potencial de las CCM en el desempeño del SRE1. a) Potenciales (Voc) de las celdas medidos en un periodo de cinco horas; b) Transferencia exitosa de carga a la batería; c) Sin transferencia energética a la batería; Vbat: Forma de onda de la tensión en la batería de almacenamiento; Vccm: Forma de onda de la tensión en la serie de los condensadores.

## **3.2 Pruebas realizadas al SRE1**

### **3.2.1 Eficiencia eléctrica**

En la Figura 3.2 se muestra el comportamiento tanto de la corriente de entrada, proveniente del módulo de condensadores, como la de salida, que se toma como la corriente que carga la batería en un ciclo de recolección para este sistema. El primer impulso de la Figura 3.2 a) corresponde a la interconexión de todos los condensadores en serie con la batería, en un instante de apenas 240 ms la tensión se ve amplificada y ocurre un equilibrio energético entre los elementos almacenadores (ver Figura 3.3 b)). El segundo impulso de la Figura 3.2 a) ocurre a los 4.5 segundos aproximadamente y se debe a la conexión de los condensadores en serie con un diodo led. Durante un segundo se disipa en forma de luz y calor parte de la energía remanente en los condensadores, que no puede ser aprovechada en el proceso de carga e interfiere en el trabajo de las CCM. En este mismo intervalo de tiempo en la Figura 3.3 a) se puede observar como el potencial de la serie decrece hasta alcanzar un poco más que 1.5 V. Por otra parte, la Figura 3.4 muestra la forma de onda de una parte de la corriente que necesita el circuito para auto sustentarse y es consumida de la propia batería.

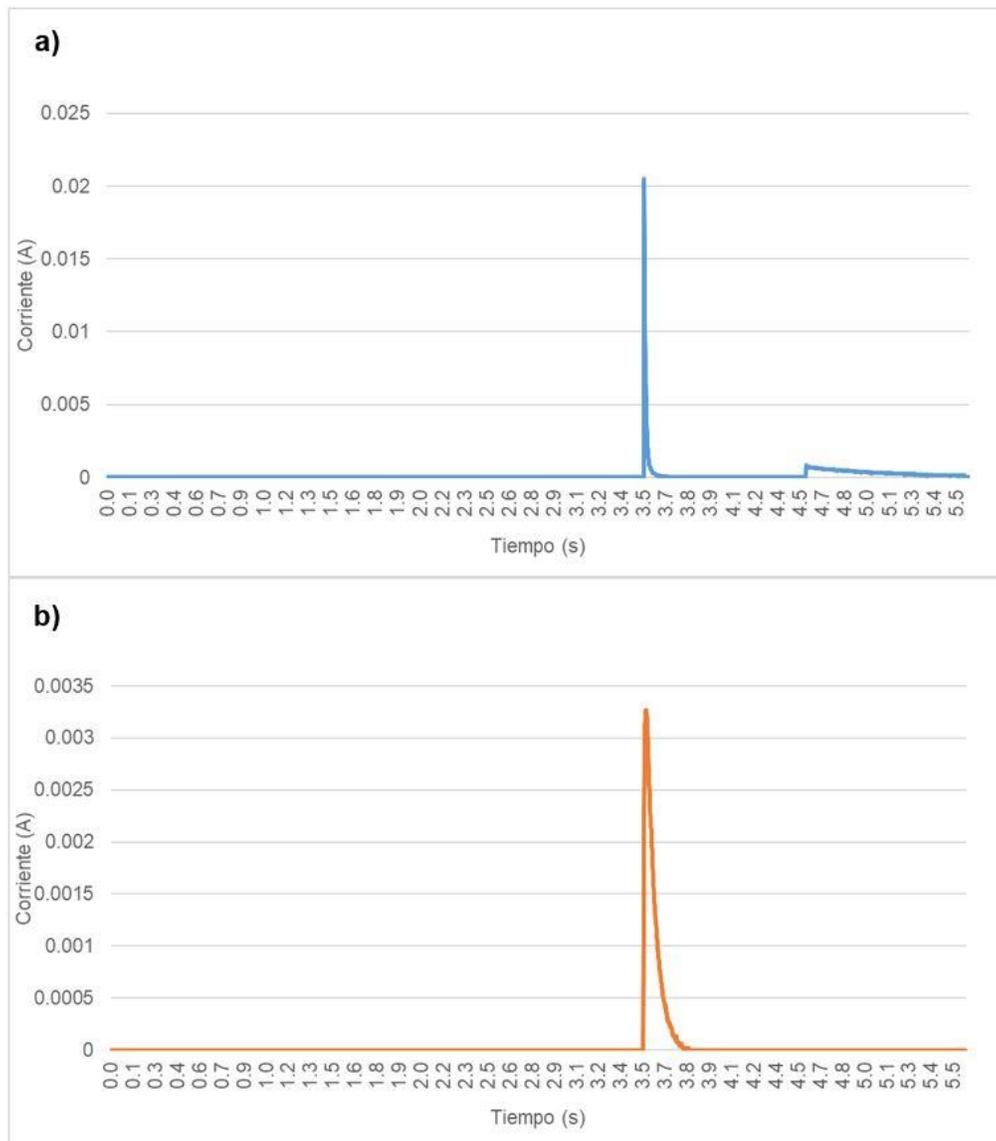


Figura 3.2. Forma de onda de las corrientes de entrada y salida en un ciclo de recolección de la tarjeta existente. a) Corriente que se extrae de las CCM; b) Corriente de carga en la batería.

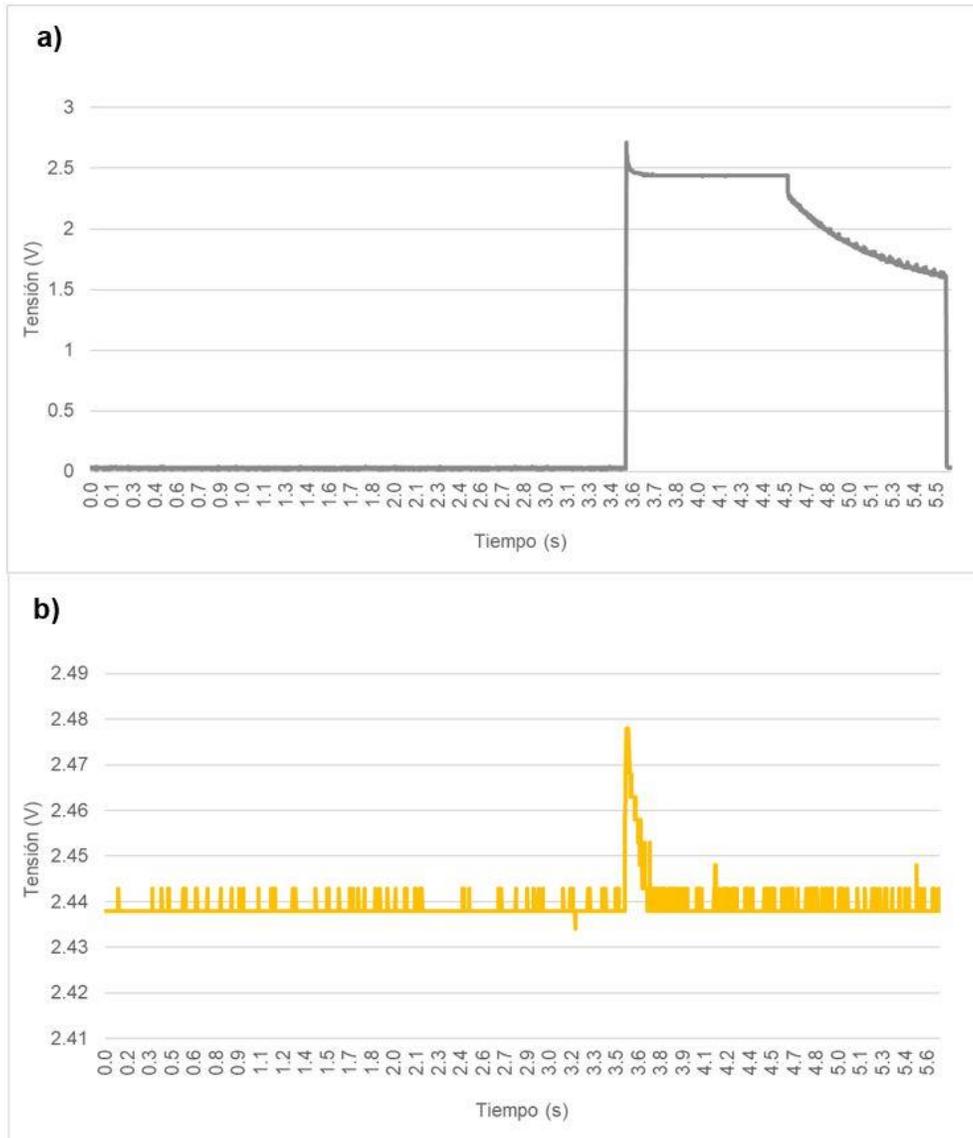


Figura 3.3. Forma de onda de los potenciales de entrada y salida en un ciclo de recolección de la tarjeta existente. a) Tensión de los condensadores en serie; b) Tensión de la batería.

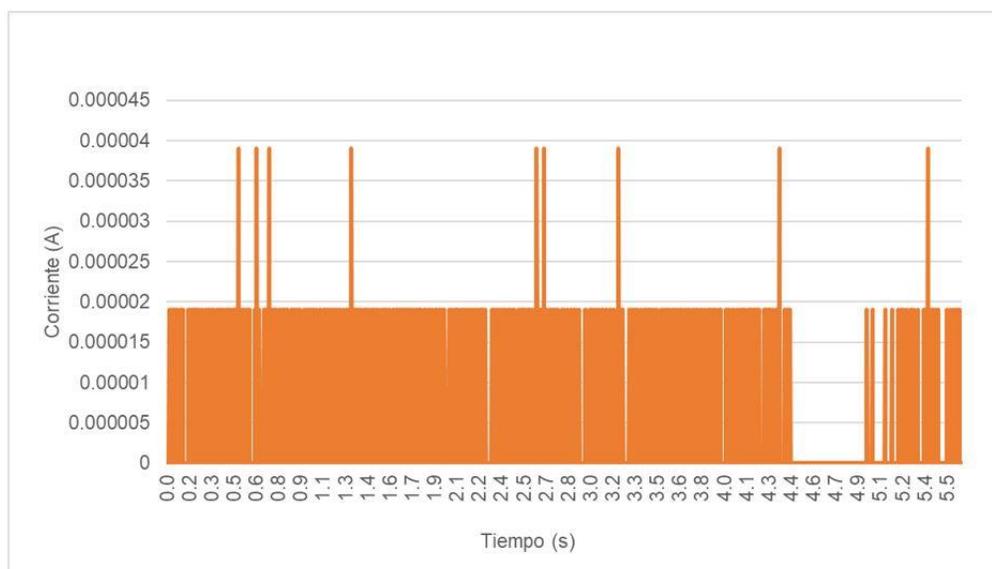


Figura 3.4. Corriente consumida de la batería en un ciclo.

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados de las mediciones en términos de energía. Este parámetro se calculó integrando la potencia en el tiempo de prueba.

Tabla 3.1. Cálculos energéticos en el SRE1.

$E_{\text{Recolectada}} \text{ (J)}$	$E_{\text{Almacenada}} \text{ (J)}$	$E_{\text{Disipada (led)}} \text{ (J)}$	$E_{\text{Consumida (circuito)}} \text{ (J)}$
0.001370294	0.000625	0.000668063	0.000125688

En la Figura 3.5 se muestra la distribución de la energía que se extrae de las CCM. La energía que se aprovecha en este caso es la que participa directamente en la carga de la batería. De esta manera, bajo parámetros controlados la eficiencia total del sistema fue de 42%. Otros autores como Carreon *et al.*, [80] y Khaled *et al.*, [65], implementaron bombas de carga capacitivas en sus investigaciones y reportaron obtener eficiencias de 65%, 86% (parcial) respectivamente. El SRE1 presenta limitantes en su diseño que impiden que se alcancen mejores resultados: el 49% de la energía que se recolecta, se pierde en la activación de un diodo led, la transferencia energética ocurre en menos de 100 ms cuando tiene asignado 1 s en la

programación y el microcontrolador siempre se encuentra en estado activo lo que implica un mayor gasto energético.

La autonomía de la tarjeta se obtuvo a partir del consumo del circuito y la energía que puede propiciar la batería de almacenamiento. Teniendo en cuenta que la demanda de corriente en condiciones críticas (sin CCM a la entrada) asciende a 80  $\mu$ A, se utilizó la Ecuación (8) para calcular el tiempo en el cual la carga se agota y el circuito pierde funcionalidad.

$$\text{Autonomía (h)} = \frac{V_{bat} (V) * Q_{bat} (Ah)}{P_c (W)} = \frac{2.4 * 0.08}{2.4 * 80 * 10^{-6}} = 1000 h$$

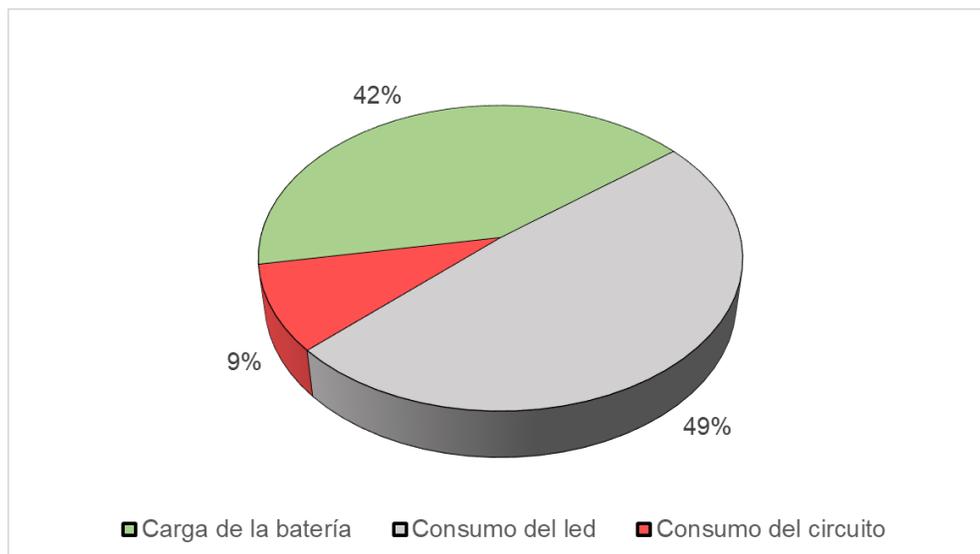


Figura 3.5. Distribución de la energía en el SRE1.

### 3.2.2 Eficiencia en el tratamiento del ARS

Las mediciones se realizaron diariamente, donde se registraron los potenciales a circuito abierto y las corrientes de cortocircuito de cada celda (Figura 3.7 a) y b)), el pH, la temperatura, la concentración de los AGV y la DQO (Figura 3.6). El pH se mantuvo en un rango comprendido entre 6.89 - 7.60 siendo favorable para las CCM cerca del punto de neutralidad según lo

reportado por Lu *et al.*, [76], la temperatura en este caso permanece constante sobre los 24 °C y se reduce la concentración de AGV un 10%. La DQO se muestra en la Figura 3.6 y se puede observar una disminución gradual durante las primeras 144 horas de prueba, con una remoción total de 870 mg/L. El porcentaje de materia orgánica degradada en el sustrato en términos de DQO, se puede calcular haciendo uso de la Ecuación (1). Otros autores como Lu *et al.*, [76] y Yu *et al.*, [81] han reportado remoción de DQO superior a 80% en un término de 7 días de operación, muy similar a los resultados obtenidos con el SRE1.

$$DQO (\%) = \frac{(2650 - 1560) - (1780 - 1560)}{(2650 - 1560)} \times 100 = 79.81\%$$

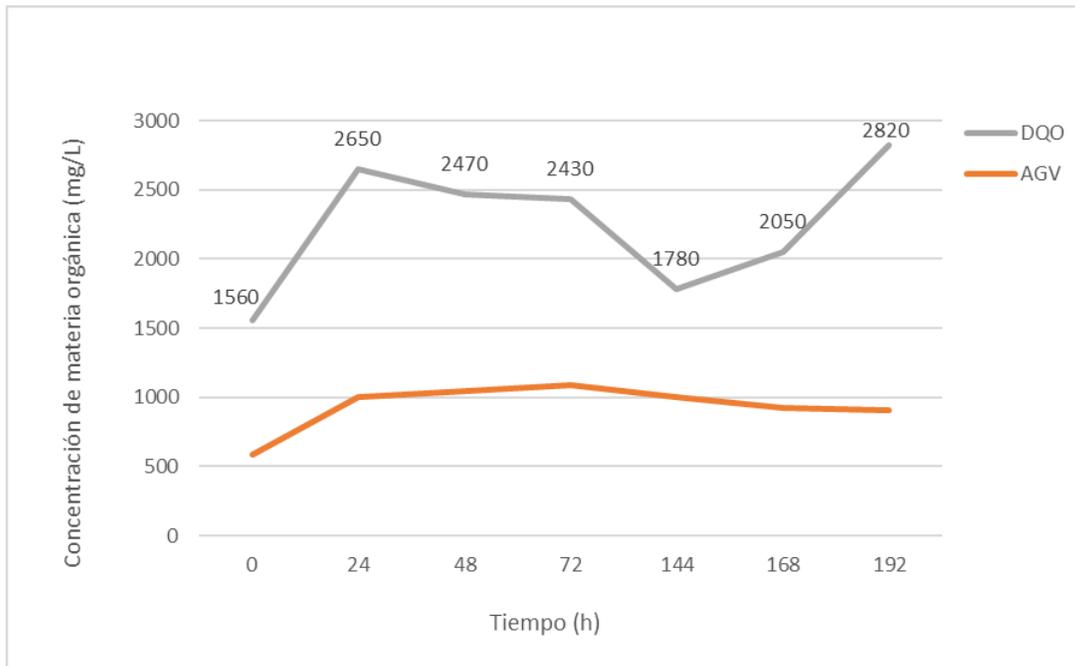


Figura 3.6. Relación de las mediciones diarias de AGV y DQO con el SRE1.

Por otro lado, las tensiones de las CCM (Figura 3.7 a)) se mantuvieron comprendidas en un rango entre 299 – 663 mV. Se observa una pérdida gradual del potencial de las celdas en el transcurso de la prueba, lo cual influye negativamente en la recolección de energía [75]. De igual forma, en el caso de las corrientes de cortocircuito (Figura 3.21 b)) la mayoría de las celdas redujeron su

capacidad un 45%. Este fenómeno se debe a la disminución de la materia orgánica degradable en el sustrato o a la baja actividad de los microorganismos exoelectrógenos que afecta el rendimiento de las celdas [82].

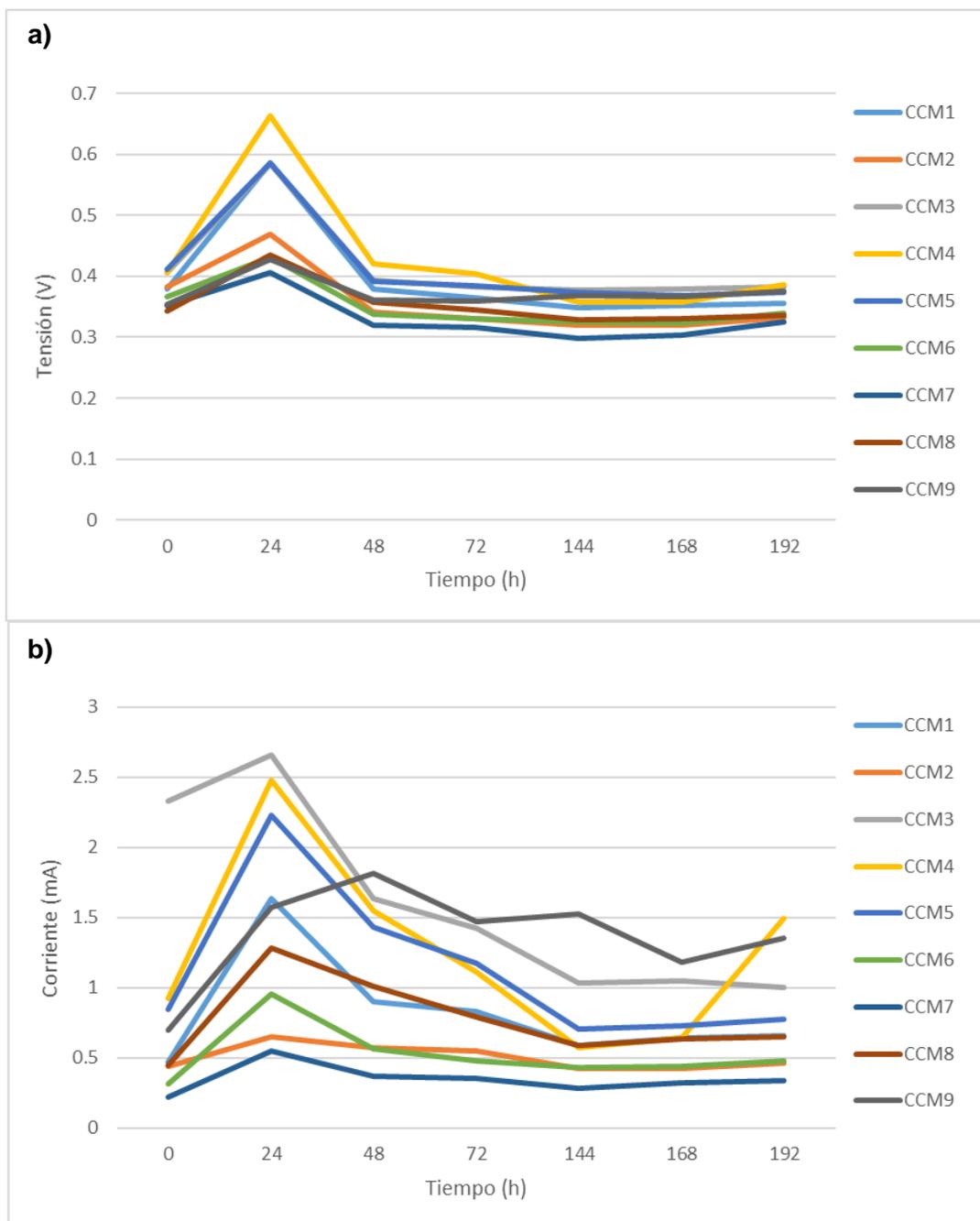


Figura 3.7. Forma de onda de las mediciones eléctricas realizadas a las CCM. a) Tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ); b) Corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ).

En la Tabla 3.2 se exponen los parámetros evaluados en el sistema. Cabe destacar, que la autonomía en este caso se calculó para una batería de mayor capacidad con el objetivo de homologar los resultados posteriores y hacerlos comparables con los parámetros del SRE2.

Tabla 3.2. Características del SRE1.

<b>Parámetros</b>	<b>Cantidad / Característica</b>
Eficiencia eléctrica	42%
Energía que se extrae de las celdas	0.001370294 J
Eficiencia en el tratamiento	79.8%
Autonomía <sup>(1)</sup>	694 días.
Diseño	Bomba capacitiva / 11 x 8 cm / nueve terminales de conexión.
Funcionamiento	La energía se invierte y pierde eficiencia.

<sup>(1)</sup> La autonomía corresponde a una batería de 2.4 V, 1500 mAh.

### **3.3 Diseño e implementación del SRE2**

#### **3.3.1 Selección del nuevo esquema de recolección**

De acuerdo a las características planteadas y a los problemas ya vistos, fue necesario actualizar el esquema de recolección existente. Los parámetros que se tuvieron en cuenta para la selección del nuevo diseño fueron los siguientes:

1. Utilizar una topología de segunda o tercera generación.
2. Brindar flexibilidad en la recolección, proveniente de múltiples fuentes de energía.
3. Permitir el trabajo individual con las CCM.
4. Reducir el cableado y las dimensiones del circuito

Debido a los aspectos planteados con anterioridad, se realizó una búsqueda selectiva en la literatura científica, donde fueron analizados los diseños y patentes registrados hasta la fecha. Estos exponen la inclusión de diversas topologías, las cuales han demostrado que pueden ser

aplicables a la recolección eficiente de energía de ultra baja potencia, proveniente de múltiples CCM (Tabla 3.3). La Figura 3.8 muestra algunos de estos esquemas.

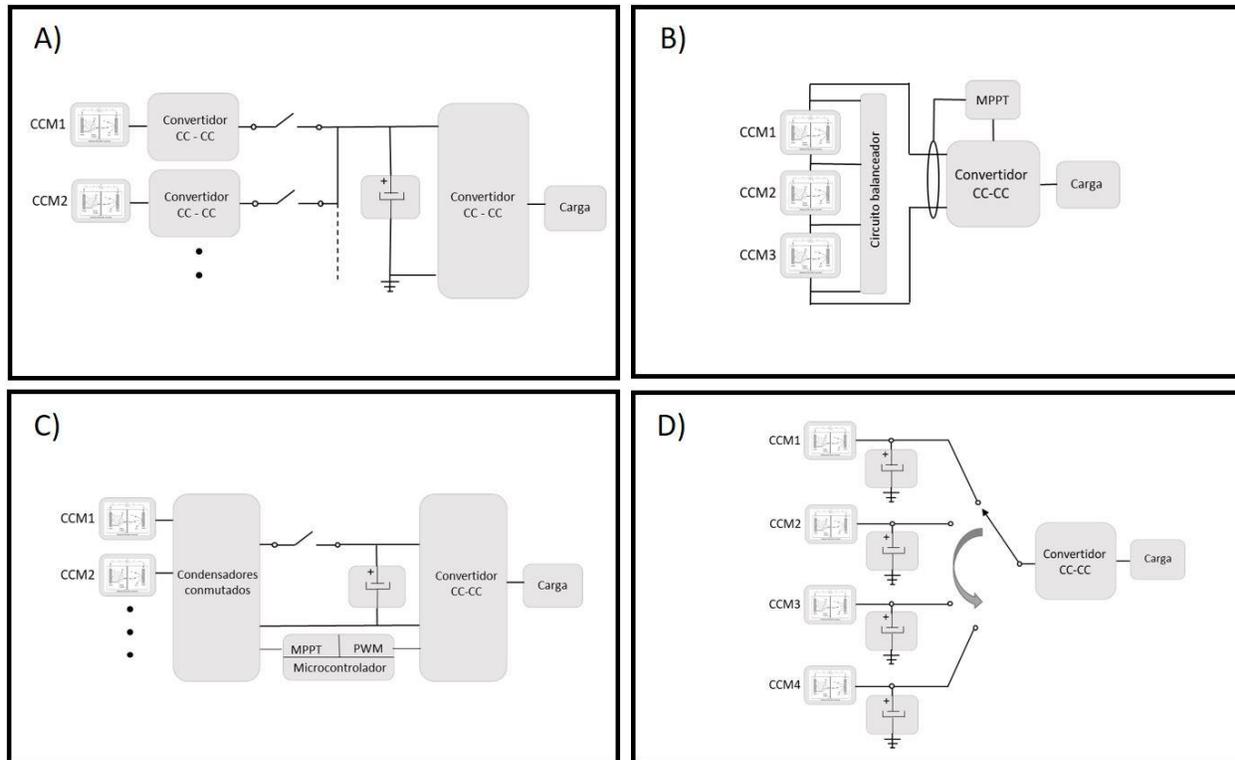


Figura 3.8. Arquitectura de SRE con múltiples fuentes de entrada: A) [83], B) [65], C) [45], D) [75].

Tabla 3.3 Parámetros y eficiencias reportadas con los diseños de la Figura 3.8.

Fuente	Entrada (V)	Salida (V)	Eficiencia (%)	Estudio
CCM	0.300	3.3	-	[83]
CCM	0.500	1.6	90.00	[65]
CCM	0.500	2.6	85.00	[45]
CCM	1.160	2.6	85.46	[75]

El diseño planteado por el autor Prasad *et al.* [75], se basa en la recolección de energía multiplexada proveniente de CCM semejantes. En el diagrama mostrado en la Figura 3.8 D) se utilizan ultra condensadores de 1 F para cada celda respectivamente, así como un convertidor CC-CC para ajustar los niveles de tensión requeridos por la carga. Este esquema, además de registrar una eficiencia de 85.46%, propone un diseño relativamente sencillo y compacto. Tiene como ventaja principal que mantiene las celdas aisladas y se puede extraer la energía de forma independiente [75]. Además, brinda la posibilidad de implementar un sistema de monitoreo a las fuentes de ultra baja potencia; siendo posible, incluir un algoritmo de MPPT en el control del convertidor [72]. Por último, en relación al SRE1, el número de terminales de interconexión se reduce a la mitad, debido a la posibilidad de implementar una tierra común (ánodo).

### 3.3.2 Selección del interruptor analógico

El SR1 está diseñado para trabajar con nueve fuentes de ultra baja potencia [62]. En un principio el nuevo diseño debe ser capaz de utilizar esta cantidad o superarla. Para ello se hizo necesaria la utilización de un interruptor de baja impedancia con nueve canales de entrada como mínimo. Estos dispositivos son circuitos integrados que incluye múltiples entradas y una sola salida [66]. En este caso las entradas, son las fuentes de ultra baja potencia y la salida se conecta a la entrada del convertidor. Los criterios para la selección de este dispositivo son enumerados a continuación:

1. El consumo energético en estado activo, así como la tensión de alimentación debe ser menor o igual al consumo de los interruptores analógicos NX3L2467.
2. La resistencia de contacto en conducción no debe sobrepasar los  $0.7 \Omega$ .
3. Debe contener tantos canales de entrada como fuentes de ultra baja potencia se requieran.

Teniendo en cuenta estos aspectos, fue propuesto un circuito integrado de la misma familia que el que se utiliza en el SRE1. El interruptor NX3L4051 presenta características similares al NX3L2467, el único inconveniente es que solo contiene ocho canales por lo que se hizo necesario utilizar dos unidades en el diseño. En la Figura 3.9 se muestra la distribución de los terminales del encapsulado.

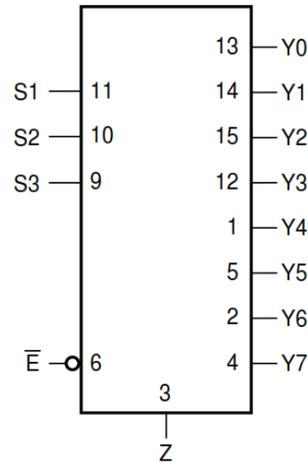


Figura 3.9. Distribución de terminales del integrado NX3L4051 [84].

El estado lógico de los terminales “S1”, “S2” y “S3” determina cuál de las entradas “Yn” pasa a la salida “Z”. El terminal de habilitación “E” permite el funcionamiento del circuito. El NX3L4051 fue diseñado para operar con corrientes no mayores a 350 mA y tensiones menores a la activación. Además, al igual que el NX3L2467 el rango de alimentación oscila entre 1.4 V y 4.3 V, lo que hace ideal este interruptor, para la función que debe realizar.

### 3.3.3 Selección del convertidor CC-CC

El convertidor de corriente directa es uno de los elementos más importantes que figuran dentro del SRE. El mismo se diseña para acoplar los niveles de tensión, entre las fuentes de ultra baja potencia y la carga [9]. Existen varios tipos de convertidores e infinidad de configuraciones en correspondencia con las peculiaridades y necesidades del sistema. Por lo general, en los sistemas de recolección actuales, se implementan convertidores del tipo elevador o *Boost*. A continuación, en la Tabla 3.4 se muestran estudios previos que implementan convertidores en los SRE de ultra baja potencia, tanto los comerciales como los diseñados por los propios autores.

Tabla 3.4. Estudios previos que incluyen convertidores en su esquema de recolección.

Fuente	Entrada (V)	Convertidor	Salida (V)	Almacenador de energía	$\eta$ (%) <sup>(5)</sup>	Estudio
CCM	0.981	LTC3108	2.562	1 mF	-	[2]
4-CCM// <sup>(1)</sup>	0.750	LTC3108	3.3	1000 $\mu$ F	-	[53]
4-CCM <sup>(2)</sup>	1.16	LTC3108	2.658	1 F	73.0	[75]
2-CCM//	0.55	TPS61099	5	3300 $\mu$ F	26.0	[55]
CCM	0.425	BQ25504	2.5	Baterías	59.4	[72]
CCM-CS <sup>(3)</sup>	0.370	BQ25504	3.8 - 4.2	Baterías	-	[52]
CCM	0.31	UPEM <sup>(4)</sup>	2.6	0.1 F	-	[54]

(1) Cuatro CCM conectadas en paralelo en todo momento.

(2) Cuatro CCM conectadas de forma independiente.

(3) Sistema híbrido que trabaja de forma independiente, conformado por una CCM y una Celda Solar (CS)

(4) Convertidor dedicado, diseñado por el autor.

(5) Eficiencia eléctrica, dato proporcionado por el autor.

Se puede observar en la Tabla 3.4, que se utilizan los convertidores para estabilizar la tensión salida, a un valor igual o superior al requerido para el trabajo de los componentes que conforman el circuito. El convertidor debe ser capaz de permitir niveles de potencias tan reducidas como las propiciadas por una CCM [54]. Los criterios para la selección del convertidor de CC-CC fueron los siguientes:

1. Operar con tensiones comprendidas en el rango de 1.8 V a 4.3 V. Esto es debido al rango de operación de los restantes componentes. La referencia se tiene del SRE1 y de los estudios previos analizados.
2. Posibilidad de trabajar con entradas cercanas a los 100 mV, de esta manera se cubre un amplio espectro en el funcionamiento de las CCM.
3. Eficiencia de conversión (convertidor) en los parámetros de operación (tensión y corriente de entrada), superior a un 70%.
4. Posibilidad de implementar un arranque en frío y una técnica de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).

Tabla 3.5. Convertidores comerciales más utilizados en los SRE.

Convertidor	Vi (mV) <sup>(1)</sup>	Vo (V) <sup>(2)</sup>	I <sub>cc</sub> (μA)	Control	MPPT	Auto-sustentable
LTC3108 [85]	20	4.3	6	No	No	Si
TPS61099 [86]	700	5	8	No	No	Si
BQ25504 [87]	130	4.2	3.3	Si	Si	Si

<sup>(1)</sup> Tensiones de entrada provenientes de las fuentes de ultra baja potencia.

<sup>(2)</sup> Tensión de salida máxima regulada por el convertidor.

Se pudo distinguir una ventaja visible del integrado BQ25504 debido a sus características de operación. Este convertidor está diseñado principalmente para el trabajo con fuentes fotovoltaicas y térmicas de ultra baja potencia [87], por lo que para poder operar con las CCM no se trabajó con las resistencias de muestreo que trae por defecto. Una de sus principales atracciones es la funcionalidad de un arranque en frío, el BQ25504 permite tensiones de entrada de tan solo 130 mV, aunque en el primer ciclo de recolección el potencial suministrado debe superar los 600 mV [87]. Un arranque del circuito esperando estas condiciones no es funcional, debido a que estos niveles de tensión, aunque son alcanzables por las CCM no deben tomarse como referencia. El convertidor BQ25504 está previsto de un sistema de MPPT con dos modalidades de operación:

- 1- Por medio de un muestreo analógico de la señal de entrada (Divisor resistivo).
- 2- A través de una señal de referencia externa (PWM).

Ambas variantes fueron implementadas en el convertidor, de manera que, de forma automática el circuito ajusta la modulación interna de la conversión.

### 3.3.4 Selección del microcontrolador

La gestión energética en estos sistemas viene programada en un integrado que se encarga de supervisar y controlar los procesos de recolección. Los microcontroladores que son utilizados en la construcción de estos circuitos, por lo general utilizan pocos recursos e integran técnicas de

ahorro energético debido a que la mayor parte del tiempo se encuentran en estado activo [10]. Los criterios para la selección de este dispositivo en el nuevo diseño se exponen a continuación:

1. Operar con tensiones comprendidas en el rango de 1.8 V a 4.3 V. Esto es debido al rango de operación del convertidor y de los restantes componentes.
2. Consumo de energía reducido en bajas frecuencias de operación
3. Cantidad suficiente de terminales I/O (entrada / salida) para implementar el control de la topología seleccionada.
4. Recursos mínimos como: un convertidor ADC y un temporizador.

Tabla 3.6. Microcontroladores implementados en circuitos de ultra baja potencia.

Microcontrolador	Vcc (V)	Icc (mA) (1 MHz)	ADC	Frecuencia (MHz)	Timer	(I/O)
MCP430 [88]	1.8 – 3.6	0.220	8 CH-10 bit	16	1	10
MC9S08 [89]	1.8 – 3.6	0.750	8 CH-12 bit	20	1	22
MEGA328P [64]	1.8 – 5.5	0.240	6 CH-10 bit	20	3	27

En la Tabla 3.6 se puede apreciar una diferencia significativa en cuanto a los consumos de energía en estado activo de los integrados, uno de los parámetros más importantes en la selección de este componente. El microcontrolador MC9S08 presenta una demanda de corriente superior a los otros dispositivos. De esta manera, la selección del microcontrolador se realizó atendiendo a la cantidad de terminales, debido a que el sistema propuesto incorpora multiplexores e interruptores analógicos y estos requieren control. Se seleccionó el microcontrolador 328P, el cual incluye rutinas de bajo consumo en las que puede reducir su demanda energética en un 90%.

### 3.3.5 Diseño del circuito, programación y ensamble del prototipo

El diseño del circuito se realizó en la plataforma de desarrollo *Proteus 8*, donde se tuvo en consideración los aspectos vistos con anterioridad y además se incluyeron otros que se especifican a continuación. Al igual que la tarjeta existente, se necesitaban terminales de conexión tanto para las CCM como para otros elementos ajenos al circuito (batería, condensador

de almacenamiento, terminal de programación y carga). Se utilizó una fuente de energía primaria (batería recargable) para hacer funcionar el circuito y que pudiera almacenar la energía excedente en la recolección. Por otra parte, como se había mencionado en el apartado 3.3.2, se incluyeron dos integrados NX3L4051 debido a la necesidad de trabajar con nueve CCM y además, se agregaron dos interruptores analógicos NX3L2467 para el control de las etapas del circuito (prueba y recolección).

La gestión energética del circuito depende del monitoreo de las CCM, por lo que se contempló una etapa de prueba en donde se realizaron lecturas analógicas del potencial y la corriente. En el caso de las mediciones de corriente, se implementó un circuito resistivo-capacitivo para obtener una estimación indirecta de la misma, ya que, la utilización de un sensor de corriente a base de amplificadores operacionales en estos circuitos representa una demanda energética elevada (+50%) en relación al consumo del microcontrolador [72]. El cálculo de la  $R_{int}$  se realizó insertando la Ecuación (14) en el código de programa. En este caso, los potenciales  $V_c$  y  $V_{oc}$  se obtienen de las mediciones analógicas en la etapa de prueba. El tiempo de carga (120 ms) y el valor del condensador (100 uF) se ajustaron a las características de las CCM utilizadas.

$$R_{int} = -\frac{t}{C \times \ln\left(\frac{V_c}{V_{oc}} - 1\right)} = -\frac{0.120}{0.0001 \times \ln\left(\frac{V_c}{V_{oc}} - 1\right)}$$

El diseño final del circuito se muestra en la Figura 3.11, en este diagrama se excluye el convertidor BQ25504, el cual se replicó de la hoja de datos propiciada por el fabricante. Las CCM se conectaron a los terminales “Yn” de los multiplexores de señal NXL34051, la selectividad de estos integrados se logró a través de los puertos de habilitación “E”. La señal de salida “Z” pasa a través de dos interruptores analógicos NX3L2467 antes de conectarse a la entrada V\_IN del convertidor BQ25504. Mediante el control del interruptor INT1 en los terminales “nY1”, el circuito realiza las pruebas de estimación de corriente. Todos los componentes se encuentran alimentados por una batería STEREN de 2.4 V 1500 mAh, y con la finalidad de proteger los integrados de la tarjeta, una vez que el potencial de la misma cae por abajo de 1.8 V el microcontrolador se desconecta del sistema. Después de modelar el circuito, se determinó que las dimensiones físicas que puede alcanzar la tarjeta son de 7 x 5 cm (Figura 3.10), lo que corresponde a una reducción de un 62% en relación al SRE1.

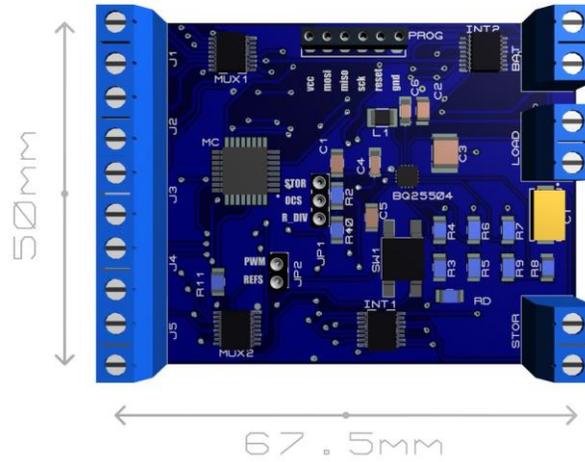


Figura 3.10. Modelo y dimensiones del SRE2.

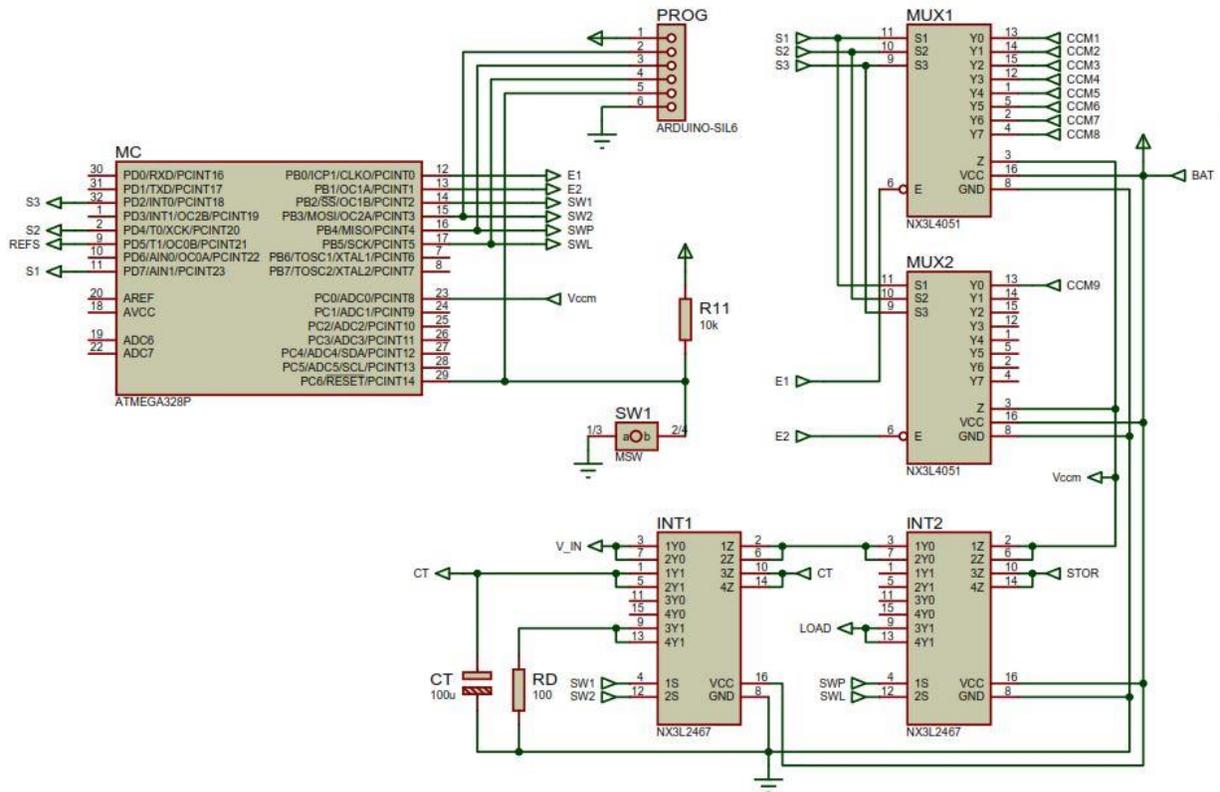


Figura 3.11. Diagrama de conexiones del SRE2.

El diagrama de flujo que ejecuta el programa en el microcontrolador se muestra en la Figura 3.12. Las premisas para conformar esta secuencia fueron las siguientes:

1. Facilitar la programación.
2. Reducir las instrucciones del código y simplificar su funcionamiento.
3. Optimizar los tiempos de ejecución del programa.
4. Visualizar desde una perspectiva general los posibles escenarios de la tarjeta.

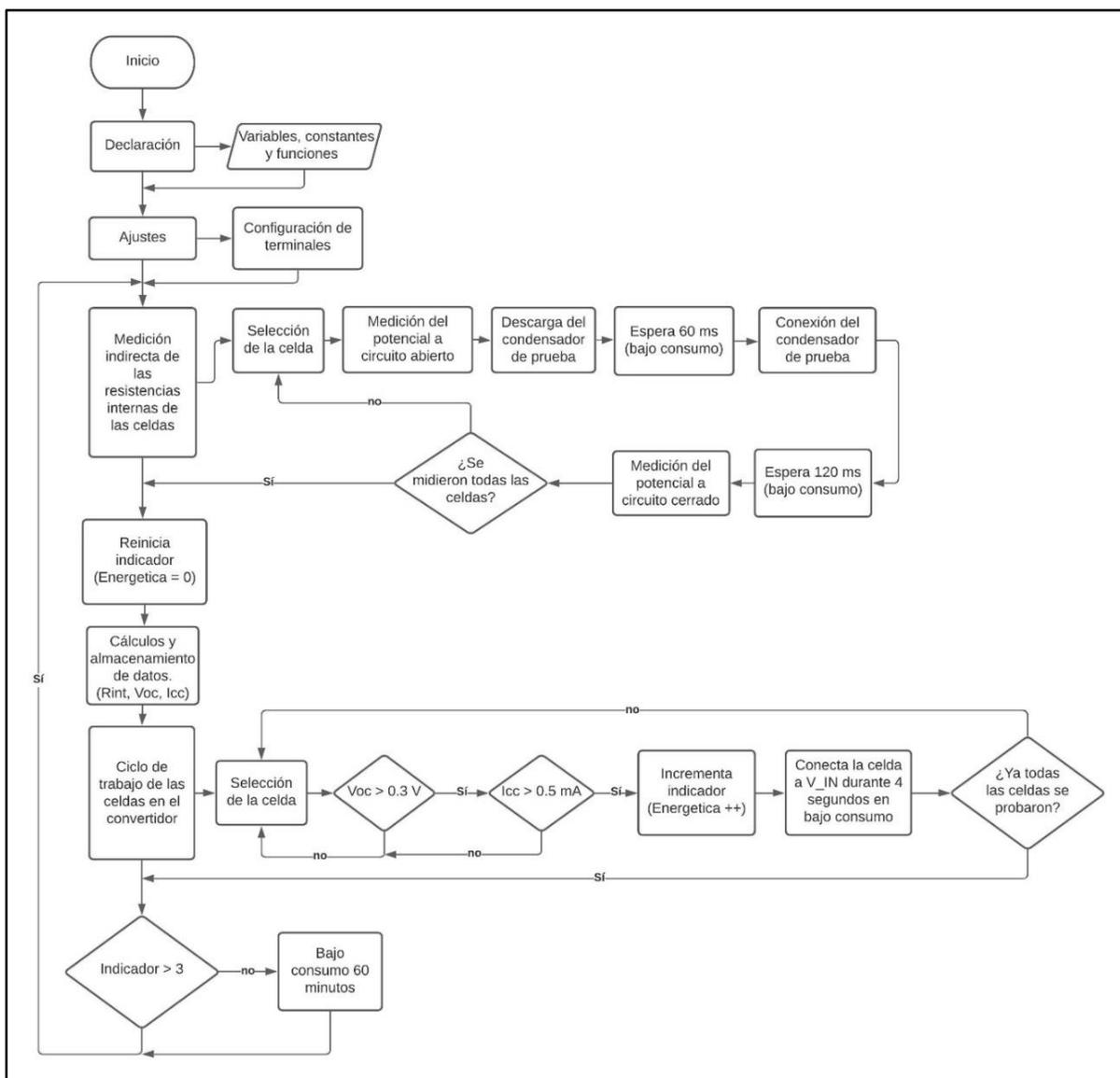


Figura 3.12. Diagrama de flujo que ejecuta el programa en el SRE2.

Haciendo uso de este organigrama, se diseñó el código de programación en la plataforma *Arduino IDE 1.8.12* (de la Figura A.1 a la Figura A.4 de los anexos). Posteriormente, mediante la simulación del circuito en *Proteus 8*, se pudo depurar y comprobar el funcionamiento del control. Para modelar las celdas se utilizaron fuentes de tensión de corriente directa (0.2 V – 0.5 V) conectadas en serie con resistencias variables (0.2 k $\Omega$  – 1 k $\Omega$ ), en la Figura 3.13 se puede observar la forma de onda de las celdas a la salida del multiplexor (Canal A) y la tensión en el condensador de medición (Canal B). El muestreo analógico en el SRE2 ocurre antes que se conecte el condensador de medición con la celda correspondiente y pasado 120 ms de esta muestra. De esta manera, el circuito almacena la tensión a circuito abierto y la tensión a circuito cerrado con una capacitancia y tiempo conocido. La descarga del condensador de 100  $\mu$ F se realiza cada ciclo en una resistencia de 100  $\Omega$  y tiene una duración de 60 ms.

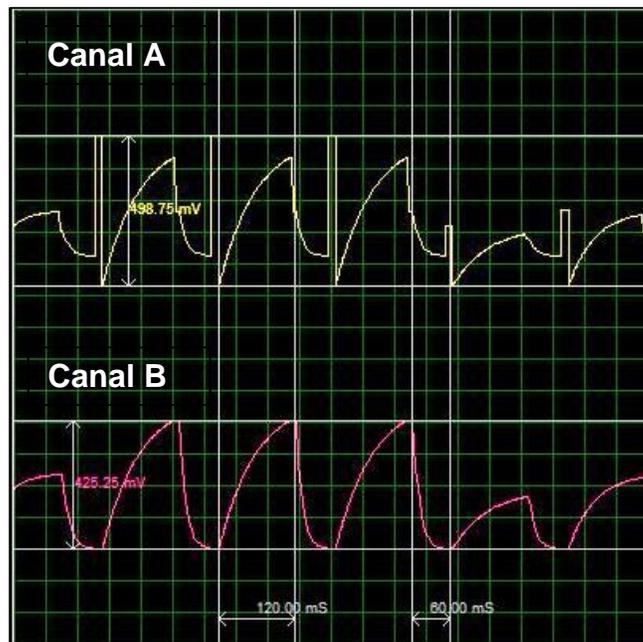


Figura 3.13. Simulación y depuración del control en *Proteus 8*. Canal A: Forma de onda de la tensión de las CCM en la etapa de medición, Canal B: Forma de onda de la tensión en el condensador para la estimación indirecta de la corriente.

Luego de comprobar los puntos antes mencionados para reducir los imprevistos durante el ensamblaje, se implementó un prototipo (Figura 3.15). El SRE2, tiene como topología básica un convertidor de corriente continua tipo elevador. Este sistema puede clasificarse en la segunda o tercera generación de los SRE. Consiste en un circuito electrónico (ver Figura 3.14 y Figura 3.15) compuesto por un microcontrolador ATMEGA 328P (1), un módulo de multiplexores NX3L4051 (2) e interruptores analógicos NX3L2467 (3), un convertidor comercial CC-CC amplificador BQ25504 (4), un divisor resistivo (5), una batería de 2.4 V, 1500 mAh (6) y terminales de interconexión con las fuentes de ultra baja potencia (7). El principio de funcionamiento es el siguiente: El microcontrolador (1) (Figura 3.14) envía una señal de control (K1, K2) al módulo de multiplexores (2) e interruptores (3) para realizar las mediciones de tensión y corriente a cada una de las CCM conectadas en (7). En una segunda etapa, las celdas que se encuentran funcionales ( $V_{oc} \geq 0.3 \text{ V}$ ,  $I_{cc} \geq 0.5 \text{ mA}$ ) se conectan al convertidor sucesivamente. El divisor resistivo (5) propicia una tensión de referencia al convertidor por el terminal OCS, el cual sirve para ajustar la regulación del MPPT (4). De esta manera, la energía que se extrae individualmente de cada celda se almacena en la batería recargable (6). De forma adicional, se agregó al circuito la posibilidad de optimizar el algoritmo de recolección de energía, al conectar una salida PWM del controlador al terminal REFS del convertidor.

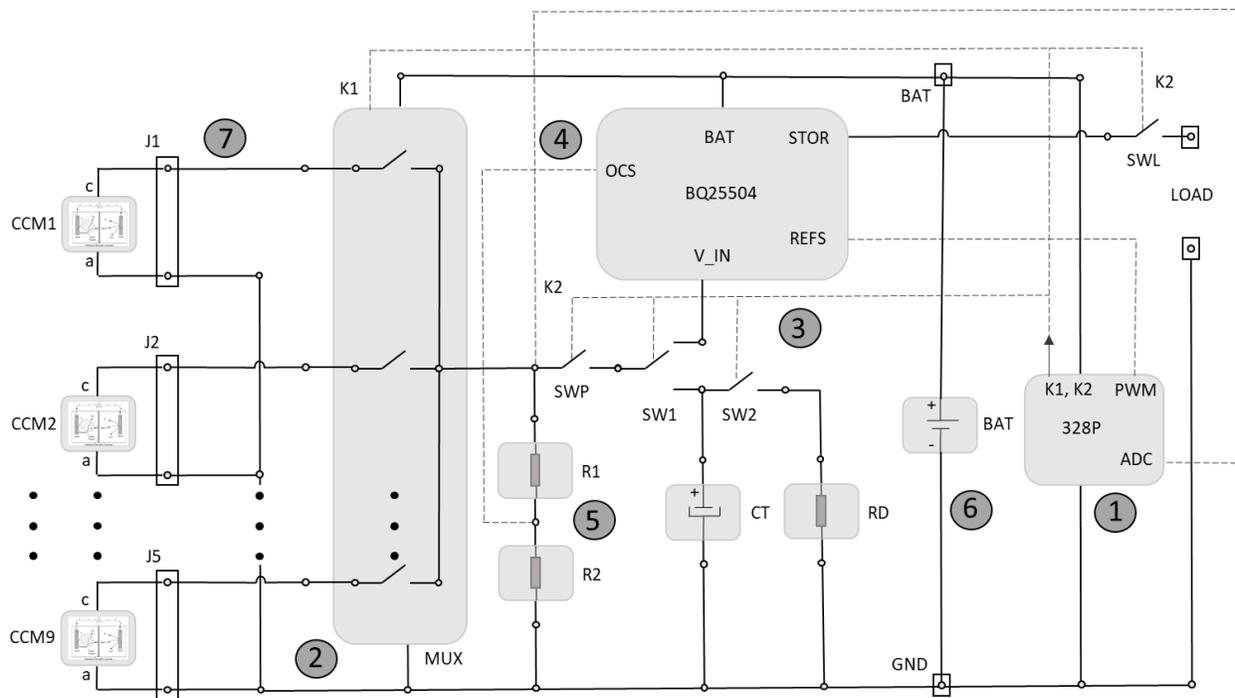


Figura 3.14. Diagrama representativo del SRE2.

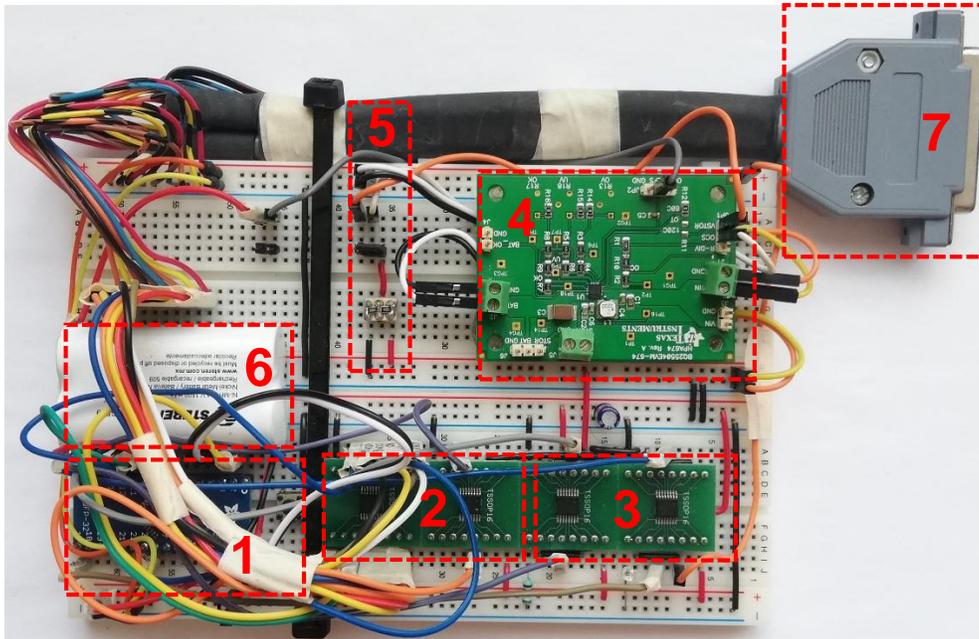


Figura 3.15. Prototipo del SRE2.

### 3.4 Pruebas realizadas al SRE2

#### 3.4.1 Eficiencia eléctrica

Para obtener como se distribuye la energía y calcular la eficiencia eléctrica en el SRE2, se realizaron las pruebas correspondientes. El SRE2 se conectó a la fuente controlada con tensiones de  $V_{oc}$  de 500 mV y corrientes de  $I_{cc}$  de 1 mA. La prueba de eficiencia se realiza en un solo ciclo de programa (35.1 s). En la Figura 3.16 se muestra tanto el comportamiento de la corriente de entrada, proveniente de las CCM, como la de salida, corriente que carga la batería en un ciclo de recolección. Los pulsos de corriente de la Figura 3.16 a) corresponden a la interconexión de las CCM al convertidor durante 4 segundos. También se observan instantes en los cuales las celdas no aportan corriente, estos intervalos corresponden al muestreo analógico (Figura 3.17 a) cada 13.3 segundos) que realiza el convertidor para actualizar el ciclo de trabajo y a la etapa de medición del microcontrolador (instante 24.4 s – 26 s). La corriente de salida del convertidor (Figura 3.17 b)) participa en la carga de la batería de almacenamiento y se mantiene pulsante en todo momento. Por otra parte, la Figura 3.18 muestra la forma de onda de la corriente que necesita el circuito para auto sustentarse y es consumida de la batería. Esta corriente es

demandada en su mayor parte por el microcontrolador, en especial cuando se encuentra en modo activo (aproximadamente 1.62 s) en el periodo de medición de las CCM.

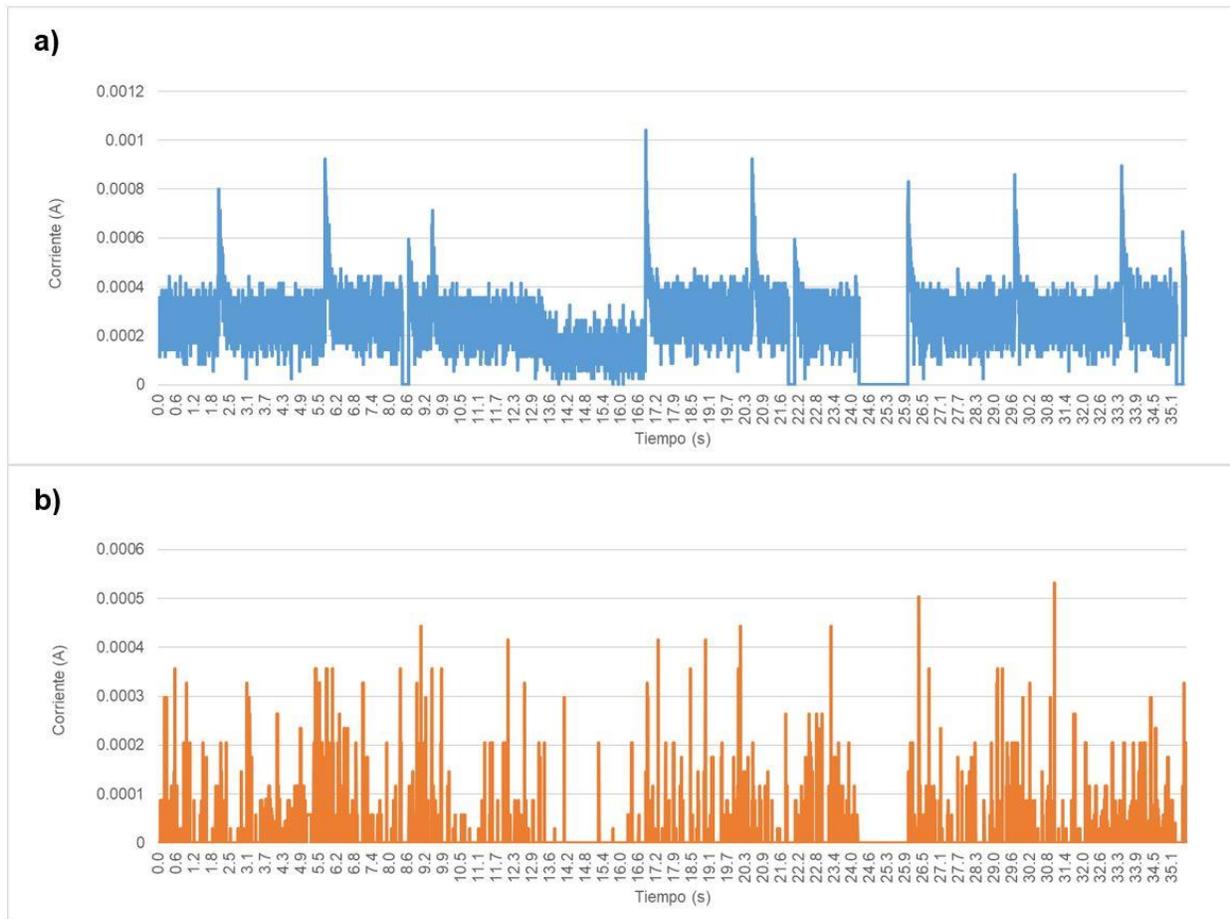


Figura 3.16. Forma de onda de las corrientes de entrada y salida en un ciclo de recolección del SRE2. a) Corriente que se extrae de las CCM; b) Corriente de carga en la batería.

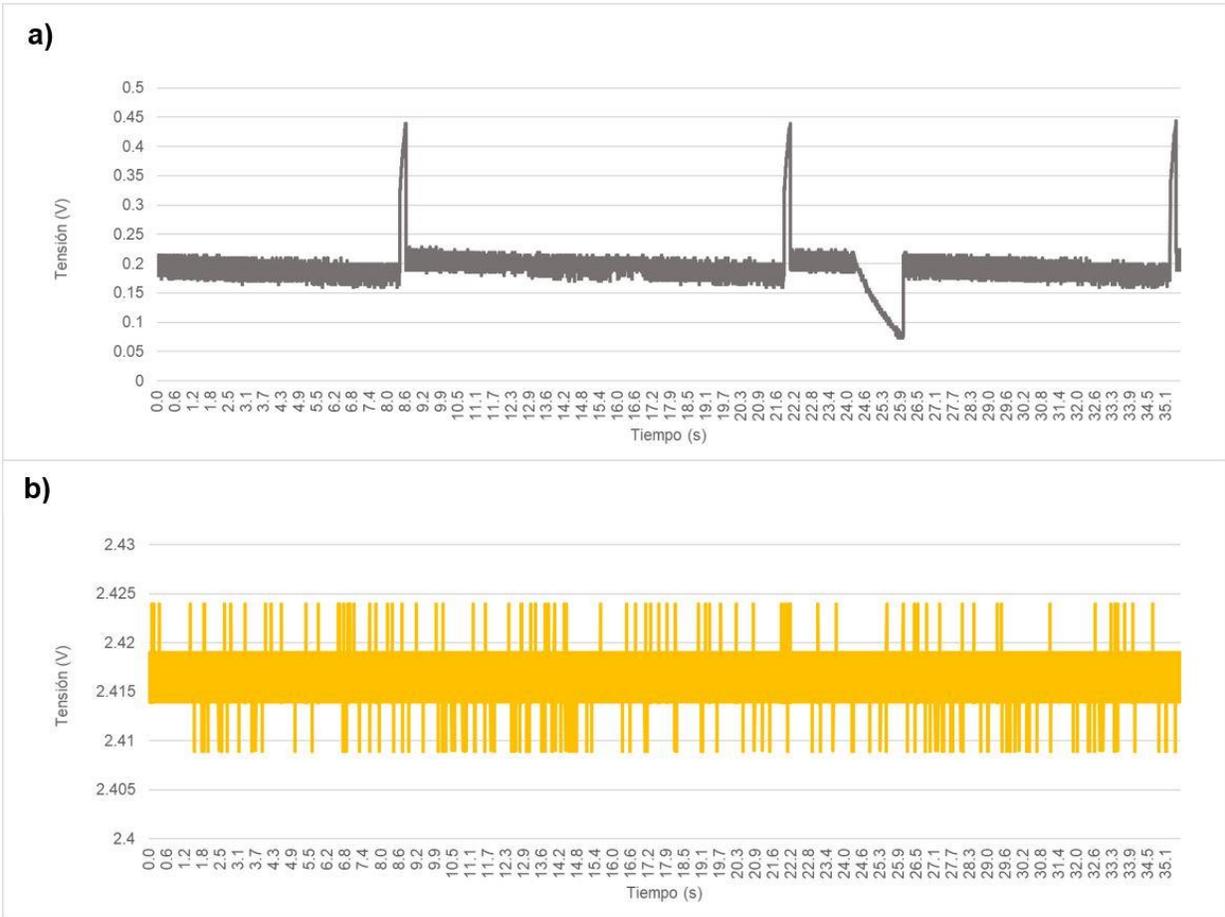


Figura 3.17. Forma de onda de los potenciales de entrada y salida en un ciclo de recolección del SRE2. a) Tensión de las CCM; b) Tensión de la batería.

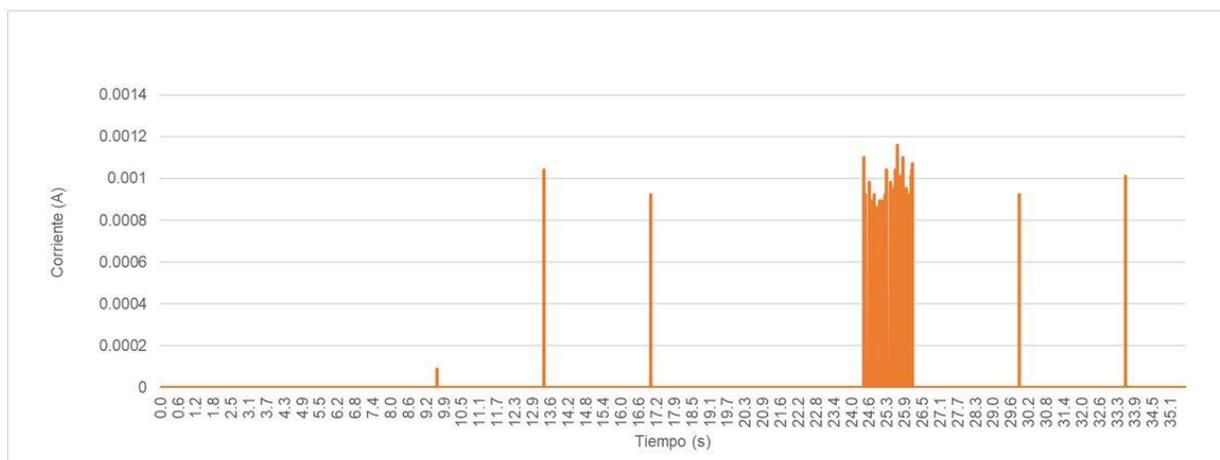


Figura 3.18. Corriente que se consume de la batería en un ciclo.

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados de las mediciones en términos de energía. Este parámetro se calculó integrando la potencia en el intervalo de prueba (36 s).

Tabla 3.7. Cálculos energéticos en el SRE2.

<b>E Recolectada (J)</b>	<b>E Almacenada (J)</b>	<b>E Perdida (J)</b>	<b>E Consumida (J)</b>
0.001704016	0.001124254	0.000579762	0.000190122

En la Figura 3.19 se muestra la distribución porcentual de la energía que se extrae de las CCM. El convertidor de corriente directa presenta pérdidas en la conversión de un 34% resultado similar al reportado por Alaraj *et al.*, [90]. En su investigación al igual que este trabajo, utilizó el convertidor BQ25504 conectado a una sola CCM y en las mediciones realizadas determinó que las pérdidas de conversión ascendieron a 33%. La energía que se aprovecha en el SRE2 es la que participa directamente en la carga de la batería ya que la restante es utilizada para sostener el circuito. El SRE2 implementado en esta investigación, bajo parámetros controlados, logró una eficiencia total del sistema de 55%, pudiendo mantener estos resultados incluso si una de las CCM del biorreactor se encuentra dañada. Los estudios de Alaraj *et al.* [90] y Costilla *et al.* [77] implementan topologías semejantes a la utilizada en este trabajo, obteniendo resultados en un rango similar ( $\pm 4.4\%$ ), lo que demuestra la viabilidad de este proyecto. No obstante, la eficiencia

lograda por el SRE2 se encuentra limitada por el consumo interno del circuito, en especial el microcontrolador. El SRE2 trabaja a una frecuencia de 1 MHz y por los requerimientos de la tarjeta en el modo de bajo consumo, reducir esta, afectaría de manera directa a los registros y a las temporalidades que se encuentran en la librería por defecto.

La autonomía de la tarjeta se obtuvo a partir del consumo del circuito y la energía que entrega la batería de almacenamiento. Teniendo en cuenta que el gasto se reduce en condiciones críticas (sin CCM a la entrada) durante una hora, se hace uso de la Ecuación (8) para calcular el tiempo en el cual la carga se agota y el circuito pierde funcionalidad.

$$Autonomía (h) = \frac{V_{bat} (V) * Q_{bat} (Ah)}{P_c (W)} = \frac{2.4 * 1.5}{0.000190122} = 18935 h$$

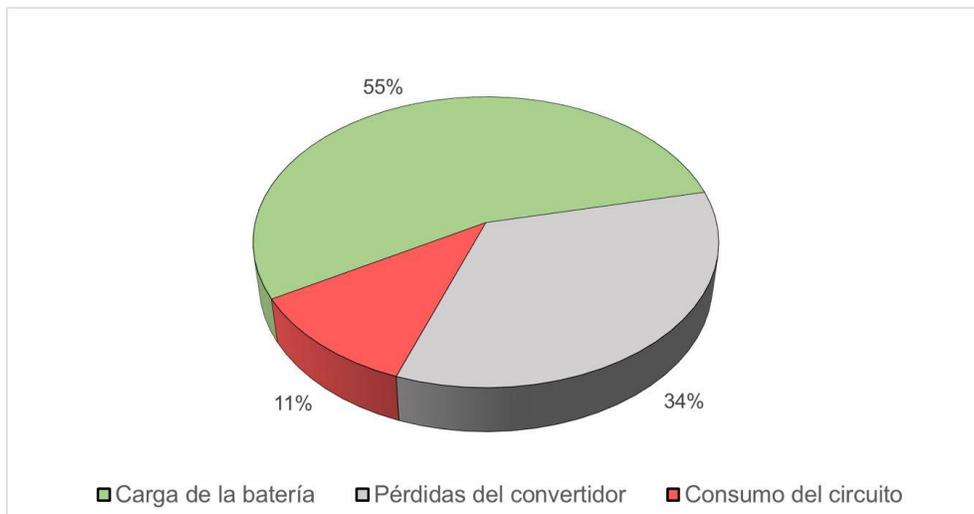


Figura 3.19. Distribución de la energía en el SRE2.

### 3.4.2 Eficiencia en el tratamiento del ARS

Se realizaron las mediciones de los parámetros de interés durante el experimento para poder contrastar los resultados una vez finalizada la prueba. Las mediciones se realizaron diariamente, donde fueron registrados los potenciales a circuito abierto y las corrientes de cortocircuito de

cada celda, el pH, la temperatura la concentración de los AGV y la DQO. Durante la prueba el pH se mantuvo en un rango entre 6.76 - 7.60 (rango similar a la prueba con el SRE1), la temperatura permaneció constante sobre los 24 °C y se redujo la concentración de AGV un 33%. El comportamiento que tuvo la DQO se muestra en la Figura 3.20, se puede observar una reducción gradual durante las 168 horas de prueba con una remoción total de 1020 mg/L. El porcentaje de materia orgánica degradada en el sustrato en términos de DQO, se calculó haciendo uso de la Ecuación (1).

$$DQO (\%) = \frac{(2250 - 930) - (1230 - 930)}{(2250 - 930)} \times 100 = 77.27\%$$

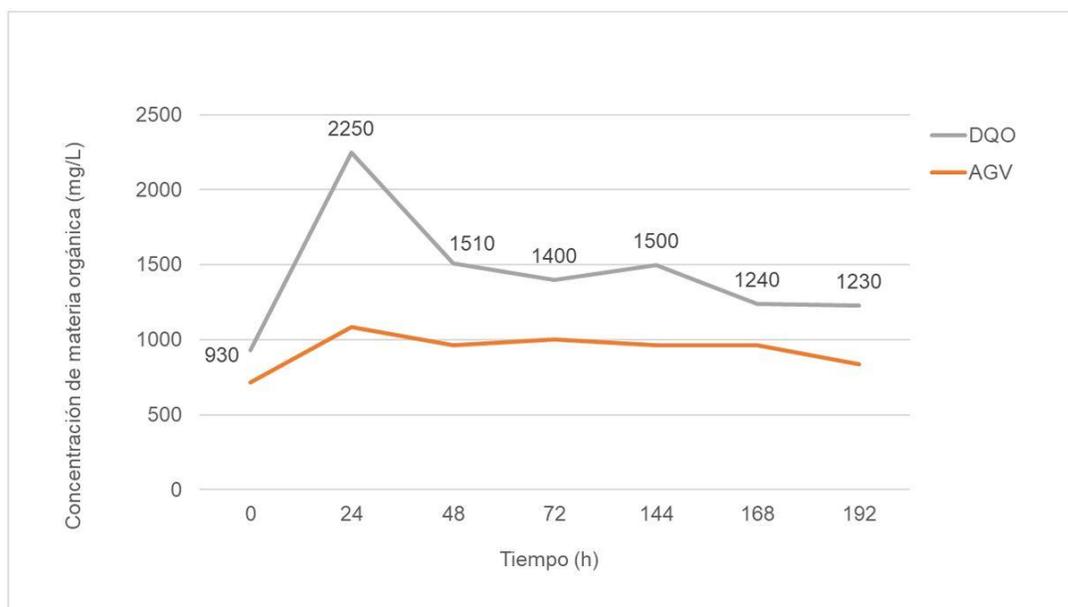


Figura 3.20. Relación de las mediciones diarias de AGV y DQO utilizando el SRE2.

Las tensiones de las celdas (Figura 3.21 a)) se mantuvieron comprendidos en un rango entre 325 – 558 mV. En el transcurso de la prueba fueron ganando ligeramente potencial, lo que es favorable para la generación de energía. Esto ocurre principalmente por el mecanismo de ahorro energético que se incluye en el programa de la tarjeta (SRE2), el cual toma descansos cuando los parámetros de las celdas ( $I_{cc}$  y  $V_{oc}$ ) no son los indicados para la recolección. En el caso de las corrientes de cortocircuito (Figura 3.21 b)) es notoria la participación de las celdas 3, 4 y 9

debido a las intensidades por encima de 1 mA. Este valor resulta suficiente para activar la oscilación del convertidor de corriente directa y lograr un almacenamiento de energía por encima de 1 mJ en la batería.

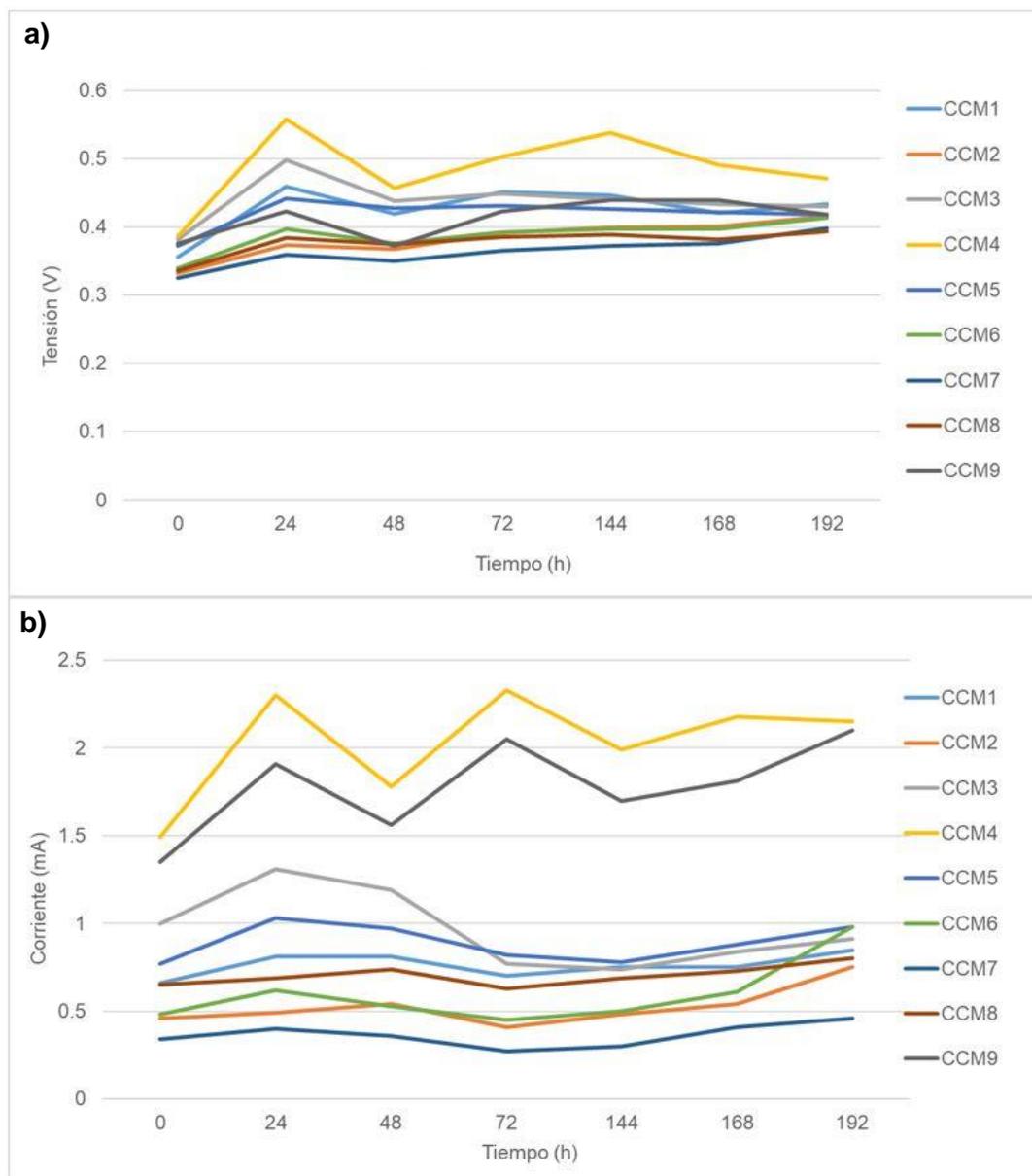


Figura 3.21. Forma de onda de las mediciones eléctricas realizadas a las CCM. a) Tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ); b) Corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ).

En la Tabla 3.8 se muestran los parámetros evaluados en el SRE2. Los resultados obtenidos pueden ser comparados de manera directa con los arrojados por el SRE1.

Tabla 3.8. Características del SRE2.

<b>Parámetros</b>	<b>Cantidad / Característica</b>
Eficiencia eléctrica	55%
Energía que se extrae de las celdas	0.001704016 J
Eficiencia en el tratamiento del AR	77.27%
Autonomía	788 días
Diseño	Convertidor <i>Boost</i> / 7 x 5 cm / cinco terminales de conexión.
Funcionamiento	Trabaja individual con nueve CCM, Incluye retroalimentación e impide que el sistema pierda eficiencia.

### 3.5 Comparativa

En la actualidad los nuevos diseños aplicados a la recolección de energía de múltiples CCM tienen como base las siguientes topologías: Balanceadores de tensión [91], Bombas de carga capacitiva [80], Convertidores de CC-CC [44, 77] y sistemas híbridos que implementan varias topologías como es el caso del SRE patentado por Nguyen *et al.* [45]. Los circuitos implementados a base de amplificadores y balanceadores de tensión capacitivos (Tabla 3.9) reportan una eficiencia superior al 65%, [91, 80, 45]. Esto se debe a que reducen las pérdidas en el control y logran adaptar el circuito a la carga conectada como el estudio de Khaled *et al.*, [91], o solo reportan la eficiencia parcial del sistema, el caso del circuito patentado de Nguyen *et al.*, [45], en el cual solo refleja la eficiencia del convertidor utilizado. Los circuitos que realizan conexiones de condensadores en serie para amplificar el potencial de las CCM, como es el caso del SRE1, tienen como principal inconveniente que necesitan del funcionamiento de todas las celdas implicadas en el sistema, debido a que de otra manera no ocurre una transferencia energética adecuada, según lo reportado por Khaled *et al.*, [65]. El SRE2 implementa una topología de tercera generación aplicada a las CCM, que incluye un multiplexor de señal y un algoritmo de selectividad con retroalimentación, para obtener una continuidad energética a la entrada del sistema y al mismo tiempo cuidar la salud de las celdas muy similar al circuito propuesto por Costilla *et al.*, [77], en su investigación para optimizar la extracción de energía de un grupo de 4 CCM. Esto hace que la recolección por multiplexión temporal sea un enfoque más

fiable y atractivo. La extracción de una mayor cantidad de energía de las fuentes de ultra baja potencia, como son la CCM, se logró implementando una técnica de seguimiento de máxima potencia. La Tabla 3.9 reporta algunos estudios, que al igual que este trabajo, centran la recolección de energía en este punto. La ventaja de la utilización del convertidor BQ25504 en el SRE2 es que ajusta la conversión automáticamente con una señal de referencia externa. En las CCM el potencial al que ocurre la máxima transferencia de potencia, corresponde de manera aproximada a la mitad de la tensión de circuito abierto, en este caso en particular se logró con un divisor resistivo a la salida de las celdas, al igual que los circuitos implementados por Khaled *et al.* [91] y Costilla *et al.*, [77].

La eficiencia eléctrica es uno de los parámetros de mayor ponderación en un circuito, ya que relaciona varios aspectos en el mismo, por lo que representa una manera práctica de realizar una comparación directa entre estos. La eficiencia depende de la energía que se recolecta de las CCM y las pérdidas que introduce el circuito: de control, de conversión, de conducción y efecto joule. Las pérdidas se deben principalmente, a los elementos que conforman el mismo y la gestión energética que desarrolla. Con la realización de este trabajo se logró una mejora respecto al SRE1: se redujeron las pérdidas por efecto joule en un 44%, debido a que se eliminaron del diseño existente cuatro terminales de interconexión con las CCM y cuatro interruptores analógicos; aumentó la eficiencia eléctrica en un 13% y la autonomía en un 12%, debido al aprovechamiento de la energía, que antes se disipaba en un diodo led, para el funcionamiento de un convertidor CC-CC; la energía que se extrae de las CCM aumentó en un 20% sin afectar la salud de las celdas, a causa de una gestión energética apropiada y en lo respecta al tratamiento del AR los resultados fueron similares, observándose una diferencia de solo un -2.53%.

Tabla 3.9. Estudios similares que implementan SRE aplicados a las CCM.

CCM	Características	Vin (mV)	Topología	Convertidor	MPPT	Consumo (μW)	Eficiencia (%)	Estudio
4	<p>Ánodo: Cepillo de fibra de carbón                      Cátodo: Fibra de carbón / Pt, 120 cm<sup>2</sup>                      Sustrato: AR                      Volumen: 0.7 L                      Acetato de sodio: 1 g/L                      T= 25 °C</p>	390 - 836	<p>Tercera generación/Híbrido: Balanceador de tensión conectado a un convertidor CC/CC</p>	<p>Flyback: Diseño del autor                      Vin: 2.68 V                      Vout: 21 V</p>	<p>Si  <math>V_{MPPT} = V_{oc}/2</math></p>	200	<p>86.00                      (Balanceador)</p>	[91]
3	<p>Ánodo: Filtro de carbón                      Cátodo: Tela de carbón/ Pt                      Sustrato: AR/ lodo activado                      Volumen: 20 mL – 1L                      Acetato de sodio: 1 g/L                      pH= 7</p>	300 - 400	<p>Primera generación con MPPT: Bomba de carga capacitiva: Dickson/ 10 etapas de amplificación</p>	<p>No                      Vout = 1.6 - 2 V</p>	<p>Si, regula la corriente de salida en una carga resistiva  <math>V_{MPPT} = V_{oc}/2</math></p>	600	<p>64.88                      (Sistema)</p>	[80]
2	<p>Ánodo: Malla de acero inoxidable, 100 cm<sup>2</sup>                      Cátodo: Tela de carbón/ Pt, 120 cm<sup>2</sup>                      Sustrato: AR de origen industrial                      Volumen: 0.7 L                      Acetato de sodio: 1 g/L</p>	785 - 934	<p>Tercera generación: Multiplexor de señal con conectado a un convertidor CC/CC</p>	<p>Boost comercial: 25504                      Vout = 3.6 V</p>	<p>Si, utiliza un divisor resistivo  <math>V_{MPPT} = V_{oc}/2</math></p>	-	<p>72.00                      (Convertidor)</p>	[44]

CCM	Características	V <sub>in</sub> (mV)	Topología	Convertidor	MPPT	Consumo (μW)	Eficiencia (%)	Estudio
4	<p>Ánodo: Filtro de carbón</p> <p>Cátodo: Tela de carbón/ Pt, 120 cm<sup>2</sup></p> <p>Sustrato: AR/ lodo activado</p> <p>Volumen: 240 mL – 1 L</p> <p>Acetato de sodio: 1 g/L</p>	300	Tercera generación: Multiplexor de señal con conectado a un convertidor CC/CC	<p>Boost comercial: 25505</p> <p>V<sub>out</sub> = 3.3 V</p>	<p>Si, utiliza un divisor resistivo</p> <p>V<sub>MPPT</sub> = V<sub>oc</sub>/2</p>	-	50.70	[77]
3	<p>Ánodo: Filtro de grafito, 10 x 5 cm</p> <p>Cátodo: Filtro de grafito/ MgO, 10 x 5 cm</p> <p>Sustrato: AR/ Lodo</p> <p>Volumen: 60mL</p> <p>Acetato de sodio: 0.5 – 0.6 g/L</p>	450 - 550	Tercera generación/Híbrido: Bomba de carga con multiplexor conectado a un convertidor CC/CC	<p>Boost: Diseño del autor</p> <p>V<sub>out</sub> = 2.95 V</p>	<p>Si, utiliza un algoritmo para extraer la energía en V<sub>oc</sub>/2</p>	-	86.60	[45]
1	<p>Ánodo: Cepillo de carbón, 2.75 cm de diámetro y 4 cm de longitud</p> <p>Cátodo: Papel carbón circular 30 mm de diámetro/ Pt</p> <p>Sustrato: AR/ Lodo</p> <p>Volumen: 60 mL</p> <p>Acetato de sodio: 2 g/L</p>	425	Tercera generación: Convertidor CC/CC	<p>Boost comercial: 25504</p> <p>V<sub>out</sub> = 2.5 V</p>	<p>Si, utiliza un algoritmo para extraer la energía en V<sub>oc</sub>/2</p>	119	59.40	[90]

CCM	Características	V <sub>in</sub> (mV)	Topología	Convertidor	MPPT	Consumo (μW)	Eficiencia (%)	Estudio
9	Ánodo: Malla de acero inoxidable/ carbón activado granular Cátodo: Tela de carbón Sustrato: ARS Volumen: 80 L (Stack) Azúcar comercial: 1 g/L	325 - 558	Tercera generación: Multiplexor de señal con conectado a un convertidor CC/CC	Boost comercial: 25504  V <sub>out</sub> = 2.4 V	Si, utiliza un divisor resistivo  $V_{MPPT} = V_{oc}/2$	190	55.00	Este trabajo

## CONCLUSIONES

A partir de la caracterización y las pruebas realizadas al SRE1, se determinaron las deficiencias y los parámetros de funcionamiento del mismo, siendo la eficiencia eléctrica a parámetros controlados de 42%, la autonomía de 694 días y la eficiencia en el tratamiento del ARS de 79.81%.

Se realiza una adaptación al esquema de recolección múltiple de energía planteado por Prasad *et al*, proponiendo una topología de tercera generación que mantiene las celdas aisladas, impide la inversión de potencial, reduce los terminales de conexión y permite mejorar la extracción de corriente.

Se utiliza el convertidor comercial de ultra baja potencia BQ25504 que se ajusta a los requerimientos del sistema, presenta un consumo reducido de 3.3  $\mu\text{A}$  y admite parámetros de trabajo similares a los de las CCM, obteniéndose una eficiencia en la conversión de 66%.

Se elaboró un *software* para el microcontrolador 328P que incluye rutinas de bajo consumo, dando como resultado una demanda máxima de 190  $\mu\text{W}$ .

La gestión energética implementada con un sistema de recolección por multiplexión temporal y estimación de corriente, mantiene monitorizada la energía en un ciclo de pruebas y reduce el gasto energético del circuito, lo que evita en todo momento que el sistema se vuelva ineficiente.

A partir de las pruebas realizadas al SRE2 se determinaron los parámetros de funcionamiento del mismo, siendo la eficiencia eléctrica a parámetros controlados de 55%, la autonomía de 788 días y la eficiencia en el tratamiento del ARS de 77.27%.

La utilización del SRE2 en relación al sistema existente, reduce las pérdidas por efecto joule en un 44%, aumenta la eficiencia eléctrica en un 13%, la autonomía en un 12%, la energía que se extrae de las CCM en un 20% y mantiene resultados similares respecto al tratamiento del ARS.

Con la implementación del SRE2 no se logra alcanzar 60% de la eficiencia eléctrica esperada.

## PERSPECTIVAS

En aras de que la investigación pueda continuar, se plasman algunas ideas para complementar el trabajo realizado, debido a que el tiempo y las condiciones no permitieron tener un mayor alcance. Se hace necesario la impresión del circuito en una tarjeta adecuada ya que las pruebas fueron realizadas con el prototipo y este introduce demasiado ruido y pérdidas en las conexiones. Se debe reducir la frecuencia de trabajo del microcontrolador sin que atente con la precisión de las mediciones de potencial realizadas en la conversión Análoga - Digital. La frecuencia se encuentra directamente relacionada con el consumo de este integrado en estado activo y representa aproximadamente el 80% del consumo total del circuito (sin incluir las pérdidas de conversión del convertidor BQ20504). Para lograr un circuito más compacto, se debe ajustar el diseño y el código del programa para que trabaje solo con ocho CCM, esto permitiría excluir del SRE2 uno de los multiplexores de señal, lo cual reduciría la complejidad del control y el consumo de la tarjeta en un 5%.

Este trabajo se desarrolló utilizando un convertidor CC-CC comercial BQ25504, el cual presenta características muy interesantes que son aplicables de manera intuitiva a las CCM. En este aspecto, se recomienda hacer pruebas que permitan comparar la diferencia real que implica: obtener la energía de las CCM con MPPT por muestreo de la señal de entrada (este trabajo), o por un algoritmo ejecutado desde el microcontrolador.

Las mediciones efectuadas en esta investigación y la obtención de las formas de onda de las señales estudiadas, se realizaron por muestreo analógico y amplificadores operacionales, se solicita replicar las pruebas con otros equipos, de preferencia con mayor precisión y resolución. De igual manera, las pruebas de tratamiento se deben repetir al menos tres veces para determinar la desviación estándar de los resultados. De esta manera, la investigación sería más robusta y ayudaría a optimizar aspectos negativos en la misma.

## REFERENCIAS

1. Palanisamy, G., Jung, H.-Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M.D., Kim, S.C., and Roh, S.-H. (2019). A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes. *J. Clean. Prod.* 598-621.
2. Prasad, J., and Tripathi, R.K. (2018). Plant Microbial Fuel Cell Energy Harvesting Boost Converter with / without the Super Capacitor. *Majlesi J. Mechatron. Syst.* 7, 7–13.
3. Kumar, S.S., Kumar, V., Malyan, S.K., Sharma, J., Mathimani, T., Maskarenj, M.S., Ghosh, P.C., and Pugazhendhi, A. (2019). Microbial fuel cells (MFCs) for bioelectrochemical treatment of different wastewater streams. *Fuel.* 254, 115526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.109>.
4. Martínez, M.A., Octaviano, C.A., Araiza, O.S., and U., R.R. (2018). Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (G Y CEI) del sector aguas residuales de México. (INECC, México.).
5. Singh, H.M., Pathak, A.K., Chopra, K., Tyagi, V. V., Anand, S., and Kothari, R. (2019). Microbial fuel cells: a sustainable solution for bioelectricity generation and wastewater treatment. *Biofuels.* 10, 11–31. DOI: <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1413860>.
6. Rathour, R., Kalola, V., Johnson, J., Jain, K., Madamwar, D., and Desai, C. (2019). Treatment of Various Types of Wastewaters Using Microbial Fuel Cell Systems. In *Microbial Electrochemical Technology* (Elsevier, India), pp. 665–692.
7. Linares, R.V., Domínguez-Maldonado, J., Rodríguez-Leal, E., Patrón, G., Castillo-Hernández, A., Miranda, A., Romero, D.D., Moreno-Cervera, R., Camara-chale, G., Borroto, C.G., *et al.* (2019). Scale up of microbial fuel cell stack system for residential wastewater treatment in continuous mode operation. *Water.* 11, 1–15.
8. Tonatiuh, Z. (2019). Tratamiento de aguas residuales. *INCyTU.* 52, 1–6.
9. Newell, D., and Duffy, M. (2019). Review of Power Conversion and Energy Management for Low-Power, Low-Voltage Energy Harvesting Powered Wireless Sensors. *IEEE Trans. Power Electron.* 34, 9794–9805.

10. Sarpeshkar, R. (2012). Universal principles for ultra low power and energy efficient design. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs* 59, 193–198.
11. Alzate A., L. (2015). Microbial fuel cells for wastewater treatment. *Biotechnol. Biomimetics Civ. Eng.*, 411–437.
12. Logan, B.E. (2008). *Microbial Fuel Cells*. (John Wiley & Sons, New Jersey).
13. WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2017). *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource*. (UNESCO, Paris.).
14. Aquino Neto, S., Reginatto, V., and De Andrade, A.R. (2018). Microbial Fuel Cells and Wastewater Treatment. In *Electrochemical Water and Wastewater Treatment*. (Elsevier, India), pp. 305–331.
15. Escapa, A., Morán, A., Tartakovsky, B., and Heidrich, E.S. (2019). Editorial: Microbial Electrochemical Technologies for Renewable Energy Production From Waste Streams. *Front. Energy Res.* 7, 1–2.
16. Roy, S., Marzorati, S., Schievano, A., and Pant, D. (2017). Microbial Fuel Cells. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. (Elsevier, India), pp. 245–259.
17. Viridis, B., Freguia, S., Rozendal, R.A., Rabaey, K., Yuan, Z., and Keller, J. (2011). Microbial Fuel Cells. In *Treatise on Water Science*. (Elsevier, Australia), pp. 641–665.
18. Farias, N.G. (2016). Análisis técnico-económico de la tecnología de celdas bioelectroquímicas microbianas para la producción de energías alternas. Tesis de Maestría, CIDETEQ, México.
19. Yang, W., Wang, X., Son, M., and Logan, B.E. (2020). Simultaneously enhancing power density and coulombic efficiency with a hydrophobic Fe–N4/activated carbon air cathode for microbial fuel cells. *J. Power Sources*. 1-7.
20. Slate, A.J., Whitehead, K.A., Brownson, D.A.C., and Banks, C.E. (2019). Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 101, 60–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044>.

21. Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., and Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *J. Power Sources*. 356, 1–20. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>.
22. Yu, B., Feng, L., He, Y., Yang, L., and Xun, Y. (2021). Effects of anode materials on the performance and anode microbial community of soil microbial fuel cell. *J. Hazard. Mater.* 401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123394>.
23. Ramírez, L., Durán, M.C., García, J., Montuy, R., and Oaxaca, M. (2008). Demanda química de oxígeno de muestras acuosas. (UNAM, México.).
24. Lee, Y.-Y., Kim, T.G., and Cho, K.-S. (2016). Characterization of the COD removal, electricity generation, and bacterial communities in microbial fuel cells treating molasses wastewater. *J. Environ. Sci. Heal. Part A*. 51, 1–9.
25. Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P., and Verstraete, W. (2005). Tubular Microbial Fuel Cells for Efficient Electricity Generation. *Environ. Sci. Technol.* 39, 1–6. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es050986i>.
26. Zuo, Y., Maness, P.C., and Logan, B.E. (2006). Electricity production from steam-exploded corn stover biomass. In *Energy and Fuels* (American Chemical Society, EE.UU), pp. 1716–1721.
27. Behera, M., Jana, P.S., More, T.T., and Ghangrekar, M.M. (2010). Rice mill wastewater treatment in microbial fuel cells fabricated using proton exchange membrane and earthen pot at different pH. *Bioelectrochemistry*. 79, 1–6.
28. Villaseñor, J., Capilla, P., Rodrigo, M.A., Cañizares, P., and Fernández, F.J. (2013). Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland - Microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates. *Water Res.* 47, 1–8.
29. Liu, S., Song, H., Li, X., and Yang, F. (2013). Power Generation Enhancement by Utilizing Plant Photosynthate in Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland System. *Int. J. Photoenergy*., 1–10.

30. Touach, N., Ortiz-Martínez, V.M., Salar-García, M.J., Benzaouak, A., Hernández-Fernández, F., de los Ríos, A.P., Labjar, N., Louki, S., El Mahi, M., and Lotfi, E.M. (2016). Influence of the preparation method of MnO<sub>2</sub>-based cathodes on the performance of single-chamber MFCs using wastewater. *Sep. Purif. Technol.* *171*, 174–181. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.031>.
31. Sawasdee, V., and Pisutpaisal, N. (2016). Simultaneous pollution treatment and electricity generation of tannery wastewater in air-cathode single chamber MFC. *Int. J. Hydrog. Energy.* *41*, 15632–15637.
32. Logan, B.E., Rossi, R., Ragab, A., and Saikaly, P.E. (2019). Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Nat. Rev. Microbiol.* *17*, 307–319.
33. Ren, H., Tian, H., Gardner, C.L., Ren, T.L., and Chae, J. (2016). A miniaturized microbial fuel cell with three-dimensional graphene macroporous scaffold anode demonstrating a record power density of over 10000 W m<sup>-3</sup>. *Nanoscale* *8*, 3539–3547.
34. Mohd Yusoff, M.Z., Hu, A., Feng, C., Maeda, T., Shirai, Y., Hassan, M.A., and Yu, C.P. (2013). Influence of pretreated activated sludge for electricity generation in microbial fuel cell application. *Bioresour. Technol.* *145*, 90–96. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.003>.
35. Jiang, Y., Ulrich, A.C., and Liu, Y. (2013). Coupling bioelectricity generation and oil sands tailings treatment using microbial fuel cells. *Bioresour. Technol.* *139*, 349–354. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.050>.
36. Elakkiya, E., and Matheswaran, M. (2013). Comparison of anodic metabolisms in bioelectricity production during treatment of dairy wastewater in Microbial Fuel Cell. *Bioresour. Technol.* *136*, 407–412. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.113>.
37. Mansoorian, H.J., Mahvi, A.H., Jafari, A.J., Amin, M.M., Rajabizadeh, A., and Khanjani, N. (2013). Bioelectricity generation using two chamber microbial fuel cell treating wastewater from food processing. *Enzyme Microb. Technol.* *52*, 352–357. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enzmictec.2013.03.004>.
38. Lu, N., Zhou, S. gui, Zhuang, L., Zhang, J. tao, and Ni, J. ren (2009). Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology. *Biochem. Eng. J.* *43*, 246–251.

39. Sevda, S., Dominguez-Benetton, X., Vanbroekhoven, K., De Wever, H., Sreerishnan, T.R., and Pant, D. (2013). High strength wastewater treatment accompanied by power generation using air cathode microbial fuel cell. *Appl. Energy* 105, 194–206. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.037>.
40. Hernandez, M.E., and Newman, D.K. (2001). Extracellular electron transfer. *Cell. Mol. Life Sci.* 58, 1562–1571.
41. Shi, L., Dong, H., Reguera, G., Beyenal, H., Lu, A., Liu, J., Yu, H.Q., and Fredrickson, J.K. (2016). Extracellular electron transfer mechanisms between microorganisms and minerals. *Nat. Rev. Microbiol.* 14, 651–662. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nrmicro.2016.93>.
42. Magnuson, T.S., Isoyama, N., Hodges-Myerson, A.L., Davidson, G., Maroney, M.J., Geesey, G.G., and Lovley, D.R. (2001). Isolation, characterization and gene sequence analysis of a membrane-associated 89 kDa Fe(III) reducing cytochrome c from *Geobacter sulfurreducens*. *Biochem. J.* 359, 147–152.
43. Reguera, G., McCarthy, K.D., Mehta, T., Nicoll, J.S., Tuominen, M.T., and Lovley, D.R. (2005). Extracellular electron transfer via microbial nanowires. *Nature* 435, 1098–1101.
44. Khaled, F., Ondel, O., and Allard, B. (2016). Microbial fuel cells as power supply of a low-power temperature sensor. *J. Power Sources* 306, 354–360. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.12.040>.
45. Nguyen, C.L., Tartakovsky, B., and Woodward, L. (2019). Harvesting Energy from Multiple Microbial Fuel Cells with a High-Conversion Efficiency Power Management System. *ACS Omega* 4, 18978–18986.
46. Oh, S.-E., and Logan, B.E. (2007). Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation. *Power Sour.* 167, 11–17.
47. Kim, B., Mohan, S.V., Fapyane, D., and Chang, I.S. (2020). Controlling Voltage Reversal in Microbial Fuel Cells. *Trends Biotechnol.* 38, 667–678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.12.007>.
48. Papaharalabos, G., Stinchcombe, A., Horsfield, I., Melhuish, C., Greenman, J., and Ieropoulos, I. (2017). Autonomous Energy Harvesting and Prevention of Cell Reversal in MFC Stacks. *J. Electrochem. Soc.* 164, H3047–H3051.

49. An, J., Kim, T., and Chang, I.S. (2016). Concurrent Control of Power Overshoot and Voltage Reversal with Series Connection of Parallel-Connected Microbial Fuel Cells. *Energy Technol.* 4, 729–736.
50. Kim, B., and Chang, I.S. (2018). Elimination of voltage reversal in multiple membrane electrode assembly installed microbial fuel cells (mMEA-MFCs) stacking system by resistor control. *Bioresour. Technol.* 262, 338–341.
51. Raju, M., and Grazier, M. (2010). Energy harvesting--ULP meets energy harvesting: a game-changing combination for design engineers, White Paper. Texas Instruments., 8. <http://www.ti.com/lit/wp/slyy018a/slyy018a.pdf> Consultado: 20 de enero del 2020.
52. Ahmed, F. (2019). MPPT Tracking Energy Harvesting System for Solar and Microbial Fuel Cell. Tesis de Maestría, Politécnico de Torino, Italia.
53. Kim, T., Yeo, J., Yang, Y., Kang, S., Paek, Y., Kwon, J.K., and Jang, J.K. (2019). Boosting voltage without electrochemical degradation using energy-harvesting circuits and power management system-coupled multiple microbial fuel cells. *J. Power Sources* 410–411, 171–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.11.010>.
54. Yamashita, T., Hayashi, T., Iwasaki, H., Awatsu, M., and Yokoyama, H. (2019). Ultra-low-power energy harvester for microbial fuel cells and its application to environmental sensing and long-range wireless data transmission. *J. Power Sources* 430, 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.04.120>.
55. Park, J. Do, and Lee, S. (2019). Single-transistor sub-1-V self-startup voltage boost energy harvesting system for microbial fuel cells. *J. Power Sources* 418, 90–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.01.078>.
56. Singal, A.K. (2013). The genesis of the internal resistance of a battery -- a physical perspective. *Res. Gate.*, 5–8.
57. Squires, D. (2015). Energy Harvesting for Low-Power Sensor Systems. Renesas., 1–28.
58. Riazor, R., Rafecas, J., and Sudriá, A. (2009). Ultracondensadores: mayor densidad de energía. In *Sistemas de almacenamiento de energía. (Automática e Instrumentación, España)*, pp. 54–58.

59. Carli, D., Brunelli, D., Benini, L., and Ruggeri, M. (2011). An effective multi-source energy harvester for low power applications. In 2011 Design, Automation & Test in Europe. (IEEE), pp. 1–6.
60. Ramadass, Y.K. (2009). Energy processing circuits for low-power applications. Tesis de Doctorado, Massachusetts Institute of Technology 2009, EE.UU.
61. Estrada-López, J.J., Abuellil, A., Zeng, Z., and Sánchez-Sinencio, E. (2018). Multiple input energy harvesting systems for autonomous IoT end-nodes. *J. Low Power Electron. Appl.* 8.
62. Alzate A., L. (2016). EE.UU. Patent 374146.
63. NXP (2012). NX3L2467. 1–24. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/NX3L2467.pdf> Consultado: 24 de septiembre del 2021.
64. Microchip (2017). ATmega328PB. 1–17. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001907A.pdf> Consultado: 20 de septiembre del 2021.
65. Khaled, F., Ondel, O., Allard, B., and Degrenne, N. (2013). Voltage balancing circuit for energy harvesting from a stack of serially-connected Microbial Fuel Cells. *IEEE.*, 392–397.
66. Mohan, Ned, Undeland, Tore M., Robbins, W.P. (1995). *Power Electronics*. (JOHN WILEY & SONS, New York.).
67. Moreno Cervera, R. (2017). Evaluación de tres membranas y un cátodo aireado en cuatro stacks de celdas de combustible microbianas, Tesis de Maestría, CICY, México.
68. Zapata Martínez, O. (2020). Stack de celdas de combustible microbianas a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales de cervecería, Tesis de Maestría, CICY, México.
69. González Gamboa, N.K. (2019). Evaluación de sedimentos de la bahía de combustible microbianas bénticas con energía en circuito de baja potencia, Tesis de Doctorado, CICY, México.
70. González, M.E. (2015). Bacterias reductoras de sulfato de sedimentos costeros como una alternativa para la generación de energía renovable, Tesis de Maestría, CICY, México.

71. Glaser, C. (2014). Accurately measuring efficiency of ultralow-IQ devices. *Analog Appl. J.*, 7.  
<http://www.ti.com/analog/docs/litabsmultiplefilelist.tsp?literatureNumber=slyt558&docCategoryId=1&familyId=490> Consultado: 12 de enero del 2021.
72. Alaraj, M., and Park, J. Do (2019). Net power positive maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cell. *J. Power Sources* 418, 225–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.02.042>.
73. MC Measurement Computing (2012). *Data Acquisition Handbook*. (Measurement Computing Corporation, EE.UU).
74. Instruments, T. (2019). INA190 Bidirectional, Low-Power, Zero-Drift, Wide Dynamic Range, Precision Current-Sense Amplifier With Enable. 45.  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina190.pdf?ts=1644032857688&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA190](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina190.pdf?ts=1644032857688&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA190) Consultado: 17 de julio del 2021.
75. Prasad, J., and Tripathi, R.K. (2019). Energy harvesting from sediment microbial fuel cell to supply uninterruptible regulated power for small devices. *Int. J. Energy Res.* 43, 2821–2831.
76. Lu, M., Chen, S., Babanova, S., Phadke, S., Salvacion, M., Mirhosseini, A., Chan, S., Carpenter, K., Cortese, R., and Bretschger, O. (2017). Long-term performance of a 20-L continuous flow microbial fuel cell for treatment of brewery wastewater. *J. Power Sources* 356, 274–287.
77. Costilla-Reyes, A., Erbay, C., Carreon-Bautista, S., Han, A., and Sánchez-Sinencio, E. (2018). A time-interleave-based Power Management System with maximum power extraction and health protection algorithm for multiple Microbial Fuel Cells for Internet of Things smart nodes. *Appl. Sci.* 8.
78. HACH (2000). *Manual de analisis de agua*. (HACH COMPANY, EE.UU.).
79. Jobling Purser, B.J., Thai, S.M., Fritz, T., Esteves, S.R., Dindale, R.M., and Guwy, A.J. (2014). An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water Res.* 61, 162–170. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.020>.

80. Carreon-Bautista, S., Erbay, C., Han, A., and Sanchez-Sinencio, E. (2015). An Inductorless DC-DC Converter for an Energy Aware Power Management Unit Aimed at Microbial Fuel Cell Arrays. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 3, 1109–1121.
81. Yu, J., Park, Y., Kim, B., and Lee, T. (2015). Power densities and microbial communities of brewery wastewater-fed microbial fuel cells according to the initial substrates. *Bioprocess Biosyst. Eng.* 38, 85–92.
82. He, W., Wallack, M.J., Kim, K.Y., Zhang, X., Yang, W., Zhu, X., Feng, Y., and Logan, B.E. (2016). The effect of flow modes and electrode combinations on the performance of a multiple module microbial fuel cell installed at wastewater treatment plant. *Water Res.* 105, 351–360. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.008>.
83. Park, J. Do, and Ren, Z. (2011). Efficient energy harvester for microbial fuel cells using DC/DC converters. *IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Energy Convers. Innov. a Clean Energy Futur. ECCE 2011, Proc.*, 3852–3858.
84. NXP (2012). NX3L4051. 1–23. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/NX3L4051.pdf> Consultado: 20 de septiembre del 2020.
85. Corporation, L.T. (2010). LTC3108, Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager. *analog.com*, 22. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3108.pdf> Consultado: 13 de marzo del 2020.
86. Instruments, T. (2017). TPS61099 Evaluation Module. *ti.com*, 10. <https://www.ti.com/lit/ug/slvuar2a/slvuar2a.pdf?ts=1644026845521> Consultado: 2 de abril del 2020.
87. Instruments, T. (2019). bq25504 Ultra Low-Power Boost Converter With Battery Management for Energy Harvester Applications. *ti.com*, 38. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf?ts=1644032804419&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ25504%253FkeyMatch%253DBQ25504](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf?ts=1644032804419&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ25504%253FkeyMatch%253DBQ25504) Consultado: 10 de octubre del 2021.
88. Instruments, T. (2012). MSP430F20xx. 94. [https://www.ti.com/lit/ds/slas491i/slas491i.pdf?ts=1644040421077&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/slas491i/slas491i.pdf?ts=1644040421077&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) Consultado: 27 de octubre del 2021.

89. NXP (2014). Addendum for New QFN Package Migration. 39. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MC9S08QG8.pdf> Consultado: 22 de octubre del 2021.
90. Alaraj, M., and Park, J. Do (2019). Net power positive maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cell. *J. Power Sources* 418, 225–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.02.042>.
91. Khaled, F., Ondel, O., and Allard, B. (2015). Optimal energy harvesting from serially connected microbial fuel cells. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 62, 3508–3515.

## ANEXOS

```
.....
Programa de la tarjeta recolectora de ultra baja potencia : SRE2
.....
//Autor: Ing. Rafael A. Dacosta Roche

#include "LowPower.h" //Incluye la librería para la utilización de las rutinas de bajo cosumo
//Device: 328P
//Clock: Internal 1MHz
//BOD: habilitado 1.8 V
//LTO: deshabilitado
//Bootloader: no

.....*/
// Declaración de variables, constantes

int Energeticas = 0; //Crea un indicador para las celdas energéticas
float Voc [] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; //Arreglo para almacenar las tensiones de las celdas en circuito abierto
float VocRef [] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; //Arreglo para almacenar las tensiones de las celdas más energéticas
float Vc [] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; //Arreglo para almacenar las tensiones del condensador
float Rint [] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; //Arreglo para almacenar las resistencias internas de las celdas
float Icc [] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}; //Arreglo para almacenar las corrientes de cortocircuito de las celdas
const int terminales [] = {2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13}; //Arreglo que incluye los terminales de control
const int code [] = {16, 20, 18, 22, 17, 21, 19, 23, 8}; //Arreglo para relacionar el número de celda con el control del multiplexor
int valor = 0; //Variable dedicada a la lectura analógica

.....*/
//Función para controlar el multiplexor

void control( int num) //Función que actualiza los terminales de control
{
    for (int bit = 0; bit < 6; bit++) //Ciclo para seleccionar el bit del vector terminales (solo los que corresponden a los multiplexores 0-5)
    {
        int pin = terminales [bit]; //Guarda en la variable pin el número del terminal
        int BitSet = bitRead(num, bit); //Guarda en la variable BitSet, el valor binario (0-1) correspondiente al código seleccionado
        digitalWrite(pin, BitSet); //Escribe en la variable pin el valor binario leído con anterioridad (HIGH o LOW)
    }
    return;
}

.....*/
//Función para hacerle pruebas energéticas a las celdas

void test() //Función que realiza la prueba de resistencia interna
{
    for (int ccm = 0; ccm < 9; ccm++) //Ciclo para seleccionar todas las celdas
    {
        control(24); //Inhabilita la salida del multiplexor E1 = 1, E2 = 1
        digitalWrite(terminales[7], HIGH); //Desconecta el interruptor principal SWP = 1
        digitalWrite(terminales[5], LOW); //Desconecta el condensador a la salida del multiplexor (conecta el convertidor) SWI = 0
    }
}
```

Figura A.1. Código de programa que ejecuta el microcontrolador en el SRE2 (Parte 1).

```

digitalWrite(terminales[6], HIGH); //Conecta la resistencia de descarga SW2 = 1
LowPower.powerDown(SLEEP_60MS, ADC_OFF, BOD_OFF); //Tiempo de descarga del condensador en bajo consumo (60 ms)
control(code[ccm]); //Selección del canal en el multiplexor que corresponde a la celda en prueba
valor = analogRead(A0); //Lectura de la salida del multiplexor
Voc[ccm] = (valor * 1.1) / 1023; //Mapeo de conversión y almacenamiento del dato en el arreglo
digitalWrite(terminales[6], LOW); //Desconecta la resistencia de descarga SW2 = 0
digitalWrite(terminales[5], HIGH); //Conecta el condensador a la salida del multiplexor SW1 = 1
digitalWrite(terminales[7], LOW); //Conecta el interruptor principal SWP = 0
LowPower.powerDown(SLEEP_120MS, ADC_OFF, BOD_OFF); //Tiempo de carga del condensador en bajo consumo (120 ms)
valor = analogRead(A0); //Lectura de la salida del multiplexor
Vc[ccm] = (valor * 1.1) / 1023; //Mapeo de conversión y almacenamiento del dato en el arreglo
}
return;
}
}
/*-----*/
//Configuraciones
void setup()
{
analogReference(INTERNAL); //Referencia analógica interna de 1.1 V (resolución 1 mV/bit)
for (int bit = 0; bit < 9; bit++) //Ciclo para seleccionar el bit del vector terminales (0-8)
{
pinMode(terminales[bit], OUTPUT); //Terminales 2,4,7,8,9,10,11,12,13 como salidas digitales
}
}
}
/*-----*/
//Programa principal
void loop()
{
test(); //Prueba para caracterizar las celdas y determinar los parámetros internos
control(24); //Inhabilita la salida del multiplexor E1 = 1, E2 = 1
digitalWrite(terminales[7], HIGH); //Desconecta el interruptor principal SWP
digitalWrite(terminales[5], LOW); //Desconecta el condensador a la salida del multiplexor (conecta el convertidor) SW1 = 0
digitalWrite(terminales[6], HIGH); //Conecta la resistencia de descarga SW2 = 1

for (int i = 0; i < 9; i++) //Ciclo para seleccionar todos los elementos del arreglo
{
Rint[i] = -0.12 / (0.0001 * log(1 - (Vc[i] / Voc[i]))); //Cálculo y almacenamiento de las resistencias internas de las celdas (t = 120 ms y C = 100 uF)
//R = -t/(C*Ln(1-(Vc/Voc)))
Icc[i] = Voc[i] / Rint[i]; //Estimación de la corriente de cortocircuito en las CCM (Icc = Voc/Rint)
}

Energeticas = 0; //Reinicia indicador en cero

digitalWrite(terminales[7], LOW); //Conecta el interruptor principal SWP
}
}
}

```

Figura A.2. Código de programa que ejecuta el microcontrolador en el SRE2 (Parte 2).

```

for (int i = 0; i < 9; i++)
{
    if (Voc[i] >= 0.3 && Icc [i] >= 0.0005)           //Si el potencial de la celda es mayor que 0.3 V y la corriente de cortocircuito es mayor que 0.5 mA
    { //Parámetros mínimos de entrada para el convertidor
        control(code[i]);                             //Coloca la celda correspondiente en la salida del multiplexor
        LowPower.powerDown(SLEEP_4S, ADC_OFF, BOD_OFF); //Espera cuatro segundos dormido en bajo consumo
        Energeticas++;                                //Incrementa el indicador en uno
    }
}

control(24);                                         //Inhabilita la salida del multiplexor E1 = 1, E2 = 1
digitalWrite(terminales[7], HIGH);                  //Desconecta el interruptor principal SWP

if (Energeticas < 3)                                //Si solo el 22 % de las celdas se encuentran trabajando
{
    for (int i = 0; i < 451; i++)                    //Repite la rutina de dormir durante 8 segundos por 450 veces
    {
        LowPower.powerDown(SLEEP_8S, ADC_OFF, BOD_OFF); // (Equivalente a 60 minutos y reanuda el programa)
    }
}
}

/-----*/
/******NOTAS*****NOTAS*****NOTAS*****NOTAS*****
S1 = 7 Terminal s1 de selección en el NX34051 (PD7)
S2 = 4 Terminal s2 de selección en el NX34051 (PD4)
S3 = 2 Terminal s3 de selección en el NX34051 (PD2)
E1 = 8 Terminal E de habilitación en el NX34051 (1) (PB0)
E2 = 9 Terminal E de habilitación en el NX34051 (2) (PB1)
SW1 = 10 Terminal s1 de habilitación en el NX3L2467 (convertidor) (PB2)
SW2 = 11 Terminal s2 de habilitación en el NX3L2467 (test) (PB3)
SWP = 12 Terminal s1 de habilitación en el NX3L2467 (principal) (PB4)
SWL = 13 Terminal s2 de habilitación en el NX3L2467 (carga) (PB5)

Control del multiplexor
-----
Terminal 9 8 7 4 2 code
-----
OFF      1 1 0 0 0 24
-----
CCM1     1 0 0 0 0 16
-----
CCM2     1 0 1 0 0 20
-----
CCM3     1 0 0 1 0 18
-----

```

Figura A.3. Código de programa que ejecuta el microcontrolador en el SRE2 (Parte 3).

```

CCM4      1 0 1 1 0  22
-----
CCM5      1 0 0 0 1  17
-----
CCM6      1 0 1 0 1  21
-----
CCM7      1 0 0 1 1  19
-----
CCM8      1 0 1 1 1  23
-----
CCM9      0 1 0 0 0   8
-----

La función control(num) lo que hace es actualizar el estado de los terminales del microcontrolador correspondiente al control del multiplexor (9,8,7,4,2). Con la variable (num) se indica un número en decimal que corresponde al valor en binario de los terminales. Ej: La selección del canal 2 del multiplexor (los terminales E2 E1 S3 S2 S1 = 9 8 7 4 2 = 1 0 1 0 0 = 20)

La función test() es utilizada para realizar pruebas a las celdas con un condensador de capacitancia conocida y una resistencia de descarga. Dentro de este algoritmo se utiliza la función control para la selección del canal() en el multiplexor. De esta prueba se obtienen las tensiones de circuito abierto de las celdas y a circuito cerrado con el condensador de medición, lo que permite estimar la corriente máxima que puede obtenerse de las mismas. En un ciclo de barrido activando y desactivando los interruptores necesarios se logra almacenar mencionadas variables en arreglos que posteriormente serán utilizados. Una vez que la función se invoca en el programa principal el multiplexor se inhabilita (E1=1 y E2=1), el interruptor principal queda abierto (SWP=1), el condensador de prueba queda en paralelo con la resistencia de descarga (SW2=1) y el convertidor queda conectado en la línea principal (SW1=0).

/*****NOTAS*****/

```

Figura A.4. Código de programa que ejecuta el microcontrolador en el SRE2 (Parte 4).