

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MEDIDOR DEL POTENCIAL
ELÉCTRICO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANO**

**EDISON URIEL CAICEDO RAMÍRES
FAUSTO YERMAIN HORMAZA BASANTE**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2017**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MEDIDOR DEL POTENCIAL
ELÉCTRICO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANO**

**EDISON URIEL CAICEDO RAMÍRES
FAUSTO YERMAIN HORMAZA BASANTE**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de ingeniero
electrónico**

**DIRECTOR
M.SC JAIME ORLANDO RUIZ
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2017**

Nota de Responsabilidad

“La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”.

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966. Emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Presidente de Tesis

Jurado 1

Jurado 2

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan sus especiales agradecimientos a:

Nuestras familias las cuales nos estuvieron apoyando en todo el proceso y desarrollo de este trabajo de grado.

Grupo de investigación en BIOELECTROQUÍMICA de la Universidad de Nariño, por el apoyo en la realización de esta investigación.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedicamos con mucho cariño a nuestros padres quienes son un apoyo fundamental en nuestras vidas, a todas las personas que de una u otra forma estuvieron a lado nuestro dándonos el apoyo y alentándonos a seguir y terminar nuestro trabajo de grado.

Agradecemos a todas las personas que aportaron positivamente a este proyecto con el cual podemos culminar esta etapa profesional.

RESUMEN

Una Celda de Combustible Microbiano es un dispositivo que genera electricidad utilizando microorganismos que convierten la energía química en eléctrica. Como resultado del metabolismo microbiano se liberan electrones los cuales inicialmente son captados por un electrodo y posteriormente transitan por un circuito eléctrico generando un flujo de corriente.

Para evaluar el desempeño eléctrico de una Celda de Combustible Microbiana es necesario determinar la intensidad de corriente eléctrica generada, la densidad de potencia, la eficiencia coulombica y la resistencia interna, para ello se requiere hacer mediciones de voltaje. Con estos datos y de acuerdo a modelos matemáticos plenamente establecidos se pueden calcular los parámetros anteriormente mencionados.

Los voltajes que se obtienen en una Celda de Combustible Microbiana son muy bajos (menores de 200 mV), por ello el sistema de medición más adecuado es el multímetro, sin embargo, la labor de medición con este instrumento, se torna lenta si se tiene en cuenta que se debe manipular de forma manual, la medición se debe hacer de manera permanente durante todo el experimento, esto es, entre 30 y 90 días, adicional a lo anterior se deben monitorear varias celdas de manera simultánea. Por ello lo que se propone en este trabajo es el diseño y la implementación de un prototipo para la medición de voltaje automatizado que permita medir voltajes de varias celdas operadas simultáneamente, de manera permanente, que almacene los datos obtenidos para calcular los parámetros relacionados con el desempeño eléctrico del sistema. El prototipo se realizó siguiendo las metodologías de desarrollo tecnológico para sistemas de mediana complejidad.

Como resultado se tiene un sistema de medición automatizado que mide el voltaje de hasta 8 celdas que operan simultáneamente, con capacidad para registrar y almacenar los datos en una memoria SD, los cuales se pueden llevar a una aplicación para realizar los análisis correspondientes al desempeño eléctrico.

El sistema de medición automatizado del potencial eléctrico de una CCM es una herramienta que ayudará a los procesos de investigación permitiendo profundizar el entendimiento de los procesos eléctricos, químicos y biológicos que suceden en este bioreactor.

ABSTRACT

A Microbial Fuel Cell is a device that generates electricity using microorganisms that convert chemical energy into electricity. As a result of the microbial metabolism, electrons are released, which are initially picked up by an electrode and then transited through an electric circuit generating current flow.

In order to evaluate the electrical performance of a Microbial Fuel Cell it is necessary to determine the electric current generated, the power density, the coulombic efficiency and the internal resistance, for this it is necessary to make voltage measurements. With these data and according to fully established mathematical models can calculate the above mentioned parameters.

The voltages obtained in a Microbial Fuel Cell are very low (less than 200 mV), so the most appropriate measurement system is the multimeter, however, the measurement work with this instrument, becomes slow if you have to In that it must be manipulated manually, the measurement must be done permanently during the whole experiment, that is, between 30 and 90 days, in addition to the above, several cells must be monitored simultaneously. Therefore, what is proposed in this work is the design and implementation of a prototype for automated voltage measurement that allows to measure voltages of several cells operated simultaneously, permanently, to store the data obtained to calculate the parameters related to performance Electrical system. The prototype was carried out following technological development methodologies for medium complexity systems.

As a result there is an automated measurement system that measures the voltage of up to 8 cells that operate simultaneously, capable of recording and storing the data in an SD memory, which can be taken to an application to perform the analyzes corresponding to the electrical performance .

The automated measurement system of the electrical potential of a CCM is a tool that will aid the research processes allowing to deepen the understanding of the electrical, chemical and biological processes that happen in this bioreactor.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	18
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
3. OBJETIVOS	20
3.1. Objetivo General	20
3.2. Objetivos Específicos.....	20
4. MARCO TEÓRICO	21
4.1. La Energía	21
4.1.1 Sistemas de producción de energía.....	21
4.2. Generalidades sobre la Celda de Combustible Microbiana	21
4.2.1. Arquitectura de una CCM.	22
4.2.2. Funcionamiento general de una CCM	22
4.2.3. Desempeño eléctrico de lasCCMs.....	22
4.3. Sistemas de medición.	24
4.3.1. Estructura básica de un sistema de medición.	24
5. METODOLOGÍA.....	26
5.1. Investigación preliminar	26
5.2. Diseño preliminar	26
5.3. Diseño detallado	26
5.4. Implementación	27
5.5. Validación del sistema	27
5.6. Especificaciones Técnicas del Sistema de Medición.....	27
5.7. Diseño preliminar.....	28
5.8. Diseño detallado.	29
5.8.1. Diseño detallado del Filtro LC.....	30
5.8.2. Diseño detallado del Amplificación JFET.....	31
5.8.3. Diseño detallado del Filtro RC.	39
5.8.4. Diseño detallado del procesamiento digital.	41
5.8.5. Diseño detallado de Lectura y procesamiento de datos.....	45
5.8.6. Diseño detallado del Filtro digital.	46
5.9. Desarrollo de una aplicación para la evaluación del desempeño eléctrico de las CCMs	52
6. Implementación	53
6.1.1. Elaboración de PC.....	54
6.1.2. Gabinete contenedor.	56
6.1.3. Sistema de presentación (Pantalla LCD)	57
6.1.4. Sistema de almacenamiento (Memoria micro SD)	58
6.1.5. Software desarrollado.....	59
6.2. Pruebas finales.....	62
6.2.1. Preparación de CCMs.	62
6.2.2. Cierre del circuito.....	65
7. CONCLUSIONES.....	72
8. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	73
9. REFERENCIAS	74
10. ANEXOS	76

10.1. Manual de usuario.	76
10.1.1 Método de encendido.	76
10.1.2 Canales de Medición.	77
10.1.3 Resistencia de carga para las CCMs.	77
10.1.4 Sistema de alerta de de conexión de las CCMs	78
10.1.5 Sistema de visualización.	79
10.1.6 Sistema de almacenamiento.	79
10.1.7 Alertas de funcionamiento.	80
10.1.8 Manejo del software	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura de una CCM(Liu., 2004).....	22
Figura 3. Grafica voltaje vs tiempo en circuito cerrado	28
Figura 4. Diagrama en bloques del Sistema de Medición(Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano)	28
Figura 5. Filtro LC (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano)	30
Figura 6. Respuesta en frecuencia del filtro LC (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	31
Figura 7. Amplificador JFET (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	32
Figura 8. Curba de transconductancia paraJFET 2SK596 tipico (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	33
Figura 9. Punto de operación del amplificador JFET (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	34
Figura 10. Descripción de las mallas para un circuito JFET (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	36
Figura 11. Representacion grafica voltaje de entrada de CCM y salida del JFET (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	39
Figura 12. Diagrama circuital filtro RC (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	40
Figura 13. Respuesta de frecuencia del filtro RC (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	41
Figura 14. Arduino MEGA 2560 ARDUINO MEGA 2560(arduino. arduino mega.,2012).....	42
Figura 15. Diagrama de flujo del procesamiento digital (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	43
Figura 16. Diagrama de flujo del inicializacion del procesamiento digital. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	44
Figura 17. Entrada de datos al ARDUINO (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	45

Figura 18. Diagrama de flujo lectura y adquisicion de datos. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	46
Figura 19. Diagrama del filtro digital. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	47
Figura 20. Diagrama de bloques filtro. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	48
Figura 21. Diagrama de bloques Ajuste y calibración (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	49
Figura 22. Diagrama circuital LCD y SD (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	50
Figura 23. Diagrama de flujo del procesamiento digital. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	51
Figura 24 interfaz grafica (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	52
Figura 25 calculadora de desempeño electrico (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	53
Figura26. Diagrama del sistema de medicion de voltages producido por las CCMs (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	54
Figura 27 . PCB amplificacion y filtrado (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	54
Figura 28. PCB de LCD ,micro SD y LEDs de alerta (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	55
Figura 29. PCB resistencias de carga y LEDs indicadores de CCMs (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	55
Figura30. PCB fuente de alimentacion (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	56
Figura 31. Gabinetes contenedor (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	57
Figura 32. Pantalla LCD 16*2 (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	57

Figura 33. Conexión Socket y Arduino (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	58
Figura 34. Conexión SD (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	59
Figura 35. Menú 1- Ingreso de valor de resistencias. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	60
Figura 36. Modelo Ejes de Coordenadas para grafica de datos. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	61
Figura 37. Menú 2- Opciones de análisis de CCM. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	61
Figura 38. Menú 3- Control de opciones. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	62
Figura 39. Menú 3- Visualización grafica. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	62
Figura 40. Grafica de voltaje CCM 0. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	66
Figura 41. Grafica de voltaje CCM 1. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	66
Figura 42. Grafica de voltaje CCM 2. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	67
Figura 43. Grafica de voltaje CCM 3. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	67
Figura 44. Grafica de voltaje CCM 4. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	68
Figura 45. Grafica de voltaje CCM 5. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	68
Figura 46. Grafica de voltaje CCM 6. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	69
Figura 47. Grafica de voltaje CCM 7. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	69

Figura 48. Sistemas de Encendido del Medidor. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	76
Figura 49. Canales de Medición. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	77
Figura 50. Resistencia de carga para las CCMs. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	78
Figura 51. Sistema de alerta de de conexión de las CCMs. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	79
Figura 52. Sistema de almacenamiento. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	80
Figura 53 Logo GraficasVoltaje.jar (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	80
Figura 54. Menú- Archivo datalog.txt.....	81
Figura 55. Menú- Valores de resistencias CCM. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	81
Figura 56. Botón Grafica- Selección CCM. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	82
Figura 57. Botón Opciones. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	82
Figura 58. Calculadora del desempeño electrico de las CCMs (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Voltaje de entrada de CCM y salida del JFET (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	38
Tabla 2. Datos obtenidos para el cálculo de precisión. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	62
Tabla 3. Componentes de las CCM a analizar. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	65
Tabla 4. Comparación de medidas realizadas CCM con multímetro y con el sistema de adquisición. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).	71

GLOSARIO

Análogo: se refiere a los valores de variables que alternan con el tiempo en forma continua como la distancia, la temperatura y la velocidad, esta última puede cambiar de forma rápida o lenta pero siempre se encontraran valores intermedios.

Ánodo: electrodo de carga positiva de un circuito eléctrico o de una célula electrolítica. En una pila es el terminal positivo que la corriente eléctrica viaja en sentido positivo al negativo por el circuito externo.

Arduino: plataforma de hardware libre, basada en un circuito electrónico con un micro controlador, puertos de entrada/salida y un entorno de desarrollo, adecuada para facilitar el diseño de sistemas electrónicos.

Bacterias: microorganismos procariotas que pueden alcanzar un tamaño de pocos micrómetros, no tienen el núcleo definido y por lo general no tienen orgánulos membranosos internos.

Bioremediación: estrategia que se emplea para restaurar ambientes contaminados utilizando seres vivos.

Cátodo: electrodo o polo negativo de un generador eléctrico, es el electrodo de menor potencial.

Celda de combustible microbiano (CCM): dispositivo que utiliza la energía química que se encuentra en la materia orgánica y la convierte en energía eléctrica mediante el metabolismo de organismos microbianos.

Densidad de potencia: la potencia por unidad de área del electrodo anódico.

Drivers o controlador de dispositivo: software que comunica los periféricos con el sistema operativo.

Electrodo: conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito.

Electroquímico: proceso de transformación de energía química a energía eléctrica, a los dispositivos que a través de reacción química genera una diferencia de potencial eléctrico se les denomina acumulador de energía eléctrica o batería.

Electrolito: cualquier sustancia que contiene partículas cargadas eléctricamente sean átomos o partículas.

Hardware: conjunto de componentes que forman la parte material de una computadora.

JFET: dispositivo electrónico de tres terminales que puede ser usado como interruptor electrónicamente controlado, amplificador o resistencia controlada por voltaje. Posee tres terminales, comúnmente llamados drenaje (D), puerta o compuerta (G) y fuente (S).

LCD: siglas en ingles de pantalla de cristal líquido (Liquid Cristal Display), es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos situados delante de una fuente de luz o reflectora.

Micro controlador: circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes previamente grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, que cumplen una tarea específica.

Micro SD: tarjetas de memoria flash, que permite la lectura y escritura en múltiples posiciones de memoria en la misma operación.

Nutrientes: la nutrición es el proceso por el que los seres vivos toman del medio donde habitan las sustancias químicas que necesitan para crecer, dichas sustancias se denominan nutrientes. Según la cantidad en que son requeridos, las bacterias necesitan macro nutrientes (C, H, O, N, P, S, K, Mg), ó micronutrientes o elementos traza (Co, Cu, Zn, Mo.)

Potencia volumétrica: potencia eléctrica que puede generar un sustrato por unidad de volumen.

Sensor: dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación y transformarlas en variables eléctricas.

Sistema Digital: se refiere a todos los sistemas que almacenan, procesan, representan información en código binario.

Software: soporte lógico de un sistema informático, que comprende el conjunto de instrucciones lógicas necesarias que hacen posible la realización de tareas específicas.

Sustrato: superficie en la que un organismo vive, el sustrato puede incluir materiales bióticos o abióticos.

1. INTRODUCCIÓN

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCMs), son novedosos sistemas bioelectroquímicos que pueden generar energía eléctrica a partir de un sustrato contenido en aguas residuales. Están constituidas por dos cámaras una anódica y otra catódica. En la cámara anódica los microorganismos generan electrones producto de la degradación del sustrato, electrodos que se transfieren hacia la cámara catódica a través de un circuito externo generando una corriente eléctrica. Es así como se transforma a energía química contenida en las aguas residuales en energía eléctrica, este proceso de conversión también permite que las CCMs sean consideradas como un sistema de tratamiento de aguas residuales de bajo costo (Sharma et al., 2010).

El desempeño eléctrico de las CCMs se evalúa a partir de las mediciones de voltaje que se realizan sobre la resistencia externa, una vez obtenidas estas mediciones se procede a realizar los cálculos de Densidad de Potencia, Eficiencia Coulombica y Resistencia Interna (Revelo et al., 2013).

El proceso de medición de voltaje se debe hacer de manera permanente durante todo el experimento (Wu et al., 2015), en consideración a lo anterior, se hizo la medición de voltaje cada 10 minutos, con un multímetro de precisión y un sistema de adquisición de datos durante 25 horas, se obtuvieron voltajes menores de 300 mV (Wang et al., 2008), igualmente, se tomaron mediciones de voltaje cada 5 minutos durante 180 horas, y con los datos obtenidos se procedió a realizar los cálculos para evaluar el desempeño eléctrico de la CCM.

El propósito de esta investigación es desarrollar un sistema automatizado que permita tomar las medidas de voltaje sobre la resistencia externa de una CCM de manera permanente de hasta 8 CCMs de manera simultánea y los datos que resulten de la medición se deben registrar para su posterior procesamiento con el fin de determinar los parámetros para la evaluación del desempeño eléctrico del sistema.

El trabajo se desarrolló siguiendo las metodologías existentes para el desarrollo de prototipos de sistemas electrónicos de mediana complejidad en las cuales se indica que se deben establecer las especificaciones técnicas, el diseño preliminar, el diseño detallado, la implementación y las pruebas de validación.

Como resultado se obtiene un sistema automatizado que mide de manera simultánea el voltaje en 8 CCMs, los datos inicialmente son registrados en una memoria SD, posteriormente son exportados a una aplicación desarrollada en Java donde finalmente se hacen los cálculos correspondientes al desempeño eléctrico.

De esta manera, el grupo de investigación en Bioelectroquímica, cuenta con una herramienta muy importante que contribuirá a las investigaciones que se llevan a cabo con las CCMs y que permitirán con el tiempo comprender los fenómenos biológicos, químicos y eléctricos que se suceden en este sistema.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La literatura científica considera que las CCMs son una fuente alternativa de generación de energía, amigable con el medio ambiente (Perez et al, 2010). La energía se produce a partir de las aguas residuales que tienen una alta carga de materia orgánica, la cual contiene energía química que se convierte en energía eléctrica como resultado del proceso metabólico, en donde se liberan electrones que fluyen por un circuito eléctrico externo (Gamez., 2016).

Como sistema generador de energía eléctrica, el desempeño de la CCM se evalúa mediante el cálculo de la intensidad de corriente, la densidad de potencia, la eficiencia coulombica y la resistencia interna, todos estos parámetros se calculan a partir de las mediciones de voltaje que se realizan sobre la resistencia externa (II Congreso Internacional de Ambiente y Energías Renovables., 2011).

Las mediciones de voltaje se hacen sobre sistemas que tienen unas características muy especiales a saber: los voltajes obtenidos son muy bajos (menores de 200 mV), las CCMs por ser reactores basados en micro organismos, con enormes poblaciones bacterianas entre las cuales se desarrollan una gran cantidad de relaciones simbióticas, constituyen un sistema altamente dinámico e impredecible, de tal suerte que el monitoreo se debe hacer de manera permanente durante un tiempo que puede oscilar entre 30 y 90 días, además los datos de la medición se deben almacenar para posteriormente examinar los parámetros eléctrico y evaluar su desempeño.

El hecho de que los voltajes sean demasiado pequeños impone una gran limitación, los sistemas de adquisición de datos comerciales no superan esta restricción, es así que la única forma de hacerla medición es a través del uso del multímetro, lo implica que se debe hacer de forma manual, lo cual resulta una actividad demasiado dispendiosa teniendo en cuenta que la toma de datos es permanente y que se debe hacer el registro de los mismos.

El grupo de investigación en Bioelectroquímica de la Universidad de Nariño realiza diferentes investigaciones con la pretensión de comprender con mayor profundidad el funcionamiento de una CCM y los fenómenos electroquímicos que suceden tanto en los procesos de bioremediación como en los procesos de generación de energía, por ello es muy importante el desarrollo de una herramienta que facilite la medición del voltaje para realizar los análisis correspondientes al desempeño eléctrico.

Las aplicaciones de la microelectrónica, los sensores y las nuevas plataformas de desarrollo tanto en hardware como en software ofrecen herramientas que se pueden utilizar de manera adecuada para contribuir a resolver problemas que se plantean, como en este caso la implementación de un sistema de medición de voltaje automatizado que se ajuste a los requerimientos que impone un sistema generador de energía como la CCM.

La pregunta que se plantea en esta investigación es: ¿es posible el diseño y la implementación de un sistema de medición del potencial eléctrico de una Celda de Combustible Microbiano que se ajuste a las características del voltaje generado y las condiciones impuestas por la dinámica del sistema que permita evaluar su desempeño eléctrico para profundizar en la comprensión de su funcionamiento?

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de medición automatizado del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano.

3.2. Objetivos Específicos

- Establecer las especificaciones técnicas para un sistema de medición del potencial eléctrico generado por una CCM.
- Diseñar un sistema prototipo capaz de medir el potencial eléctrico generado por una CCM.
- Implementar y validar el sistema de medición del potencial eléctrico generado por una CCM.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. La Energía

La energía es uno de los grandes soportes de la humanidad y el mejoramiento de la calidad de vida. La energía no es un fin en sí mismo, sino un medio para alcanzar la meta que es el desarrollo humano sostenible. Antes se creía que el crecimiento económico estaba ligado al mayor consumo de energía; sin embargo cada vez es más posible tener más crecimiento con menor consumo de energía.

4.1.1 Sistemas De Producción De Energía.

En la actualidad existen diversas formas de obtención de energía con el fin de abastecer la enorme demanda entre las principales formas de generación de energía tenemos:

Las termo eléctricas, que son sistemas mediante los cuales se transforma la energía térmica en eléctrica, los sistemas hidroeléctricos los cuales emplean el caudal de ríos para generar energía y, las fuentes alternativas de energía como son la eólica, fotovoltaica, electroquímica, sistemas de generación a partir de biomasa como la energía bioelectroquímica.

4.1.2. Energía Bioelectroquímica.

Es la energía que se obtiene a partir de reacciones de oxidación y reducción en las cuales se impliquen elementos químicos como biológicos.

4.2. Generalidades Celda De Combustible Microbiana

Una CCM es un dispositivo electroquímico que utiliza microorganismos para convertir la energía química en eléctrica. Esto es posible cuando bajo condiciones adecuadas, determinadas bacterias electro activas transfieren los electrones liberados en su actividad metabólica a un electrodo, los cuales posteriormente fluyen por un circuito externo. La viabilidad técnica de este concepto ha sido demostrada experimentalmente, en trabajos recientes, de manera que se han creado grandes expectativas en la comunidad científica de poder producir una energía renovable mediante la explotación de la biomasa contenida en las aguas residuales domésticas e industriales (Montaje de una pila de combustible microbiana para depuración de agua con producción simultánea de energía., 2012).

Al utilizarse la materia orgánica contenida en las aguas residuales como combustible, paralelamente a la producción de energía, se consigue la depuración de las aguas contaminadas. De esta manera una CCM también constituye un interesante sistema para

el tratamiento de aguas residuales, lo cual también ha sido ampliamente soportado por la experimentación y la investigación científica (Davila., 1998).

4.2.1. Arquitectura de una CCM.

En la Figura 1 se puede apreciar la arquitectura de una CCM. La que está conformada por dos cámaras, la anódica y la catódica, un separador entre ellas y un electrodo en cada cámara, los cuales se conectan mediante una resistencia externa.

En la cámara anódica se deposita un sustrato como pueden ser aguas residuales con un alto contenido de materia orgánica, en la cámara catódica se puede depositar otro sustrato diferente o incluso puede estar al aire, el separador puede ser una membrana de intercambio de protones o un puente salino, los electrodos son de grafito.

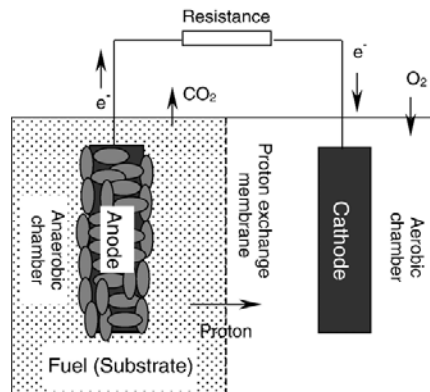


Figura 1. Arquitectura de una CCM(Liu., 2004).

4.2.2. Funcionamiento general de una CCM

La materia orgánica presente en el sustrato de la cámara anódica, libera electrones como resultado del metabolismo realizado por los microorganismos, estos electrones se acumulan en el electrodo de grafito y circulan a través de la resistencia externa hacia el electrodo de la cámara catódica, de esta manera se produce la corriente eléctrica. La liberación de electrones implica la formación de protones los cuales pasan hacia la cámara catódica a través del separador (Liu., 2004).

4.2.3. Desempeño eléctrico de las CCMs

El desempeño eléctrico de una CCM se evalúa de acuerdo a los cálculos de la intensidad de corriente, la resistencia interna (Rismani et al., 2011), la densidad de potencia y la eficiencia coulombica (Borole et al 2009). El cálculo de estos parámetros se realiza a partir de las mediciones de voltaje que se hacen sobre la resistencia externa de la CCM.

La intensidad de corriente (I), se calcula a partir de la ley de ohm: $I = V/R$, donde V es el voltaje medido en la resistencia externa R.

La resistencia interna (R_i), es un parámetro muy importante para caracterizar un generador de corriente eléctrica como lo es una CCM. Se puede obtener a partir del análisis de las curvas de polarización que se derivan de las mediciones de voltaje en la resistencia externa (Borole et al., 2009), o por la técnica de espectroscopia de impedancias que se fundamenta en la aplicación de una pequeña señal de voltaje a la celda electroquímica y posterior medición de la corriente a través de ella (Ramírez et al., 2009).

La densidad de potencia (DP) expresada como la potencia por unidad de área del electrodo anódico (Wang et al 2010) se calcula de la siguiente manera:

$$DP = IV/A \quad (1)$$

Donde, I es la corriente en amperios, V es voltaje en V y A es el área de la superficie del electrodo anódico expresado en m^2 .

La eficiencia coulombica (EC) es un parámetro que permite obtener la fracción de energía eléctrica que se puede generar en la CCM a partir de un sustrato determinado. Su medición es importante porque posibilita comparar el desempeño de diferentes CCMs. La EC se calcula como la razón entre la carga generada y la carga teórica presente en el sustrato de la cámara anódica (Sharma y Li 2010), mediante la siguiente expresión matemática:

$$EC\% = \frac{\int v dt}{RFb\Delta S V} M \times 100 \quad (2)$$

Donde, v es el voltaje de la CCM, R es la resistencia externa, F es la constante de Faraday (96485 C/mol), b es el número de moles de electrones producidos por una mol de demanda química de oxígeno (DQO), ΔS es la concentración removida de DQO (g/L), V es el volumen del líquido (L) y M es el peso molecular del oxígeno (32g/mol).

La medición del voltaje en la CCM se torna en una necesidad muy imperiosa porque es lo que permitirá la evaluación del desempeño eléctrico del sistema. El sistema de medición a utilizar se debe ajustar a condiciones muy específicas como son: lectura de voltajes muy pequeños, la toma de datos debe ser automatizada porque se requieren mediciones permanentes durante el tiempo que dura el experimento, se deben registrar los datos para posterior análisis y finalmente se deben atender varias CCMs de manera simultánea.

4.2.4 Estudios Previos CCMs

Algunas importantes aplicaciones que se han descrito son el robot Eco Bot II que permite la realización de funciones de movimiento, sensado, computación y comunicación, este dispositivo tiene incorporado una CCM para obtener un sistema eléctricamente autónomo (Du et al., 2007).

El tratamiento de aguas residuales a pequeña escala para la eliminación de proteínas y otro tipo de compuestos químicos presentes en agua (He et al., 2013).

Son diversas las revisiones científicas disponibles sobre CCMs, cada una de estas con diferentes puntos de vista, para citar algunas: Logan et al. (2006) presentan el diseño, la caracterización y el desempeño de las CCMs; Rabaey y Verstraete (2005) revisan la limitada información sobre el metabolismo energético y la naturaleza de las bacterias que usan el ánodo como aceptor de electrones; Chang et al. (2006) enfocan su discusión en el estudio de las bacterias electroquímicamente activas usadas en CCMs sin mediador que afectan el transporte de electrones. En Latinoamérica son escasas las publicaciones relacionadas con este tipo de dispositivos, en esta revisión se puntualizan en forma general los aspectos más relevantes de las CCMs con el propósito de entender las diferentes variables que afectan su operación.

En países desarrollados se sigue investigando en tecnologías como esta, potencialmente útil para procesos de remoción de materia orgánica, biorremediación y generación alternativa de energía. En entornos como el nuestro existe una gran diversidad de sustratos y microorganismos que podrían contribuir al desarrollo de CCMs, debido a que se han empleado diferentes sustratos como combustibles (Pant et al., 2010) y microorganismos que se encuentran en forma natural y abundante, tales como lodos anaeróbicos provenientes de aguas residuales, material de desecho de rellenos sanitarios, sedimentos de ríos o sedimentos marinos y muchas otras fuentes (Fuentes-Albarrán et al., 2012).

Además, se pueden desarrollar CCMs a mayor escala profundizando sobre la arquitectura misma. El enfoque global de este tipo de dispositivos logrado en esta revisión científica es un producto de un trabajo multidisciplinario de áreas de microbiología, química e ingeniería electrónica, lo que permite adelantar investigaciones básicas y aplicadas de esta fascinante área de investigación.

4.3. Sistemas de medición.

La función de un sistema de mediciones es obtener la información de un sistema físico y presentarla a un observador de forma objetiva de un número de propiedades o cualidad de un objeto o evento de tal manera que la describa (Perez et al 2004). Es decir, el resultado de la medida debe ser independiente del observador (objetiva), basada en la experimentación (empírica) y de tal forma que exista una correspondencia entre las relaciones numéricas y las relaciones entre las propiedades descritas.

4.3.1. Estructura básica de un sistema de medición.

En la Figura 2 se muestra el esquema básico de un sistema de medición: la medición se hace sobre un evento físico causal, para lo cual se utiliza un sensor adecuado con el fin de obtener una señal eléctrica que debe ser procesada para ajustarla a unas condiciones para poder presentar los resultados de forma que pueda ser percibida por nuestros sentidos y hacer un registro de los datos obtenidos cuando se requiera.

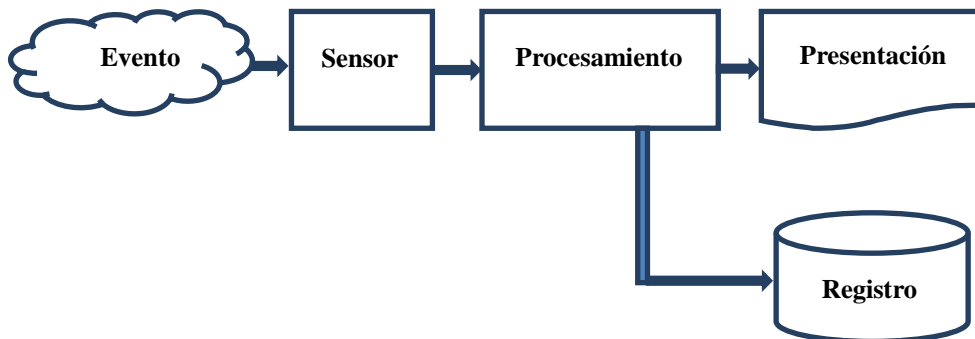


Figura 2. Esquema básico de un sistema de medición (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano)

Un sensor es un dispositivo, que a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida en forma de voltaje corriente u otra variable física proporcional a la variable medida. En un sentido más amplio se podría decir que el sensor es una manera de ampliar los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas, que por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente (Pallas., 2008).

El procesamiento de la señal incluye una serie de transformaciones de tipo analógico y/o digital que se hacen sobre la señal de salida del sensor, para obtener una señal apta para ser presentada, registrada y que permita un tratamiento posterior mediante un equipo o instrumento de análisis. Si la señal de salida del sensor es analógica, la etapa de procesamiento incluye dos partes: el procesamiento analógico y el procesamiento digital, en ambos se hace mediante un conjunto de circuitos electrónicos que cumplen diversas funciones como filtrado, amplificación, adaptación de impedancias y transformaciones digitales adecuadas.

La presentación de los resultados del proceso de medición se puede hacer de diferentes formas, lo más común es mediante una representación numérica, pero también se puede tener una representación gráfica o acústica. Una representación numérica, consiste en asignarle un número que establece una estimación cuantitativa del fenómeno en observación, esta cuantificación debe estar acorde a lo establecido por la comunidad científica. Es decir, si por ejemplo se está midiendo la temperatura, se debe establecer la escala de medición (escala Kelvin, Celsius u otra), si es la escala Celsius, debe quedar claro que valores negativos indican temperaturas por debajo de cero grados asociadas al frío y valores positivos indican temperaturas asociadas al calor y entre más grande sea la cantidad indicada el calor es mayor.

Finalmente, el registro de datos puede ser muy importante para análisis posteriores, para evaluar la traza del fenómeno en un periodo de tiempo determinado o para realizar cálculos adicionales a partir de unos datos básicos.

5. METODOLOGIA.

5.1. Investigación Preliminar

Se hizo una revisión documental de la literatura científica relacionada con las CCMs, también se participó de actividades de experimentación planificadas por el grupo de investigación en BIOELECTROQUIMICA junto a profesores y estudiantes de los departamentos de Biología y Química quienes desarrollan sus trabajos de investigación.

En este proceso se logró entender en términos generales como opera una CCM entendiéndola como generador de energía eléctrica y cuáles son los indicadores que muestran su desempeño eléctrico y sus características. La comprensión del fenómeno eléctrico en este sistema y el conocimiento de la dinámica de la experimentación, pruebas y toma de datos, conduce a la definición de las especificaciones técnicas para el desarrollo de un sistema automatizado que permita medir el potencial eléctrico generado en una CCM.

5.2. Diseño preliminar

Se evalúa las características que debe cumplir el sistema de medición para cada una de las necesidades del grupo de investigación en BIOELECTROQUIMICA. Los principales aspectos que se tienen en cuenta en la presentación del voltaje medido en la resistencia externa de las CCms son la presentación en una pantalla LCD, el almacenamiento en memoria SD y la presentación de los datos (software).

El resultado de esta etapa fue el diagrama en bloques del sistema, el cual consiste en la definición de un conjunto de bloques operativos tanto en hardware como en software los cuales cumplen cada uno una función específica y la interacción con los otros bloques determina la estructura general del sistema. Cada bloque se describe en términos de lo que debe hacer y cómo se comunica con otros, esta dinámica permite además la planificación de las pruebas de validación.

5.3. Diseño detallado

Con el diseño detallado se obtuvo los planos con los circuitos electrónicos de cada una de las partes del diagrama en bloques, se identificaron plenamente los componentes electrónicos, se establecieron los diagramas de flujo correspondientes a los módulos de software y su implementación en el lenguaje apropiado a la tecnología aplicada.

Una vez se obtuvieron los planos circuitales de cada bloque y los módulos de software se hicieron diferentes tipos de experimentos en el laboratorio de electrónica buscando las mejores respuestas de acuerdo a lo planificado. El proceso de experimentación condujo al rediseño de los módulos tanto de hardware como de software.

Es muy importante destacar que es en esta etapa donde ya se inicia el proceso de validación del sistema, es precisamente el rediseño de los módulos funcionales el resultado de las primeras pruebas de validación.

El siguiente paso en la etapa de diseño detallado es interconectar los diferentes bloques funcionales para verificar la funcionalidad del sistema, esto también condujo al rediseño de algunos componentes e incluso a la redefinición de algunos parámetros de entrada, de salida, etc.

Finalmente, en laboratorio se obtiene un primer prototipo con sus diferentes componentes y también se hicieron las pruebas de validación.

5.4. Implementación

La etapa de implementación consiste básicamente en el diseño y fabricación de los circuitos impresos necesarios para la puesta en funcionamiento del sistema. En esta instancia también se requiere hacer pruebas de validación para certificar el que el sistema de medición funcione de acuerdo al planificado.

5.5. Validación del sistema

La validación del sistema consiste en un conjunto de pruebas con las cuales se corrobora el funcionamiento de cada bloque de hardware, de cada módulo de software y del sistema en general cuando esta interconectado. Se puede decir que el proceso de validación fue una actividad que se hizo de manera permanente después que se inició el diseño preliminar para una mejora continua sin retroceso de información.

5.6. Especificaciones Técnicas del Sistema de Medición.

La Figura 3 muestra el comportamiento eléctrico de dos CCMs, una que utiliza como separador puente salino y otra que utiliza una MIP, implementadas dentro de las actividades de investigación realizadas por el grupo de investigación en BIOELECTROQUIMICA de la Universidad de Nariño.

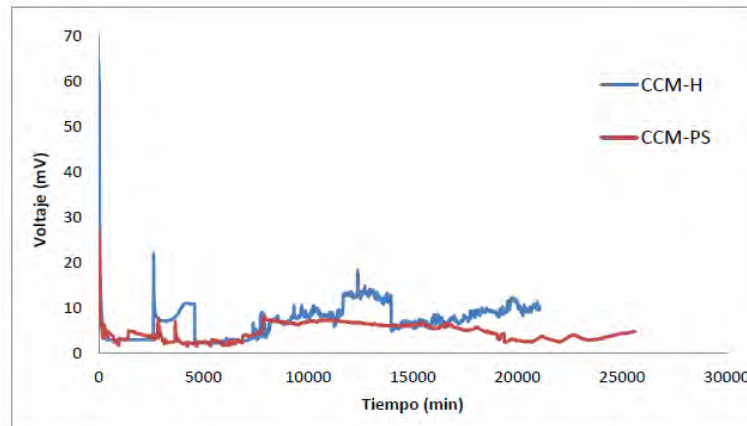


Figura 3. Grafica voltaje vs tiempo en circuito cerrado

Los voltajes obtenidos son muy pequeños varían entre 0 y 28 mV en un caso y entre 0 y 65 mV en otro caso. Los voltajes máximos se presentan cuando se cierra el circuito, posteriormente el voltaje decrece presentando pequeñas fluctuaciones hasta llegar a valores muy cercanos a cero después de 16 días de operación.

La anterior observación permite establecer algunas especificaciones técnicas que debe cumplir el sistema de medición:

- El sistema debe permitir la medición de voltajes muy pequeños, en este caso se determina que el rango de medición es de 0 a 1V.
- La medición de voltajes debe ser permanente durante varios días por lo tanto se debe hacer de manera automática.
- Los datos de la medición se deben registrar en un archivo, de tal manera que se puedan utilizar posteriormente para el cálculo y la visualización de los parámetros del desempeño eléctrico de la CCM como son la densidad de potencia, la eficiencia coulombica y la resistencia interna.
- Adicionalmente a lo anterior, el sistema debe brindar la posibilidad de realizar la medición de manera simultánea hasta de 8 CCMs.

5.7. Diseño preliminar.

De acuerdo a las anteriores especificaciones y teniendo en cuenta que la medición del voltaje se realiza en la resistencia externa de la CCM, se plantea el diseño preliminar del sistema. La Figura 4 muestra el diagrama en bloques, que explica la funcionalidad del mismo.



Figura 4. Diagrama en bloques del Sistema de Medición(Hormaza, F., Caicedo, E., 2016).

Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano)

Donde:

CCM. Sistema bioelectroquímico que convierte la energía química en energía eléctrica que produce una caída de tensión en la resistencia externa.

Filtro LC. Debido a que la señal de la CCM es muy pequeña es necesario amplificarla, pero se presentaron muchos inconvenientes para realizar este proceso de manera directa por lo que fue necesario interponer una etapa que constituye un filtro pasa bajas. Este resultado se logra después de múltiples actividades de experimentación y pruebas, muy probablemente las componentes de alta frecuencia son ruidos que afectan la etapa de toma de datos.

Amplificación JFET. Es un circuito amplificador de señal cuya función es suministrar una señal de mayor voltaje que permita realizar las siguientes etapas de procesamiento para cumplir con los propósitos del proyecto. Este circuito amplificador se implementa con un transistor JFET.

Filtro RC. Es un filtro pasa bajas cuyo propósito fundamental es disminuir los efectos del ruido que se presenta debido a las interferencias de la red eléctrica.

Procesamiento digital. Esta etapa de procesamiento implica la conversión de la señal analógica a digital, posteriormente se implementa un filtro digital, se hacen procesos de calibración y ajuste, presentación de datos en una pantalla LCD y almacenamiento de datos en memoria SD.

Presentación. En una pantalla LCD se presenta el valor del voltaje actual y la identificación de su correspondiente CCM y el conjunto de datos adquiridos se almacenan en una memoria SD para luego ser procesados, mediante una aplicación, que permite graficar el voltaje y calcular los parámetros del desempeño eléctrico.

5.8. Diseño detallado.

A continuación, se hace la descripción detallada del proceso de diseño de cada uno de los componentes del diagrama en bloques. Este proceso incluye los respectivos cálculos, de acuerdo a la teoría de análisis de circuitos que conducen a la definición de componentes eléctricos que cumplen con las especificaciones técnicas definidas y los requisitos para resolver situaciones relacionadas con ruidos e interferencias que pueden afectar el procesamiento de la señal. De igual manera se detallan los procesos de software que fue necesario implementar para el correspondiente procesamiento digital.

Para abordar el proceso de diseño detallado se utilizó una CCM constituida por dos cámaras, la anódica y la catódica, separadas por un puente salino, se utilizaron electrodos de grafito y resistencia externa de 500 Ω . En la cámara anódica se adiciono solución anódica y se depositó aguas residuales del río Pasto, y en la cámara catódica se adiciono solución catódica y lodo obtenido en relleno sanitario.

5.8.1. Diseño detallado del Filtro LC.

La Figura 5 muestra el circuito eléctrico del filtro LC que se implementó y posteriormente se describe su respectivo análisis.

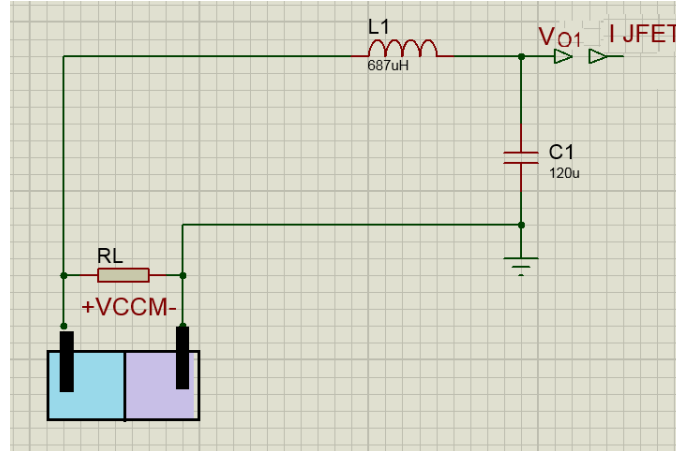


Figura 5. Filtro LC (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano)
La función de transferencia del filtro LC :

$$\frac{V_{o1}}{V_{CCM}} = \frac{\frac{1}{sC}}{sL + \frac{1}{sC}} \quad (3)$$

Por lo tanto:

$$\frac{V_{o1}}{V_{CCM}} = \frac{1}{s^2CL + 1} \quad (4)$$

En el dominio de la frecuencia se obtiene:

$$\frac{V_{o1}}{V_{CCM}} = \frac{1}{(j\omega)^2CL + 1} \quad (6)$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{CCM}} = \frac{1}{1 - \omega^2CL} \quad (5)$$

De la expresión 6 se puede establecer que:

La ganancia para frecuencia $\omega = 0$:

$$\frac{V_{o1}}{V_{CCM}} = \frac{1}{1 - 0^2CL} = 1 \quad (7)$$

Y la frecuencia de resonancia (cuando la ganancia es teóricamente infinita)

$$\begin{aligned} 1 - \omega^2CL &= 0 \\ 1 &= \omega^2CL \end{aligned} \quad \omega^2 = \frac{1}{CL}$$

$$w = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

$$\quad \quad \quad (10)$$

$$\quad \quad \quad (11)$$

(8)

Por lo que la frecuencia de corte es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (12)$$

Experimentalmente se encontró que una frecuencia de corte de 500 Hz contribuye a mejorar la señal, se escogió un inductor 687 uH con lo que se obtiene un capacitor de 147 uF.

Debido a que en el comercio el condensador más cercano que se consigue es de 120 uF con el cual la frecuencia de corte aproximada a que se obtiene es de 550 Hz.

En consecuencia la función de transferencia es:

$$\frac{V_{o1}}{V_{CCM}} = \frac{1}{s^2 687 \cdot 10^{-6} \cdot 120 \cdot 10^{-6} + 1} \quad (13)$$

Cuya respuesta en frecuencia se muestra en la Figura 6.

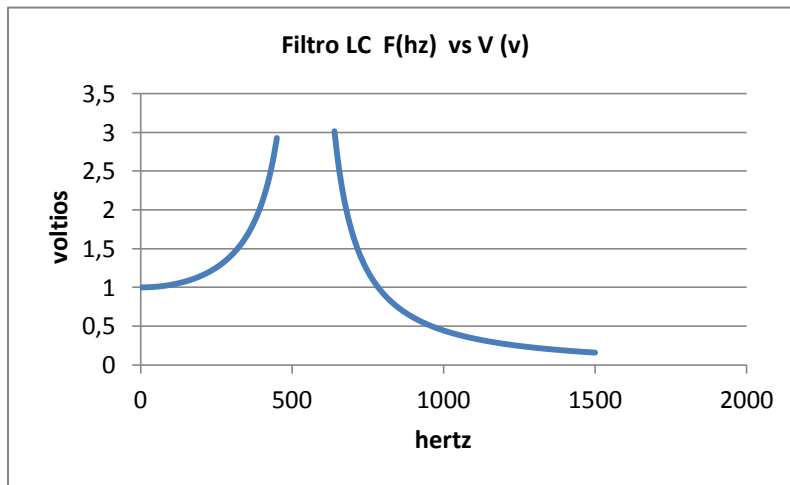


Figura 6. Respuesta en frecuencia del filtro LC (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

5.8.2. Diseño detallado del Amplificación JFET.

La señal que proviene del filtro LC es muy pequeña por lo que es necesario amplificarla, para ello se diseña un circuito amplificador con base en un transistor JFET. Se seleccionó este transistor porque su característica de alta impedancia se acomoda muy bien a las condiciones de baja potencia de la señal.

En la Figura 7 se muestra el circuito eléctrico del amplificador JFET.

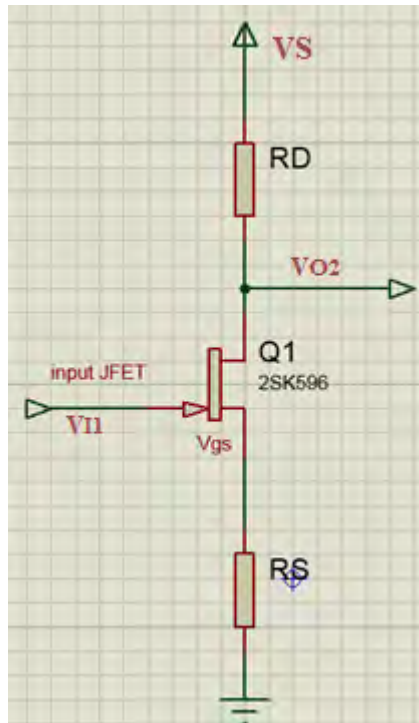


Figura 7. Amplificador JFET (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

No existe una relación lineal entre las cantidades de salida y entrada de un JFET. La ecuación de Shockley define la relación entre I_D y V_{GS} (Boylestad y Nashelski.,1997).

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{p(off)}} \right)^2 \quad (14)$$

De acuerdo a la hoja de especificaciones del transistor JFET 2SK596:

$$V_{p(off)} = -0,6 V$$

$$I_{DSS} = 800 \mu A$$

Por lo tanto la curva de transconductancia es como se muestra en la Figura 8.

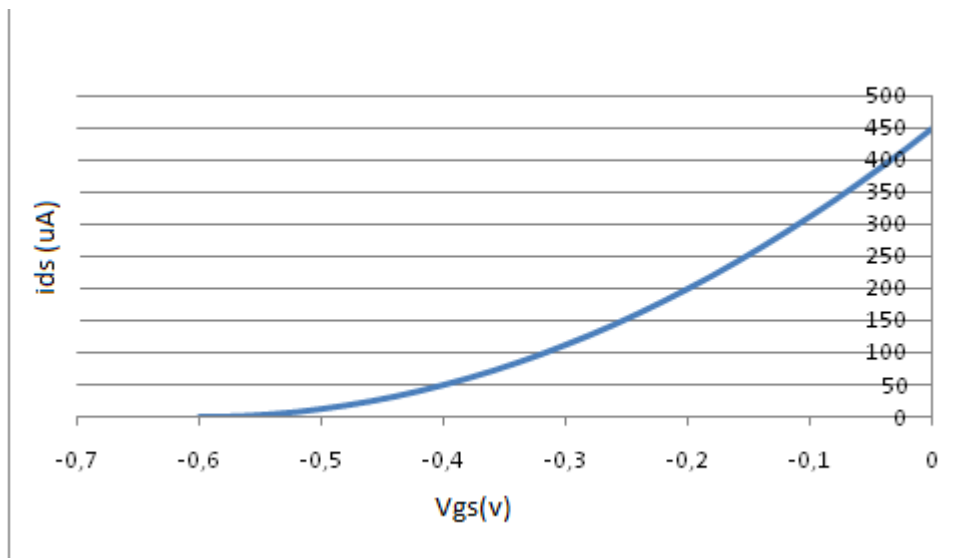


Figura 8. Curba de transconductancia para JFET 2SK596 típico (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

De acuerdo al circuito de la Figura 7 y aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff en la malla de compuerta se tiene:

$$-V_{I1} + V_{GS} + V_{RS} = 0 \quad (15)$$

$$-V_{I1} + V_{GS} + I_D * R_S = 0 \quad (16)$$

$$I_D = -V_{GS}/R_S + V_{I1}/R_S \quad (17)$$

Sobre el mismo plano (V_{GS} vs I_D), se grafican las expresiones (14) y (17) y su intersección representa el punto de operación del circuito.

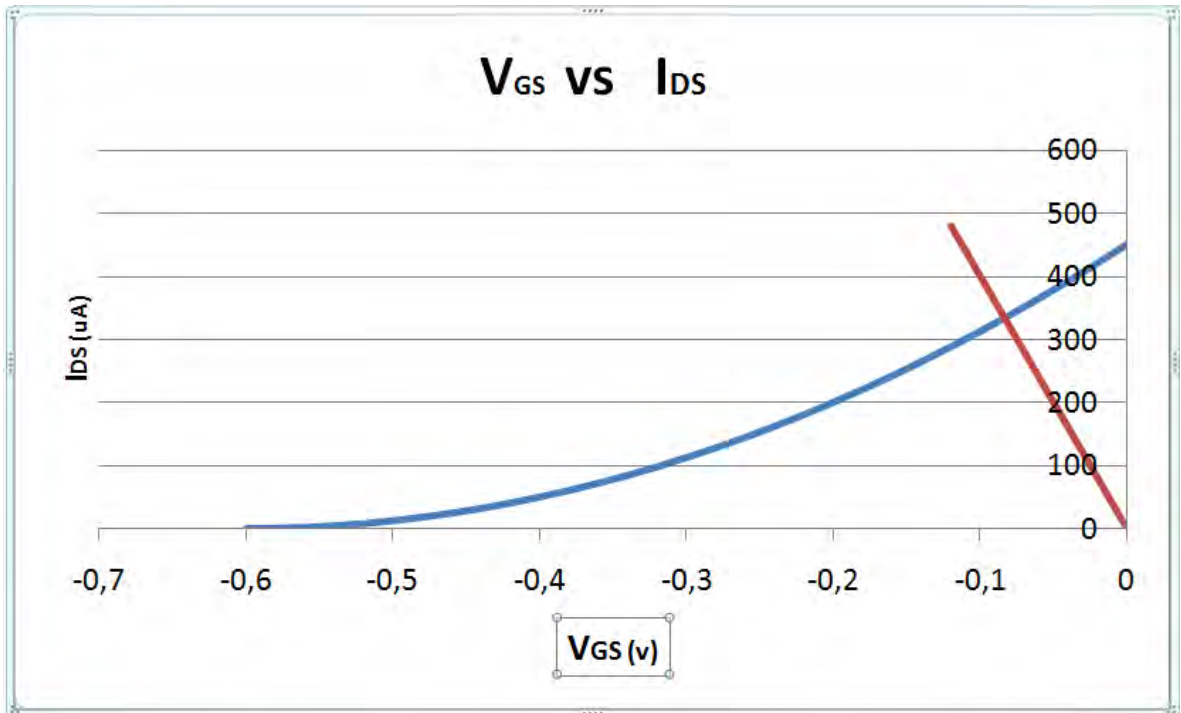


Figura 9. Punto de operación del amplificador JFET (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

En la Figura 9, se puede observar que la pendiente de la recta depende de los valores de las resistencias del circuito, esta situación permite establecer dos canales de operación con los cuales se puede obtener mayor precisión para la medición del voltaje. De esta manera se puede establecer el canal A para amplificar señales en el rango de 0 a 200 mV y el canal B en el rango de 200mV a 800 mV.

Con el fin de que el voltaje V_{GS} siempre sea menor a cero, para que el transistor opere en la región adecuada, se tiene que el V_{RS} tanto para el canal A como en el B deben mantenerse en un voltio para sus voltajes extremos de cada canal 1 V y 0,2V además se tiene que la corriente máxima se da cuando $V_{GS}=0$.

$$V_{I1} = V_{RS} \quad (18)$$

$$V_{I1} = I_{DS} * R_S \quad (19)$$

Por otro lado, se tiene que la corriente es máxima cuando $V_{GS}=0$. De acuerdo a la hoja de especificaciones del JFET se asume que la corriente máxima es de 800uA.

Para el canal A con un voltaje de CCM o V_{input} máximo =200 mV se tiene:

$$0,2v = 800u A * R_S \quad (20)$$

$$\frac{0,2V}{800u A} = 250 \Omega \quad (21)$$

Para el canal B se tiene:

$$\frac{1V}{800\mu A} = 1250 \Omega \quad (22)$$

Al analizar la malla drenaje surtidor de la Figura 7 se tiene que para corrientes pequeñas (canal A) con un voltaje V_{GS} de $-0,2V$ se encontró una corriente de $174 \mu A$ al circuito se lo alimenta con una fuente de alimentación de $9 V$

$$V_S - V_{RD} - V_{DS} - V_{RS} = 0 \quad (23)$$

$$V_S - V_{RD} = V_{DS} + V_{RS} \quad (24)$$

Para que la digitalización sea posible se tiene que el voltaje máximo $V_{DS} + V_{RS} = 5$

$$9 - V_{RD} = 5 \quad (25)$$

$$174\mu A * R_D = 4v \quad (26)$$

$$\frac{4v}{174\mu A} \approx 22\Omega \quad (27)$$

Para el canal B con un voltaje V_{GS} de $-1V$ se encontró una corriente de $80\mu A$ empleando una fuente de alimentación de $9 V$. Aplicando las ecuaciones 29 y 30

$$9 - V_{RD} = 5 \quad (28)$$

$$80\mu A * R_D = 4 \quad (29)$$

$$\frac{4V}{80\mu A} = 50000 \Omega \quad (30)$$

Por lo tanto el circuito para el canal A tiene las resistencias R_S aproximada de 250Ω y R_D $20 k \Omega$ y para el canal B las resistencias R_S es igual a $1,2 \Omega$ R_D $50 k \Omega$, como lo indica la Figura 7.

Debido a que se emplea como amplificación JFET se debe calcular la relación entre el voltaje de entrada V_{CCM} el voltaje de salida V_{o2} para lo que es necesario realizar análisis circuital a la malla de entrada o malla1 y a la malla de salida malla 2 como se muestra en la Figura10 y tener en cuenta la ecuación 14.

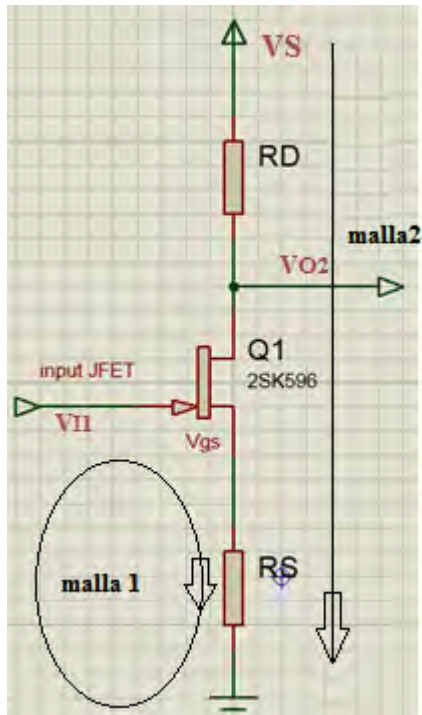


Figura 10. Descripción de las mallas para un circuito JFET (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Se realiza la sumatoria de los voltajes de la malla 1 teniendo en cuenta que V_{I1} corresponde al voltaje de la CCM V_{CCM} y la corriente que circula a través de la resistencia R_S es prácticamente igual a la que circula por la resistencia R_D .

$$\begin{aligned} V_{CCM} - V_{GS} - V_{RS} &= 0 \\ V_{CCM} - V_{GS} - I_D R_S &= 0 \end{aligned} \quad (31) \quad (32)$$

De donde se despeja V_{GS}

$$V_{CCM} - I_D R_S = V_{GS} \quad (33)$$

Expresión que se sustituye en la ecuación 14.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{CCM} - I_D R_S}{V_{p(off)}} \right)^2 \quad (34)$$

Debido a que el voltaje V_{O2} depende de la corriente I_D se despeja de la malla 2.

$$V_{DD} = V_{RD} + V_{O2} \quad (35)$$

Despejando el voltaje de salida V_{O2} y expresando en términos de I_D se tiene

$$V_{02} = V_S - I_D R_D \quad (36)$$

$$\frac{V_S - V_{02}}{R_D} = I_D \quad (37)$$

Expresión que se sustituye en la ecuación 34.

$$\frac{V_S - V_{OUT}}{R_D} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{CCM} - \frac{V_S - V_{OUT}}{R_D} R_S}{V_{p(off)}} \right)^2 \quad (38)$$

Expandiendo la potencia y reduciendo términos se tiene.

$$0 = \left(\frac{V_{p(off)} - V_{CCM}}{V_{p(off)}} \right)^2 + \left(\frac{2 R_S (V_{p(off)} - V_{CCM})}{R_D V_{p(off)}^2} - \frac{1}{R_D I_{DSS}} \right) (V_S - V_{OUT}) + \left(\frac{V_S - V_{OUT}}{V_{p(off)}} * \frac{R_S}{R_D} \right)^2 \quad (39)$$

Resolviendo esta ecuación:

$$\frac{V_S - V_{OUT}}{I_{DSS}} = \frac{- (2 R_S I_{DSS} (V_{p(off)} - V_{CCM}) - V_{p(off)}^2) \pm \sqrt{\left((2 R_S I_{DSS} (V_{p(off)} - V_{CCM}) - V_{p(off)}^2)^2 - I_{DSS}^2 (2 R_S (V_{p(off)} - V_{CCM}))^2 \right)}}{(2 R_S^2)} \quad (40)$$

Con el fin de conocer el voltaje de salida con respecto al voltaje de entrada se plantea la ecuación para el canal A como para el canal B con los valores de los elementos establecidos para estos y I_{DSS} y $V_{p(off)}$ encontrados para cada canal.

Evaluando en los voltajes extremos producidos por la CCM para el canal A 0V.

$$V_{CCM} = 0$$

Para lo que se obtiene dos soluciones

$$\text{Solución 1: } 4.81 \quad \text{Solución 2: } -788,385$$

Se escoge la solución uno por que el voltaje generado se encuentra en el rango de voltajes producidos por el J FET y apto para la digitalización.

Canal B. Evaluando en los voltajes extremos producidos por la CCM para el canal B 0.2 V.

$$V_{CCM} = 0.2$$

Esta es una ecuación cuadrática cuyas soluciones son:

$$\text{Solución 1: } 3,147 \quad \text{Solución 2: } -224,42$$

Se escoge la solución uno por que el voltaje generado se encuentra en el rango de voltajes producidos por el J FET y apto para la digitalización.

Se realiza el montaje a un JFET como se muestra en la figura 10 al cual se realiza mediciones del voltaje generado por una CCM y se registra el voltaje de salida en tabla 1.

VCCM	VOUT
0	4,71032127
0,015	4,53344572
0,021	4,35299692
0,032	4,16897489
0,041	3,98137961
0,049	3,79021108
0,06	3,59546932
0,074	3,39715431
0,081	3,19526605
0,091	2,98980456
0,102	2,78076981
0,112	2,56816183
0,125	2,3519806
0,137	2,13222613
0,141	1,90889842
0,154	1,68199746
0,161	1,45152326
0,171	1,21747582
0,183	0,97985513
0,191	0,7386612
0,202	0,49389402
0,209	0,2455536

Tabla 1. Voltaje de entrada de CCM y salida del JFET (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

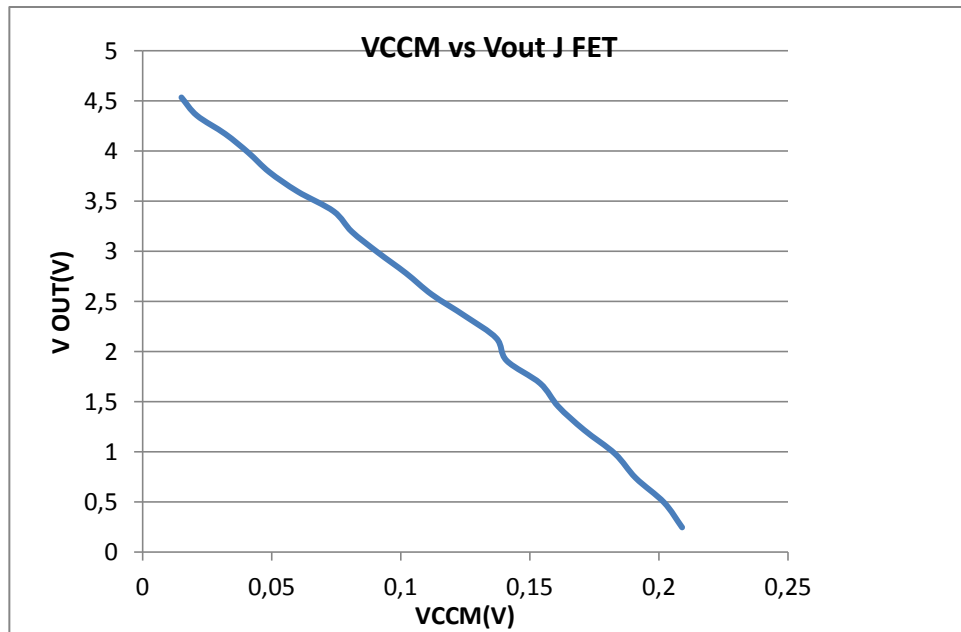


Figura 11. Representación gráfica voltaje de entrada de CCM y salida del JFET (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

En la figura 11 es evidente que los J FET pueden ser usados como sistema de amplificación para las CCMs y además que en algunos intervalos podría trabajar de manera lineal.

5.8.3. Diseño detallado del Filtro RC.

Después de la etapa de amplificación se observó algunas anomalías, relacionadas probablemente con la frecuencia de la red eléctrica o ruidos generados por otros aparatos eléctricos o electrodomésticos que se encuentran cerca. Experimentalmente se encontró una respuesta adecuada implementando el filtro que se muestra en la Figura 12.

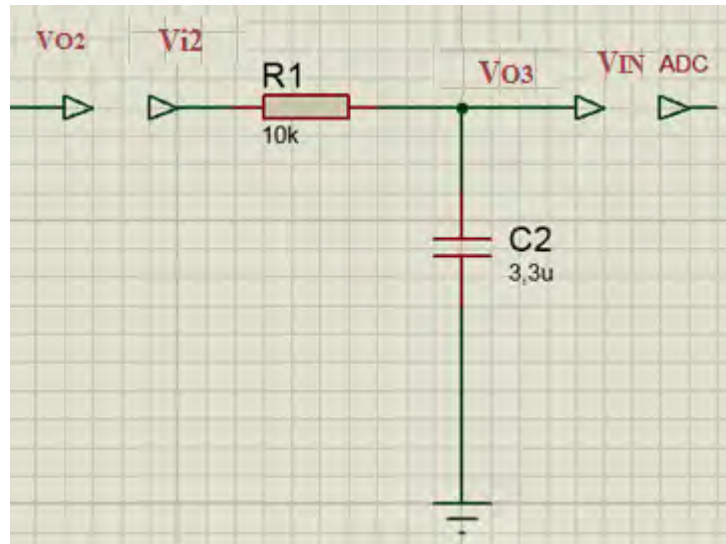


Figura 12. Diagrama circuital filtro RC (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

La función de transferencia es:

$$\frac{V_{O3}}{V_{I2}} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (41)$$

$$\frac{V_{O3}}{V_{I2}} = \frac{1}{j\omega RC + 1} \quad (42)$$

$$\omega_{02} = \frac{1}{RC} \quad (43)$$

Por lo que la frecuencia de corte es:

$$f_{02} = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad (44)$$

De donde se define una frecuencia de corte de 5 HZ para lo cual se selecciona una resistencia de 10 K:

$$5 = \frac{1}{2 * \pi * 10000 * C} \quad (45)$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * 10000 * 5} \quad (46)$$

Lo que resulta una capacitancia de 3,18 microfaradios por lo que se emplea un capacitor de 3,3 microfaradios.

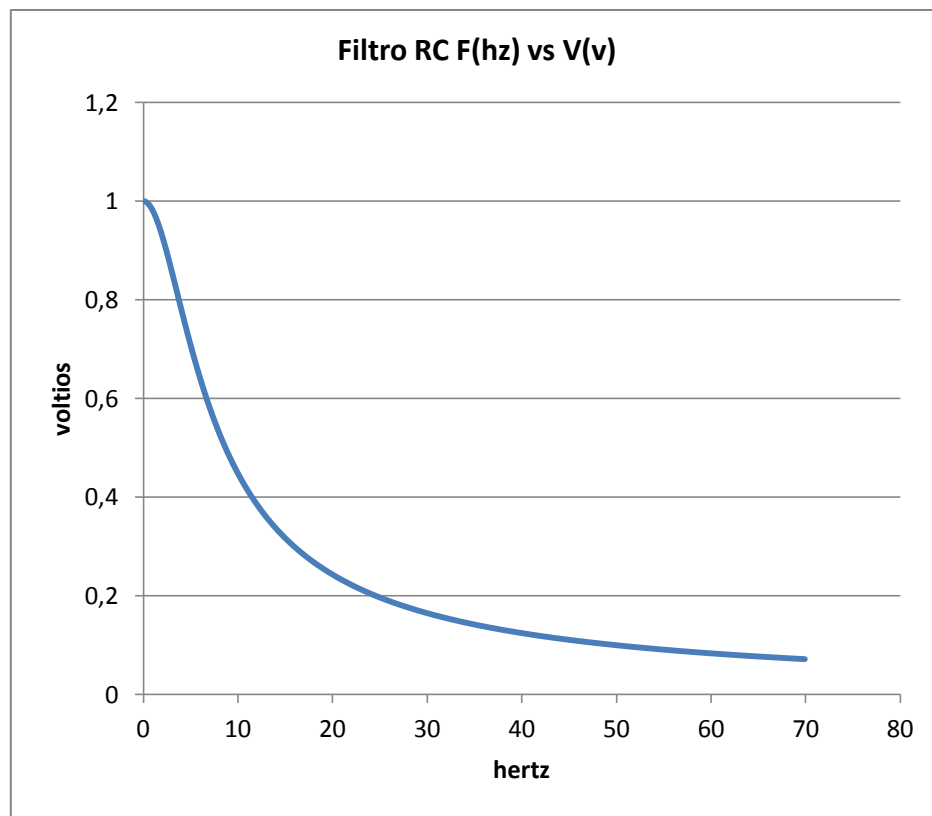


Figura 13. Respuesta de frecuencia del filtro RC (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

5.8.4. Diseño detallado del procesamiento digital.

En la etapa de procesamiento digital se utilizó un ARDUINO el cual es una plataforma de hardware libre basada en un circuito electrónico con un micro controlador, puertos de entrada/salida y un entorno de desarrollo adecuado para facilitar el diseño de sistemas electrónicos.

De manera particular se utilizó el Arduino Mega el cual está basado en un microcontrolador ATmega2560. Tiene 54 pines de entradas/salidas digitales, 14 de las cuales pueden ser utilizadas como salidas PWM, 16 entradas analógicas con un convertidor A/D de diez bits, 4 UARTs, puertos seriales por hardware, su frecuencia de trabajo está determinada por un cristal oscilador de 16 Mhz, conexión USB, jack de alimentación, conector ICSP y botón de reset. En la Figura 14 se observa el ARDUINO MEGA 2560(arduino. arduino mega.,2012).



Figura 14. Arduino MEGA 2560 ARDUINO MEGA 2560(arduino. arduino mega.,2012).

Los procesos que se realizan con el ARDUINO son: conversión de la señal analógica a digital, implementación de un filtro digital, calibración ajuste y determinación del canal A o B lo cual se realiza de manera automática teniendo en cuenta el valor de voltaje en que se encuentra cada CCMSi es menor de 200 mV se emplea el canal A y si es mayor el canal B, presentación de datos en pantalla LCD y almacenamiento de datos en memoria SD. La Figura 16 muestra el diagrama de flujo que explica el procesamiento digital de la señal.

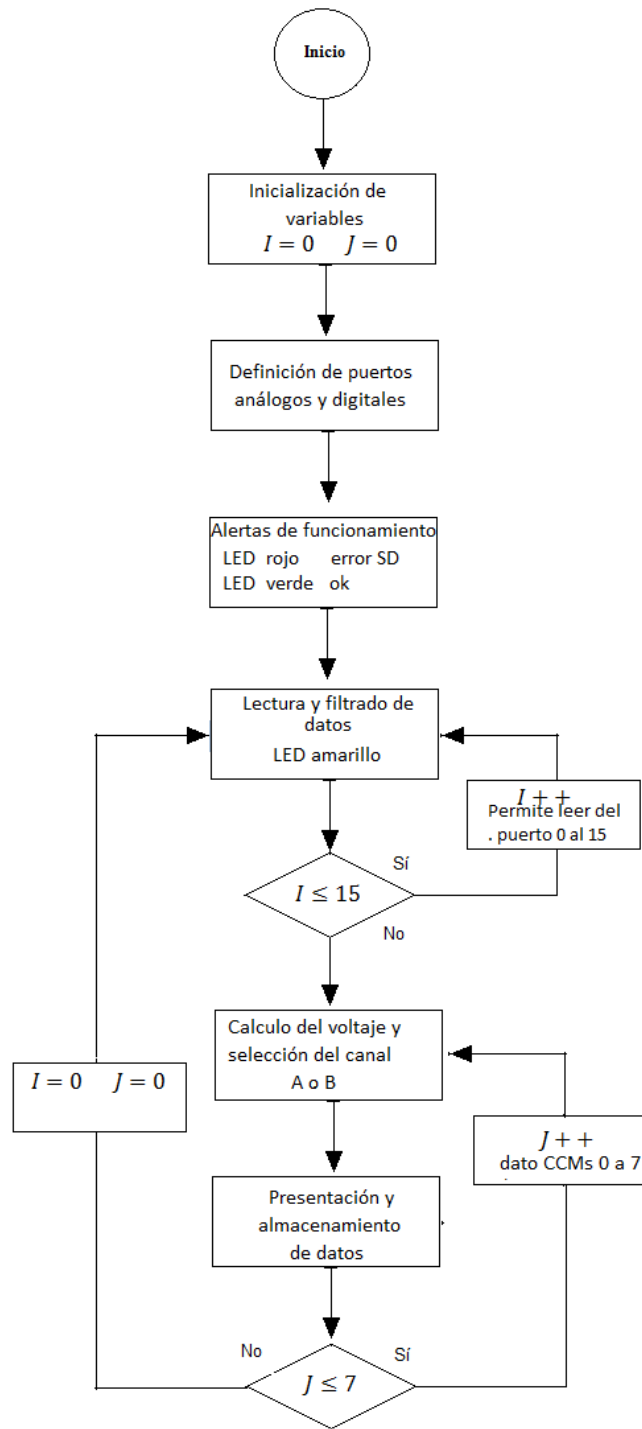


Figura 15. Diagrama de flujo del procesamiento digital (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Inicialización de librerías, vectores y constantes.

Inicialmente se incluye las librerías a emplear como son las de comunicación SPI, manejo de la micro SD, manejo display de cristal liquido con su respectiva configuración de pines. A demás se debe especificar los vectores que se emplearan para almacenar la información y los que se emplean en el proceso de calibración y final mente se comprueba que se encuentre la micro SD y se crea el archivo de texto en el cual se almacenara la información.

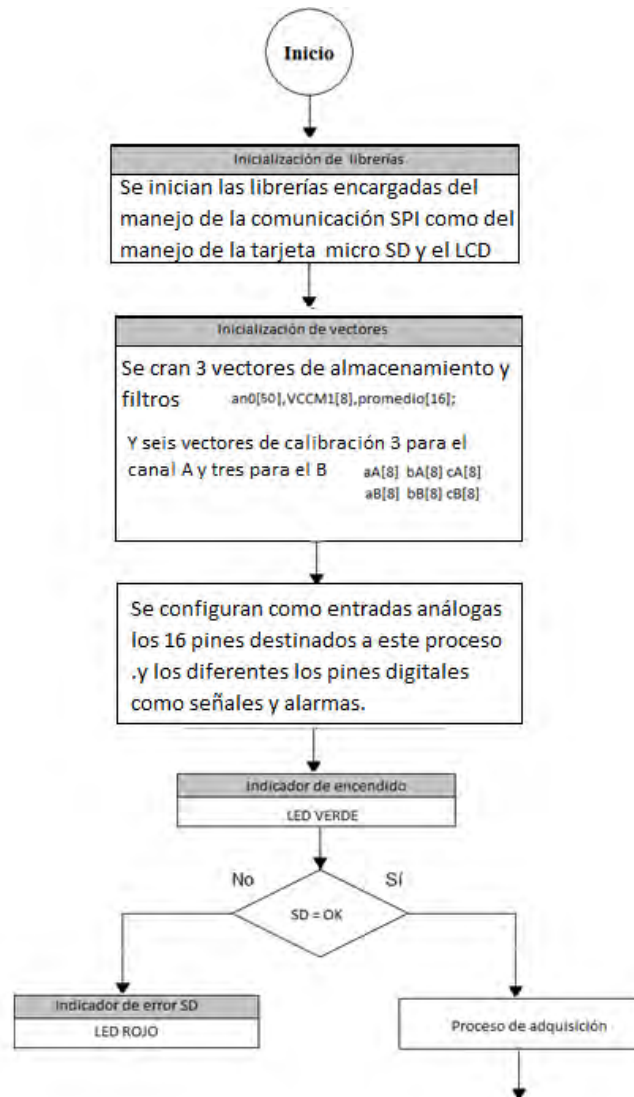


Figura 16. Diagrama de flujo del inicialización del procesamiento digital.
(Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

5.8.5. Diseño detallado de Lectura y procesamiento de datos.

En este proceso se adquiere la señal que proviene del canal A de la CCM 0 a través del puerto analógico 0, Primero se hace la conversión A/D, se toman 50 muestras cada 20 ms, de la misma señal las cuales son procesadas en un filtro digital, como resultado se tiene un valor el cual es almacenado.

El mismo proceso se realiza con las señales correspondientes a los canales A y B de cada CCM las cuales estarán presentes en los pines A0 a A15 pines destinados a la conversión A/D, como lo muestra la Figura 17.

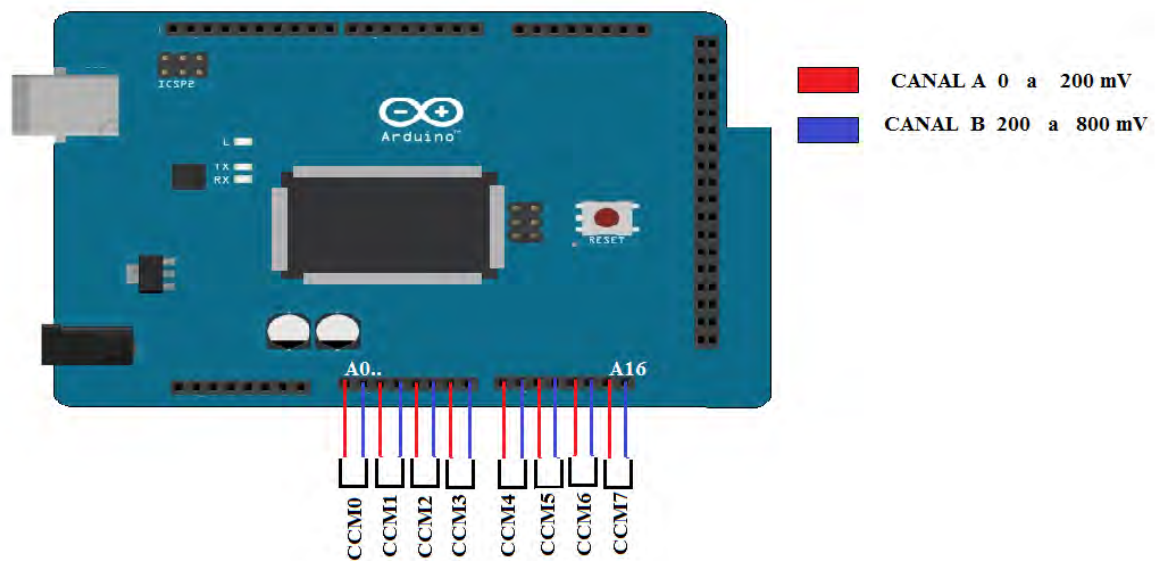


Figura 17. Entrada de datos al ARDUINO (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

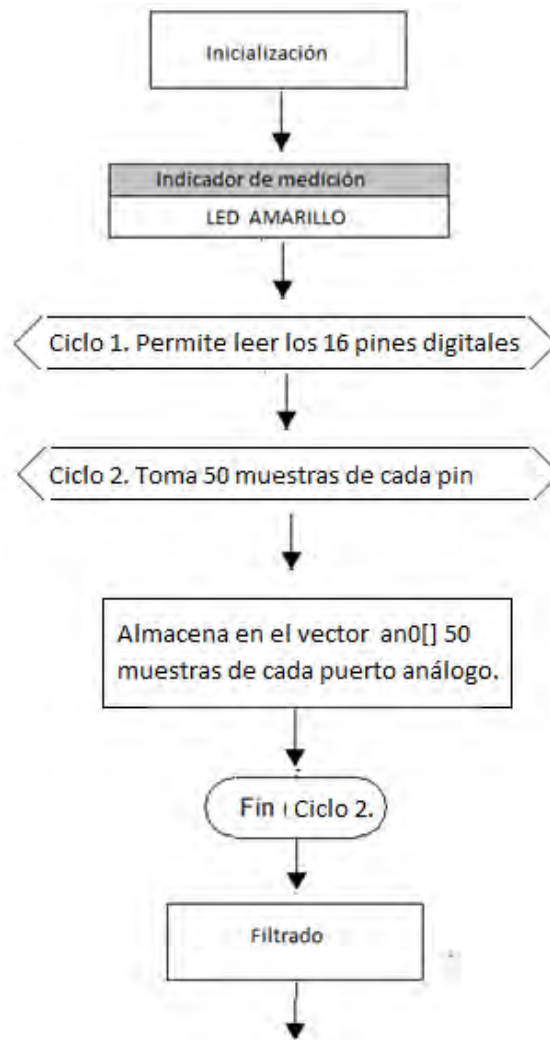


Figura 18. Diagrama de flujo lectura y adquisición de datos. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

5.8.6. Diseño detallado del Filtro digital.

Los filtros digitales son sistemas usados para modificar una señal mediante el uso de un algoritmo en el cual una señal digital es transformada en una segunda secuencia de muestras o señal digital de salida.

Para la implementación del Filtro Digital se recogen cincuenta muestras con una frecuencia de muestreo de 40 Hertz, La frecuencia se estableció teniendo en cuenta el teorema de Nyquits de acuerdo al cual solo pueden ser reconstruidas señales con una frecuencia f_s mayor al doble de la frecuencia máxima a muestrear para este caso

$$fs = 2(20 \text{ Hz}) = 40 \text{ Hz} \quad (47)$$

Ya que el cambio de los voltajes de la CCM no es inmediato se espera una serie en forma de diente de sierra el cual es almacenado en el vector A y suavizado por un filtro de media móvil de orden cinco, el cual entrega 45 datos almacenados en el vector B para finalmente ser promediados.

$$B(i) = \frac{A(i)+A(i+1)+A(i+2)+A(i+3)+A(i+4)+A(i+5)}{5} \quad (48)$$

Debido a que de cada toma de datos solo se registrara un valor el dato registrado será.

$$\frac{\sum_0^{245} B(i)}{45} = V_{\text{DIG}}(55)$$

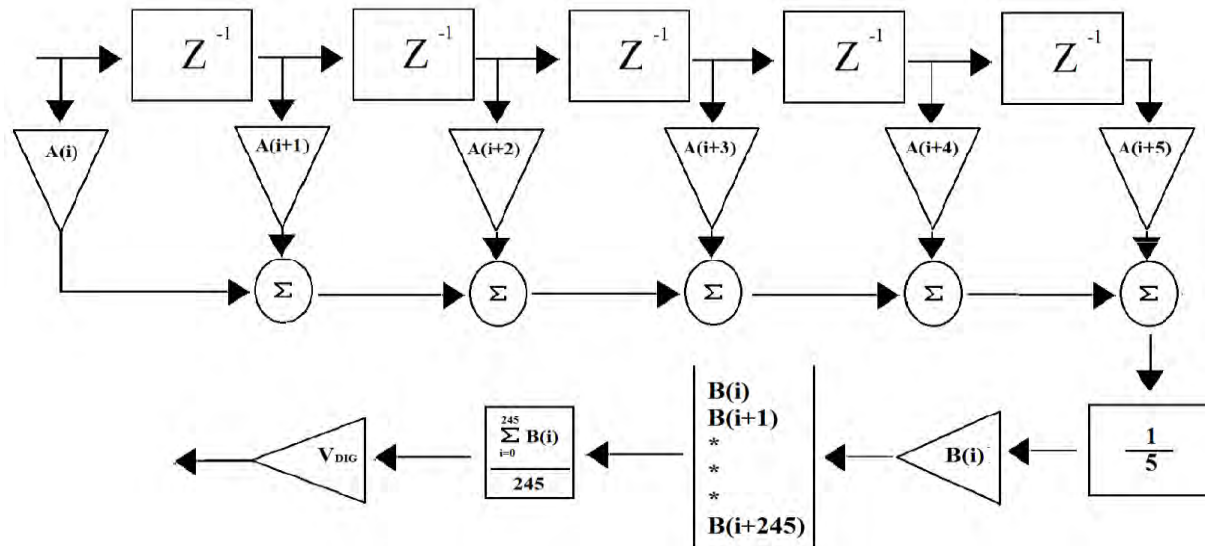


Figura 19. Diagrama del filtro digital. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

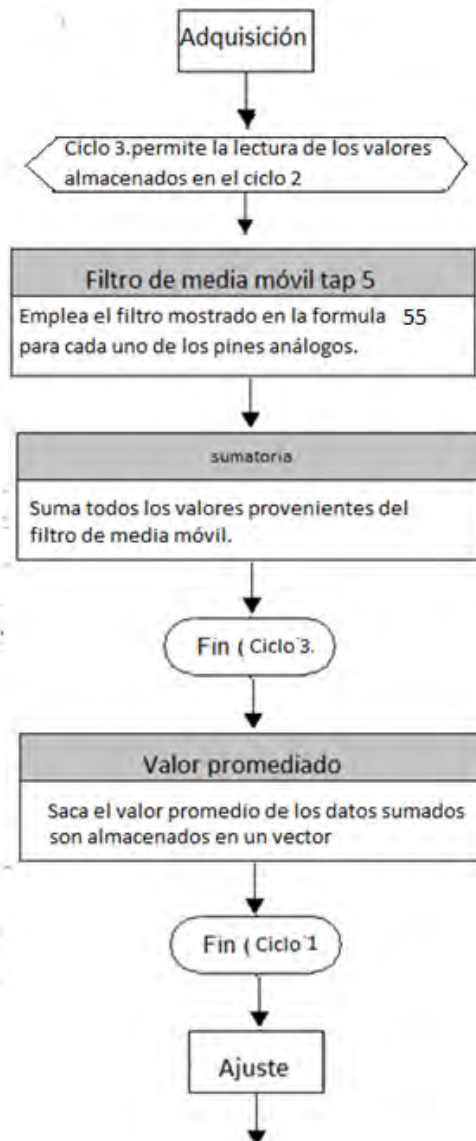


Figura 20. Diagrama de bloques filtro. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Ajuste y calibración. Debido a que el canal A y el canal B presentan diferentes tipos de amplificación se debe tener en cuenta que las constantes de calibración del canal A y del canal B son distintas. En este proceso se toma el dato que resulta del filtro digital, se calcula el voltaje aplicando la ecuación de la curva de polarización y transconductancia.

El primer dato corresponde al canal A de la CCM 0, si este es menor de 200 mV se almacena para luego ser presentado en pantalla LCD y almacenado en memoria SD, pero si es mayor a 200 mV se toma el siguiente dato que corresponderá al canal B de la CCM 0.

En la Figura 21, se muestra el diagrama de flujo del proceso anteriormente descrito.

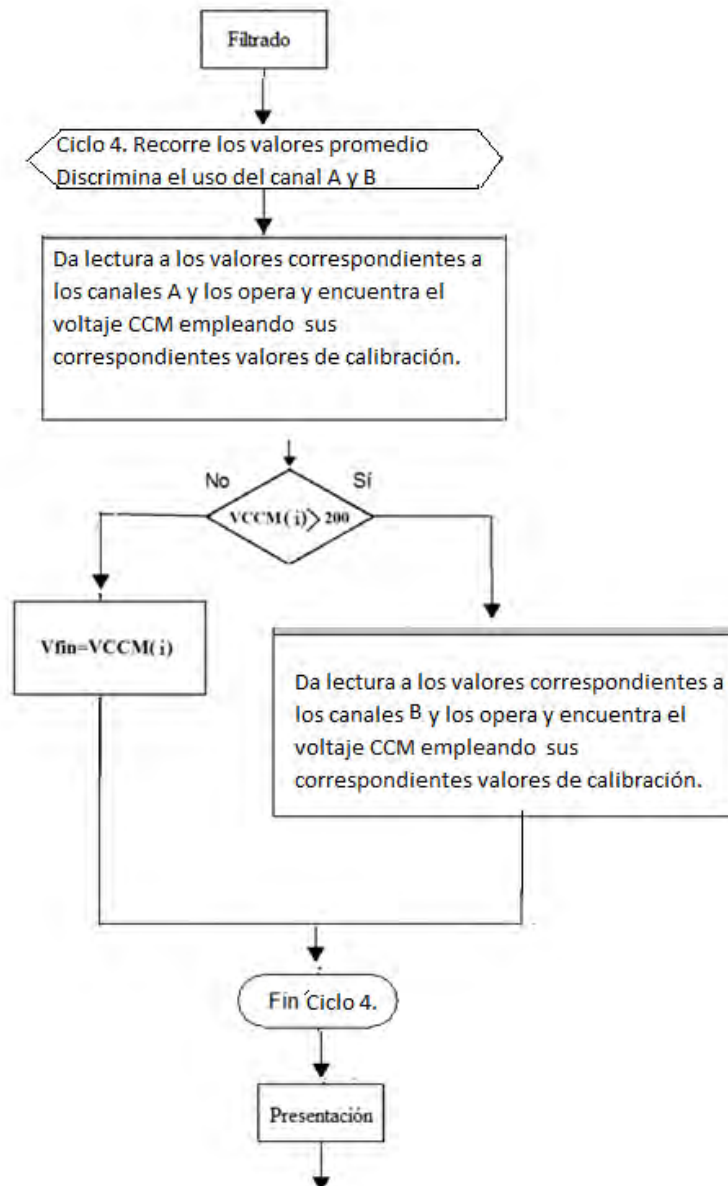


Figura 21. Diagrama de bloques Ajuste y calibración (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Presentación de datos. Este proceso incluye la presentación de datos en una pantalla LCD y el almacenamiento de los mismos en una memoria SD para su posterior evaluación. La presentación de datos en pantalla LCD se hace una vez se tenga el resultado de los procesos anteriores, de esta manera se presenta por ejemplo el valor del voltaje de la CCM 0 durante un tiempo adecuado para que una persona lo pueda leer y después se presenta el valor de voltaje de la CCM1 y así sucesivamente con los datos de las siguientes celdas y se repite el ciclo.

El almacenamiento de datos se hace en una memoria SD, para cada CCM se almacenan datos cada 10 minutos, estos datos posteriormente son leídos mediante una aplicación realizada en Java donde se realizan cálculos y visualización.

El LCD presenta 16 pines del cual se emplea el pin 1 5 y 16 para conexión a tierra y los pines 2 y 15 a 5 V además se debe conectar un potenciómetro de ajuste en el cual uno de sus extremos se conecta a tierra y el otro a 5V y el centro al pin 3 del LCD. Finalmente se conectan los pines de control RS y EN a los pines 7 y 8 del arduino y los pines de transmisión de datos del 11 al 14 del LCD se conectan con los pines del 9 al 12 del arduino (Arduino. display() and noDisplay().,2012).

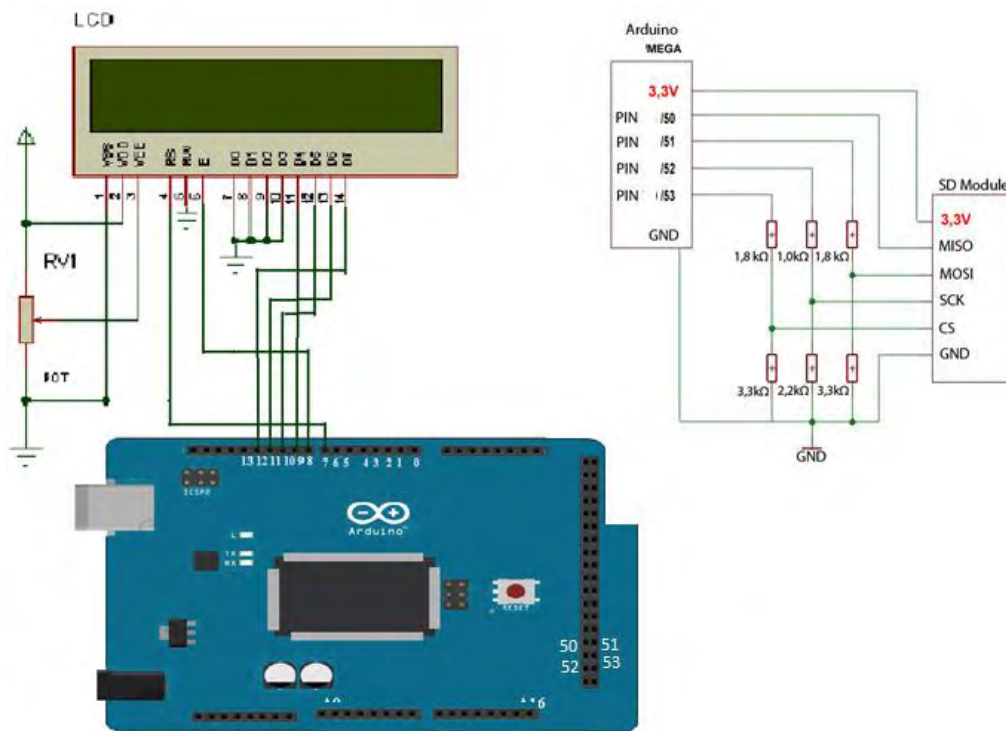


Figura 22. Diagrama circuital LCD y SD (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

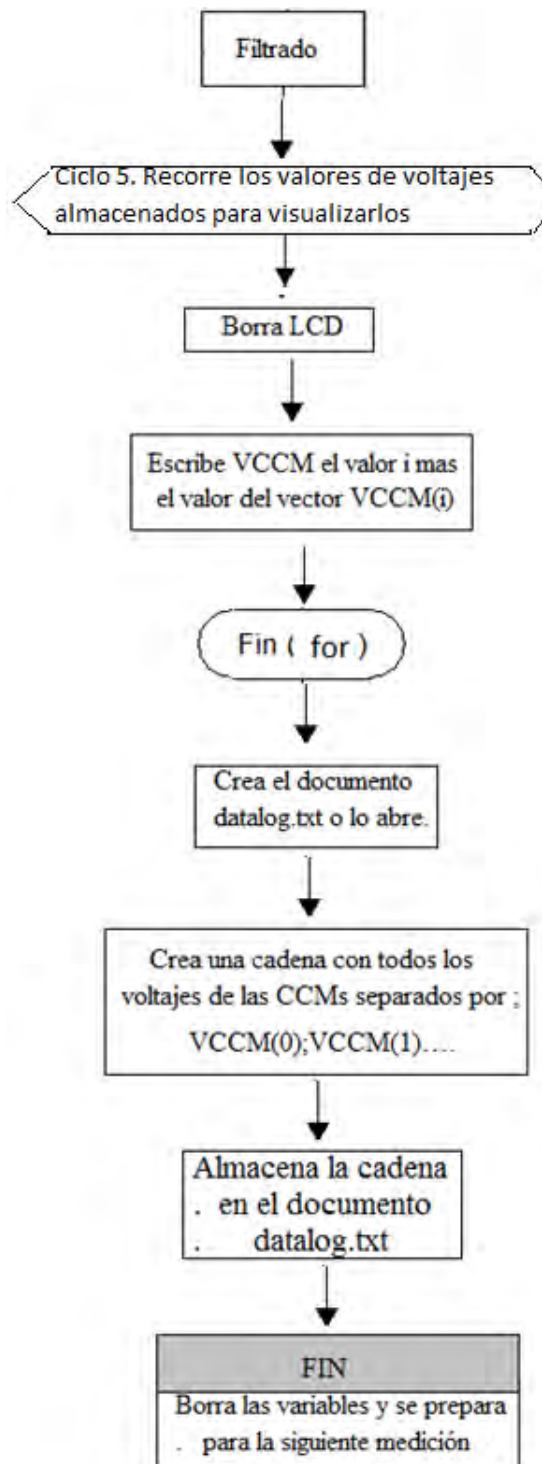


Figura 23. Diagrama de flujo del procesamiento digital. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

5.9. Desarrollo de una aplicación para la evaluación del desempeño eléctrico de las CCMs

Se desarrolla dos aplicaciones en java: graficas CCMs y calculadora CCM, la aplicación graficas CCM sirve para visualizar los datos almacenados en la memoria SD y la aplicación calculadora CCM permite calcular la densidad de potencia por volumen, la densidad de potencia por área, la carga y la eficiencia coulombica.

La aplicación graficas CCMs tiene una interface de usuario que consiste en un plano cartesiano cuyo eje horizontal corresponde al tiempo en minutos, el eje vertical dependerá de la selección de variable a graficar con sus respectivas unidades, puede ser voltaje (V), corriente (mA) y potencia (mW).

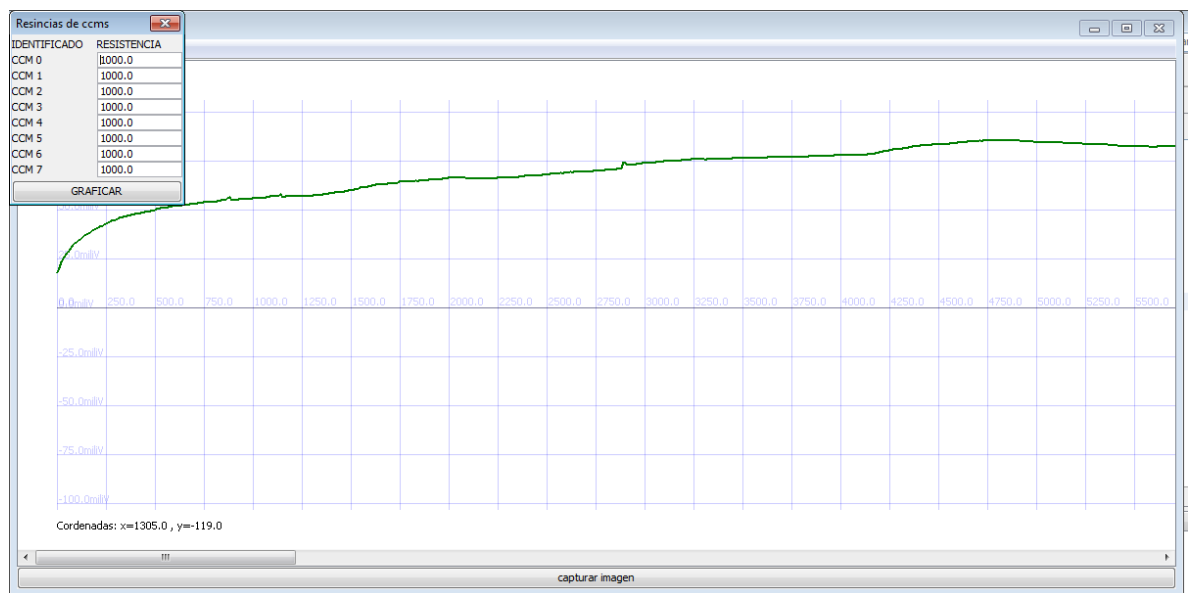


Figura 24 interfaz grafica (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

La aplicación graficas CCMs consta de dos pestañas llamadas gráfica y opciones, un plano cartesiano donde se graficarán las variables mencionadas y para el caso de grafica de potencia en la parte inferior se presenta la suma de potencias. En el plano cartesiano hay dos barras una horizontal y una vertical para ubicar el área a visualizar, el área seleccionada se puede capturar en una imagen con extensión .png dando click en el botón captura.

Con la pestaña grafica se puede seleccionar de la CCM 0 a CCM 8 y la variable a graficar.

Con la pestaña opciones se puede seleccionar archivos de diferentes experimentos almacenados en el disco duro o memorias extraíbles estos archivos tienen la extensión.txt. Al seleccionar el archivo aparecerá una ventana para especificar el

valor de la resistencia de carga para cada una de las CCMs, en la pestaña opciones se puede verificar y actualizar los valores de la resistencia externa, además de esto se puede hacer zoom a una parte de la gráfica.

La aplicación calculadora CCM consta de varios cuadros de texto donde se especifica las condiciones iniciales de la CCM como son potencia promedio, resistencia externa en ohmios, tiempo en minutos, volumen de la cámara anódica, área del electrodo, DQO y diferencial de SDQO, para poder calcular la densidad de potencia por volumen, la densidad de potencia por área, carga y la eficiencia coulombica.

VARIABLES DE ENTRADA		VARIABLES DE SALIDA	
VOLTAJE Voltios	<input type="text"/>	POTENCIA wats	<input type="text"/>
RESISTENCIA ohmios	<input type="text"/>	DPV	<input type="text"/>
VOLUMEN Metros cubicos	<input type="text"/>	DPA	<input type="text"/>
AREA Metros cuadrados	<input type="text"/>		
CARGA ACUMULADA	<input type="text"/>	EFICIENCIA COULOMBICA	<input type="text"/>
b DQO	<input type="text"/>		
delta S DQO(G/L)	<input type="text"/>		
TIEMPO minutos	<input type="text"/>		

Figura 25 calculadora de desempeño electrico (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

6. Implementación

En la Figura 26 se muestra el diagrama en bloques de todos los componentes que se implementaron en circuitos electrónicos sobre los respectivos impresos.

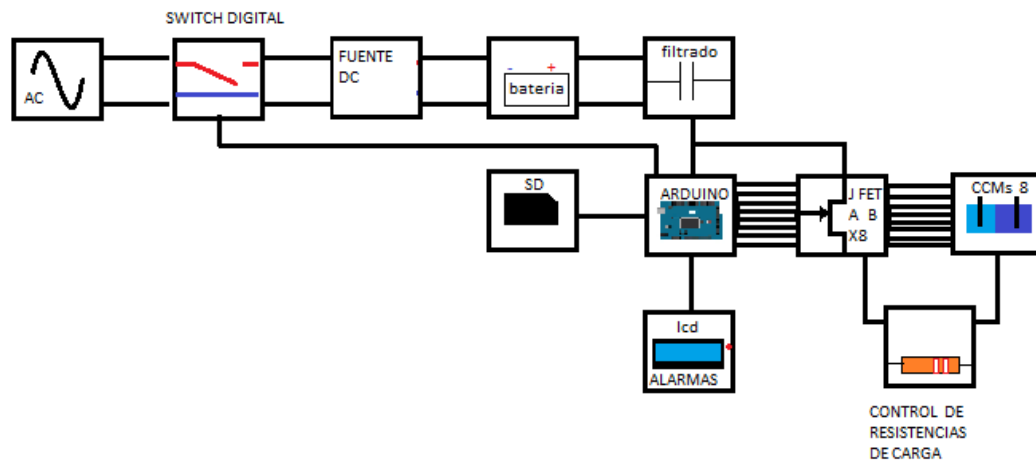


Figura26. Diagrama del sistema de medición de voltages producido por las CCMs (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Para la implementación de los PCB se emplea ARES que es el complemento de PROTEUS. Teniendo en cuenta la distribución de pines en cada elemento se realiza el diagrama para realizar los diferentes acoples eléctricos.

Estos diseños son impresos en papel termo transferible, empleando una fuente de calor se trasfiere el diseño a la baquelita, para remover el exceso de cobre se emplea cloruro férrico disuelto en agua finalmente se perfora y suelda los componentes.

6.1.1. Elaboración de PC

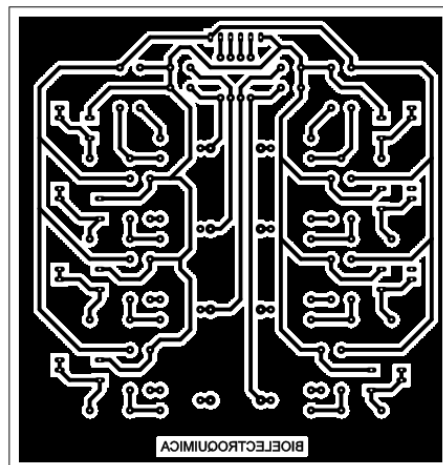


Figura 27 . PCB amplificación y filtrado (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

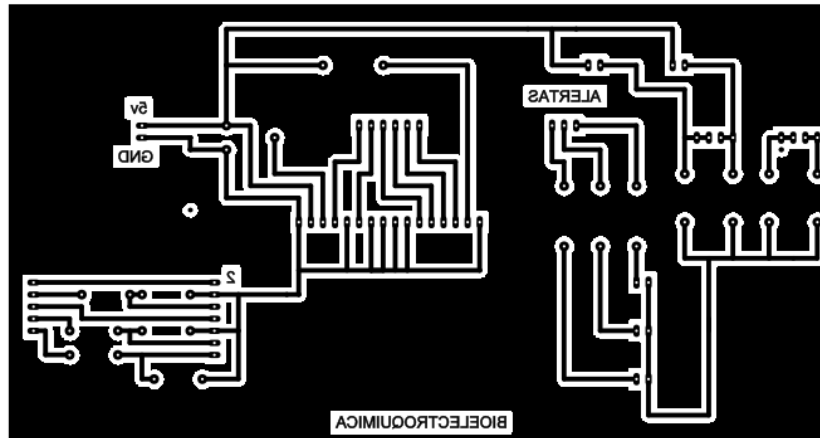


Figura 28. PCB de LCD ,micro SD y LEDs de alerta (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

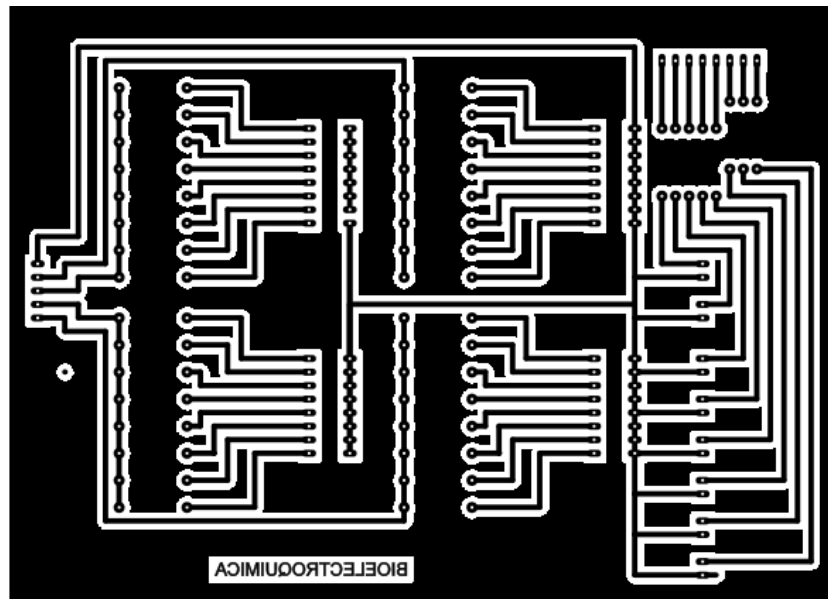


Figura 29. PCB resistencias de carga y LEDs indicadores de CCMs (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

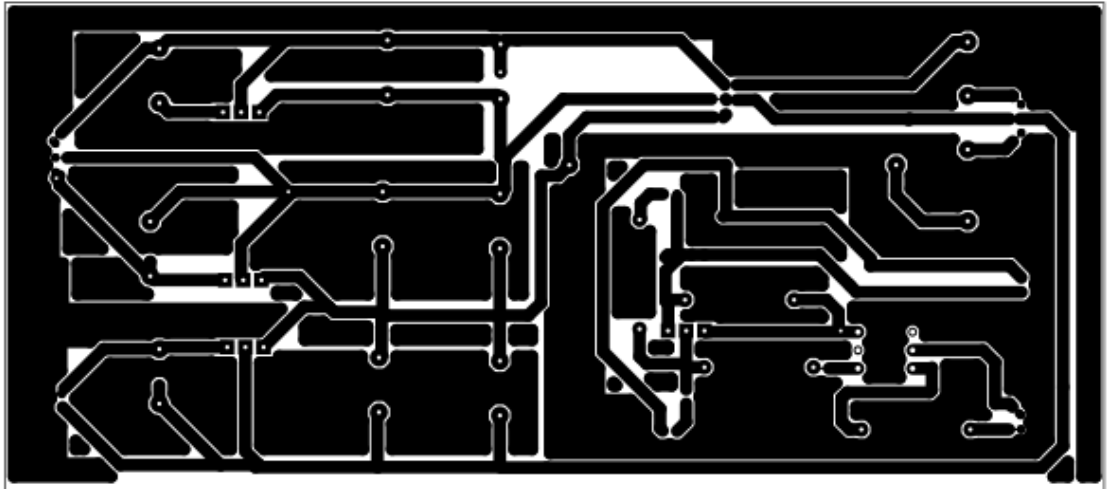


Figura30. PCB fuente de alimentacion (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

6.1.2. Gabinete contenedor.

Como sistema contenedor se construye un gabinete metálico el cual cumple tres funciones importantes, proteger de ruidos electromagnéticos, servir como contenedor térmico y asegurar y soportar las CCM's con el sistema de medición.

El gabinete consiste en una caja metálica cerrada, donde se alojan los circuitos impresos necesarios, los controles del sistema y las ocho CCMs de experimentación. En la parte frontal tiene la pantalla de cristal líquido en la cual se visualizan las mediciones de voltaje de cada una de las CCMs.



Figura 31. Gabinetes contenedor (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

6.1.3. Sistema de presentación (Pantalla LCD)

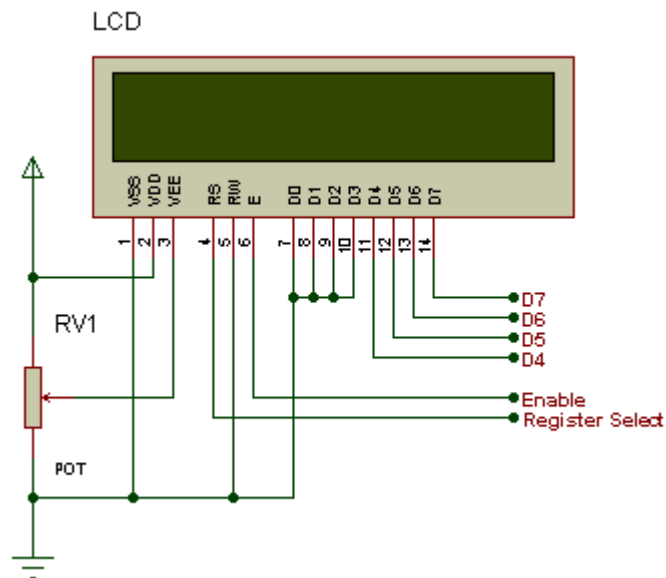


Figura 32. Pantalla LCD 16*2 (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

La pantalla LCD cumple con la función de un multímetro fijo a cada CCM. Presenta cíclicamente el voltaje en que se encuentran cada una de las ocho CCMs, además

tiene la facilidad de autoescalar, condición necesaria ya que la mayoría de investigadores son personas ajenas al uso de un multímetro por lo que son propensos a cometer errores lo que retrasaría la investigación.

6.1.4. Sistema de almacenamiento (Memoria micro SD)

La Micro SD se gestiona a través de la comunicación SPI, dentro de este protocolo se define como maestro aquel dispositivo que será encargado de transmitir información para lo que existen cuatro líneas lógicas, MOSI (master outslave in) línea para llevar los bits que proviene del maestro hacia el esclavo, MISO (master in slaveout) línea para llevar los bits que provienen del esclavo hacia el maestro, CLK(clock) línea proveniente del maestro, línea que se encarga de enviar una señal de reloj para sincronizar los dispositivos, SS (slaveselec) línea para seleccionar un esclavo. Este protocolo presenta una gran velocidad de transmisión.

Arduino permite usar tarjetas SD como micro SD gracias a la librería SD que cuenta arduino es de fácil uso, que están diseñadas para el protocolo SPI para lo que tiene cuatro cables de conexión.

Para la utilización de las tarjetas SD arduino dispone de dos librerías `#include "SPI.h"` la cual tiene en el arduino mega pines establecidos donde MOSI es el pin 51, MISO al pin 50, CLK pin 52 y un pin cualquiera.

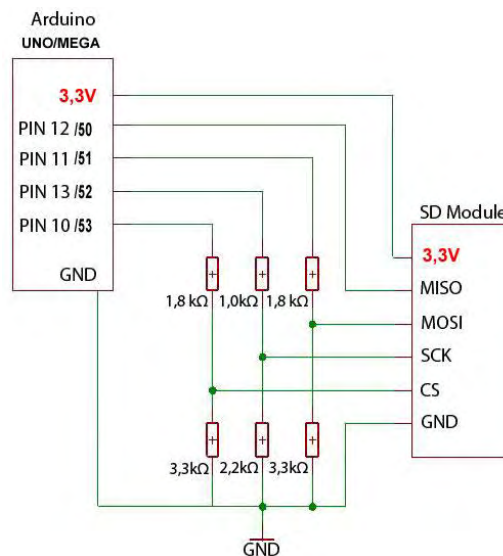


Figura 33. Conexión Socket y Arduino (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Pinout Tarjeta SD



- 9- DAT 1
- 1- CS (Chip Selector) / SS (Slave Selector)
- 2- MOSI (MasterOut-SlaveIn)
- 3- GND
- 4- VCC +3.3V
- 5- CLK (Señal de Reloj)
- 6- GND
- 7- MISO (MasterIn-SlaveOut)
- 8- DAT 0

Figura 34. Conexión SD (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Para el manejo de las tarjetas micro SD se emplea en Arduino las siguientes instrucciones:

6.1.5. Software desarrollado.

El software fue completamente desarrollado en Java, lo que permite ser empleado sin ninguna restricción.

Dicho software es un panel de visualización el cual muestra el voltaje, la corriente y la potencia en función del tiempo. Posee un menú el cual permite escoger que dato se está analizando y la CCM a estudiar.

Cuenta con un menú que permite crear gráficas de los datos obtenidos para posteriormente realizar el análisis pertinente. Esta información puede ser adquirida directamente desde la MicroSD en la que fue creado el archivo.

Posee herramientas para el análisis de graficas como lo son: Zoom y Desplazamiento horizontal a través de las gráficas.

El programa desarrollado para la visualización está compuesto por cuatro partes fundamentales que son los paquetes entidad, gestión, grafica de voltajes, interface.

El paquete entidad contiene el archivo **ccm.java** el cual se encarga de adquirir los datos desde el paquete gestión, el cual proporciona la información con la cual es posible calcular la corriente y la potencia suministrada por las CCMs

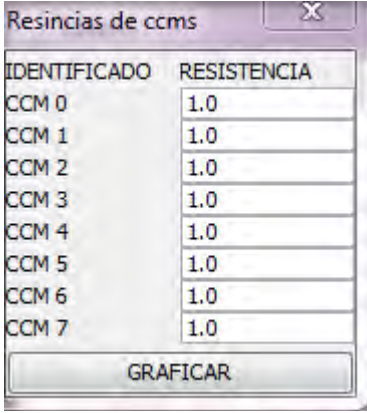
En el paquete gestión se encuentran dos archivos **FS.java** el cual se encarga de recorrer los renglones del documento, convierte estos a vectores de datos para luego enviarlos para ser utilizados por el paquete **grafica.java**.

El paquete **grafica.java** le da propiedades a los datos como: dimensiones, color, cantidad de pixeles correspondientes a un cambio mínimo de voltaje y corriente a graficar, ubicación de los valores en coordenadas X y Y.

El paquete **graficasvoltaje.java** se encarga de abrir y ubicar en la pantalla los diferentes componentes de la interfaz.

El paquete interfaz contiene cuatro archivos:

DialogoCcms.java visualiza el primer menú en aparecer, el cual permite ingresar el valor de resistencia que se ha puesto de carga a las CCMs, iniciando de la CCM en la ubicación 0 y terminando en la séptima ubicación y así al final dar la orden de graficar.



IDENTIFICADO	RESISTENCIA
CCM 0	1.0
CCM 1	1.0
CCM 2	1.0
CCM 3	1.0
CCM 4	1.0
CCM 5	1.0
CCM 6	1.0
CCM 7	1.0

GRAFICAR

Figura 35. Menú 1- Ingreso de valor de resistencias. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Panel **grafica.java** es el encargado de crear los ejes de coordenadas con sus respectivas divisiones que se usara para graficar y además atribuye propiedades que permiten modificar su tamaño de acuerdo al valor de los datos a graficar.

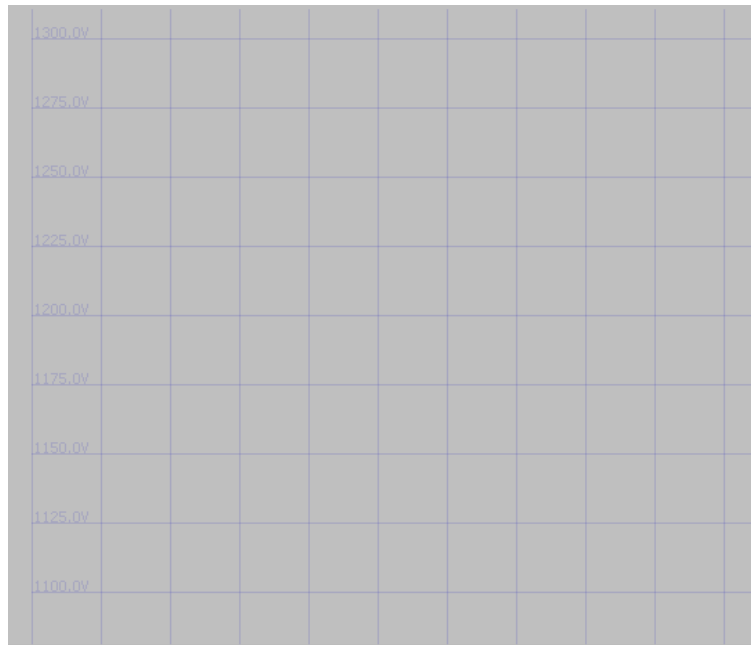


Figura 36. Modelo Ejes de Coordenadas para grafica de datos. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Ventanagrafica.java permite la selección sobre cual CCM que se desee analizar y las opciones de corriente, voltaje o potencia se escogen por medio de botones de selección.

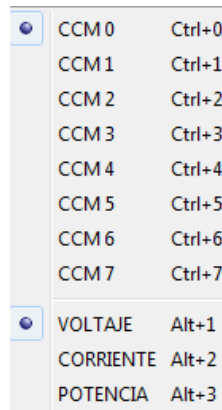


Figura 37. Menú 2- Opciones de análisis de CCM. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Además del control de opciones- Figura 38.

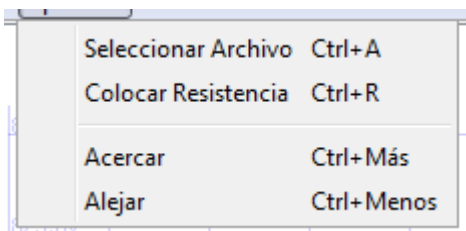


Figura 38. Menú 3- Control de opciones. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Visualización grafica Figura 39.

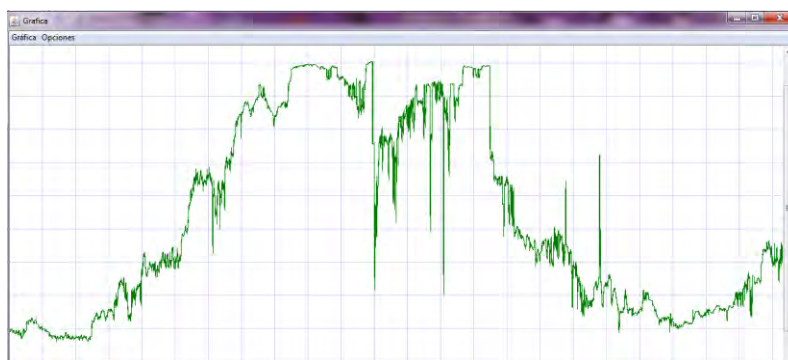


Figura 39. Menú 3- Visualización grafica. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

10,76	10,81	0,05032258
-------	-------	------------

Tabla 2. Datos obtenidos para el cálculo de precisión. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

6.2. Pruebas finales.

6.2.1. Preparación de CCMs.

➤ Reactivos seleccionados para la elaboración de las CCMs a estudiar Soluciones anódica y catódica:

El día 16 de junio se preparan estas soluciones en el laboratorio asignado para este proyecto, para la cámara anódica se empleará agua residual sintética descrita por Huang et al. (2010), empleando como única fuente de carbono glucosa y adicionando además una fuente de azufre ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.01)). Se deben preparar 2,5 L. La composición está dada en g/L:

KH₂PO₄ (4.4),
K₂HPO₄ (3.4),
NH₄Cl (1.3),
NaCl (0.5),
CaCl₂ (0.0146),
MgSO₄·7H₂O (0.01)

Preparar 500mL de solución de Micronutrientes (Cha et al., 2010)(a partir de esta solución se agregará 1 mL/L a cada celda) (mg/L): CaCl₂·6H₂O (130), FeCl₃ (1000), H₃BO₃ (6), ZnCl₂ (70), CuCl₂ (2), MnSO₄·H₂O (100), (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O (206), AlCl₃ (50), CoCl₂ (238) y NiCl₂ (24). El compuesto MnSO₄·H₂O se agregará a 250 mL (solución anódica), a los otros 250 mL en su lugar se agregará: MnCl₂·4H₂O (100) (para la solución catódica).

Fuente de carbono: glucosa a 0.05 M. Se deben pesar 27 gramos para adicionar a los 3L de solución, hacer la conversión para 2,5 L.

En la cámara catódica se empleará una solución catódica de macronutrientes descrita por Huang et al. (2010). Se deben preparar 1,5 L (g/L):

KH₂PO₄ (4.4),
K₂HPO₄ (3.4),
NH₄Cl (1.3),
NaCl (0.5),
CaCl₂(0.0146),
NaHCO₃ (1.0).

Adicionar 1 mL/L de la solución de micronutrientes modificada a partir de Chaet al. (2005), como se indicó antes.

Suplementaremos la solución catódica con K₂Cr₂O₇ (Cr(VI)) a 50 ppm (mg/L).

Solución catódica para celdas 4, 5, 6 y 7:

Preparar 1200mL de buffer fosfato (50 mM, pH 7.0) (Chae et al., 2008).

- **Preparación de electrodos:** Se adquiere minas de grafito de buena calidad para evitar que sean desechas por acción de los microorganismos, debido a que estos se encuentran protegidos por una película plástica que debe ser retirada cuidadosamente para conseguir buena conductividad de los electrodos y buena adherencia del microorganismo.

El proceso de inoculación comienza el día 16 de junio del 2016.

- **Preparación de los ánodos:** Se escoge ocho electrodos previa mente preparados los cuales se los ubico en contenedores se parados para ser activados con lodos, aguas residuales de lácteos, GAC ads y en GAC ox y además se esteriliza los que serán empleados en CCMs de control los cuales se los deja siete días en periodo de activación.

Después de este tiempo se encontró que los ánodos que debían ser activados en todos no fueron activados de forma correcta por lo que se decide implementar las celdas 2 a 7 y dejar los electrodos de las celdas 1 y 0 se las deja siete días más para la formación de la biopelícula.

- **Preparación de los cátodos:** Para la preparación de los cátodos se pone en periodo de activación en aguas del rio pasto debido a que estas contienen el contaminante cromo VI y poblaciones bacterianas resistentes a este.
- **Preparación del agar:** Para el separador de las CCMs se empleará: KCl 0.25M en agar. Para 8CCMs pequeñas se agregan 70 mL a cada una, total: 600 mL de PS. fue preparado previamente por auxiliar de laboratorio a quien se le solicito el día 22 junio y fue entregado el día 23 de este mismo mes

➤ **Implementación de CCMS**

El día 16 de junio del 2016 se prepara el área de trabajo como los materiales necesarios para la implementación de las CCMs

- **Preparación de la zona de trabajo:** Debido a que las CCMs contienen elementos patógenos y sales se debe tener cuidado en la manipulación de estas y la protección de las mesas del laboratorio para estos montajes se empleó el material de seguridad básico en los laboratorios de química y biología como son el uso de guantes, tapabocas, batas de laboratorio.

Se procede a limpiar y organizar las mesas de trabajo para lo que se usa papel y plástico para evitar que estas se manchen.

- **Preparación de instrumento de medición:** Se procede a limpiarlo y quitar residuos de experimentos anteriores además se debe revisar que las puntas de prueba se encuentren en buen estado limpias y sin óxido de lo contrario estas deben ser reemplazadas por puntas nuevas.
- **Preparación de las celdas:** La selección de celdas se escoge de forma visual las que mejores condiciones presenten las cuales se las limpia y retira residuos de experimentos anteriores a estas se las llena con agua para identificar posibles fugas las cuales son selladas con silicona una vez reparadas se vuelven a llenar con agua con el fin de garantizar que las fugas fueron selladas.

Una vez revisadas se tapa los agujeros que conectan las cámaras con el puente salino para lo que se emplea cinta.

Los electrodos fueron sujetos a las CCMs empleando silicona y las cajas fueron selladas para impedir derrame de líquido y evitar que las CCMs anaeróbicas estén en contacto con el aire

- **Toma de datos:** se ubica las CCMs en el gabinete del instrumento de medición teniendo en cuenta que el ánodo esté conectado a la punta roja y el cátodo a la punta negra el instrumento de medición registrara la medición de voltaje cada diez minutos en forma automática durante el tiempo que dure el experimento y además se tomara datos una vez al día con un multímetro digital medidas que servirán para garantizar que el instrumento funciona correctamente.

6.2.2. Cierre del circuito.

Después de estar las CCMs en circuito abierto durante siete días a Las CCMs se les puso una resistencia de carga de 330Ω donde se siguió registrando la información hasta el día 26 de julio.

No. CCM	Réplica /Control	Cámara anódica		Cámara catódica	
		Inóculo/Solución	Ánodo	Inóculo/Solución	Cátodo
0	0	Lodo anaerobio /anódica	½ Barra activada en lodo	Aguas rio Pasto – curtiembres /catódica	½ Barra activada en aguas rio Pasto – curtiembres
1	Control 0	Sin inóculo /anódica	½ Barra nueva y esterilizada	Sin inóculo /catódica	½ Barra nueva y esterilizada
2	1	Aguas residuales lácteos /anódica	½ Barra activada en lácteos	Aguas rio Pasto – curtiembres /catódica	½ Barra activada en aguas rio Pasto – curtiembres
3	Control 1	Sin inóculo /anódica	½ Barra nueva y esterilizada	Sin inóculo /catódica	½ Barra nueva y esterilizada
4	2	GAC ads /anódica	½ Barra activada en GAC ads	Sin inóculo /buffer	½ Barra nueva y esterilizada
5	Control 2	Sin inóculo /anódica	½ Barra nueva y esterilizada	Sin inóculo /buffer	½ Barra nueva y esterilizada
6	3	GAC ox /anódica	½ Barra activada en GAC ox	Sin inóculo /buffer	½ Barra nueva y esterilizada
7	Replica 6	GAC ox /anódica	½ Barra activada en GAC ox	Sin inóculo /buffer	½ Barra nueva y esterilizada

Tabla 3. Componentes de las CCM a analizar. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

➤ CCM 0

Celda anaerobia se emplea el puente salino que fue preparado por el personal del laboratorio y los componentes de la solución catódica y anódica anteriormente explicados. Como ánodo se emplea una barra activada en lodos anaerobios y como cátodo una barra activada en aguas del río pasto del sector de las curtiembres.

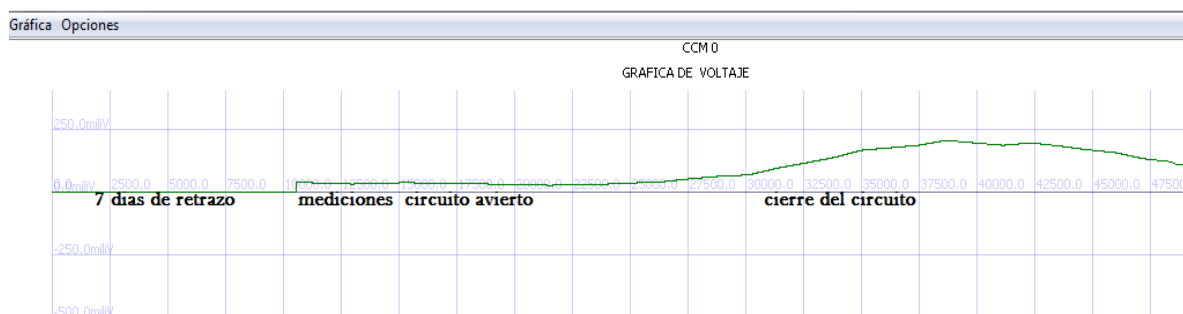


Figura 40. Grafica de voltaje CCM 0. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

La CCM 0 al momento de ser conectada tiene un voltaje inicial de 40 mV y alcanza en 27 días de comenzado el experimento un voltaje máximo de 208 mV

➤ CCM 1

Celda anaerobia de control de la CCM 0 emplea el puente salino que fue preparado por el personal del laboratorio y los componentes de la solución catódica y anódica anteriormente explicados. Para el ánodo y cátodo se emplean barras de grafito esterilizadas.



Figura 41. Grafica de voltaje CCM 1. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

No se presenta generación de voltaje considerable y fluctúa entre 0 y 7 mV.

➤ CCM 2

Celda anaerobia se emplea el puente salino que fue preparado por el personal del laboratorio y los componentes de la solución catódica y anódica ante explicados. Como ánodo se emplea una barra activada en aguas residuales de lácteos y como cátodo una barra activada en aguas del rio pasto del sector de las curtiembres.



Figura 42. Grafica de voltaje CCM 2. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Presenta un voltaje inicial de 30 mV y adquiere a los un máximo a los quince días de iniciado el experimento con un voltaje de 336 mV.

➤ CCM 3

Celda anaerobia de control CCM 2 emplea el puente salino que fue preparado por el personal del laboratorio y los componentes de la solución catódica y anódica anteriormente explicados. Para el ánodo y cátodo se emplean barras de grafito esterilizadas.

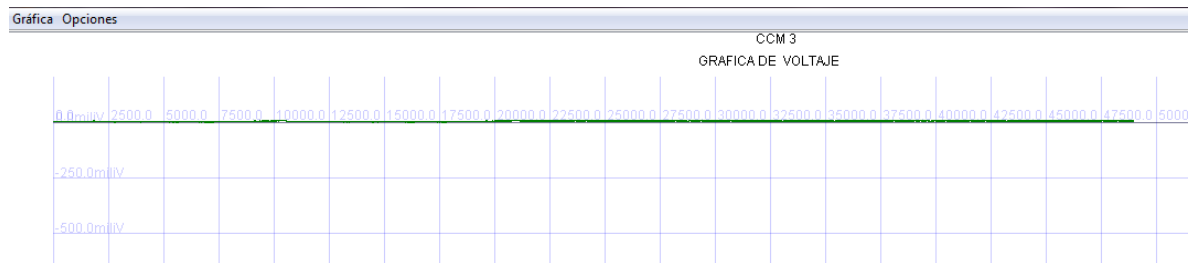


Figura 43. Grafica de voltaje CCM 3. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Camba sus voltaje entre cero y 10 mV.

➤ CCM 4

Celda de cátodo aireado se emplea el puente salino que fue preparado por el personal del laboratorio y los componentes de la solución catódica y anódica ante

explicados. Como ánodo se emplea una barra activada en GAC adc y como cátodo una barra esterilizada.

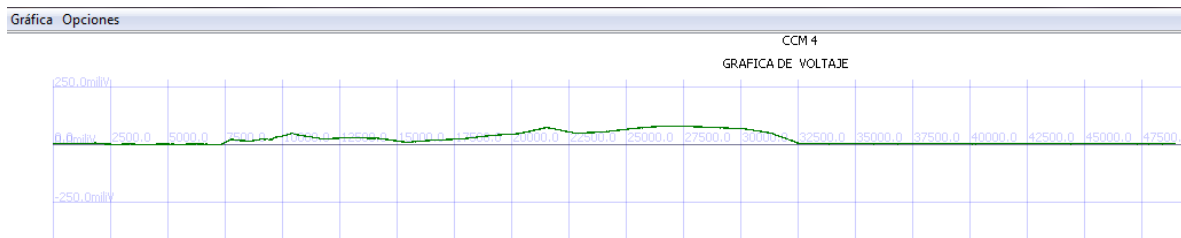


Figura 44. Grafica de voltaje CCM 4. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Inicia con un voltaje de 4,45 mV y alcanza su voltaje máximo a los 18 días de iniciado el experimento

➤ CCM 5

Celda de cátodo aireado de control se emplea para las CCM.s 4 6 7 el puente salino que fue preparado por el personal del laboratorio y los componentes de la solución catódica y anódica ante explicados. Como Para el ánodo y cátodo se emplean barras de grafito esterilizadas.

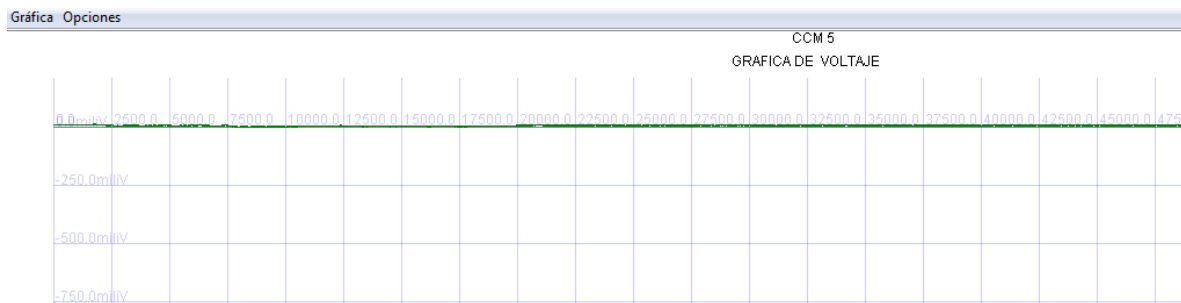


Figura 45. Grafica de voltaje CCM 5. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Varia el voltaje entre cero y 12 mV.

➤ CCM 6

Celda de cátodo aireado se emplea el puente salino que fue preparado por el personal del laboratorio y los componentes de la solución catódica y anódica ante explicados. Como ánodo se emplea una barra activada en GAC ox y como cátodo una barra esterilizada.

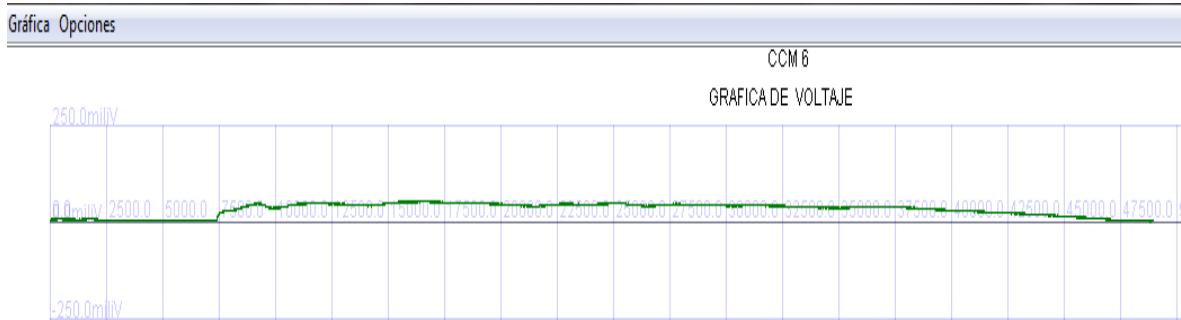


Figura 46. Grafica de voltaje CCM 6. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Alcanza su máximo a los 11 días de ser montado el experimento con un voltaje de 54 mV y un voltaje inicial de 6,4 mV

➤ CCM 7

Celda de cátodo aireado replica .contiene elementos similares a los de la CCM 6

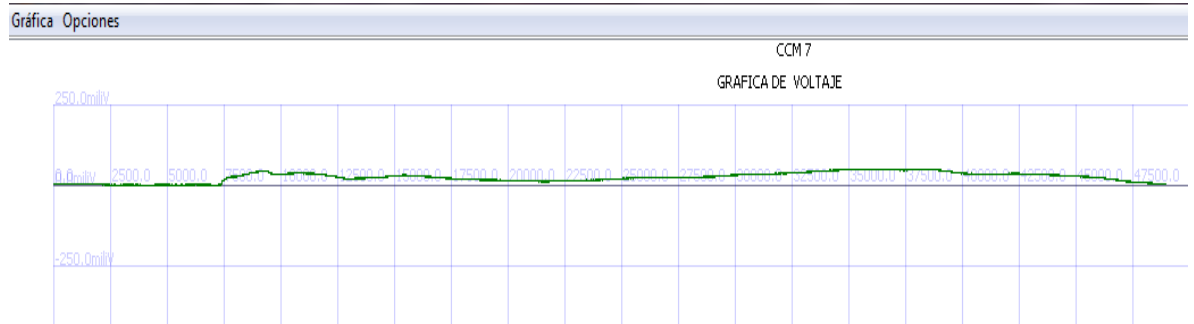


Figura 47. Grafica de voltaje CCM 7. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Alcanza su máximo a los 24 días de ser montado el experimento con un voltaje de 51,7 mV y un voltaje inicial de 3,24 mV

Voltajes CCM

	CCM0	CCM1	CCM2	CCM3	CCM4	CCM5	CCM6	CCM7
PANTALLA	1.24	0.71	30.04	4.5	4.45	8.72	6.14	3.24
MULTÍMETRO	4.24	3.71	30.04	8.5	5.45	11.72	10.14	3.24
PANTALLA	1.53	0.49	29.98	5.38	2.44	7.89	5.7	2.6
MULTÍMETRO	1.5	0.5	32	10.4	7.4	10.9	8.7	3.6
PANTALLA	1.54	1.75	34.91	5.14	3.44	8.44	6.5	2
MULTÍMETRO	4.5	3.8	35.9	6.1	7.4	9.4	6.5	2
PANTALLA	0.54	0.96	80.66	3.13	2.93	8.29	6.07	1.47
MULTÍMETRO	0.5	1	82.7	6.1	5.9	10.3	6.1	1.5
PANTALLA	1.31	1.3	117.3	5.12	16.75	1.27	37.25	33.65
MULTÍMETRO	2.3	6.3	118.3	5.1	16.8	5.3	38.3	33.7
PANTALLA	1.79	2.02	134.2	7.64	22.8	2.01	47.78	44.88
MULTÍMETRO	3.8	6	139.3	8.6	26.8	7	50.8	48.9
PANTALLA	38.3	5.18	162.6	4.58	29.96	4.08	47.57	37.45
MULTÍMETRO	42.3	5.2	163.6	9.6	31	8.1	51.6	38.5
PANTALLA	37.97	3.94	160.1	3.24	24.57	4.64	49.99	34.01
MULTÍMETRO	43	4.9	161.1	3.2	25.6	8.6	50	38
PANTALLA	34.34	3.02	155.5	4.12	29.08	3.52	45.99	21.96
MULTÍMETRO	39.3	6	157.5	9.1	32.1	5.5	51	24
PANTALLA	35.42	5.1	170.0	4.6	20.59	5.1	54.43	26.93
MULTÍMETRO	40.4	5.1	173	7.6	22.6	9.1	57.4	30.9
PANTALLA	33.47	4.47	218.3	5.67	30.7	4.07	50.35	19.31
MULTÍMETRO	37.5	5.5	219.3	5.7	31.7	4.1	52.4	20.3
PANTALLA	28.8	7.72	306.5	7.42	57.56	8.82	43.73	13.95
MULTÍMETRO	32.8	10.7	306.6	9.4	57.6	12.8	46.7	15
PANTALLA	28.57	7.7	331.1	7.6	62.77	7.3	44.35	14.79
MULTÍMETRO	31.6	12.7	333.2	10.6	64.8	11.3	47.4	14.8
PANTALLA	40.89	8	283.1	7.8	73.91	8.4	47.69	23
MULTÍMETRO	43.9	10	285.1	8.8	76.9	9.4	49.7	24
PANTALLA	92.6	7.2	204.4	7.2	52.21	6.7	44.01	34.27
MULTÍMETRO	93.6	11.2	206.4	9.2	56.2	8.7	44	39.3
PANTALLA	111.6	8.5	195.0	7.9	18	8.1	42.45	37.17
MULTÍMETRO	112.6	10.5	198	11.9	21	11.1	47.5	39.2
PANTALLA	147.2	7.9	190.4	8.1	4.11	8.3	38.75	45.86
MULTÍMETRO	150.2	12.9	190.5	13.1	4.1	11.3	43.8	46.9
PANTALLA	189.3	7.8	144.8	6.9	5.18	7.4	27.92	34.81
MULTÍMETRO	190.3	8.8	144.8	6.9	8.2	8.4	32.9	35.8
PANTALLA	182.8	7.4	83.21	7.7	4.62	7.4	19.32	33.08

MULTÍMETRO	187.8	10.4	87.2	12.7	4.6	12.4	22.3	38.1
PANTALLA	149.1	6.9	17.8	8.1	3.03	8.3	9.77	21.3
MULTÍMETRO	153.2	10.9	17.8	10.1	6	10.3	10.8	25.3
PANTALLA	110.2	7.4	6.01	8.3	3.15	8.3	2.41	6.3
MULTÍMETRO	111.3	12.4	10	13.3	6.2	9.3	6.4	6.3
PANTALLA	109.0	7.5	4.84	7.3	4.58	7	3.57	4.72
MULTÍMETRO	111.1	9.5	7.8	9.3	4.6	10	7.6	8.7

Tabla 4. Comparación de medidas realizadas CCM con multímetro y con el sistema de adquisición. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

En la tabla 3 se observa el voltaje medido para cada una de las CCMs y su valor de comparación con un multímetro de precisión, y así determinamos los errores para cada una de las CCMs. El error máximo fue de 5 mV pase comprueba que el sistema funciona adecuadamente.

7. CONCLUSIONES

- El sistema de medición del potencial eléctrico de una CCM cumple con unas especificaciones técnicas muy particulares (alta impedancia, medición continua, almacenamiento de datos) de estos bioreactores para la generación de energía eléctrica, se puede destacar la medición de voltajes muy bajos (menores de 300 mV), la posibilidad de atender 8 CCMs de manera simultánea, el almacenamiento y procesamiento de los datos.
- La implementación del sistema de medición se basó en la experimentación a partir de lo cual se diseñaron componentes muy específicos como filtros y amplificadores a un bajo costo siendo factible su fabricación.
- Las pruebas de validación, aplicadas por método de comparación directa en la medición del potencial eléctrico producido por las CCMs permiten establecer que el producto tecnológico obtenido es confiable el cual es apto para uso en laboratorio siendo una gran herramienta de trabajo tendiente a comprender los fenómenos eléctricos y bio-electroquímicos que suceden en diferentes CCMs.

8. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Es necesario abordar otra fase de investigación y desarrollo tecnológico para evaluar parámetros importantes de un sistema de medición como es la precisión, la exactitud de igual manera la estabilidad operativa del sistema.
- Muy probablemente la actividad sugerida conduce al rediseño de algunos de los componentes del sistema y en ese caso serán necesario el uso de componentes de mayor precisión y estabilidad.

9. REFERENCIAS

- Arduino. Arduino mega. (2012). disponible en internet [http://arduino.cl/arduinomega-2560/Arduino.display\(\) and noDisplay\(\)](http://arduino.cl/arduinomega-2560/Arduino.display() and noDisplay().).
- Boylestad, R., Nashelski, L. (1997) Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10 ed. Pearson: p. 378.
- Biotecnología y limpieza del medio ambiente. (2009). disponible en internet <http://porquebiotecnologia.com.ar/index.php?action=cuaderno&opt=5&tipo=1¬e=4>
- Borole, A. P., C. Y. Hamilton, T. Vishnivetskaya, D. Leak y C. Andras. (2009). Improving power production in acetate-fed microbial fuel cells via enrichment of exoelectrogenic organisms in flow-through systems, *Biochemical Engineering Journal*: 48 (1), 71-80
- Davila, S. (1998). El tratamiento de aguas residuales. Disponible en Internet: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-795812>
- Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. 2012. Montaje de una pila de combustible microbiana para depuración de agua con producción simultánea de energía.
- Gamez Galicia, E. (2016). Evaluación de la eficiencia de operación de una celda microbiana de biocombustible utilizando sistemas electrónicos. Disponible en Internet: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9981/Tesis.pdf?sequence=3>
- Liu, H. y B. E. Logan. (2004). Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane, *Environmental*.
- Pallas, A. (2008). Sensores y Acondicionadores de señal, 4 ed. Marcombo: p. 2.
- Perez Garcia, M. Alvarez, A., Rodríguez, J., Ferrero Martín, J., Grillo Ortega, G. (1998). Instrumentación electrónica. 1 ed. Gijón: Thomson: p. 10.
- Ramírez, N., A. Regueiro, O. Arias y R. Contreras, Espectroscopia de impedancia electroquímica, herramienta eficaz para el diagnóstico rápido microbiológico, *Biotecnología Aplicada*: 26 (1), 65-71.
- Revelo D. M., Hurtado N. H. y Ruiz J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía e energía eléctrica.

- Rismani-Yazdy, H. y otros cinco autores, Effect of external resistance on bacterial diversity and metabolism in cellulose-fed microbial fuel cells, *Bioresource Technology*: 102 (1), 278–283 (2011)
- Sharma,(2010) "Immobilization of Protease, documento en línea disponible en:<http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_05/BioRes_05_4_2547_Sharma_SC_Immob_Protease_Sorp_BSA_Cellu_Graft_Polymers_695.pdf>
- Sharma, Y. y B. Li.(2010).Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC), *International Journal of Hydrogen Energy*: 35 (8),3789-3797
- Universidad Nacional de Villa Maria Cordoba, Argentina(2011). II Congreso Internacional de Ambiente y Energias Renovables.. Disponible en Internet:<https://issuu.com/hachete/docs/ii-cayerb>
- Wang.G.,huang.L., Zhang.Y.(2008).Cathodic Reduction of hexavalent chromium coupled with electricity generation in microbial fuel cell. Dalian China.
- Wang, C., W. Chen y R. Huang,(2010) Influence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by *Escherichia coli*, *International Journal of Hydrogen Energy*: 35 (13),7217-7223 .
- Wu,X, Zhu,X, Song,T., Zhang,L.,Honghua ,J. ,Ping Wei.(2015).Effect of acclimatization on hexavalent chromium reduction in a biocathode microbial fuel cell. Connecticut USA. Elsevier

10. ANEXOS

10.1. Manual de usuario.

El sistema de medición de potencial eléctrico se desarrolló para facilitar la medición de los voltajes producidos por las CCMs y está dirigido a aquellas personas que tienen bajos a nulos conocimientos de electrónica y de manejo de instrumentos como el multímetro, por lo que se les ha dificultado conocer valores como son corriente, voltaje y resistencia que son los valores resultado de la investigación realizada en las CCM's.

El prototipo de sistema de medición de potencial eléctrico generado por las CCMs al ser un sistema automático evita que los investigadores cometan errores en el proceso de medición ya que el proceso de medición es constante, lo que difícilmente podría ser llevado a cabo por una persona.

10.1.1 Método de encendido.

El sistema cuenta con dos sistemas de alimentación, uno que proviene directamente de la red eléctrica y un segundo método de alimentación el cual proviene de una batería seca recargable la cual permite tomar mediciones a pesar de que la red eléctrica presente caída de voltaje. Debido a esto, el sistema cuenta con dos sistemas de encendido el primario el cual conecta el sistema a la red eléctrica y realiza la carga de la batería y un segundo sistema de encendido el cual conecta la batería al sistema de medición.

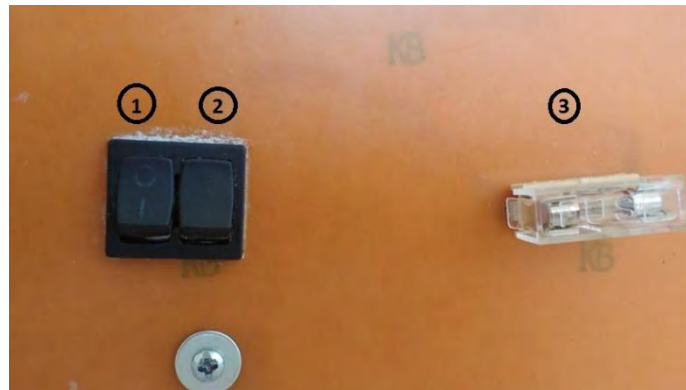


Figura 48. Sistemas de Encendido del Medidor. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

(1) El sistema de conexión a red eléctrica

(2) Sistema de conexión a batería

(3) Fusible de protección.

El usuario debe asegurarse que los dos sistemas se encuentran activados ya que si tan solo se encuentra conectado al sistema de la red eléctrica en caso de falla de esta, la toma de datos se interrumpirá y si solo el sistema de conexión de la batería se encuentra conectado esta al paso de unos pocos días se descargará, suministrando energía insuficiente, lo que generara errores de medición hasta el punto de apagarse totalmente.

10.1.2 Canales de Medición.

El sistema cuenta con ocho pares de puntas de prueba cada una de ellas cuenta con una impedancia de entrada superior a los 20 M Ω de impedancia de entrada y marcada a las cuales se debe conectar las CCMs. Teniendo en cuenta que el ánodo de la CCM debe conectarse a la punta roja y el cátodo a la punta negra, de lo contrario el sistema quedara polarizado de manera inversa e impedirá el registro correcto de la información ya que el sistema no puede medir voltajes negativos.

Otro factor que se debe tener en cuenta es que todas las puntas que no se estén usando deben estar conectado a su respectivo par para garantizar que no existe la introducción de ruidos ni presentar voltajes producidos por diferencias de potencial existentes en el aire.



Figura 49. Canales de Medición. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Debido a que las CCMs poseen agentes corrosivos se recomienda que se revise constantemente el estado de las pinzas y asegurarse que estas como los electrodos se encuentran limpias tanto de corrosión como agentes biológicos que pueden causar aislamiento.

10.1.3 Resistencia de carga para las CCMs.

El sistema cuenta con una matriz de ocho dipswitch cada uno con ocho diferentes puntos de interrupción el cual permite conectar las CCMs a diferentes resistencias de carga, Por ejemplo:

300 Ω ,510 Ω ,1K Ω , 2 K Ω ,10K Ω , 15K Ω ,18K Ω , 20K Ω .

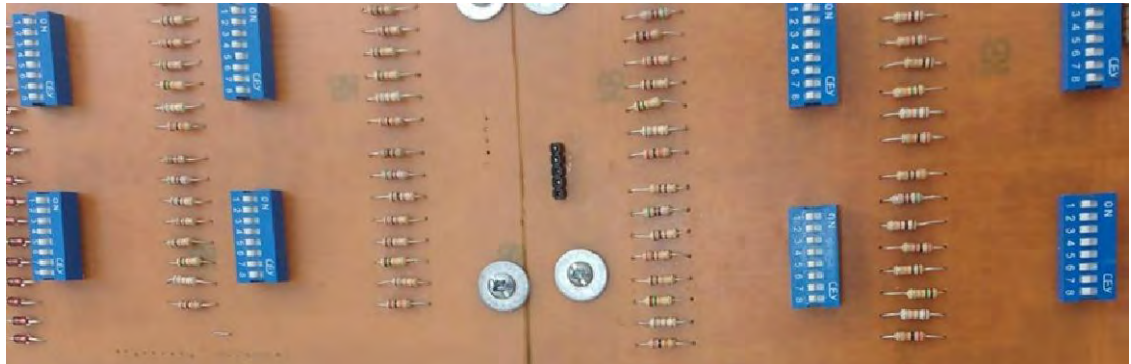


Figura 50. Resistencia de carga para las CCMs. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Debe asegurarse que solo el switch que corresponde a la resistencia deseada se encuentre a la derecha ya que si se encuentran más resistencias accionadas, el valor de resistencia que se encuentra en la carga es el valor del paralelo de estas.

10.1.4 Sistema de alerta de de conexión de las CCMs

Este sistema cuenta con ocho LEDS rojos que indican si el voltaje de las CCMs se encuentran en un voltaje superior 2mV lo que significa que la CCM se encuentra produciendo voltajes y el sistema se encuentra conectado de forma correcta.



Figura 51. Sistema de alerta de de conexión de las CCMs. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

10.1.5 Sistema de visualización.

Este cuenta con un display de cristal líquido el cual permite visualizar en serie el voltaje que se encuentra en cada una de las CCMs conectadas a las respectivas puntas de prueba, se visualizan los voltajes de forma similar a un multímetro pero sin la necesidad de estar moviendo las puntas de prueba, ni exponiéndose innecesariamente a los organismos patógenos.

10.1.6 Sistema de almacenamiento.

El sistema permite almacenar datos en una memoria micro SD en forma de archivo de texto, proceso que se iniciara si la micro SD se encuentra en el sistema en el momento en que se enciende el sistema o en el momento en que se presione el botón de iniciar almacenamiento. El sistema almacena el valor de la medición cada diez minutos en una memoria de 4 GBYTES, la cual de ser necesario permitiría almacenar información durante 10 años.

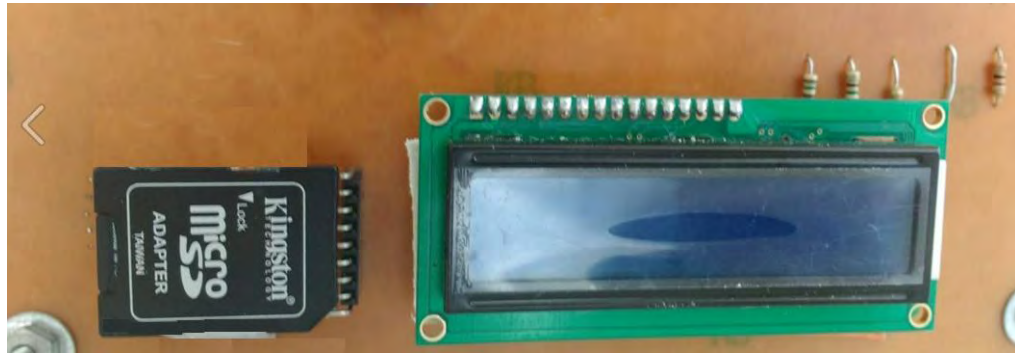


Figura 52. Sistema de almacenamiento. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

10.1.7 Alertas de funcionamiento.

El sistema cuenta con tres luces LED, una verde amarilla y una roja. Cuando el LED verde se encuentra encendido indica que se encuentra energizado y funcionando. En el momento en que se enciende el LED amarillo se indica que se está realizando almacenamiento de información en la micro SD ,si dicho LED se encuentra encendido se debe esperar para retirar la memoria o apagar el sistema ya que los cambios bruscos de voltaje pueden dañar la micro SD causando pérdida de la información almacenada.

El LED rojo indica que la memoria micro SD se encuentra dañada o mal ubicada por lo que debe ser cambiada o revisada y se debe reiniciarse el sistema.

10.1.8 Manejo del software

- a. Dar Click en el logo **GraficasVoltaje.jar** el cual se identifica por el logo de java.
- b.

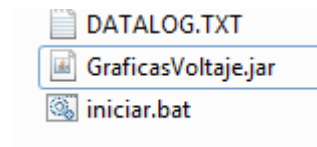


Figura 53 Logo GraficasVoltaje.jar (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Donde se desplegara el siguiente menú el cual nos permite acceder a cualquier archivo que se encuentre en nuestro computador de donde se debe elegir el documento **datalog.txt**.

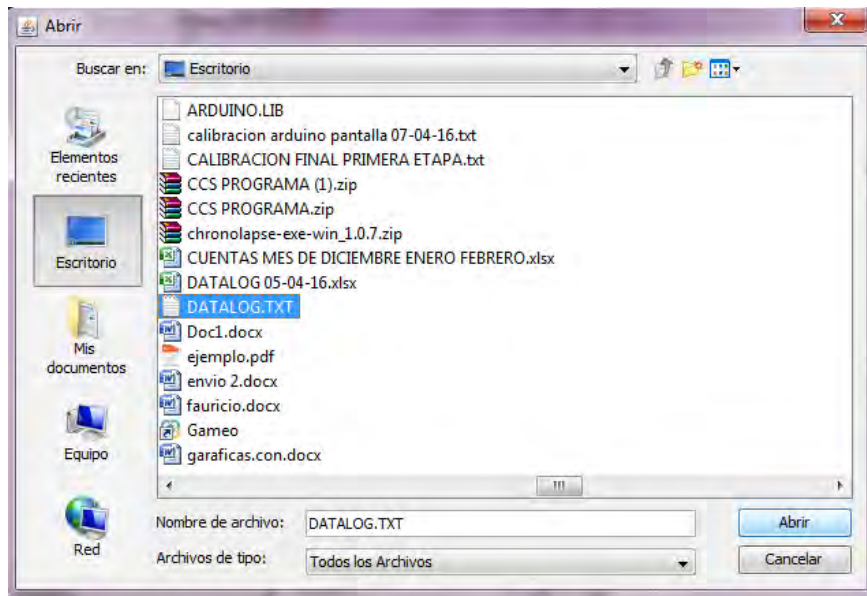


Figura 54. Menú- Archivo datalog.txt.(Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Posteriormente, se desplegará un menú en el cual se presentara un cuadro de dialogo que permite introducir el valor de las resistencias con lo cual se calculara los valores de corriente y potencia, se debe presionar el botón graficar.

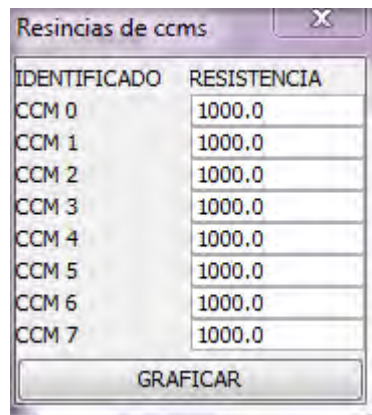


Figura 55. Menú- Valores de resistencias CCM. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Al desplegarse la gráfica podemos acceder por medio del botón grafica el cual despliega un menú para seleccionar que los valores de la CCM a analizar y elegir entre corriente potencia o voltaje.

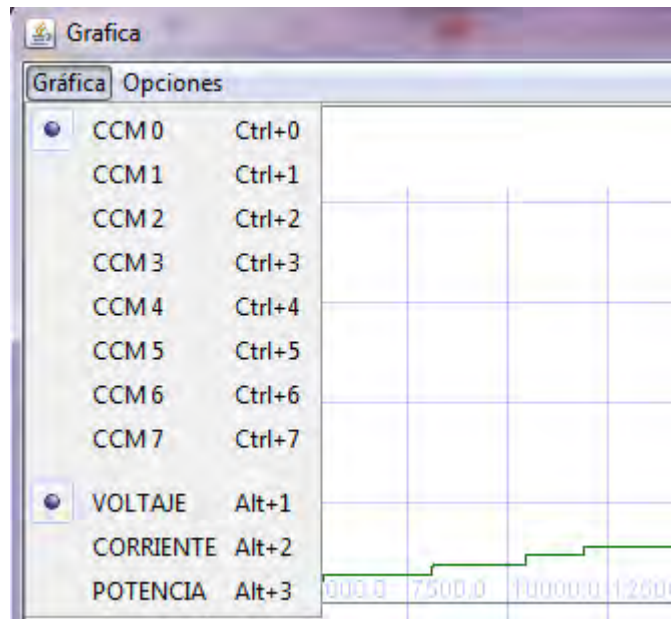


Figura 56. Botón Grafica- Selección CCM. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

El menú opciones permite seleccionar la apertura de otro documento con datos para graficar, redefinir los valores de la resistencia y acceder a las opciones de alejar y acercar para detallar los valores de la gráfica.

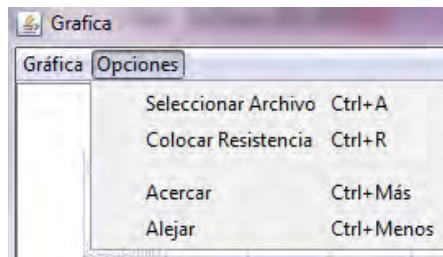


Figura 57. Botón Opciones. (Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Finalmente, se debe presionar el botón de capturar imagen el cual almacena en la carpeta seleccionada las capturas que el usuario desee realizar.

VARIABLES DE ENTRADA		VARIABLES DE SALIDA	
VOLTAJE Voltios	<input type="text"/>	POTENCIA wats	<input type="text"/>
RESISTENCIA ohmios	<input type="text"/>	DPV	<input type="text"/>
VOLUMEN Metros cubicos	<input type="text"/>	DPA	<input type="text"/>
AREA Metros cuadrados	<input type="text"/>	EFICIENCIA COULOMBICA	<input type="text"/>
CARGA ACUMULADA	<input type="text"/>		
b DQO	<input type="text"/>		
delta S DQO(G/L)	<input type="text"/>		
TIEMPO minutos	<input type="text"/>		

Figura 58. Calculadora del desempeño electrico de las CCMs(Hormaza, F., Caicedo, E., 2016. Diseño e implementación de un sistema medidor del potencial eléctrico de una celda de combustible microbiano).

Junto al programa principal se adiciona una pequeña calculadora que evita que los investigadores requieran herramientas externas como las herramientas de Microsoft Excel o calculadoras haciendo mucho más rápido el proceso de investigación está calculadora permite ingresar las variables medidas como son áreas, volúmenes, resistencia, voltaje, DQO con lo que se calcula densidad de potencia volumétrica, densidad de potencia en función del área, porcentaje de eficiencia coulombica y cantidad de electrones producidos.