



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

DISEÑO DE UN NODO DE ADQUISICIÓN DE
DATOS PARA REDES DE SENSORES
INALÁMBRICOS ENERGÉTICAMENTE
AUTOSUSTENTABLES

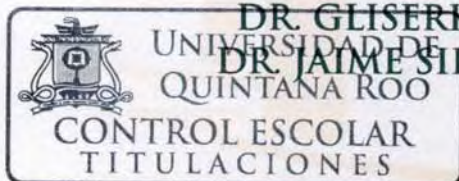
TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN MECATRÓNICA

PRESENTA
MARIO ALBERTO CARMONA CAMPOS

DIRECTOR DE TESIS
DR. JAVIER VÁZQUEZ CASTILLO

CO-DIRECTORA DE TESIS
DRA. EDITH OSORIO DE LA ROSA

ASESORES
DR. ALEJANDRO ARTURO CASTILLO ATOCHE
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL
DR. JAIME SILVERIO ORTEGÓN AGUILAR



CONTROL ESCOLAR
TITULACIONES



DIVISIÓN DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA

CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2018



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO

“DISEÑO DE UN NODO DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA REDES
DE SENSORES INALÁMBRICOS ENERGÉTICAMENTE
AUTOSUSTENTABLES”

ELABORADO POR

MARIO ALBERTO CARMONA CAMPOS

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN MECATRÓNICA

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:


DR. JAVIER VÁSQUEZ CASTILLO

CO-DIRECTORA:


DRA. EDITH OSORIO DE LA ROSA

ASESOR:


DR. ALEJANDRO ARTURO CASTILLO ATOCHE

ASESOR:


DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL

ASESOR:


DR. JAIME SILVERIO ORTEGÓN AGUILAR



UNIVERSIDAD DE
QUINTANA ROO
CONTROL ESCOLAR
TITULACIONES



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2018

“He llegado al final de este camino y en mi han quedado marcadas huellas profundas de éste recorrido. Son Madre tu mirada y tu aliento. Son Padre tu trabajo y esfuerzo. Son Maestros tus palabras y sabios consejos, mi trofeo es también de ustedes.
Gracias por todo...”

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional y en especial:

A mis padres Mario y Gabriela quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mi el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios esta conmigo siempre.

A mis hermanos Sara, Raúl, Mariana y Diana que con sus palabras me hacían sentir orgulloso de lo que soy y de lo que les puedo enseñar. Ojala algún día yo me convierta en su fuerza para que puedan seguir avanzando en su camino.

A mi mejor amigo que durante estos 7 años en esta máxima casa de estudios me ayudó, gracias Oscar Azueta por sufrir esos días sin comida, inventando cosas, viviendo con ladrones, pero a pesar de eso apoyarnos mutuamente tanto en lo material y económicamente como en la escuela, eres un hermano más y recuerda que cada triunfo mío es uno tuyo también.

A la memoria de una gran persona como Kembrey Álvarez Ríos, quién me animó en este campo de estudio y, durante un par de años facilitó su apoyo en mi investigación cuando lo necesité. La fuerza y la fe de Kembrey durante el último año de su vida me dieron una nueva apreciación del significado y la importancia de la amistad.

A mi novia Paula Fuentes, porque me siento el hombre más afortunado de tenerte y me haz iluminado con tu amor y tú voz en cada momento, que a pesar de la distancia para mi es un honor que me quieras también y que sepas que cada día a tu lado te admiro más como mujer. TE AMO.

Agradecimientos

Sabiendo que no existirá una forma de agradecer una vida de sacrificio y esfuerzo, quiero que sientan que el objetivo logrado también es de ustedes y que la fuerza que me ayudó a conseguirlo fue su apoyo. Con cariño y admiración:

Agradezco a Dios por guiarme en mi camino y por permitirme concluir con mi objetivo.

A mis padres quienes son mi motor y mi mayor inspiración, que a través de su amor, paciencia, buenos valores, ayudan a trazar mi camino.

A mi novia por ser el apoyo incondicional en mi vida, que con su amor y respaldo, me ayuda alcanzar mis objetivos.

A mi querida Universidad y a todas las autoridades y profesores de la maestría y de la carrera, por permitirme concluir con una etapa de mi vida, gracias por la paciencia, orientación y guiarme en el desarrollo de esta investigación.

Agradezco a mi director de tesis Dr. Javier Vázquez y a la Dra. Edith Osorio quienes con sus experiencias, conocimientos y motivaciones me orientaron en la investigación de este trabajo.

A la Dra. Paty y la Dra. Roberta por sus consejos, enseñanzas, apoyo y sobre todo amistad brindada para desarrollar este importante proyecto.

Agradezco a quien fue mi tutor durante la carrera al Mtro. Rubén González y al Dr. Inocente Bojórquez quienes fueron un pilar fundamental para mi aprendizaje y demostrarles que con perseverancia y disciplina se pueden alcanzar las metas.

Por último a todos quienes conforman la comunidad del CENEI, por haberme abierto las puertas, permitiendo la accesibilidad a desarrollarme profesionalmente como docente impartiendo asesorías a otras carreras y facilitarme el apoyo del desayuno comunitario cuando en su momento lo necesité.

Me van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo. Amigos de la carrera, amigos de cada viaje y todos los que fueron mis entrenadores durante mis estudios.

Resumen

El aumento de las tecnologías modernas como las redes de sensores inalámbricos (WSN), la Internet de las cosas (IO) y las comunicaciones máquina a máquina (M2M) implica el uso de baterías, lo que supone un grave riesgo para el medio ambiente con la eliminación de miles de millones de baterías cada año. La recolecta de energía es esencial para la corta vida útil que tienen las fuentes de alimentación para mantener en funcionamiento los dispositivos electrónicos de baja potencia, hoy en día, existen diferentes métodos para implementar sistemas que no requieren el uso de baterías tales como las pilas de combustible microbianas, solares, piezoeléctricas, térmicas y de energía cinética. Esta tesis describe la implementación de la adquisición de datos de un nodo usando una nueva opción de recolección de energía, como la Celda de Combustible Microbiana de Planta (PMFC), convirtiéndose en un nodo autosustentable del sistema energético. Una solución de energía verde para aplicaciones en agricultura de precisión como la WSN, ya que ayudaría a mejorar el rendimiento de los cultivos.

Palabras Clave: Batteryless, Energy Harvesting, IoT, Plant Microbial Fuel Cell, Wireless Sensor Network.

Abstract

The increase of modern technologies such as wireless sensor networks (WSN), Internet-of-things (IoT) and machine-to-machine (M2M) communications involves the use of batteries, which pose a serious environmental risk with the Elimination of billions of batteries every year. Energy harvesting is essential for the short life span that are in power supplies to keep running electronic devices of low power, nowadays, there are different methods to implement systems that do not require the use of batteries such as Microbial Fuel Cell, Solar, piezoelectric, thermal and kinetic energy. This thesis describes the implementation of a node's acquisition of data using a novel option of harvest energy, as the Plant Microbial Fuel Cell (PMFC), becoming a self-sustaining energy system node. A solution of green energy for applications in precision agriculture as the WSN's, since it would help to improve the crop yield.

Keywords: Batteryless, Energy Harvesting, IoT, Plant Microbial Fuel Cell, Wireless Sensor Network.

Contenido

1. Introducción	1
Antecedentes	2
Planteamiento del Problema	3
Objetivos	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos	4
Justificación	5
Alcance del Proyecto	5
Limitación Espacial	5
Limitación Temporal	5
Otras Limitaciones	5
2. Sistema de Energía	6
2.1. Fuentes de Energía Renovable	7
2.2. Administradores de Energía	9
2.2.1. Bq25570-EVM	9
2.2.2. LTC-3108	10
2.3. Supercapacitores	11
3. Nodo Sensor	12
3.1. Microcontrolador	12
3.1.1. LaunchPad	12
3.1.2. Microcontrolador MSP430FR5969	14
3.2. Sensor	16
3.2.1. Sensor SHT1x	16
4. Estándares de Comunicación Inalámbrica.	17
4.1. Tecnologías de Comunicación.	17
4.1.1. LoRa.	19
4.1.2. Sigfox.	20
4.1.3. Bluetooth Low Energy.	21
4.1.4. ZigBee.	21
4.1.5. Módulos Xbee	23
5. Diseño del Nodo Sensor	26
5.1. Celda de Combustible de Planta Microbiana: Métodos y Cálculos.	27
5.2. Configuración Serie Paralelo de una PMFC	29
5.2.1. Desempeño de una planta PMFC	30

5.2.2. Desempeño en Diferentes Condiciones Ambientales	33
5.2.3. Comparativo Plantas Serie Vs Paralelo	35
5.3. Circuito Administrador de Energía.	36
5.4. Sistema del Nodo Sensor.	36
5.4.1. Módulo Adquisición de Datos y Acondicionamiento de la Señal.	37
5.4.2. Módulo Microcontrolador.	37
5.4.3. Módulo de Transmisión Inalámbrica.	38
5.5. Prototipo Final.	39
5.6. Estrategia para el Consumo de Energía de Ultra-Baja Potencia.	40
5.7. Servicios de Almacenamiento en la Nube y de IoT	41
6. Resultados y Discusiones	42
6.1. Diseño PMFC	42
6.2. Consumo de Energía del Nodo Sensor	45
6.2.1. Estrategia DPM	45
6.3. Aplicación IoT: Sistema de supervisión vía WEB	46
6.4. Discusión	47
7. Conclusiones	48
Bibliografía	49
Anexos	54
A. Anexo I: Ejemplo de código lauchPad	55
B. Anexo II: Esquemas de Conexión	57
C. Anexo III: Artículo	65

Índice de tablas

5.1. Tabla de Configuración SHT10.	37
6.1. Resultados del consumo de energía de la PMFC basado en un sistema EH para aplicaciones IoT.	46

Índice de figuras

1.1. Elementos Principales de un Dispositivo para WSN.	2
2.1. Representación esquemática de un sistema de recolección de energía.	6
2.2. Representación Esquemática de una Celda de Combustible Planta Microbiana.	8
2.3. Administrador de Energía BQ25570EVM-TI	9
2.4. Administrador de Energía LTC3108.	10
2.5. Supercapacitores Vs Baterías	11
3.1. Code Composer Studio / Energía.	13
3.2. Tarjeta de Desarrollo LaunchPad MSP430FR5969.	14
3.3. Circuito Interno del Sensor.	16
4.1. Cobertura de Redes Inalámbricas	18
4.2. LoRa como una Red de Comunicaciones para Aplicaciones de IoT.	19
4.3. Sigfox como un Proveedor de Servicios de IoT.	20
4.4. Topologías de Red ZigBee y los roles que pueden adquirir los dispositivos.	22
4.5. Módulo Xbee Fabricado por DiGi.	23
4.6. Los Diferentes Roles de los Módulos Xbee.	23
4.7. Tarjetas Electrónicas para la Comunicación del Módulo Xbee con la Computadora.	24
4.8. Software para Interactuar y Configurar los Módulos Xbee.	25
5.1. Esquema a bloques del nodo sensor y utilizando tecnología de una PMFC como fuente renovable y Recolector de Energía.	26
5.2. Representación esquemática de la PMFC usado en los experimentos.	27
5.3. I-V y P-V Curvas Características de la PMFC Propuestas.	28
5.4. Sistema PMFC Conectada en Serie.	29
5.5. Sistema PMFC Conectada en Paralelo.	30
5.6. Tabla de Datos voltaje Vs corriente PMFC con Carga de 1 k.	30
5.7. Gráfica de una PMFC con Carga de 1k Ω	31
5.8. Sansevieria Hahnii.	31
5.9. Tabla de datos voltaje vs corriente.	32
5.10. Desempeño de 3 plantas en Serie.	32
5.11. Desempeño de 3 plantas en Serie con Diferentes Cargas.	32
5.12. Pruebas de suelo.	33
5.13. Gráfica que muestra el comportamiento de la corriente Vs voltaje y la potencia respecto a diferentes variables ambientales.	34
5.14. Desempeño de las Plantas Conectadas en Serie (naranja) y Paralelo (azul) Comparadas con la Potencia de una Sola Planta (verde).	35
5.15. Prototipo Final.	35

5.16. Circuito Administrador de Energía (LTC3108).	36
5.17. Esquema a Bloques del Nodo Sensor.	38
5.18. Sistema del Nodo Sensor.	39
5.19. Esquema de WSN para Aplicaciones IoT.	39
5.20. Modelo para el Manejo Dinámico de la Energía (DPM).	40
6.1. Curva de Voltaje, Corriente y Potencia Máxima Según las Condiciones de Suelo. . .	42
6.2. Curva de Polarización de la PMFC, cuando el potencial controlado se mantiene durante diez ciclos.	43
6.3. Análisis Comparativo del Voltaje en Circuito Abierto (línea negra) y La Corriente de Cortocircuito (línea azul) durante diez ciclos.	44
6.4. (a) Curva de Potencia de la PMFC, (b) Máxima Densidad de Potencia (curva negra) por ciclo y el Parámetro de resistencia interna (curva azul) por ciclo.	44
6.5. Estrategia DPM SSM1.	45
6.6. Aplicación IoT: Sistema de Supervisión Vía WEB	47
B.1. Diagrama del Sistema Energy Harvesting.	57
B.2. Modelo del Nodo Sensor I.	57
B.3. Modelo del Nodo Sensor II.	58
B.4. Modelo del Nodo Sensor III.	58
B.5. Esquema de Circuito del LTC-3108.	59
B.6. Esquema de Conexión del la Launchpad.	59
B.7. Medición de voltaje en serie suelo.	60
B.8. Diseño de planta1.	60
B.9. Diseño de planta2.	61
B.10. Esquema para realizar las pruebas del diseño de una PMFC, a) imagen de la izquierda prueba para elegir tipo de suelo, b) imagen de la derecha, diseño del tamaño de nuestra maceta utilizando las mejores condiciones arrojadas en la prueba de suelo . .	61
B.11. Pruebas de suelo.	62
B.12. Pruebas de implementación del sistema completo.	63
B.13. Configuración Xbee modo DigiMesh.	64

Capítulo 1

Introducción

La agricultura es considerada como una de las actividades económicas más importantes para distintas zonas a nivel mundial. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, mundialmente conocida como FAO (por sus siglas en inglés: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*), menciona en su informe en febrero del 2017 sobre el Futuro de la alimentación y la agricultura, que para el año 2050 se espera que la población mundial crezca hasta 9700 millones de personas [1], lo cual implica de la misma manera una demanda en el consumo de alimentos. En la agricultura tradicional, las pérdidas oscilan entre un 30 % y un 40 % [2]. Por tal motivo, se busca hoy en día mejorar la productividad agrícola de forma sostenible para satisfacer la creciente demanda.

A través del tiempo se ha ido evolucionando y adaptando nuevas estrategias con el propósito de cubrir los requerimientos de los productores y de las distintas técnicas que permiten a los a estos mismos planificar los cultivos y alterar a su gusto elementos como la humedad, concentración de dióxido de carbono o flujo del aire. En este sentido, se tiene un área abierta a la investigación denominada como agricultura de precisión.

La agricultura de precisión puede definirse como el arte y la ciencia para mejorar la producción del cultivo con apoyo de las tecnologías de la información y la comunicación (*TIC's*) [3]. Angela María Rodríguez menciona que *"la agricultura de precisión es un concepto de gestión de parcelas agrícolas que estudia la variabilidad de suelo y clima entre diferentes campos de cultivo con el fin de ajustar a la medida la aplicación de insumos como agua, fertilizantes, pesticidas, etc., y consecuentemente, incrementar los niveles de productividad"* [4]. En pocas palabras, podemos decir que la agricultura de precisión es una práctica que integra los principios de la tecnología y la agronomía, con el propósito de mejorar el rendimiento del cultivo [5]. Esta actividad hace uso de herramientas tecnológicas como las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN, *por sus siglas en inglés: Wireless Sensor Network*) que permiten aumentar la rentabilidad de los cultivos, así como su calidad, cantidad y rendimiento, que ayudan a controlar y automatizar el manejo específico de una zona o área de cultivo.

A fin de que las WSN lleven a cabo la eficiencia en el rendimiento del cultivo, las empresas manufactureras han diseñado dispositivos de adquisición de datos como el EZ430-RF2500-SEH por Texas Instruments, el EDK 350 por parte de OCEAN y el DV164133 por Microchip, por mencionar algunos ejemplos. En la figura 1.1 se muestra el esquema general de los elementos principales que contienen los dispositivos de adquisición de datos.



Figura 1.1: Elementos Principales de un Dispositivo para WSN.

Antecedentes

La historia de las redes de sensores surge en EE.UU, durante la guerra fría, y su principal propósito era para aplicaciones de carácter militar. Podemos mencionar a SOSUS (*Sound Surveillance System*) que se trataba de una red de sensores acústicos desplegados en el fondo del mar para detección de submarinos. Al mismo tiempo EE.UU desplegaba por aire una red de radares aéreos, dando lugar a los famosos aviones AWACS [6].

Hoy en día estas redes de sensores han evolucionado con el tiempo, dejando atrás las tecnologías alámbricas para pasar a nuevas tecnologías como las inalámbricas; dentro de esta categoría existen las WSN, que no es nada más que numerosos dispositivos llamados nodos o estaciones de trabajo inalámbricos, distribuidos especialmente y que se encargan de recolectar información mediante sensores de algún evento o fenómeno físico; después, procesan los datos obtenidos y los envían a otros nodos llamados Nodos Coordinadores, que reciben toda la información enviada por cada nodo sensorial dentro de las WSN y a través de un Gateway, interconectan la red WSN con una red TCP/IP a una Estación Base, o Nodo Central [7], que recibe toda la información de la red para su procesamiento mediante el uso de herramientas web como servicios de computación que se utilizan mediante el internet (*Cloud Computing*) que faciliten la comunicación con los usuarios sobre la información obtenida.

Los nodos que conforman la red son energizados por baterías o supercapacitores, destinados a mantener a los diferentes sensores (temperatura, humedad, CO₂, entre otros) y dispositivos de transmisión/recepción de datos. El continuo reemplazo de las fuentes de alimentación encarece el mantenimiento en general y obstruye el tiempo de vida de la red. En este sentido, la recolección de energía para nodos viene a mitigar el problema de agotamiento, prolongando el tiempo de vida de la WSN, por lo que el concepto de recolecta de energía es un área fuerte que se abre a la investigación para implementar sistemas sin baterías en redes de sensores (*battery-less energy harvesting*

sensors).

Las WSN han adquirido especial importancia y en la actualidad las WSN se han utilizado para diversas aplicaciones; extendiéndose considerablemente hacia la monitorización de entornos naturales, aplicaciones para defensa y aplicaciones médicas [8], para tareas de vigilancia del hábitat, agricultura, control de reactores nucleares, seguridad y vigilancia táctica [5,9], por mencionar algunas.

Los nodos de sensores poseen memoria interna, la cual permite almacenar información proveniente de las lecturas de sensado realizadas por cada uno de los sensores; estas lecturas pueden ser almacenadas en paquetes. Los paquetes de datos suelen ser enviados a través de la red en forma de difusión (*Broadcast*). Los nodos centrales o estaciones base se encargan de retransmitir estos paquetes para su análisis en tiempo real mediante el uso de las tecnologías de la información y comunicación (*TIC's*).

Las WSN se han convertido en un importante soporte tecnológico, el cual para la obtención de grandes datos, tales como temperatura, humedad, condiciones de trabajo de equipo, información de salud y consumo de electricidad por mencionar algunos, se requiere de un algoritmo de procesamiento capaz de manejar datos muy grandes. Es aquí donde existe un desafío técnico en la recopilación de datos en tiempo real, que por su elevado volumen, diversidad y complejidad; éstos no pueden ser almacenados ni visualizados con herramientas tradicionales puesto que pueden llegar a alcanzar el orden de los petabytes [10]. Las dimensiones enormes de estos datos obligan a buscar diferentes soluciones tecnológicas, surgiendo en este sentido el concepto de Big Data; pues el buen manejo de estos datos, puede representar nuevos métodos para la toma de nuevas decisiones y oportunidades.

A pesar de que las redes de sensores inalámbricos se van abriendo camino como una de las nuevas tecnologías del futuro, aún existen problemáticas, tal como el uso del manejo eficiente de la energía en estos dispositivos, pues las investigaciones en la última década han sido en buscar nuevas fuentes de alimentación (Fotovoltaica, TEG's, Piezoeléctrico, RFI) [11,12], mediante el EH (*EH, por sus siglas en inglés: Energy Harvesting*), que no es otra cosa más que el aprovechamiento de la energía renovable. En lo que respecta al manejo de la información, surgen problemas de programación, que durante el procesamiento de datos [10] hay que determinar cual estándar de comunicación usar y que protocolos de internet, así como el acceso a los servicios del Cloud Computing para garantizar el tiempo de vida útil y el equilibrio del consumo de energía en las transmisiones de los datos [13].

Planteamiento del Problema

En la actualidad la agricultura de precisión, aunque va evolucionando gracias al uso de nuevas tecnologías de comunicación, tiene su fundamento básico en las características de los suelos y para llevarlo a cabo se requiere de tareas como la recopilación de datos, el monitoreo y la evaluación del suelo, el cual conlleva a una amplia planificación metódica y de mucho tiempo. En el pasado, estas tareas se realizaban con papel y bolígrafo, lo cual no solamente hacía que el proceso fuera propenso a errores, sino que también aumentaba la dificultad de realización en gran escala, además de que los costos de operación aumentaban [9].

Entonces surge un problema en cómo obtener estos datos de una manera sencilla para poder entender la dinámica del suelo y determinar que realizar para obtener el mejor aprovechamiento de un área de cultivo. Los avances tecnológicos como el uso de las TIC's y de IoT (por su siglas en ingles *Internet of Things*) han permitido con el tiempo la fabricación de dispositivos electrónicos con estas características, con la finalidad de detectar, procesar datos y comunicarse con otros dispositivos donde las extensiones de área son demasiado grandes.

La razón de usar una WSN como un sistema de adquisición de datos es la modularidad y la versatilidad que le da a la red de monitoreo, pues al añadir tantos nodos se puede abarcar mayor área. Además, permite integrar fácilmente diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica para lograr distintos alcances y rangos de conexión [9]. Por lo tanto, en este trabajo se diseñará un nodo que tendrá la capacidad de hacer la recolección de energía a través de una Celda de Combustible de Planta Microbiana (PMFC, por sus siglas en ingles); asimismo se hará uso del protocolo de comunicación por defecto ZigBee de acuerdo al estándar de transmisión IEEE 802.15.4 [13].

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un nodo de adquisición de datos ambientales para conformar una red de sensores inalámbricos con la característica de ser energéticamente autosustentable (battery-less energy harvesting systems).

Objetivos Específicos

- Realizar una revisión del estado del arte de los dispositivos comerciales con características de energy harvesting.
- Conocer la respuesta de los sensores (temperatura/humedad) para implementar los nodos de adquisición de datos.
- Investigar gestores de potencia y su alimentación del sistema que estará compuesto de módulos supercapacitores, fuente de energía alternativa y el nodo de adquisición de datos para la red.
- Realizar una revisión de los módulos de transmisión de datos comerciales y estudiar el protocolo Zigbee para la comunicación.
- Definir la topología de red e implementar el lenguaje de programación para el nodo de adquisición de datos.
- Realizar pruebas en laboratorio y campo para caracterizar el funcionamiento del nodo.

Justificación

Este proyecto de tesis tiene como objetivo el diseño de un nodo capaz de tomar muestras de temperatura y humedad mediante un dispositivo (nodo) central, poder monitorear las propiedades del suelo adquiridas. Se espera que en el futuro el nodo diseñado pueda servir para determinar ciertas tareas en el cultivo o para establecer un estándar apropiado de condiciones ideales del suelo. Cabe mencionar que el estado de Quintana Roo cuenta con 25 mil 958 hectáreas de cultivo cíclicos, en el que se establecen cultivos de chile habanero, elote, maíz y tomate, así como el cultivo de la caña de azúcar en un área de 32 mil 229 hectáreas de tierra (datos proporcionados por la SAGARPA, en el informe municipal del 5 de Octubre del 2016) [14].

Alcance del Proyecto

Limitación Espacial

- La investigación se realizó en las instalaciones de la División de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Quintana Roo.
- Se realizaron las pruebas en tiempo real en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.

Limitación Temporal

- La investigación se llevará a cabo en un periodo comprendido desde Agosto del 2017 a Junio del 2018.

Otras Limitaciones o Casos Futuros

- El usuario debe tener conocimientos básicos sobre el manejo de dispositivos electrónicos (computadora, celular).
- Las pruebas a realizar son mediciones de humedad y temperatura, las pruebas de CO₂ del suelo se deja a una continuación del proyecto.
- Buscar una mejor topología de propagación de señales inalámbricas para la mejora de la tecnología ZigBee.
- Queda como una futura investigación, en ramas de la seguridad en cuanto al cifrado de los datos.
- Mejorar el circuito electrónico para integrar el administrador de energía, el modulo de radio y el sensor en una sola placa.

Capítulo 2

Sistema de Energía

La energía almacenada en una batería, mantiene en funcionamiento aparatos como cámaras de video, teléfonos celulares incluso operar a distancia dispositivos electrónicos. Sin embargo la durabilidad de las baterías es finita y la mayoría termina en la basura ocasionando un serio problema por sus componentes químicos al ecosistema. A través del tiempo se ha ido evolucionando y adaptando nuevas estrategias para obtener fuentes de alimentación confiables y sostenibles hacia el uso de sistemas sin baterías, como la energía obtenida por el sol, la recolectada por biomasa, viento o por diferencia de temperatura [15]. En la Figura 2.1 se muestra el diagrama a bloques del sistema global de recolecta de energía sostenible, este sistema tiene como propósito principal el de consumir en menor proporción energía derivada de la combustión de combustibles fósiles, el cual genera emisiones de CO_2 en el aire dañando al medio ambiente.

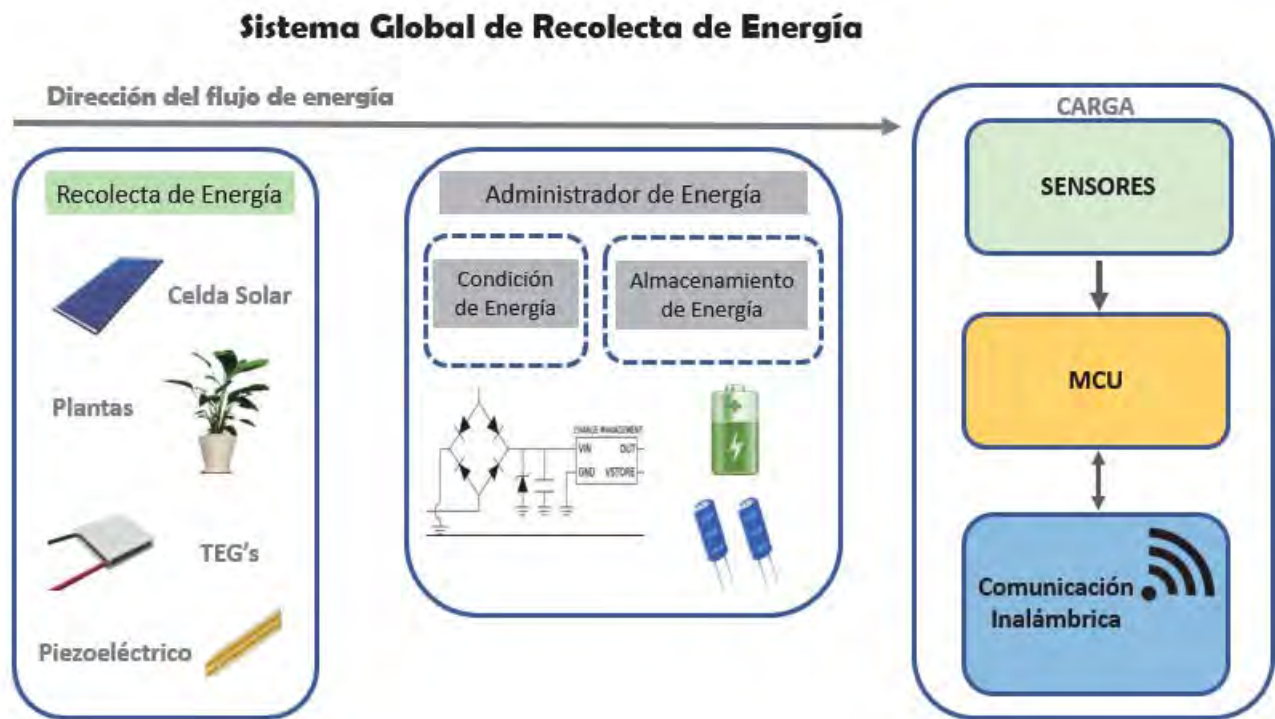


Figura 2.1: Representación esquemática de un sistema de recolección de energía.

2.1. Fuentes de Energía Renovable

A través del tiempo se ha ido evolucionando y adaptando nuevas estrategias para obtener fuentes de alimentación confiables y sostenibles. Las fuentes de energía renovables o sostenibles, son las que provienen de fuentes naturales como el sol, el agua de lluvia, el viento, el mar, por vibraciones etc. A continuación una breve descripción de las más conocidas:

- **Energía Solar.** Los fotones, que provienen de la radiación solar, impactan sobre la superficie de paneles solares o fotovoltaicos. Estos paneles están formados por grupos de celdas solares hechos de materiales semiconductores, tales como el silicio. Las celdas solares son las responsables de transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones).
- **Energía Eólica.** Para obtener electricidad, el movimiento de las aspas o paletas accionadas por el viento activan un generador eléctrico (un alternador o un dinamo) que convierte la energía mecánica de la rotación en energía eléctrica. La electricidad producida se puede almacenar en baterías o ser vertida directamente a la red eléctrica.
- **Energía Piezoeléctrica.** Es la capacidad que tienen algunos cristales para generar energía eléctrica al ser sometidos a tensiones mecánicas, es decir, generan tensión eléctrica al ser golpeados o deformados.
- **Energía Mareomotriz.** Es energía mecánica producto del movimiento de las mareas y las olas del mar. El movimiento de mareas es generado por la interacción gravitatoria entre la Tierra y la Luna. Tal movimiento se utiliza para traspasar energía cinética a generadores de electricidad.

Con el paso del tiempo aparecen novedosas tecnologías viables y autosustentables como la obtención de energía eléctrica mediante el uso de Celdas de Combustibles Microbianas (MFC, por sus siglas en inglés) [16], una fuente de alimentación natural y limpia. Las MFC's usan bacterias como el catalizador, para oxidar materia orgánica e inorgánica y con ello mediante un proceso electro-químico, generar corriente eléctrica [15, 17–19]. Al descomponerse la materia orgánica, las bacterias liberan en efecto, electrones (e^+) debido a su metabolismo pero también liberan protones de hidrógeno (H^+) que al contacto con el oxígeno se transforma en agua [15].

En la última década se han estudiado diferentes configuraciones de MFC con el fin de obtener valores de potencias y tensiones de salidas constantes [20, 21] pero se desconocen los roles que juegan las bacterias a causa de diferentes factores como la temperatura, humedad, sustratos biodegradables, incluso el tipo de microorganismos que se encuentran en el suelo. Existen diferentes tipos de MFC's dependiendo de la naturaleza de la biocatálisis, celdas enzimáticas, celdas por sedimentos marinos, residuos de biomasa o PMFC. Siendo las PMFC's una alternativa de recolección de energía sustentable, novedosa y fácil de implementar.

Las PMFC's son una tecnología bioelectroquímica que produce energía eléctrica gracias a los microorganismos del suelo que descomponen la materia orgánica y de los compuestos orgánicos (glucosa) que se eliminan a través de las raíces de las plantas derivados del proceso de fotosíntesis (ver Figura 2.2). Este fenómeno sucede cuando el dióxido de carbono absorbido por las hojas es lanzado como rizodepositos por las raíces de la planta los cuales se utilizan como sustratos de bioenergía y los microorganismos (bacterias) se alimentan de ello para obtener energía metabólica además de descomponer la materia y liberar electrones así como retornar CO_2 a la atmósfera [16].

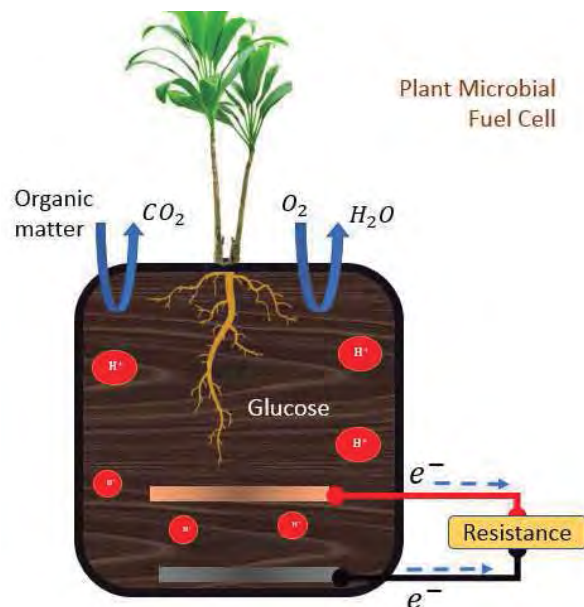


Figura 2.2: Representación Esquemática de una Celda de Combustible Planta Microbiana.

Las principales características de este tipo de fuentes son la corriente producida, voltaje en circuito abierto y la máxima potencia registrada, en la literatura podemos encontrar PMFC's con mediciones obtenidas en orden de los mW por ejemplo, Strik reportó en el 2008 [16] 253 mV, 0.253 mA y su máxima potencia fue de 0.67 mWm^{-2} , Brunelli en el 2016 [22], en su experimento obtiene una potencia máxima alrededor de $300 \mu W$ a una carga resistiva de 800Ω en ambos casos usando 2 PMFC's como experimento, pero comparando otras fuentes de energía como los TEG's, Yaoguan Shi reportó que su dispositivo generó en el 2018, 10.5 mV en circuito abierto con una potencia de $23 \mu W$ y una densidad de potencia de $4.75 \mu Wm^{-2}$ [23].

Los estudios sobre fuentes de energía autosustentables nos ayudan a minimizar el problema de dispositivos electrónicos que trabajan con baja potencia energética o en su caso, los que son alimentados por baterías, para determinar el tiempo en que se tenga que reemplazar. En relación a los dispositivos de baja potencia, en el mercado no existe gran variedad puesto que es una tecnología reciente, aunque varias empresas desarrollan actualmente dispositivos que puedan trabajar con potenciales muy bajos, hoy en día podemos encontrar administradores de energía como el BQ25570-EVM de Texas Instruments [24] o el LTC3108 de Linear Technology [25] que se usan para aplicaciones de ultra-baja potencia.

2.2. Administradores de Energía

La eficiencia de la energía en un dispositivo para aplicaciones de bajo consumo es primordial, ya que el recurso energético es limitado y por lo tanto el reemplazo o cambio de baterías puede llegar a ser más costoso e inclusive imposible de realizar. Las tecnologías van evolucionando al paso de los años, por consiguiente van apareciendo sistemas capaces de proporcionar una tensión y corriente destinada a un caso en particular, sistemas llamados Administradores de Energía que, a partir de una fuente de corriente continua o alterna regulan la energía. En este trabajo nos enfocamos estrictamente en buscar administradores de energía que operen con potencias muy bajas, tal es el caso del Bq25570EVM de Texas Instruments, como se muestra en la Figura 2.3 y el LTC3108, como se muestra en la Figura 2.4 de Linear Technology.

2.2.1. Bq25570-EVM

El dispositivo Bq25570 está diseñado específicamente para extraer eficientemente miliwatts (mW) de potencia generada a partir de una variedad de fuentes de Corriente Continua (CC, por sus siglas en ingles) como generadores fotovoltaicos (solares) o termoeléctricos (TEG). Las funciones de administración de la batería garantizan que una batería recargable no se sobrecargue con esta potencia extraída, con un aumento de voltaje o una carga del sistema más allá de los límites de seguridad. El Bq25570EVM integra un convertidor de Corriente Directa a Corriente Directa (DC/DC) de nano-potencia altamente eficiente para proporcionar alimentación a sistemas tales como redes inalámbricas de sensores (WSN) que tienen una potencia estricta y demandas operativas [24].

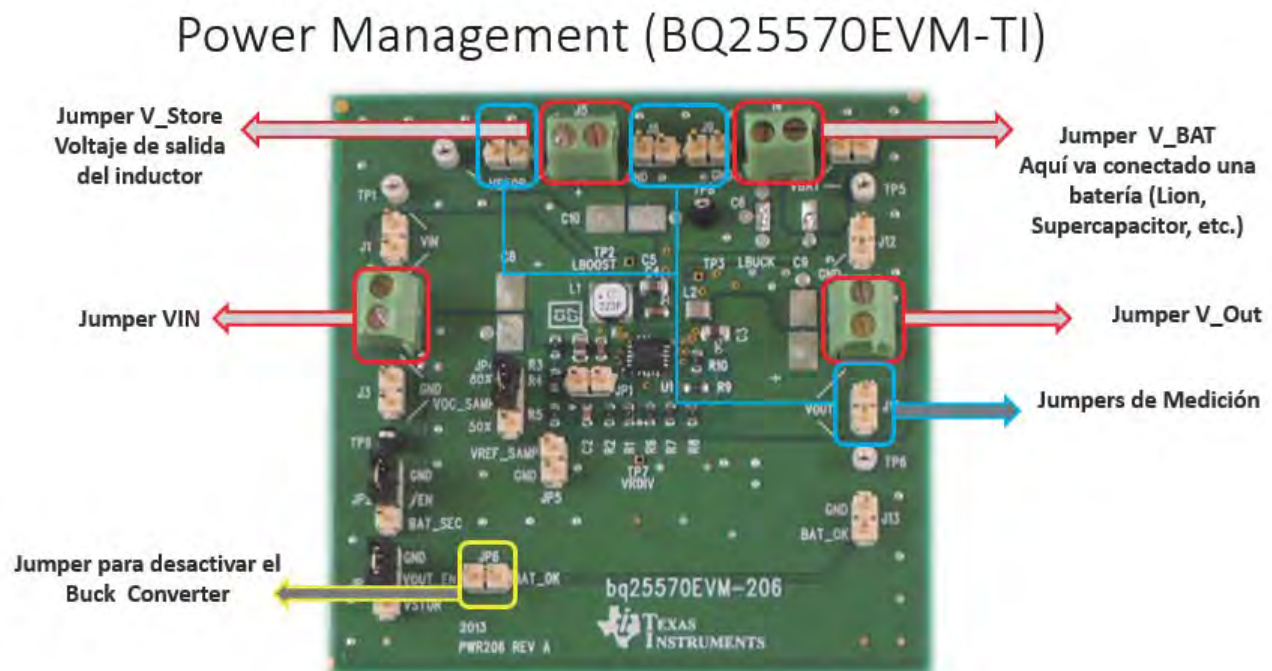


Figura 2.3: Administrador de Energía BQ25570EVM-TI

Características del Bq25570EVM

- Convertidor DC/DC tipo Boost y tipo Buck.
- Voltaje de operación $\geq 300\text{ mV}$.
- Voltajes de Salida: V_{BAT} 1.8 Volts a 4.2 Volts y V_{Buck} 1.8 Volts.
- Integra un óptimo aprovechamiento de la energía con un algoritmo Programmable Maximum Power Point Tracking (MPPT).
- Puede almacenar energía para recargar baterías de Li-ion, Supercapacitores o capacitores convencionales.

2.2.2. LTC-3108

El convertidor DC / DC utiliza un pequeño transformador para crear un aumento de voltaje de entrada ultra bajo. Es ideal para sensores inalámbricos de baja potencia y otras aplicaciones en las que se utiliza la recolección de energía excedente para generar energía del sistema porque la energía tradicional de la batería es inconveniente o poco práctica. El LTC3108 maneja la carga y la regulación de múltiples salidas, el convertidor también se puede usar para cargar lentamente un capacitor estándar, un súper capacitor o una batería recargable, utilizando energía extraída de un elemento por ejemplo el Peltier [25].

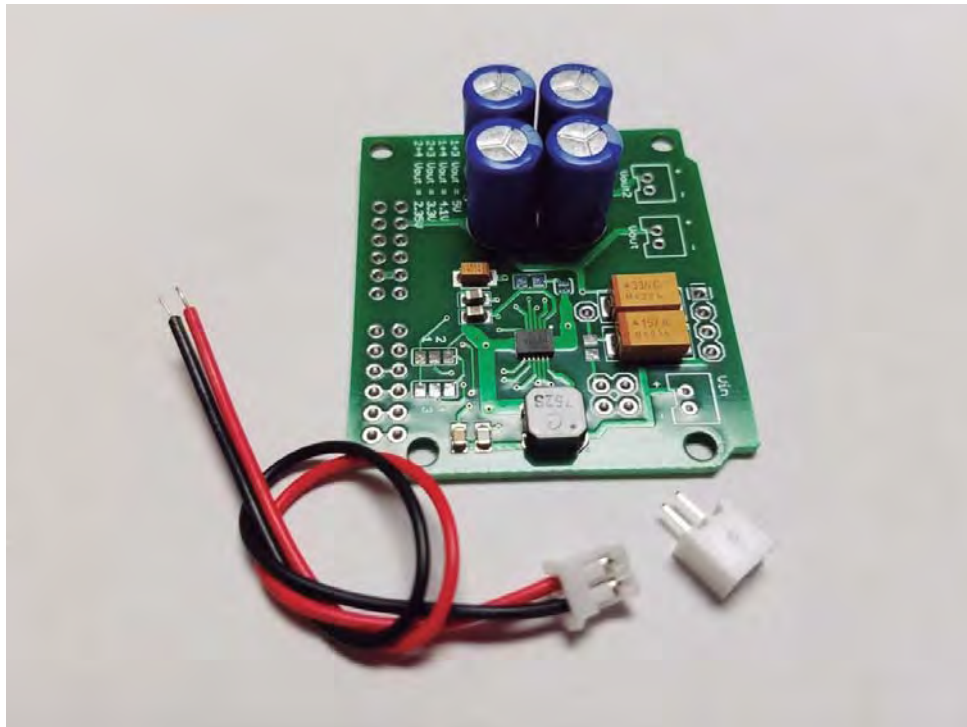


Figura 2.4: Administrador de Energía LTC3108.

Características del administrador de energía LTC3108

- Convertidor DC/DC tipo Boost
- Voltaje de operación $\geq 20\text{ mV}$.
- Voltajes de Salida Variable: 1.8 V, 2.2 V, 3.3 V, 4.2 V y 5 Volts.
- Contiene 4 supercapacitores de 1.5 F cada uno.
- VLDO de 2.2 Volts constante.

2.3. Supercapacitores

Los supercapacitores o ultracapacitores electrolíticos están formados con una tecnología que les permite almacenar bastante energía más que un capacitor electrolítico convencional, como se muestra en la Figura 2.5. Un capacitor comercial esta normalmente en el orden de los micro-Faradios (μF) mientras que un supercapacitor esta en el orden de los Faradios (F), los Faradios es la unidad de capacitancia eléctrica.

Los supercapacitores tienen la desventaja que manejan voltajes bajos, no existen hasta el momento mas allá de 5.5 V, mientras que un capacitor comercial puede trabajar hasta con 450 V. Aunque los supercapacitores tienen una mayor capacidad de energía, por ahora no logran igualar a las baterías directamente, puesto que las baterías, durante su tiempo de vida mantienen prácticamente su voltaje, en los supercapacitores pasa lo contrario, mientras este cargado, el voltaje se mantiene pero si la carga del supercapacitor cae el voltaje igual; en este sentido, necesitamos de circuitos adicionales para estabilizar la tensión tal como los convertidores tipo boost.

En general, podemos decir que los supercapacitores son dispositivos electroquímicos que sirven para almacenar energía, una batería tiene tiempos de carga muy largos, mientras que los de un supercapacitor son mas cortos, otra característica de los supercapacitores es que pueden descargarse muy rápido o muy lentamente, lo que significa que pueden ceder la potencia necesaria cuando se requiera a diferencia de una batería que se descarga lentamente.

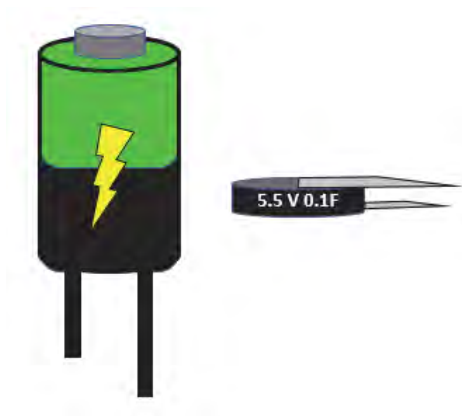


Figura 2.5: Supercapacitores Vs Baterías

Capítulo 3

Nodo Sensor

3.1. Microcontrolador

El MSP430 es una familia de microcontroladores producidos por Texas Instruments. Este microcontrolador está diseñado para aplicaciones de bajo costo y bajo consumo de energía. El MSP430 es muy útil para proyectos inalámbricas o proyectos que requieran de bajo consumo [26].

Existen cuatro generaciones fundamentales del MSP430. La primera 1xx, la 2xx, la 3xx y la 4xx. Los números escritos después de la letra identifican primero el modelo, segundo la cantidad de memoria integrada, y tercero alguna variante del modelo [26].

3.1.1. LaunchPad

Launchpad es una herramienta de desarrollo y de evaluación para los dispositivos MSP-430 de Texas Instruments [27]. El MSP430 Ultra-Low-Power (ULP) es un integrado Ferroeléctrico Aleatorio Acceso Memoria (FRAM), significa que usa un microchip RAM para almacenar datos temporalmente y el CPU pueda acceder a estos datos rápidamente, con ello al estar integrado un material ferroeléctrico [28], puede retener información digital aunque no haya energía que alimente el microcontrolador. El MSP-EXP430FR5969 (o el "FR5969 LaunchPad") es un modulo fácil de usar para una evaluación del microcontrolador MSP430FR5969 [29]. Contiene lo necesario para desarrollar proyectos en plataformas de desarrollo integrados (IDE's) como el Code Composer Studio (CCS) [30], que incluye una emulación para su programación, depuración y mediciones de energía. Otro IDE importante es Energía, es una interfaz de desarrollo como la IDE de Arduino, más simplificado pero sin algunas de las herramientas que Arduino utiliza. Una persona familiarizada con Arduino se le puede facilitar mucho a la hora de implementar alguna aplicación.

La gran diferencia es que en CCS tú puedes simular y medir en tiempo real los consumos de energía, mediante un eZFET [29] un emulador integrado en esta tarjeta mientras que en Energía trabaja directo con el microcontrolador MSP430FR5969.

Como se muestra en la Figura 3.1 podemos apreciar los IDE's con los que se puede programar el FR5969 LaunchPad.



Figura 3.1: Code Composer Studio / Energía.

Las características del dispositivo MSP430FR5969 64 Kb de FRAM incorporado, una memoria no volátil conocida por su potencia ultra baja, alta resistencia y acceso de escritura de alta velocidad. El dispositivo admite velocidades de CPU de hasta 16 MHz y tiene periféricos integrados para comunicación, ADC, temporizadores, encriptación AES y mucho más, suficiente para comenzar a desarrollar [31].

3.1.2. Microcontrolador MSP430FR5969

Las características de la tarjeta en general contiene botones y LED's para su rápida integración con el usuario, también integra un supercapacitor que permite hacerlo único y es perfecto para mediciones de temperatura, uso en nodos de sensores para recolecta de energía y optimizados para lograr una mayor duración de la batería en aplicaciones dependientes que requieran energía. La tarjeta de desarrollo LaunchPad MSP430FR5969 puede observarse a través de la Figura 3.2 [29].

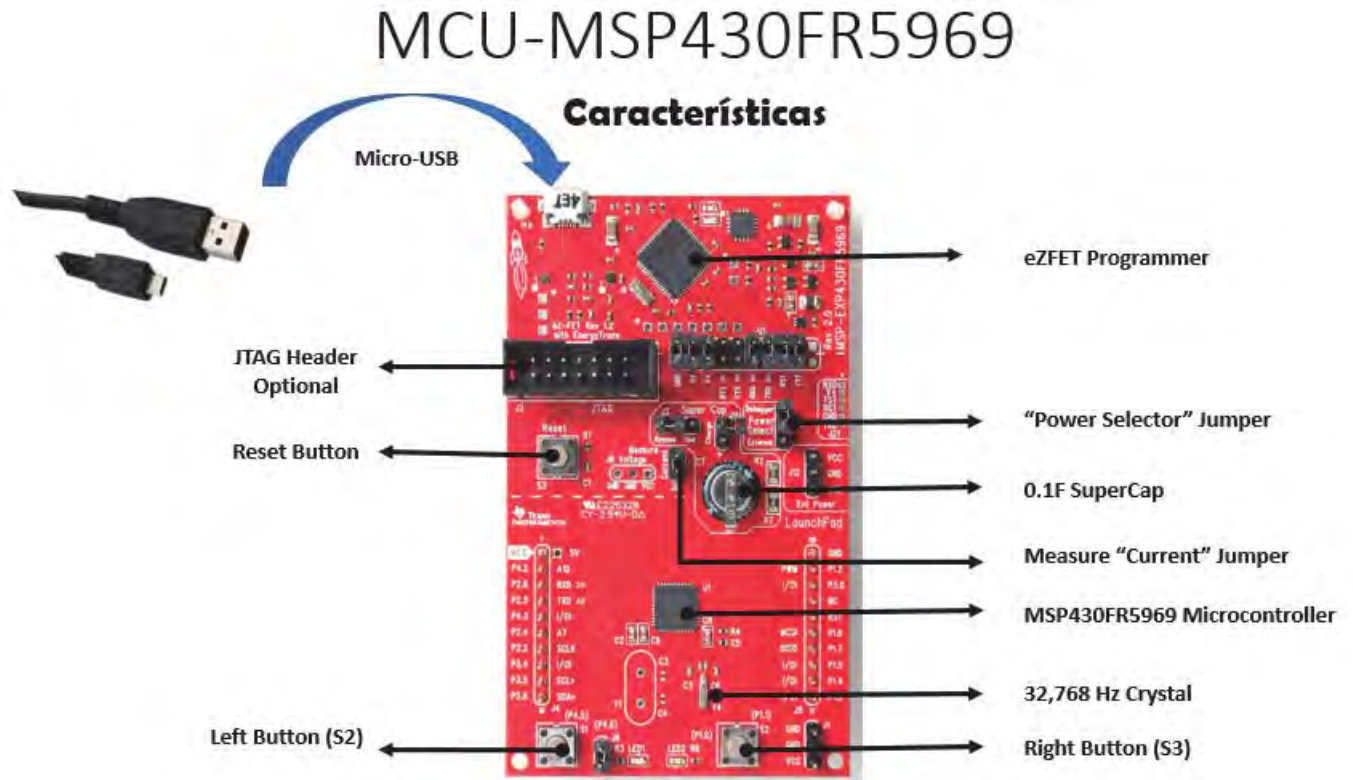


Figura 3.2: Tarjeta de Desarrollo LaunchPad MSP430FR5969.

Características Generales del MSP430FR5969

- Microcontrolador integrado.
 - Arquitectura RISC de 16 Bits.
 - Voltaje de alimentación 1.8 V a 3.6 V.
- Modos optimizados de energía.
 - Activo: aproximadamente 100 $\mu\text{A}/\text{MHz}$.
 - Reloj en tiempo real (LPM3.5): 0,25 μA .
 - Apagado (LPM4.5): 0,02 μA (típico).
- RAM ferroeléctrica de ultrabaja potencia (FRAM).
 - Hasta 64 KB de memoria no volátil.
 - Escritura rápida a 125 ns por palabra (64 KB en 4 ms).
 - Resistente a radiaciones y no magnético.
- Escrituras de ultrabaja potencia.
- Reloj en tiempo real (RTC) con funciones de calendario y alarma.
- Hasta 40 puertos de entrada/salida multifunción.

3.2. Sensor

Un sensor, no es más que un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud del exterior y transformarla en otra magnitud, un impulso eléctrico que posteriormente es procesado por una serie de circuitos que generan una acción predeterminada en un aparato, sistema o máquina. Existen varios y diferentes tipos de sensores que miden varias magnitudes externas, como el aire, el agua, el viento, el pH, por mencionar algunos. En este proyecto nos enfocaremos en los sensores de temperatura de la familia SHT1x, ya que tienen la característica de ser dispositivos que producen mediciones analógicas o digitales, además de ser sensores de bajo consumo de energía.

3.2.1. Sensor SHT1x

La familia SHT1x, creados por la empresa Sensirion, son módulos de sensores digitales que tienen la capacidad de medir dos variables exteriores (humedad y temperatura). Los sensores integran los elementos básicos de operación de un sensor más el procesamiento de señal y proporcionan una salida digital totalmente calibrada. Se usa un único elemento sensor capacitivo para medir la humedad relativa mientras que la temperatura se mide con un sensor de banda prohibida. Usan una tecnología CMOSens[®] que garantiza una excelente fiabilidad y estabilidad a largo plazo. Ambos sensores están acoplados sin problemas a un convertidor analógico a digital de 14 bits y a un circuito de interfaz en serie. Esto da como resultado una calidad de señal superior, un tiempo de respuesta rápido y una insensibilidad a las perturbaciones externas. A continuación se muestra la forma de conexión al microcontrolador elegido por el usuario, como se muestra en la Figura 3.3 [32].

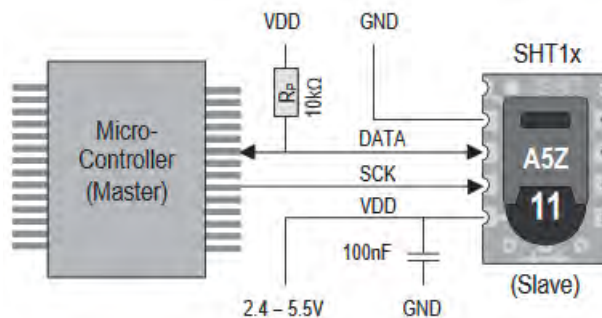


Figura 3.3: Circuito Interno del Sensor.

Características del Sensor SHT1x

- Dimensiones: 14mm de diametro, 55mm largo.
- Resolución de 12 Bits.
- Tamaño de Cable: 1 metro.
- Lecturas de humedad con 4.5% de exactitud.
- Lecturas de temperatura con ± 0.5 grados de precisión
- Rango de trabajo humedad/temperatura: $- 40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 4 cables : Rojo=Vcc(3 V - 5.5 V), Amarillo= Reloj, Verde o Negro= Ground, Azul= Datos.

Capítulo 4

Estándares de Comunicación Inalámbrica.

Para iniciar con este capítulo, debemos saber que existen reglas que permiten la transferencia e intercambio de datos entre dispositivos electrónicos que forman una red y a estas reglas las llamamos estándares o protocolos de comunicación, en pocas palabras, es disponer de un lenguaje común que permita interactuar a múltiples sistemas desarrollados por distintos proveedores. Los dispositivos han tenido un proceso de evolución gradual, a medida que la tecnología electrónica esta avanzado se van creando sistemas con identificadores únicos capaces de transferir información a través de una red sin tener que intervenir la mano del hombre, por lo tanto tener la necesidad de comunicarse de manera remota con uno o varios dispositivos electrónicos y simplificar la comunicación, ganar cobertura de red y que el consumo energético sea menor, hace que surjan nuevas tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) [33].

4.1. Tecnologías de Comunicación.

Por otra parte, una red cableada siempre traerá consigo gastos en el desarrollo de infraestructura cuando se trata de cubrir grandes distancias, es por ello, que se busca desarrollar trabajos de tipo inalámbricas. En este sentido, la tecnología inalámbrica permite conectar varios dispositivos sin la necesidad de depender de un cable [34].

Los principales beneficios de las redes inalámbricas, se pueden observar a través de los siguientes cuatro conceptos:

- Escalables: porque pueden ser configurados en una variedad de topologías.
- Flexibles: facilidad de utilizar dispositivos de manera móvil.
- Acceso a la información: interactuar remotamente con el uso de la información recolectada.
- Costos: un ahorro económico a largo plazo en la instalación, o en ambientes dinámicos.

En la Figura 4.1 , se muestran los tipos de redes y coberturas que existen. Sin embargo las redes inalámbricas pueden tener ciertas desventajas, y la principal es la seguridad. La seguridad en redes inalámbricas continua mejorándose día a día, por un lado con la autenticación y acceso a la información, mejoras en la consulta de datos y por el otro realizando diversos estudios que no dañen la salud, como exposición a la energía electromagnética emitida por los dispositivos electrónicos que brindan las diferentes tecnologías de radio y en ese sentido, existen organizaciones que se dedican a dictar las normas y reglas que deben seguir los fabricantes para tener una comunicación lo más estándar posible.

La IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers, por sus siglas en inglés), es la institución encargada de generar estándares de comunicación. La IEEE creó un equipo de trabajo llamado 802.15, dedicado al estudio de las Redes de Área Personal(Wireless Personal Area Network) [34].



Figura 4.1: Cobertura de Redes Inalámbricas

Pero en las redes inalámbricas van surgiendo como resultado natural del querer acercar al usuario a la red y de darle todos los servicios en base a conquistar un entorno ideal de comunicación sin la ayuda o manipulación humana [34]. Tecnologías capaces de ofrecer objetos conectados de forma directa a la red y de muy bajo consumo energético pero de una amplia cobertura de red, que van apareciendo con el tiempo y dichas soluciones estan catalogadas como otro tipo de red llamadas “Low Power Wide Area Network” (LPWAN) tales como Sigfox, LoRa o Weightless entre otras, las cuales han ayudado al éxito en aplicaciones de IoT [35].

Los nuevos protocolos parecen conseguir un solo objetivo: ampliar el alcance de las redes inalámbricas, garantizar la seguridad de las comunicaciones, reducir el consumo de los dispositivos y crear un lenguaje común. A continuación se muestra una breve descripción de las dos redes más importantes de gran cobertura para aplicaciones IoT.

4.1.1. LoRa.

LoRa es una red de comunicaciones basada en el protocolo LoRaWAN (Long Range Wide-area network), es decir, una red extendida de largo alcance. Es un protocolo de capa física (Modelo OSI) que ofrece un medio de comunicación de baja potencia para aplicaciones de máquina a máquina (M2M) e IoT. Reduce considerablemente el consumo de los dispositivos conectados a ella, y garantiza las comunicaciones a gran distancia a través de servidores, sin necesidad de usar otras redes como WiFi o conexiones a Internet.

Es una tecnología Open Source, desarrollada originalmente por Semtech, pero ahora es comandada por la empresa LoRa Alliance (Figura 4.2), el principio de funcionamiento es similar al de una red de telefonía móvil: la señal es emitida por una antena conectada a una estación base que a su vez está conectada a Internet. Los objetos conectados compatibles con LoRa se comunican con un controlador en la banda de los 863 a 870 MHz para Europa / 902 a 928 MHz en Estados Unidos y éste enlaza con la estación base por la red LoRa de baja velocidad y largo alcance.

Actualmente LoRa se encuentra arraigado en países como Francia, Bélgica, Suiza, Países Bajos, Sudáfrica y a diferencia de Sigfox, LoRa tiene como objetivo desarrollar un estándar y vender Chips.



Figura 4.2: LoRa como una Red de Comunicaciones para Aplicaciones de IoT.

4.1.2. Sigfox.

Es una compañía francesa (Figura 4.3) que se posiciona como otro proveedor de red IoT y aspira a convertirse en el primer proveedor global de redes IoT. Sin embargo, en esta red los dispositivos envían sus datos a través de la red Sigfox hacia una Backend Sigfox y este maneja la transferencia de los mensajes, la tecnología UNB (“Ultra Narrow Band”) que utiliza hace que la red sea de bajo costo, comunicación por mensajes cortos, largo alcance y bajo consumo.

Similar al funcionamiento de la telefonía móvil, la compañía despliega sus antenas con la ayuda de compañías locales de telecomunicaciones alrededor del mundo, Sigfox recibe en sus propios servidores los “telegramas” que envían los objetos conectados y transmite la información a servidores de terceros para que los fabricantes puedan integrar los datos en sus aplicaciones móviles de modo que el proveedor IoT no tiene que preocuparse por la creación de la infraestructura.



Figura 4.3: Sigfox como un Proveedor de Servicios de IoT.

Las tecnologías LPWAN, como Sigfox o LoRa, ofrecen una solución de ultra bajo costo, tanto económico como energético, la experiencia que dan varios millones de conectividades y unas redes con gran auge en algunos países.

Hay varias tecnologías de radio que están enfocadas en aplicaciones de IoT, pero ¿cuál es la correcta?, bueno la respuesta es "depende" de que proyecto se necesite desarrollar y en base a las características y demandas del proyecto. Por ejemplo, distancia de transmisión, bajo consumo u otras, podemos elegir la que se adapte mejor a las necesidades. Para la elaboración de este trabajo, nuestra necesidad primordial es que un protocolo que funcionará a corta distancias.

4.1.3. Bluetooth Low Energy.

Bluetooth se basa en la tecnología de frequency hopping (salto de frecuencia), Bluetooth opera en la banda de 2.4 GHz con 79 canales de 1 MHz y para formar parte de una WSN, se debe crear una topología de red llamada picorred, para la transferencia de información en distancias cortas entre un grupo privado de dispositivos. Las picorredes obedecen a comunicaciones maestro-esclavo, considerando a un nodo maestro, el cual se activa con otros nodos llamados esclavos [36].

La distancia estándar de cobertura ronda entre los 10 cm hasta los 100 m. El objetivo es lograr redes ad hoc simples de bajo costo y consumo, es por ello que con el tiempo la tecnología Bluetooth va mejorando en cuanto al ancho de banda, alcance y seguridad. En vista de lo anterior, es que existen mejoras, dándole surgimiento a la nueva tecnología BLE (Bluetooth Low Energy), no es mas que la tarea de ser una tecnología en bajo consumo de energía. BLE no utiliza una gran cantidad de energía, pero tiene una gama bastante limitada de operaciones en comparación con otros protocolos de red, así que no sería ideal para cosas que necesitan estar conectados todo el tiempo como los sistemas de seguridad y sensores de movimiento [36]

4.1.4. ZigBee.

ZigBee es una tecnología muy utilizada también en la automatización industrial y en las plantas. Por eso, está también muy asociada al Internet de las Cosas y a la Comunicación Máquina a Máquina (M2M), al igual que los anteriores, su comunicación es por radio frecuencia. Anteriormente las tecnologías inalámbricas carecían de confiabilidad, ya que al ser lineal (comunicación punto a punto), cualquier edificación u objeto podía interrumpir el pasaje de información, partiendo de ello, se fue creando un nuevo concepto de comunicación, con información transmitida en forma de malla, generando así conexiones multipunto.

El nombre de "Zigbee" se deriva de los patrones de traslado que tienen las abejas al recolectar el polen [34], las abejas se comunican en un modelo zig-zag, compartiendo así, información de la situación, distancia y dirección del alimento. Esta tecnología esta basada en el estándar 802.15.4 de la IEEE de redes inalámbricas de área personal.

Características principales de Zigbee

- Implementación diseñada para el uso de las bandas ISM, específicamente 868 MHz en Europa, 915 MHz en Norteamérica y la banda de 2.4 GHz, la cual es una banda de reconocimiento mundial.
- Bajo consumo energético.
- Permite que las redes manejen 2^{16} dispositivos.
- Escalabilidad
- Sistema muy sencillo de configurar.
- Distancias máximas hasta 75 metros.

Las redes ZigBee se clasifican en función de la disposición de los dispositivos y existen tres topologías de red: en malla, árbol o estrella, siendo ésta última la más interesante por sus posibilidades de reorganización en caso de fallo de alguno y así se logran alcanzar distancias consideradas entre puntos y extremos. El campo de mayor desarrollo ZigBee es la domótica, y sus dispositivos pueden asumir tres roles distintos como se muestra en la Figura 4.4:

- Coordinador: el cual controla la red y los caminos que deben de seguir los dispositivos para comunicarse entre ellos.
- Router: el cual interconecta a los dispositivos separados pertenecientes a otras redes.
- Dispositivo final: llamado igual End Device, el cual puede comunicarse con el Coordinador o Router, pero no puede transmitir información con otro dispositivo final, de esta manera aumenta la vida de la batería.



Figura 4.4: Topologías de Red ZigBee y los roles que pueden adquirir los dispositivos.

4.1.5. Módulos Xbee

Xbee es un microcontrolador inalámbrico fabricado por DiGi (figura 4.5), el cual es compatible con el protocolo ZigBee, constan de 20 pines en total, de los cuales 13 Pines Entradas/Salidas digitales y 4 entradas análogas, trabajan a una frecuencia de 2.4 GHz [37], también tienen una temperatura de operación de $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 4.5: Módulo Xbee Fabricado por DiGi.

Características Xbee

Los módulos Xbee juegan roles importantes que podemos apreciar en la Figura 4.6:

- **Coordinador:** Se requiere uno en cada red, se encarga de configurar toda la red y no puede estar en modo Sleep, ya que si se configura en modo Sleep, la red estará en modo dormida.
- **Router:** Pueden existir múltiples de estos mismos en una red, ellos se encargan de redirigir los mensajes a otros dispositivos. Tampoco pueden estar en modo Sleep.
- **Dispositivo final o End Device:** ellos se caracterizan por estar en modo sleep y así pueden ahorrar energía.

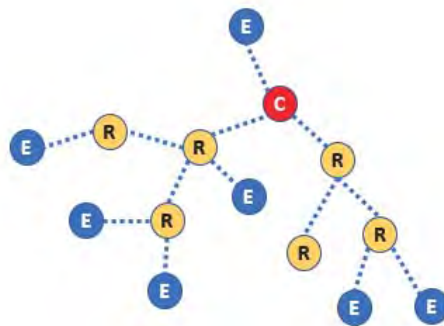


Figura 4.6: Los Diferentes Roles de los Módulos Xbee.

De igual manera existen modos de trabajo para el correcto desempeño de los módulos Xbee:

- **Modo Transparente:** Donde los dispositivos actúan como un reemplazo de cable serial, por lo tanto cuando reciben datos por radio frecuencia, lo transmiten al puerto serial. Usando la interfaz en modo de comandos AT.
- **Modo API:** Basado en tramas, se encarga de encapsular todos los parámetros que definen operaciones o eventos dentro del dispositivo para ser transmitidos o recibidos en una trama.

Los pines del modulo Xbee, tienen una distancia muy corta entre sí. Esto no permite que los módulos sean configurados en una protoboard como la mayoría de los circuitos de electrónica, sin embargo, para este problema es necesario hacer uso de los shields o adaptadores de Xbee, capaces de comunicar nuestro modulo con la computadora, vía USB o la comunicación con cualquier microcontrolador a través del puerto serial. En la Figura 4.7 se muestran algunos ejemplos.



Figura 4.7: Tarjetas Electrónicas para la Comunicación del Módulo Xbee con la Computadora.

DiGi ha creado un software llamado XCTU [38] es gratuito y el cual provee una interfaz gráfica que nos permitirá realizar la administración y configuración necesarios para poder interactuar con los módulos de radiofrecuencia Xbee. En la Figura 4.8 se muestra el ejemplo de la interfaz del usuario con el programa.



Figura 4.8: Software para Interactuar y Configurar los Módulos Xbee.

Capítulo 5

Diseño del Nodo Sensor

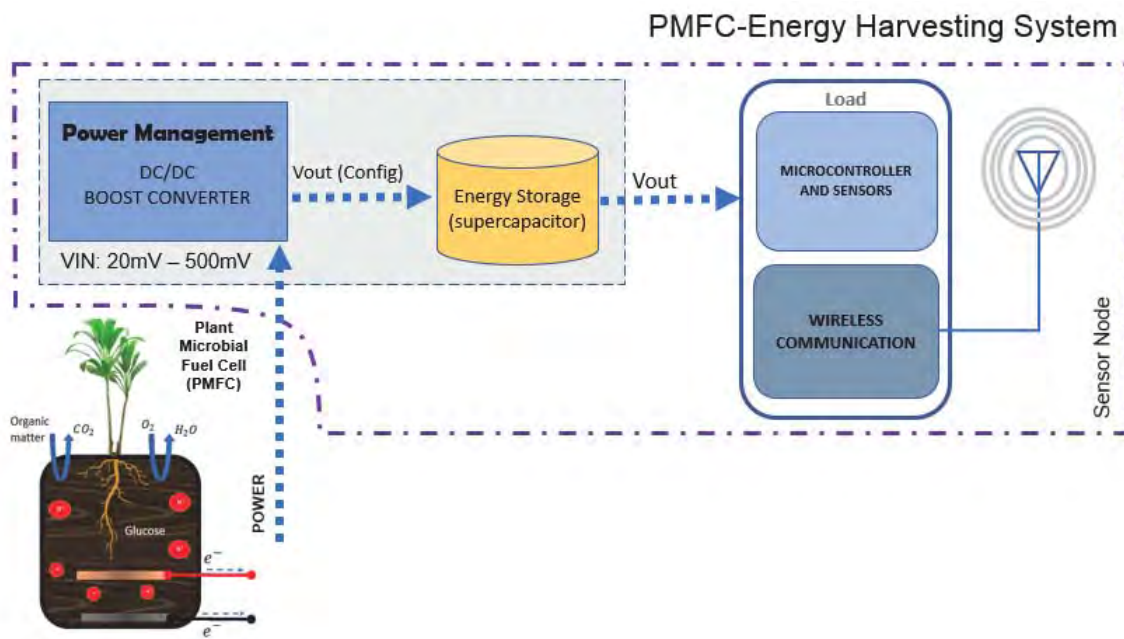


Figura 5.1: Esquema a bloques del nodo sensor y utilizando tecnología de una PMFC como fuente renovable y Recolector de Energía.

Para este proyecto se propuso el diseño de un sistema recolector de energía con el uso de una PMFC, implementando un diseño sin baterías y haciéndolo un sistema autosustentable a la vez para mediciones de temperatura y aplicaciones IoT. Un administrador de energía estratégicamente adaptado para recolectar la energía eléctrica producida de una PMFC para proporcionar un sistema autónomo e igualmente sea un sistema inalámbrico. Como se aprecia en la Figura 5.1, el diseño está compuesto de una PMFC, un convertidor de nano-potencia tipo boost y un microcontrolador basado en un sistema de ultra bajo consumo de energía.

5.1. Celda de Combustible de Planta Microbiana: Métodos y Cálculos.

La PMFC es una tecnología de bioingeniería renovable y limpia basada en dos principios: A) Rizodpositos o pérdida de sustancias orgánicas por medio de las raíces de la planta y B) la generación de electricidad electroquímica por microorganismos que descomponen la materia. Actualmente investigadores están enfocados en incrementar la potencia eléctrica de una PMFC; este parámetro depende de muchos factores, como la disposición de sustratos en el suelo, el área de crecimiento de la planta, la distancia entre el ánodo y cátodo, tipo de materiales y la mezcla de diferentes factores en el suelo: humedad, conductividad eléctrica, temperatura, pH, entre otros [16, 39–45]. Por lo tanto, es necesario seleccionar los componentes en orden para diseñar una PMFC, para entregar la máxima densidad de potencia.

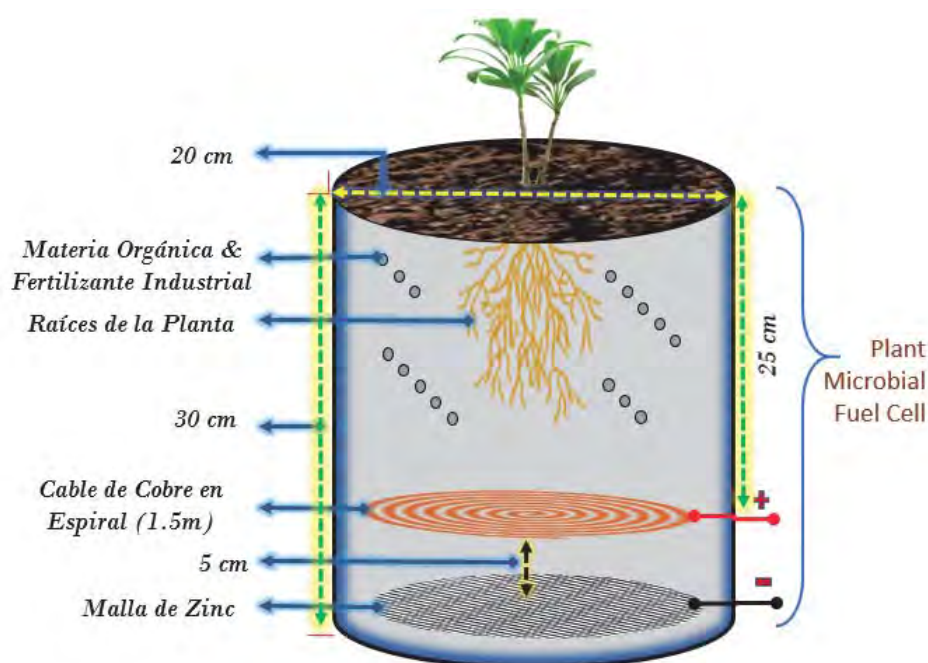


Figura 5.2: Representación esquemática de la PMFC usado en los experimentos.

La Figura 5.2 ilustra la PMFC propuesta diseñada con una mezcla de materia orgánica, fertilizante y una planta típica de la región sureste de México como la *Cordiline Fructicosa*. Esta fuente de energía convierte compuestos de bajo peso molecular en bióxido de carbono, protones y electrones. La PMFC fue implementado con un cable de Cobre (Cu) en forma de espiral de calibre 14 como electrodo y que tiene un área transversal de 0.021 cm^2 . Una malla de Zinc como cátodo se colocó en la parte inferior del PMFC a una profundidad de 30 cm desde el nivel del suelo, el cable de cobre fue colocada a 5 cm por encima del cátodo y sirve como ánodo. Ambos electrodos tienen un área circular y un diámetro de 20 cm, están conectados a una carga externa para medir el potencial de la PMFC, mediante dos cables conectados a los electrodos.

El rendimiento eléctrico de la PMFC fue oportuno gracias al uso de un instrumento para mediciones electroquímicas, conocido como potenciostato de la marca Metrohm Autolab. Teniendo en cuenta que la máxima potencia extraída de una PMFC depende fuertemente de factores como la población de microorganismos, la calidad de los electrodos, temperatura de la celda, y la carga de resistencia externa (R_{ext}). La Densidad de potencia (P_D) representa la cantidad de energía que el sistema PMFC pueda entregar basado en su volumen. Este tipo de energía es expresado en Watts por centímetro cuadrado (W/cm^2) como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$P_D = \frac{V_{cell}^2}{A_{anode} \cdot R_{ext}} \quad (1)$$

Donde V_{cell}^2 es la medición del potencial de la celda en volts (V) y el A_{anode} representa el área del ánodo. La curva de Corriente-Voltaje (I-V) indica la influencia del abono orgánico seleccionado sobre la generación de bioelectricidad. Como se muestra en la Figura 5.3 el rendimiento típico de una PMFC. Analizando la figura, se puede deducir que el punto de máxima potencia se produce con voltaje (V_{OP}) y densidad de corriente (J_{OP}) óptimos, lo que representa un punto ideal de operación de una PMFC.

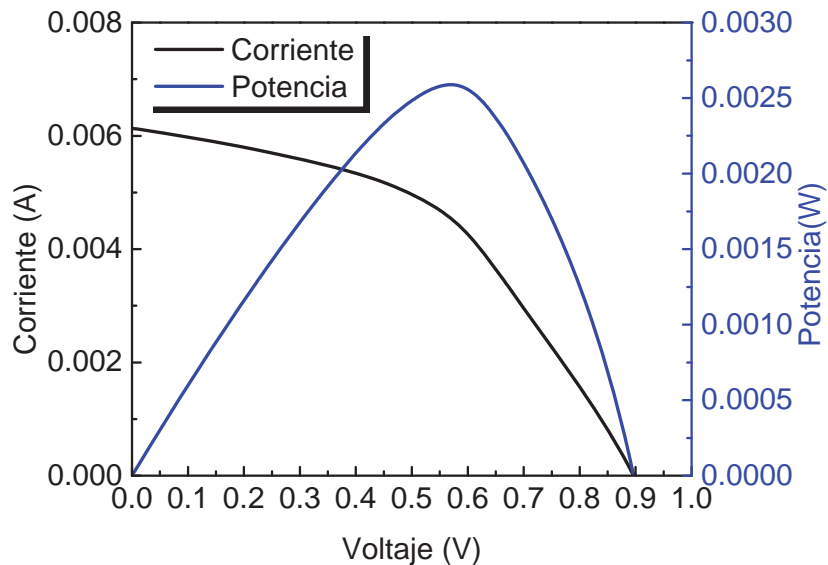


Figura 5.3: I-V y P-V Curvas Características de la PMFC Propuestas.

El rendimiento de la PMFC se determinó analizando la potencia de la celda, la corriente generada y la resistencia interna. Cualquier fuente PMFC tiene una resistencia interna (R_{int}) y la máxima potencia se transfiere a la carga cuando R_{int} es igual a la resistencia externa (R_{ext}) [39, 40]. La resistencia interna es calculada como se aprecia en la Ecuación 2.

$$R_{int} = \frac{V_{ocv} - V_{cell}}{i_D} \quad (2)$$

Donde V_{ocv} y i_D representan el voltaje en circuito abierto y la densidad de corriente ($A\ cm^2$) de la PMFC, respectivamente. El análisis de densidad de potencia PMFC se llevó a cabo bajo condiciones de luz natural con una intensidad de luz promedio de $900\ W/m^2$ durante 12 horas por día. Los datos de Radiación Solar por el periodo de estudio fueron obtenidos por la estación meteorológica localizada en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en Mérida Yucatán, México.

5.2. Configuración Serie Paralelo de una PMFC

Hablar de la importancia de dispositivos que convierten la energía química, mecánica o de cualquier otra forma en energía eléctrica, nos ayudan a poder recolectar energía de manera eficiente para diferentes tipos de almacenamiento como las pilas o capacitores, pero lo mas importante es que benefician a detener el consumo de fuentes de energía derivados de la descomposición de desechos fósiles.

Hoy en día los estudios sobre cualquier circuito eléctrico están enfocados en el potencial máximo que puedan llegar a brindar, tener un circuito con componentes en serie o paralelo, y que nos permitan saber cuando es necesario usar cierta configuración electrónica para obtener voltajes altos o para obtener corrientes altas. Los componentes en serie suman el voltaje pero mantienen la corriente del circuito, entonces un sistema de plantas en serie, el voltaje seria mayor a la proporcionada por una sola, como se muestra en la Figura 5.4 y la corriente se mantiene igual.



Figura 5.4: Sistema PMFC Conectada en Serie.

Los componentes ahora en paralelo suman la corriente pero mantienen el voltaje del circuito, entonces un sistema de plantas en paralelo, el voltaje es igual a la proporcionada por una sola, como se muestra en la Figura 5.5 pero la corriente del sistema aumenta.



Figura 5.5: Sistema PMFC Conectada en Paralelo.

5.2.1. Desempeño de una planta PMFC

A continuación se describe el comportamiento de una PMFC con una sola planta y en las siguientes secciones se muestra un conjunto de 4 plantas para formar un sistema en serie o paralelo bajo condiciones normales de ambiente. Para más detalle se encuentran las imágenes de las pruebas y el experimento más detallado adjunto en el anexo B.

Primero que nada se realizaron pruebas con una sola planta (*Cordyline fruticosa*) sin modificar propiedades naturales del suelo y expuesta al sol de 11 am hasta las 6 pm, para tomar medidas de voltaje en circuito abierto y para verificar la corriente agregamos una carga resistiva de 1 k, como se muestra en la Figura 5.6 fueron los datos obtenidos y su respectiva gráfica en la Figura 5.7. Algo que nos sorprendió, es el hecho que una sola planta nos llegará a dar una magnitud de voltaje y pasado el medio día obtener un pico máximo de potencia. Con ello iniciamos una serie de pruebas para obtener una posible solución a nuestro problema de energía alternativa a nuestros sensores y al dispositivo adquirente de datos.

Hora (t)	Corriente (mA)	Voltaje (V)	Potencia (mW)	Temperatura (°C)	Carga (Ohms)
11:00	0.91	0.87	0.7917	22	1K
11:30	0.94	0.89	0.8366	28	1K
12:00	1.03	0.98	1.0094	28	1K
12:30	1.14	0.96	1.0944	28	1K
13:00	1.13	0.98	1.1074	29	1K
13:30	1.23	1.01	1.2423	29	1K
14:00	1.17	0.99	1.1583	30	1K
14:30	1.16	0.98	1.1368	30	1K
15:00	1.21	0.99	1.1979	30	1K
15:30	1.12	1.01	1.1312	30	1K
16:00	1.11	0.98	1.0878	30	1K
16:30	1.11	1.01	1.1211	30	1K
17:00	1	0.98	0.98	29	1K
17:30	0.99	0.96	0.9504	28	1K
18:00	1	0.95	0.95	28	1K

Figura 5.6: Tabla de Datos voltaje Vs corriente PMFC con Carga de 1 k.

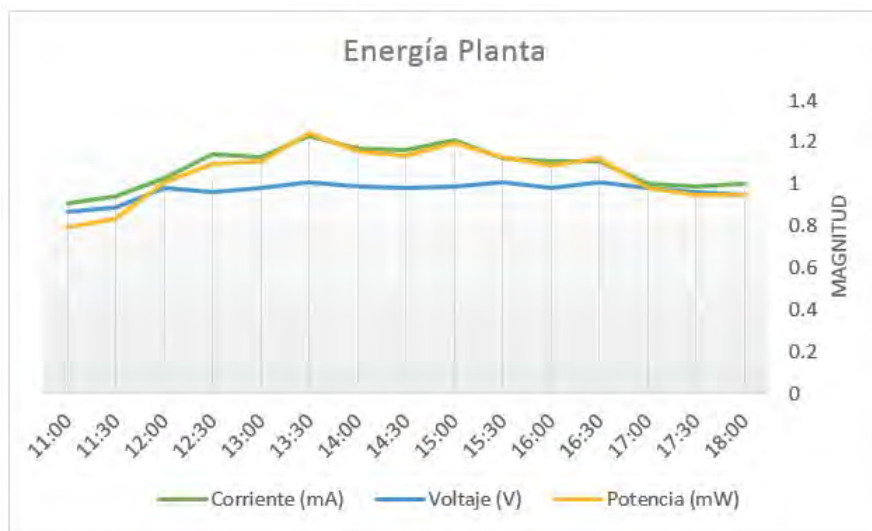


Figura 5.7: Gráfica de una PMFC con Carga de $1k\Omega$.

En una segunda prueba se usaron 3 plantas *Sansevieria Hahnii* como experimento para ver si los niveles de voltaje son los mismos para cualquier tipo de planta, la *Sansevieria hahnii* es una planta no nativa de esta región pero debido a las condiciones fértiles del suelo, existe en esta zona sur del país en abundancia como se muestra en la Figura 5.8. Se tomaron mediciones individuales y en un primer resultado se determinó que los voltajes varían a pesar de tener el mismo tipos de suelo y la misma cantidad en un recipiente para refrescos de 2 lts, las mediciones y gráficas se aprecian en la Figura 5.9. Para más detalles se encuentra adjunto en el anexo B.



Figura 5.8: *Sansevieria Hahnii*.

Tiempo (min)	Planta 1			Planta 2			Planta 3			Temperatura (°C)	Carga (Ohms)
	Planta 1 (mA)	Planta 1 (V)	Potencia (mW)	Planta 2 (mA)	Planta 2 (V)	Potencia (mW)	Planta 3 (mA)	Planta 3 (V)	Potencia (mW)		
0	0.69	0.65	0.4485	0.5	0.49	0.245	0.66	0.64	0.4224	30	1K
5	0.69	0.65	0.4485	0.5	0.49	0.245	0.66	0.64	0.4224	30	1K
10	0.72	0.7	0.504	0.5	0.48	0.24	0.66	0.63	0.4158	30	1K
15	0.76	0.72	0.5472	0.54	0.5	0.27	0.62	0.6	0.372	30	1K
20	0.75	0.73	0.5475	0.52	0.51	0.2652	0.64	0.62	0.3968	30	1K
25	0.74	0.74	0.5476	0.56	0.53	0.2968	0.61	0.6	0.366	30	1K
30	0.73	0.73	0.5329	0.53	0.51	0.2703	0.62	0.6	0.372	30	1K

Figura 5.9: Tabla de datos voltaje vs corriente.

Basados en los primeros resultados obtenidos de las 3 plantas, se decidió implementar un sistema conectado en serie y verificar su comportamiento, ya que las dudas que nos surgían era si realmente se mantenían los voltajes de cada una o sí al unirlos en un sistema conectado en serie o paralelo variaban y si alguna se comportaba como una carga. Es por ello que se tomaron muestras cada 10 minutos manteniendo la carga a 1 kΩ y se pudo constatar que la potencia se mantenía y el voltaje como dice la teoría aumentó a 2 V. Esto nos hizo pensar que podíamos conectar un circuito de varias plantas para obtener 3V, voltaje requerido para alimentar energéticamente nuestro circuito de adquisición de datos, como se muestra en la Figura 5.10, posteriormente se tomaron muestras (1 pm a 4 pm) con intervalos de 30 minutos con diferentes tipos de carga con la finalidad de obtener la carga ideal para generar la máxima potencia, la cual se encontraba entre los 400 Ω y 800 Ω.

Tiempo (min)	Planta 1,2,3		
	Total (mA)	Total (V)	Potencia (mW)
0	1.33	1.3	1.729
10	1.42	1.37	1.9454
20	1.43	1.39	1.9877
30	1.4	1.37	1.918
40	1.39	1.35	1.8765
50	1.4	1.37	1.918
60	1.41	1.38	1.9458

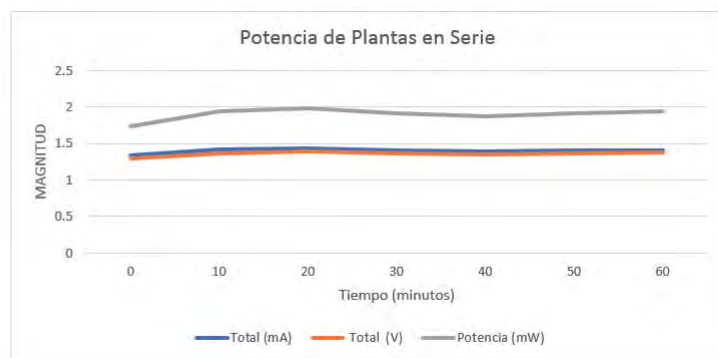


Figura 5.10: Desempeño de 3 plantas en Serie.

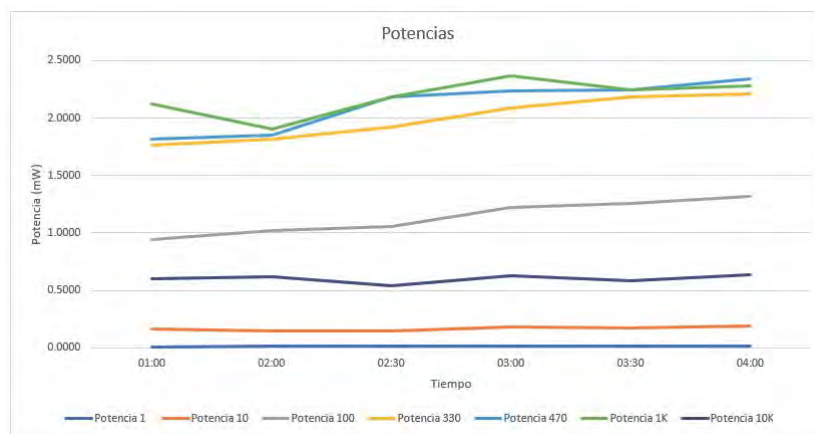


Figura 5.11: Desempeño de 3 plantas en Serie con Diferentes Cargas.

5.2.2. Desempeño en Diferentes Condiciones Ambientales

Al parecer la idea de energizar un sistema de adquisición de datos y transmisión de los mismos con plantas era una solución viable, aunque con muchas dudas, para ello decidimos realizar otra investigación sobre las PMFC's, un tema relacionado con la obtención de energía eléctrica de plantas en la literatura y realizar pruebas donde se controle la mayor cantidad de variables ambientales importantes, como temperatura, humedad, fertilizante, y realizar una prueba de voltamperometría con un potencióstato de la empresa Metrohm Autolab®. Para más detalles se encuentra adjunto en el anexo B.

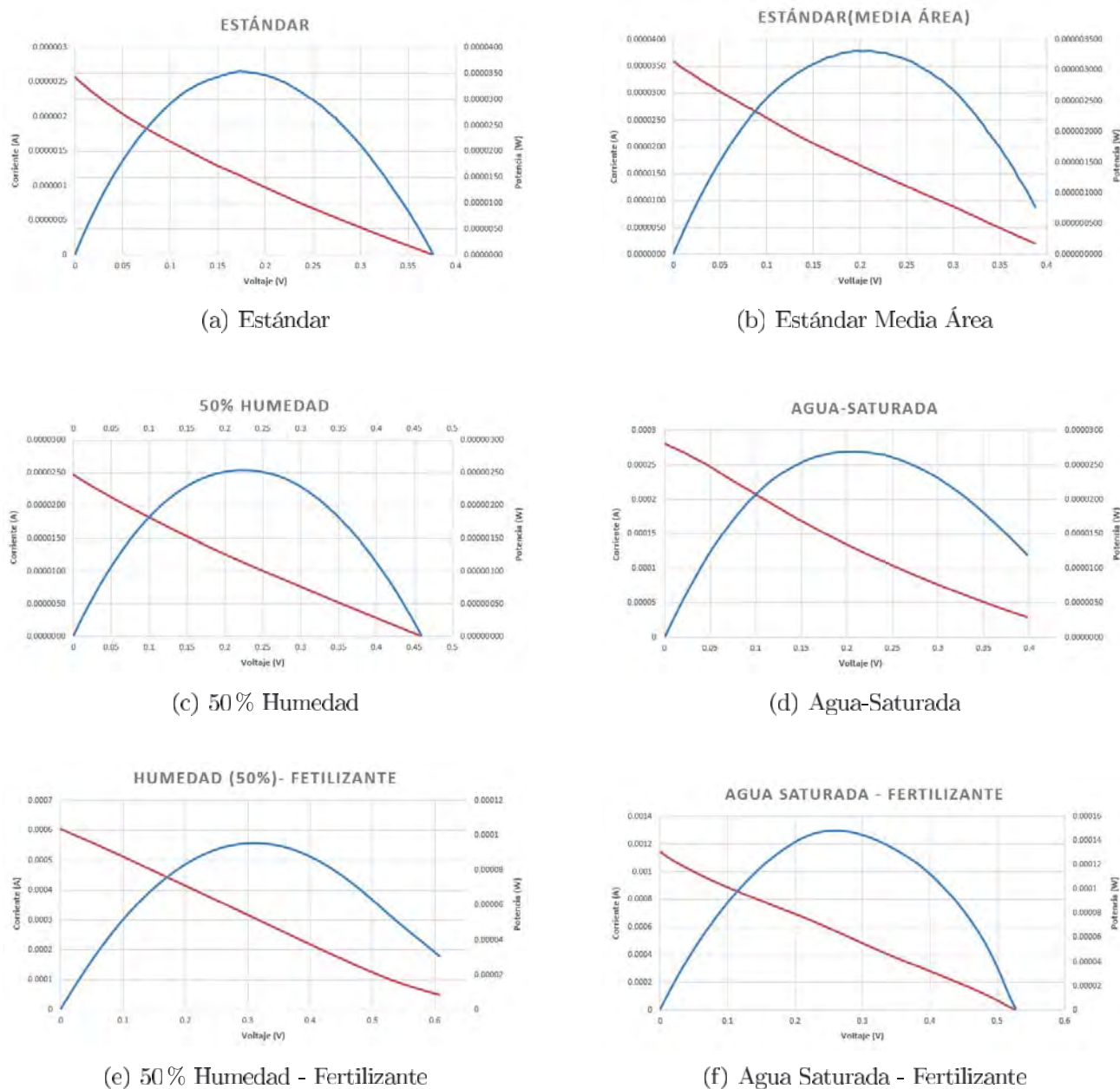


Figura 5.12: Pruebas de suelo.

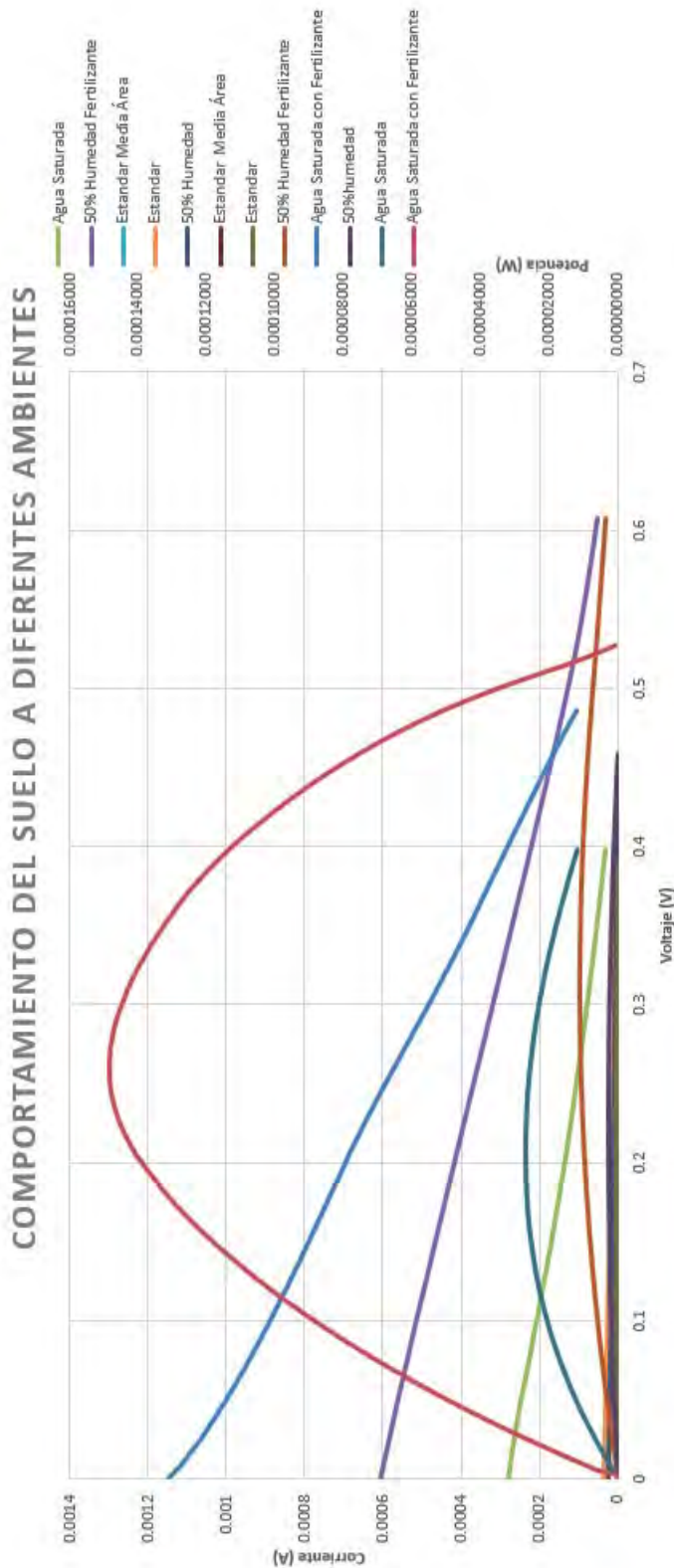


Figura 5.13: Gráfica que muestra el comportamiento de la corriente Vs voltaje y la potencia respecto a diferentes variables ambientales.

Dentro de la literatura consultada las plantas generan electricidad mediante sus raíces y la interacción de los microorganismos en el suelo en un lugar llamado rizosfera [46] como podemos apreciar en cada gráfica mostrada en la Figura 5.12 se encuentran los valores reales de cada muestra realizada con el potencióstato esto con la finalidad de tener las condiciones ideales y la generación de energía por parte de los microorganismos para poder mantener la planta con vida y de la misma manera asegurar un voltaje constante o de lo contrario saber en que condiciones no es posible obtener un voltaje adecuado. La siguiente gráfica de la Figura 5.13 nos muestra todas las gráficas en una sola y así poder entender cual de todas las pruebas es la mejor. Cabe mencionar que la curva de potencia en color rojo representada por agua saturada y fertilizante industrial el mejor tipo de condición ideal en el suelo para provechar la máxima potencia entregada por la planta.

5.2.3. Comparativo Plantas Serie Vs Paralelo

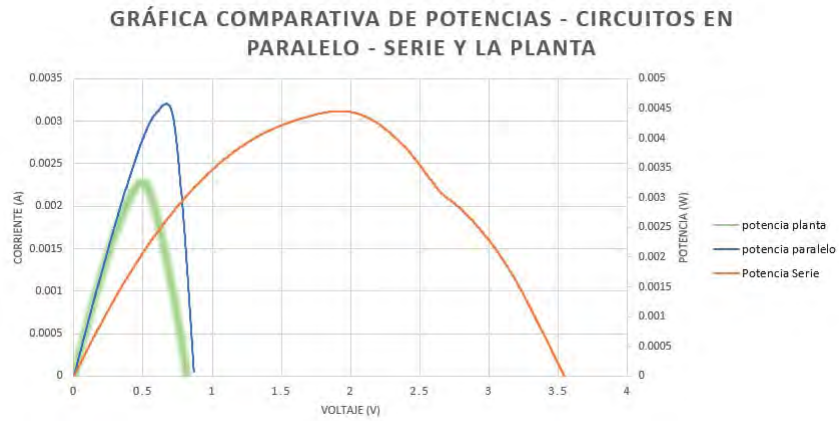


Figura 5.14: Desempeño de las Plantas Conectadas en Serie (naranja) y Paralelo (azul) Comparadas con la Potencia de una Sola Planta (verde).



Figura 5.15: Prototipo Final.

5.3. Circuito Administrador de Energía.

El subsistema EH (Recolector de Energía, por su siglas en ingles) esta compuesto del LTC3108, un circuito integrado de administración de la energía [25] y cuatro supercapacitores de 1.5F. En la Figura 5.16 se muestran los componentes del subsistema EH. El circuito contiene un convertidor DC/DC que administra la energía de voltajes de entrada muy bajos como 20 mV. El LTC3108 tiene una corriente de consumo menos de $6 \mu\text{A}$ y usa un interruptor tipo MOSFET para formar un oscilador intensificante resonante usando un transformador externo (1:100 ratio) y un pequeño capacitor de acoplamiento. Esto le permite aumentar los voltajes suficientemente tan bajos como 20 mV, para proporcionar múltiples voltajes de salida regulados para alimentar el nodo del sensor basado en IoT. La frecuencia de oscilación está determinada por la inductancia del devanado secundario del transformador y típicamente en el rango de 10 a 100 kHz.

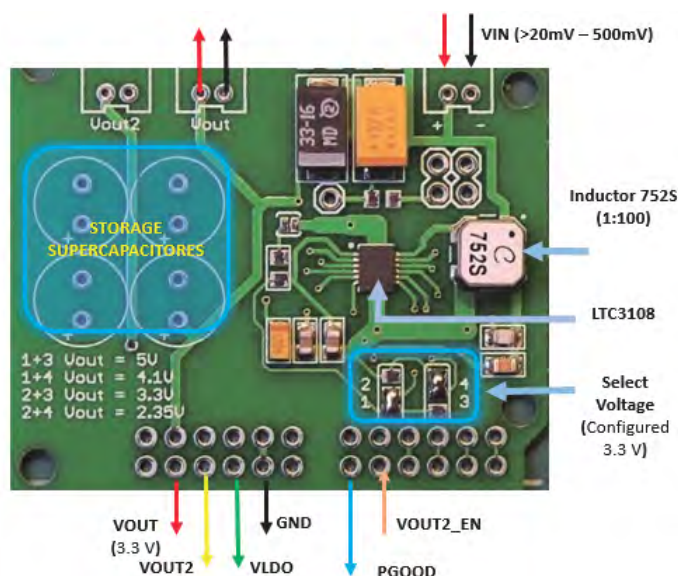


Figura 5.16: Circuito Administrador de Energía (LTC3108).

De acuerdo con la Figuras 5.16 y 5.17, tan pronto como exceda el rectificador los 2.2 Volts, el Voltaje de Batería (V_{BAT}) esta listo para cargar los supercapacitores que dependen del voltaje de entrada y la relación de vueltas del transformador; sin embargo, la corriente esta limitada a 4.5 mA. El circuito administrador de energía esta diseñado para entregar un voltaje de salida (V_{OUT}) regulado a 3.3 V para el nodo sensor.

5.4. Sistema del Nodo Sensor.

La arquitectura del nodo sensor de ultra baja potencia ha sido diseñada para interpretar mediciones de temperatura en tiempo real. El subsistema EH esta adaptado a la PMFC y suministra la energía requerida para el nodo sensor. La arquitectura esta compuesta por tres secciones: a) Adquisición de datos y condición de la señal, b) un MCU y c) el modulo de transmisión inalámbrica. Se pueden apreciar los módulos del nodo sensor de ultra baja potencia en la Figura 5.18, en un campo de prueba.

5.4.1. Módulo Adquisición de Datos y Acondicionamiento de la Señal.

Los datos de temperatura son adquiridos a través del sensor SHT10 [32]. El SHT10 es un circuito integrado (IC), entrega 12 bits de salida digital con una resolución típica de 0.01 °C. Puede funcionar desde 2.4 V hasta 5.5 V, con un consumo de 0.9 mA cuando está en operación y un máximo de 1.5 μ A cuando está en modo dormido. La interfaz serial del SHT10 está optimizado para que la lectura del sensor sea a través del protocolo de comunicación I2C. La configuración de conexiones del SHT10 se muestra en la Tabla 5.1.

SHT10			
Pin	Nombre	Cable	Descripción
1	SCK	Amarrillo	Señal de Reloj
2	VDD	Rojo	Voltaje
3	GND	Verde	Tierra
4	DATA	Azul	Datos




Tabla 5.1: Tabla de Configuración SHT10.

5.4.2. Módulo Microcontrolador.

El MCU seleccionado es un microcontrolador de ultra baja potencia fabricado por Texas Instruments, con una tecnología FRAM embebida. El MSP430FR5969 MCU presenta 64KB de FRAM integrado, memoria no-volátil, alta resistencia, y acceso de escritura de alta velocidad. Su soporte CPU alcanza velocidades hasta 16 MHz, tiene periféricos integrados de ADC y timers. El MCU también soporta un amplio rango de voltajes (1.8 V a 3.6 V) y la arquitectura RISC de 16 Bits, incluye el modo espera (Standby, LMP3) y dormido (Sleep, LPM3.5) de baja potencia, lo cual se ha optimizado para lograr una mayor prolongación del tiempo de vida de la batería en aplicaciones de energía limitada.

5.4.3. Módulo de Transmisión Inalámbrica.

El protocolo de comunicación para el nodo sensor es de la IEEE estándar 802.15.4 WPAN Zig-Bee. El módulo de radio empleado para este proyecto fue el XBee PRO S2C, un módulo de bajo consumo y unidad de baja potencia para enviar y transmitir datos recomendado para WSN y aplicaciones de IoT. Este módulo proporciona una conectividad inalámbrica a dispositivos de punto final y funciona con una corriente de baja potencia inferior a $1 \mu A$. La potencia de transmisión es de +18dBm alcanzando distancias de hasta 1 milla (1609.34 metros, rango de visión libre) a una velocidad máxima de datos de 250 Kbps.

La comunicación de la información obtenida del XBee es mediante el protocolo UART (Tx,Rx) a través de los pines seriales de la MCU, como esta representado en la Figura 5.17. En este caso particular se trabajó con la tecnología ZigBee ya que permite ubicar un dispositivo a corta distancia y su consumo energetico es muy bajo, usada para WSN; cada nodo se configuró como dispositivo final (End Device) aplicándolo a una topología estrella.

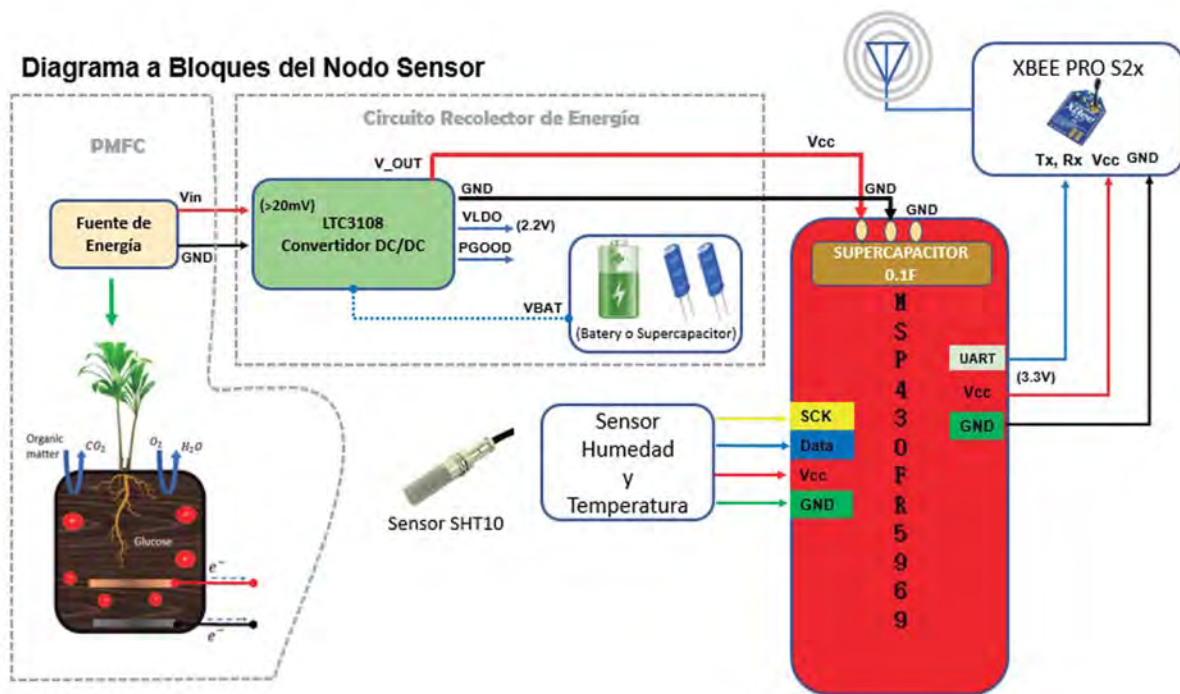


Figura 5.17: Esquema a Bloques del Nodo Sensor.

5.5. Prototipo Final.

Finalmente como se aprecia en el esquema a bloques de la Figura 5.17, nuestro prototipo final ya en campo y transmitiendo en tiempo real se muestra en la Figura 5.18. La información de los datos a través de la red son transmitidos a un gateway, el cual recolecta estos datos de los sensores para subir la información a servicios de la nube, como se muestra en el esquema de la Figura 5.19.

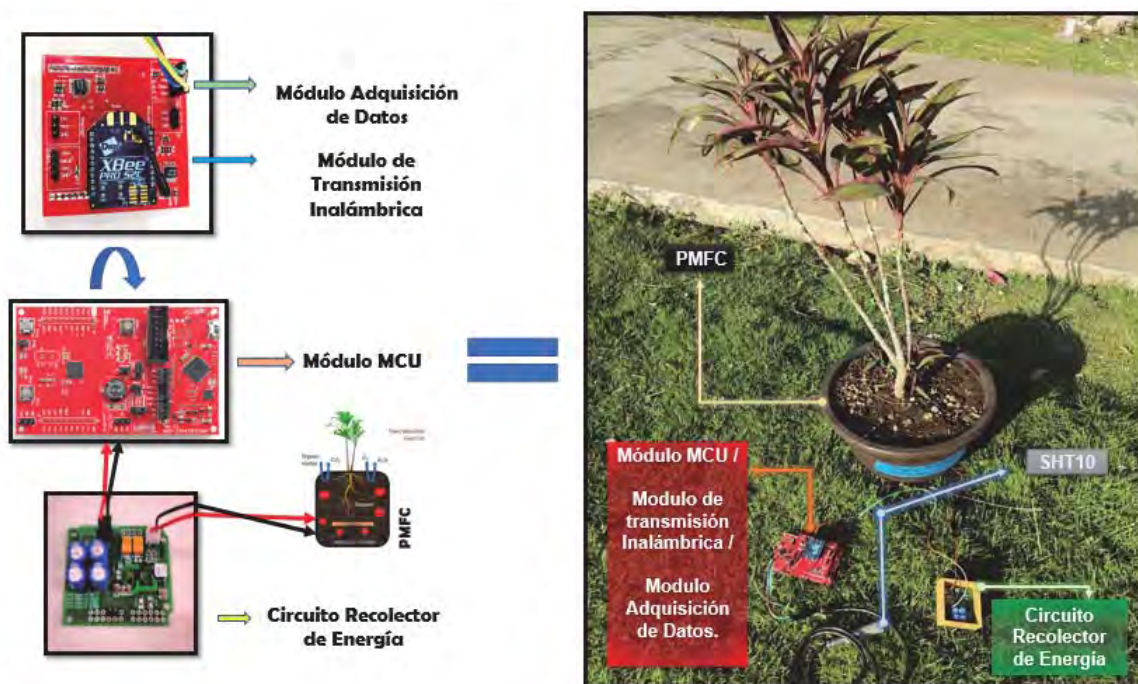


Figura 5.18: Sistema del Nodo Sensor.



Figura 5.19: Esquema de WSN para Aplicaciones IoT.

5.6. Estrategia para el Consumo de Energía de Ultra-Baja Potencia.

El Manejo Dinámico de Energía (DPM) es una técnica usada para administrar la energía y el desempeño de la red de sensores inalámbricos basados en IoT. El DPM reduce el uso de energía mediante el control dinámico de componentes cambiando en modos de baja potencia [47]. Es un Modo de Cambio de Horario (SSM) que maneja las transiciones de los estados, lo que permite ahorrar energía para extender el tiempo de vida del sensor.

En la Figura 5.20 se muestran las etapas SSM desde la adquisición de los datos hasta la transmisión inalámbrica. Dependiendo del tipo del escenario DPM-SSM, el nodo puede consumir diferentes niveles de capacidad de la batería, por ejemplo, cambiando de modo Standby a modo Sleep toma 6 ms y opera con una corriente de $65 \mu\text{A}$. Los tiempos de transición de los estados también son considerados en el modelo DPM, con todos los valores tomados de las hojas de datos de los dispositivos.

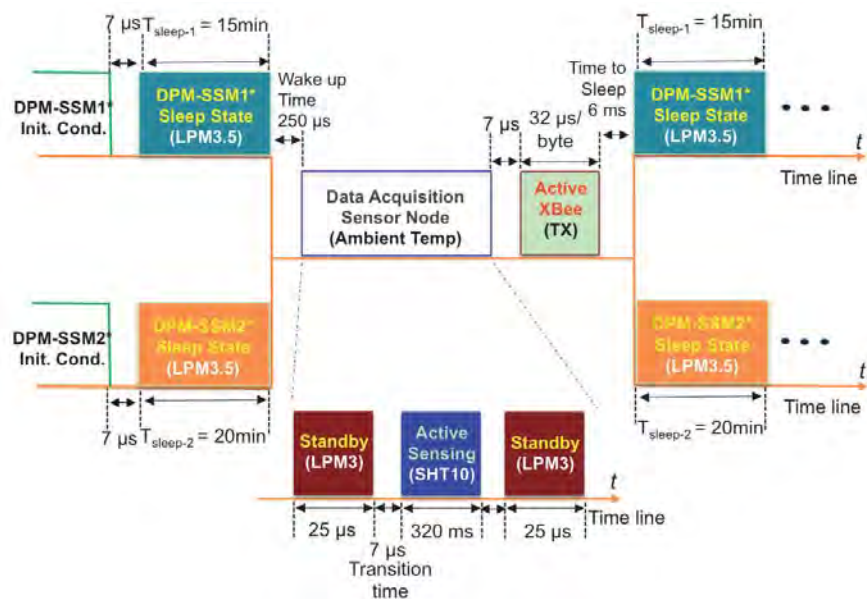


Figura 5.20: Modelo para el Manejo Dinámico de la Energía (DPM).

En este proyecto, dos estados DPM-SSM fueron implementados en base a la capacidad de recolección de energía de la PMFC y casi estático comportamiento de los datos de temperatura durante el día. Para la primera estrategia DPM-SSM1 se realizó de 6:01 am a 7:00 pm y la segunda DPM-SSM2 de 7:01 pm a 6:01 am con periodos de estado dormido (*sleep*) de 15 minutos y 20 minutos respectivamente. Acorde a la Figura 5.20, una vez que el sistema nodo sensor esta despierto (*wake-up*), el tiempo de transición es de $250 \mu\text{s}$, los estados Standby y Active Sensing del nodo son secuencialmente activados por un periodo de 320.02ms , con un promedio de consumo de corriente de 5.06mA . El Active Xbee es el estado que consume mayor energía, con una corriente típica de hasta 49.09mA . Por lo tanto, ambos estados DPM-SSM adoptan un cambio del estado dormido hasta el estado activo del Xbee. Estas estrategias DPM-SSM fueron llevados acabo en orden para aprovechar al máximo el efecto de recuperación de la batería basada en una PMFC.

5.7. Servicios de Almacenamiento en la Nube y de IoT

El protocolo de comunicación ZigBee esta conectado a un gateway local y después a Internet subiendo los datos de las mediciones a la nube. Los protocolos Message Queue Telemetry Transport (MQTT) y Representational State Transfer (REST) son usados para proporcionar, baja latencia, tamaño de paquetes pequeños y una comunicación estable para dispositivos con recursos limitados. Los requerimientos del ancho de banda son muy bajos y la naturaleza del protocolo hace que la energía sea muy eficiente [48]. REST es un protocolo de intercambio y manipulación de datos, tiene un estilo de arquitectura que ofrece propiedades tales como rendimiento, escalabilidad, modificabilidad en los servicios de Web. Un servicio basado en REST es una red de datos orientada a servicios RESTful. Los sistemas basados en IoT, proporcionan un almacenamiento de datos basados en la nube y un servicio de análisis de los datos. Cuando se enciende o se reinicia el nodo sensor, solicita datos cada 15 o 20 minutos. En la comunicación local entre los radios módem XBee (a través del estándar IEEE 802.15.4), los dispositivos PRO XBee S2 estan configurados para transmitir datos y MQTT transfiere los datos en forma mensajes desde el nodo sensor a un gateway o servidor (broker). El modelo de Publish/Subscribe utilizado en MQTT es asignado a los observadores del recurso. las operaciones PUT y GET en HTTP/REST están también integrados dentro de el MQTT broker.

Capítulo 6

Resultados y Discusiones

A continuación se detallan los resultados y el análisis respecto al diseño de una PMFC para aplicaciones de IoT.

6.1. Diseño PMFC

El experimento PMFC establece un escenario para evaluar el diseño de una PMFC, considerando una resistencia de carga promedio de $R_{ext} = 120 \Omega$. Con el fin de garantizar la presencia de bacterias electroquímicamente activas, el experimento PMFC emplea fosfato de diamonio en forma de un fertilizante industrial conocido como FERTIQUIM[®] [49], que contiene la siguiente composición química: 18 % Nitrogeno- N , 18 % Amonio- NH_4 , 46 % Pentóxido de Fósforo P_2O_5 , 2,20 % Azufre Soluble S , y 10 % pH en solución (nivel 6-7). En este sentido, el experimento de la PMFC es una mezcla de materiales orgánicos con fertilizante FERTIQUIM[®] 11 : 1 (wt/wt) en peso seco y con 100 % de humedad de acuerdo en el experimento realizado en las mejores condiciones de suelo como se muestra en la gráfica de la Figura 6.1.

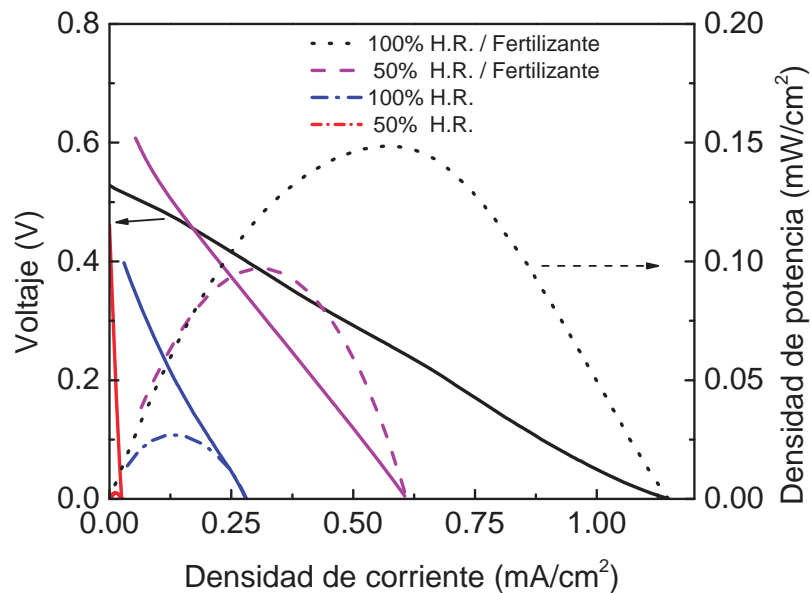


Figura 6.1: Curva de Voltaje, Corriente y Potencia Máxima Según las Condiciones de Suelo.

El potencial requerido por el nodo sensor para el procesamiento, el sensado y la comunicación debe estar balanceado con la energía extraída del PMFC. En este sentido, la energía generada por la PMFC y la estabilidad de los parámetros eléctricos de PMFC, como el voltaje de circuito abierto V_{ocv} , corriente en corto circuito J_{sc} , la máxima potencia P_{max} , y la R_{int} , deberán ser analizados (como se muestra en la Figura 6.3).

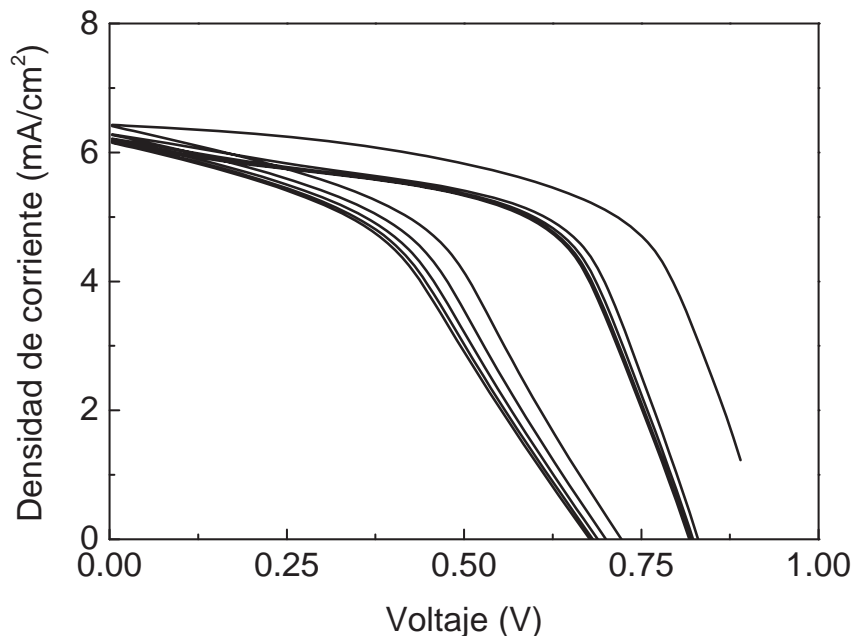


Figura 6.2: Curva de Polarización de la PMFC, cuando el potencial controlado se mantiene durante diez ciclos.

En la Figura 6.2 muestra la curva de polarización de la PMFC bajo estrés. La densidad de corriente es casi constante a bajo voltaje, sin embargo, presenta variaciones a altas velocidades. Esta histéresis en la curva de polarización está relacionada con la estabilización inicial de electrones y protones producidos por bacterias [50].

El V_{ocv} (línea negra) y J_{sc} (línea azul) de la PMFC están ilustrados en la Figura 6.3 para diferentes ciclos. En los resultados, J_{sc} tiende a disminuir suavemente produciendo variaciones de hasta 0.5 mA/cm^2 a través de los ciclos. El V_{ocv} tiene variaciones de $0.7\text{V} - 0.8\text{V}$ para el mismo número de ciclos. Los valores son similares a los reportados en el estado del arte [51, 52].

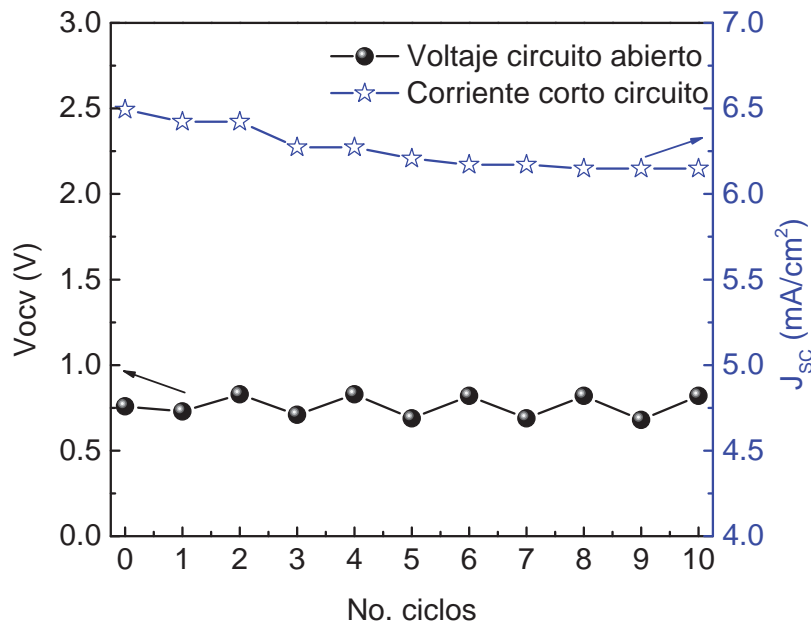


Figura 6.3: Análisis Comparativo del Voltaje en Circuito Abierto (línea negra) y La Corriente de Cortocircuito (línea azul) durante diez ciclos.

La Figura 6.4 se muestran las diferentes curvas P_D . El P_D alcanza una potencia máxima de 3.5 mW/cm^2 , que corresponde a J_{OP} igual a 5 mA/cm^2 y un V_{OP} de 0.7 V . El análisis de la figura muestra que la histéresis se acentúa alrededor del punto máximo de densidad P_{max} con variaciones de hasta 1.5 mW/cm^2 . Los resultados son similares a los presentados en [53], [54]. De acuerdo al teorema de máxima transferencia de energía, la potencia máxima se alcanza cuando R_{ext} es igual a la R_{int} [55]. Por lo tanto, R_{int} es calculada por ciclo usando (2), con resultados que oscilan entre 90Ω a 150Ω .

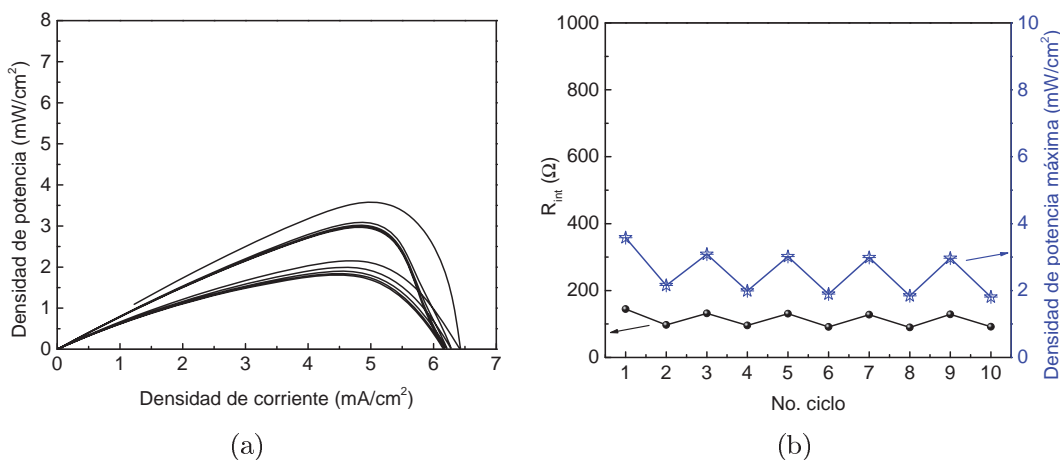


Figura 6.4: (a) Curva de Potencia de la PMFC, (b) Máxima Densidad de Potencia (curva negra) por ciclo y el Parámetro de resistencia interna (curva azul) por ciclo.

La máxima transferencia de energía de una PMFC también se ha discutido en [56], [57]. Song et al. en [56] desarrolló una célula de combustible microbiana de sedimentos (SMFC) con resistencias externas más bajas, lo que resulta en un mayor potencial de ánodos. Lyon et. al. [57] monitorizó una producción de densidad de potencia con un MFC durante 18 días, variando la resistencia externa, encontrando que durante el período inicial de mayor potencia máxima, aparecen dos picos en la curva de polarización. Estos picos están relacionados con poblaciones separadas de bacterias que producen electricidad. Song et al. [56] observó que la densidad de potencia se mejora con el aumento de la resistencia externa, logrando una densidad de potencia de 3.15 mW/cm^2 .

6.2. Consumo de Energía del Nodo Sensor

6.2.1. Estrategia DPM

Para probar el consumo de energía del nodo del sensor, la adquisición de datos, la MCU y los estados de transmisión se verificaron para analizar la energía consumida por los datos de transmisión desde el nodo sensor hasta el gateway. Los nodos se configuraron de acuerdo a la estrategia DPM que se planteó en la Figura 5.20. Se realizaron mediciones en tiempo real del consumo de energía del nodo del sensor en cada estado operativo. En la Figura 6.5 se muestra la etapa SSM1 de la estrategia DPM para el sistema EH basado en PMFC e ilustra la secuencia de estados a lo largo del tiempo. Después de dormir durante 15 minutos ($T_{Sleep} = 900 \text{ sec}$), el sistema se activa y el estado de detección se activa en el módulo del sensor durante un período de $T_{Sensing} = 1 \text{ ms}$. A continuación, el estado XBee se activa para $T_{ActiveXbee} = 0.5 \text{ ms}$. Finalmente, el estado de datos de la transmisión XBee requiere $T_{XbeeTX} = 2 \text{ ms}$.

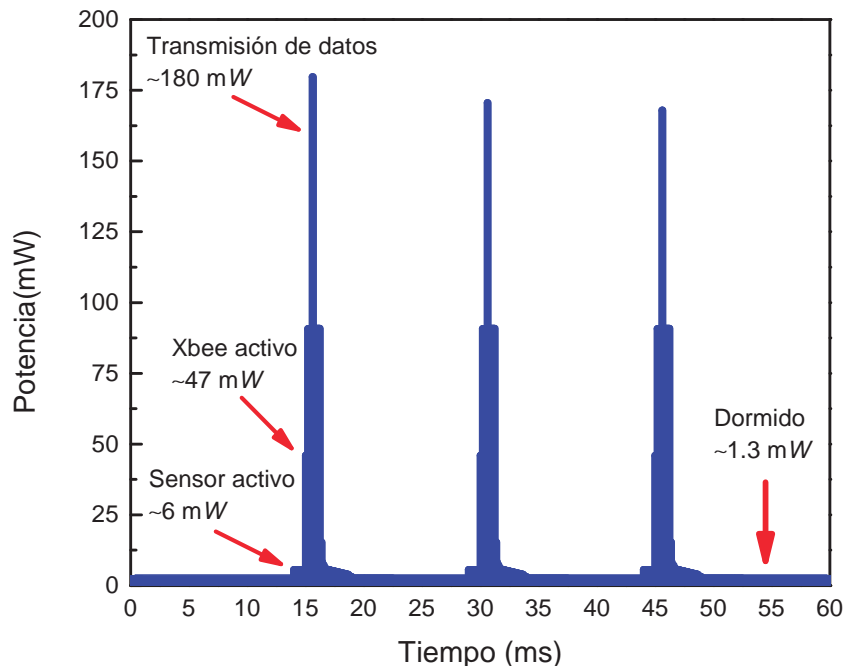


Figura 6.5: Estrategia DPM SSM1.

La Tabla 6.1 resume los resultados del consumo de potencia medido para todos los estados de configuración, correspondientes al comportamiento dinámico del DPM SSM1 y DPM SSM2.

	DPM SSM2	DPM SSM1
Sistema		
Tiempo	2523 s	1862 s
Energía	3266 mJ	2375 mJ
Potencia		
Promedio	1.29 mW	1.27 mW
Min	0.0 mW	0.00 mW
Max	178.8 mW	179.74 mW
Voltaje		
Promedio	3.58 V	3.58 V
Corriente		
Promedio	0.36 mA	0.35 mA
Min	0.0 mA	0.00 mA
Max	49.90 mA	50.12 mA

Tabla 6.1: Resultados del consumo de energía de la PMFC basado en un sistema EH para aplicaciones IoT.

Para estimar el consumo de energía del nodo sensor, el software EnergyTrace se usó para mediciones de energía / potencia en tiempo real diseñadas específicamente para aplicaciones de ultrabaja potencia. La tecnología EnergyTrace está incluida en Code Composer Studio versión 6.0 y más reciente [30]. El valor medio de consumo de energía resultante es igual a 1,29 mW y 1,27 mW para el DPM SSM1 y SSM2, respectivamente. El EnergyTrace proporciona información sobre el consumo de energía y el estado interno del microcontrolador. Estos estados incluyen encendido o apagado de los periféricos y todos los relojes del sistema, así como el modo de baja potencia (LPM) actualmente en uso.

6.3. Aplicación IoT: Sistema de supervisión vía WEB

Se ha implementado una prueba de concepto de una red de sensores inalámbricos autónomos a pequeña escala para aplicaciones IoT capaces de realizar adquisición de datos sobre temperatura, servicios de almacenamiento de datos en la nube y su respectivo análisis. Asimismo, se ha desarrollado un sistema de supervisión basado en la web para la presentación en línea de los datos medidos.

En la Figura 6.6 muestra el menú principal de la interfaz de usuario en un dispositivo móvil Android. El menú principal se compone de tres iconos principales: el gráfico en tiempo real, que abre una ventana secundaria donde los datos de temperatura adquiridos se muestran en tiempo real durante un período de tiempo; el gráfico de la semana, que muestra la temperatura media por semana a través de una nueva ventana secundaria; y el icono de Month Graph, muestra la temperatura media de los meses anteriores en una nueva ventana secundaria. Los datos también se almacenan en la nube y están disponibles para su análisis a través de otras aplicaciones de software estadístico.

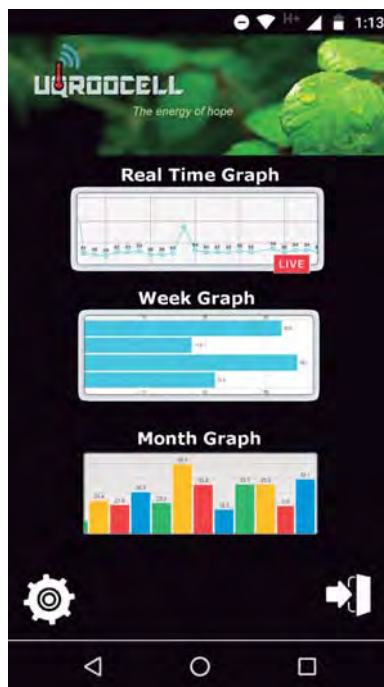


Figura 6.6: Aplicación IoT: Sistema de Supervisión Vía WEB .

6.4. Discusión

Un diseño equilibrado para la generación de energía de PMFC y el consumo de energía del nodo sensor es un tema importante. En este sentido, se implementó un diseño de PMFC con una planta local y materia orgánica del suelo del sureste de México y una metodología de administración dinámica de energía (DPM) para el funcionamiento eficiente del nodo sensor, como se ilustra en la Figura 6.5. El funcionamiento autónomo del nodo del sensor se logra con un consumo de energía de solo 1.27 mW (valor promedio) y una generación de PMFC de hasta 3.5 mW/cm². La prueba indica que la velocidad de transmisión de datos de temperatura usando el DPM SSM1 y SSM2 está muy bien soportada. Sin embargo, se pueden proponer nuevas estrategias de DPM para mejorar el comportamiento de PMFC cuando se requieren nuevos protocolos de comunicación, o las condiciones de PMFC (es decir, fertilizante y 100 % de humedad) no están disponibles.

Capítulo 7

Conclusiones

El mundo va cambiando y el crecimiento demográfico igual haciendo que la eficiencia respecto a la producción de alimentos sea cada vez efectiva y sostenible. Es por ello que la agricultura de precisión es una solución importante a este reto. La agricultura de precisión conecta personas con la tecnología en beneficio de un mejor aprovechamiento del cultivo.

Como consecuencia de lo expuesto en este trabajo, podemos concluir que la adquisición de datos ambientales es muy importante para tener un mejor control en la producción de alimentos, es por ello que la realización de una red de sensores capaces de obtener estos datos para después enviarlos a la nube con tecnologías como el internet de las cosas (IoT), capaces de ayudarnos a optimizar procesos y entender el comportamiento de un área de cultivo. Es importante destacar que en este trabajo se atacó desde dos puntos de vista, obtener un producto que ayude al mejoramiento de la agricultura y por el otro lado, un producto que sea amigable con la naturaleza, teniendo una característica importante como la energización de un dispositivo sin hacer uso de baterías, en pocas palabras autosustentable. Aunque aun nos falta mucho por recorrer entre ofrecer un producto comercialmente y un producto con un nivel de validez adecuado existe la seguridad de hay un mercado y que los beneficios de las tecnologías son reales.

De igual forma aunque se logró el objetivo principal, es importante tener en consideración la importancia de tener un dispositivo recolector y administrador de energía apropiado o en una sola tarjeta para el sistema que se vaya a implementar, puesto que en el mercado existen muy pocos y con diferentes características, además de mejorar la comunicación de los sensores con una base de datos ya sea con otro tipo de topología o incluso probar con otros estándares o nuevas tecnologías de comunicación como son LoRa, NB-IoT o Sigfox. Este trabajo deja un camino trazado para futuras investigaciones en mejorar la obtención de energía por medio de plantas, una nueva forma de obtener energía limpia y poder contribuir un poco con el medio ambiente.

Finalmente este proyecto de tesis me ayudo a entender otros mundos como el internet de las cosas y los sistemas de energía, que sin los conocimientos adquiridos en la maestría y durante mi estancia académica, me hubieran sido difíciles de entender gran parte de estos temas tan relevantes y novedosos hoy en día.

Bibliografía

- [1] FAO. El futuro de la alimentación y la agricultura: Tendencias y desafíos. Technical report, 2017.
- [2] Efe David Proenza. Agricultura en ambiente controlado, solución a cambio climático en América Latina, 2017.
- [3] Manijeh Keshtgari and Amene Deljoo. A wireless sensor network solution for precision agriculture based on zigbee technology. *Wireless Sensor Network*, 4(1):25, 2012.
- [4] Angela María Rodríguez Vivas and Juan Carlos Corrales Muñoz. Adaptación de una metaheurística evolutiva para generar árboles enrutadores en una red de sensores inalámbricos del contexto de la agricultura de precisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 15(29):63, 2016.
- [5] Ravi Kishore Kodali, Nisheeth Rawat, and Lakshmi Boppana. WSN sensors for precision agriculture. In *Region 10 Symposium, 2014 IEEE*, pages 651–656. IEEE, 2014.
- [6] Meseguer Copado Pedro José. Programación de Redes de Sensores Inalámbricas para aplicaciones domóticas, 2007.
- [7] A Arellano, D Ávila, J Erazo, and C Herves. Evaluación de una red de sensores inalámbrica para detección de incendios forestales. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 28(3), 2015.
- [8] Diana Milena Archila Córdoba and Frey Alfonso Santamaría Buitrago. Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos. *Tecnología Investigación y Academia*, 1(2), 2013.
- [9] José Eduardo García López, Julia Chavez Chavez, and Alan Kevin Jurado Sánchez. Modelado de una red de sensores y actuadores inalámbrica para aplicaciones en agricultura de precisión. In *Humanitarian Technology Conference (MHTC), IEEE Mexican*, pages 109–116. IEEE, 2017.
- [10] Lovepreet Singh and Er Dinesh Kumar. A study on big data analysis on wsn for different data. 2017.
- [11] Rudd JM Vullers, Rob Van Schaijk, Hubregt J Visser, Julien Penders, and Chris Van Hoof. Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 2(2):29–38, 2010.
- [12] Vincent Chunwan Lee. Energy harvesting for wireless sensor networks. *MS project in Engineering-Electrical Engineering and Computer Sciences, UC, Berkeley*, 2012.

-
- [13] Francisco Javier Ferrández-Pastor, Juan Manuel García-Chamizo, Mario Nieto-Hidalgo, Jerónimo Mora-Pascual, and José Mora-Martínez. Developing ubiquitous sensor network platform using internet of things: application in precision agriculture. *Sensors*, 16(7):1141, 2016.
- [14] Prensa Il. Edil pide apoyo a sagarpa para productores de opb. <http://www.opb.gob.mx/portal/edil-pide-apoyo-a-sagarpa-para-productores-de-opb//>, October 2016.
- [15] Kamaraj Sathish-Kumar, Venkatasamy Vignesh, and Felipe Caballero-Briones. Sustainable power production from plant-mediated microbial fuel cells. In *Sustainable Agriculture towards Food Security*, pages 85–107. Springer, 2017.
- [16] David PBTB Strik, Jan FH Snel, Cees JN Buisman, et al. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9):870–876, 2008.
- [17] Bruce E Logan, Bert Hamelers, René Rozendal, Uwe Schröder, Jürg Keller, Stefano Freguia, Peter Aelterman, Willy Verstraete, and Korneel Rabaey. Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental science & technology*, 40(17):5181–5192, 2006.
- [18] Fernanda Leite Lobo, Xin Wang, and Zhiyong Jason Ren. Energy harvesting influences electrochemical performance of microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 356:356–364, 2017.
- [19] Muhannad Alaraj, Miloje Radenkovic, and Jae-Do Park. Intelligent energy harvesting scheme for microbial fuel cells: Maximum power point tracking and voltage overshoot avoidance. *Journal of Power Sources*, 342:726–732, 2017.
- [20] Mohammad Danish Khan, Nishat Khan, Saima Sultana, Mohammad Zain Khan, Suhail Sabir, and Ameer Azam. Microbial fuel cell: Waste minimization and energy generation. In *Modern Age Environmental Problems and their Remediation*, pages 129–146. Springer, 2018.
- [21] Feng Zhao, Robert CT Slade, and John R Varcoe. Techniques for the study and development of microbial fuel cells: an electrochemical perspective. *Chemical Society Reviews*, 38(7):1926–1939, 2009.
- [22] Davide Brunelli, Pietro Tosato, and Maurizio Rossi. Flora monitoring with a plant-microbial fuel cell. In *International Conference on Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society*, pages 41–48. Springer, 2016.
- [23] Yaoguang Shi, Yancheng Wang, Deqing Mei, Bo Feng, and Zichen Chen. Design and fabrication of wearable thermoelectric generator device for heat harvesting. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(1):373–378, 2018.
- [24] Texas Instruments. BQ25570: Converter and power manager. <http://www.ti.com/lit/ug/sl00007a/sl00007a.pdf>, May 2018.
- [25] Linear Technology. LTC3108: ultralow voltage step-up converter and power manager. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3108fc.pdf>, May 2018.
- [26] John H Davies. *MSP430 microcontroller basics*. Elsevier, 2008.

-
- [27] Ana Samudio Jesus Santa. Reseña: Texas instruments msp430 launchpad. <https://www.geekfactory.mx/resenas/texas-instruments-msp430-launchpad/>, June 2018.
- [28] CONICYT. ¿qué es la ferroelectricidad? <https://www.explora.cl/455-sabias-que/sabias-fisica/1245-que-es-la-ferroelectricidad-1>, June 2018.
- [29] User Guide. Msp430fr5969 launchpad™ development kit. <http://www.ti.com/lit/ug/slau535b/slau535b.pdf>, June 2018.
- [30] Texas Inst. Code composer studio™ - integrated development environment. <http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>, June 2018.
- [31] TI. MSP430FR59xx: Mixed-signal microcontrollers. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr5969.pdf>, June 2018.
- [32] Sensirion. Datasheet SHT1x: (sht10, sht11, sht15) humidity and temperature sensor ic. https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/0_Datasheets/Humidity/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT1x_Datasheet.pdf, February 2018.
- [33] Magaret. Msp430fr5969 launchpad™ development kit. <https://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/Internet-de-las-cosas-IoT>, June 2018.
- [34] María Catalina Acosta Ponce. Estudio del estándar ieee 802.15. 4 zigbee para comunicaciones inalámbricas de área personal de bajo consumo de energía y su comparación en el estándar ieee 802.15. 1 bluetooth. B.S. thesis, QUITO/EPN/2006, 2006.
- [35] Pablo Pardal Garcés. Redes de área extensa para aplicaciones de iot: modelado de comunicaciones sigfox. 2017.
- [36] Jorge Serrano Ramos. Red inalámbrica de sensores para la optimización del riego en plantaciones agrónomas. 2018.
- [37] José Ignacio Vega Luna, Mario Alberto Lagos Acosta, Gerardo Salgado, and Víctor Noé Tapia Vargas. Sistema de acceso a áreas restringidas con detección de intrusos. *Pistas Educativas*, 36(112), 2018.
- [38] DIGI. XCTU :next generation configuration platform for xbee/rf solutions. <https://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/xctu-software/xctu>, July 2018.
- [39] Nicolas Degrenne, François Buret, Bruno Allard, and Pascal Bevilacqua. Electrical energy generation from a large number of microbial fuel cells operating at maximum power point electrical load. *Journal of Power Sources*, 205:188–193, 2012.
- [40] Heming Wang, Jae-Do Park, and Zhiyong Jason Ren. Practical energy harvesting for microbial fuel cells: a review. *Environmental science & technology*, 49(6):3267–3277, 2015.
- [41] Ruud A Timmers, David PBTB Strik, Hubertus VM Hamelers, and Cees JN Buisman. Characterization of the internal resistance of a plant microbial fuel cell. *Electrochimica Acta*, 72:165–171, 2012.

- [42] A Larrosa-Guerrero, K Scott, IM Head, F Mateo, A Ginesta, and C Godinez. Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells. *Fuel*, 89(12):3985–3994, 2010.
- [43] Koen Wetser, Emilius Sudirjo, Cees JN Buisman, and David PBTB Strik. Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied energy*, 137:151–157, 2015.
- [44] MA Moqsud, J Yoshitake, QS Bushra, M Hyodo, K Omine, and David Strik. Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste management*, 36:63–69, 2015.
- [45] M Helder, DPBTB Strik, HVM Hamelers, RCP Kuijken, and CJN Buisman. New plant-growth medium for increased power output of the plant-microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 104:417–423, 2012.
- [46] Tarek Alshaal, Hassan El-Ramady, Abdullah H Al-Saeedi, Tarek Shalaby, Tamer Elsakhawy, Alaa E-D Omara, Aliaa Gad, Eman Hamad, Ayman El-Ghamry, Ahmed Mosa, et al. The rhizosphere and plant nutrition under climate change. In *Essential Plant Nutrients*, pages 275–308. Springer, 2017.
- [47] Rodrigo M Passos, Claudionor JN Coelho Jr, Antonio AF Loureiro, and Raquel AF Mini. Dynamic power management in wireless sensor networks: An application-driven approach. In *null*, pages 109–118. IEEE, 2005.
- [48] N Ahmed, H Rahman, and Md I Hussain. A comparison of 802.11 ah and 802.15. 4 for iot. *ICT Express*, 2(3):100–102, 2016.
- [49] Fertiquirem. Diammonium phosphate. http://fertiquirem.com.mx/wp-content/uploads/2016/06/fosfato_diamonico.pdf, May 2018.
- [50] A. Carmalin Sophia and S. Sreeja. Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 21:59 – 66, 2017.
- [51] Firas Khaled, Olivier Ondel, and Bruno Allard. Microbial fuel cells as power supply of a low-power temperature sensor. *Journal of Power Sources*, 306:354–360, 2016.
- [52] Heming Wang, Jae-Do Park, and Zhiyong Jason Ren. Practical energy harvesting for microbial fuel cells: A review. *Int J. Energy Res*, 49:3267 – 3277, 2015.
- [53] Koen Wetser, Emilius Sudirjo, Cees J.N. Buisman, and David P.B.T.B. Strik. Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied Energy*, 137:151–157, 2015.
- [54] M.A. Moqsud, J. Yoshitake, Q. S. Bushra, M. Hyodo, K. Omine, and David Strik. Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste Management*, 36:63–69, 2014.
- [55] Ruud A. Timmers, David P.B.T.B. Strik, Hubertus V.M. Hamelers, and Buisman Cees J.N. Characterization of the internal resistance of a plant microbial fuel cell. *Electrochimica Acta*, 72:3267 – 3277, 2012.
- [56] T.S. Song, Yan Z.S., Zhao Z.W., and Jiang H.L. Removal of organic matter in freshwater sediment by microbial fuel cells at various external resistances. *J Chem Technol Biotechnol*, 85:1489–1423, 2010.

- [57] Delina Y. Lyon, Francois Buret, and Jean-Michel Vogel, Timothy M. and Monier. Is resistance futile? changing external resistance does not improve microbial fuel cell performance. *Bioelectrochemistry*, 78:2–7, 2010.

“ Enseñarás a volar, pero no volarán tu vuelo.

Enseñarás a soñar, pero no soñaran tu sueño.

Enseñarás a vivir pero no vivirán tu vida.

Sin embargo...

En cada vuelo, en cada vida, en cada sueño, perdurará siempre la huella del camino enseñado".

Madre Teresa de Calcuta.

Anexos

Anexo A

Anexo I: Ejemplo de código launchPad

El siguiente código fue utilizado para tomar muestras de temperatura del sensor SHT10 con la LaunchPad usando el entorno Code Composer Studio y Energía (CodigoEstaca.ino):

```
1
2 #include <SHT1x.h> //Libreria sensor
3 #include <XBee.h> //Libreria Xbee
4
5 //Definiendo Pines segun la hoja de datos del MSP430FR5969
6 #define dataPin 8
7 #define clockPin 9
8 #define analogSensor1 2
9 #define analogSensor2 18
10 #define deshabilitarAnalog1 11
11 #define deshabilitarAnalog2 12
12 #define activarFiltro1 5
13 #define activarFiltro2 19
14 #define deshabilitarXbee 15
15
16 //Parametros que usa el sensor
17 SHT1x sht1x(dataPin, clockPin);
18
19 //Esqueleto de armado de tramas en un arreglo para el envio de datos
20 XBee xbee = XBee();
21 uint8_t payload2[2];
22
23 XBeeResponse response = XBeeResponse();
24 ZBRxResponse rx = ZBRxResponse();
25 ModemStatusResponse msr = ModemStatusResponse();
26
27 //Direccion del modulo Xbee a comunicar
28 XBeeAddress64 addr64 = XBeeAddress64(0x0013A200, 0x40F78458);
29 ZBTxRequest zbTx = ZBTxRequest(addr64, payload2, sizeof(payload2));
30 ZBTxStatusResponse txStatus = ZBTxStatusResponse();
31
32 //Variables a usar
33 int temp_c;
34 //int humidity;
```

```
35
36 void setup() {
37
38   Serial.begin(9600); // Velocidad en Baudios
39   Serial1.begin(9600); // xbee1.begin(9600);
40   xbee.begin(Serial1);
41
42   //Habilitando los pines como entradas o salidas
43   pinMode(deshabilitarAnalog1, OUTPUT);
44   pinMode(deshabilitarAnalog2, OUTPUT);
45   pinMode(deshabilitarXbee, OUTPUT);
46
47   //Impedancia del pin hacia el analogico
48   digitalWrite(deshabilitarAnalog1, LOW);
49   digitalWrite(deshabilitarAnalog2, LOW);
50
51 }
52
53 void loop() {
54
55   //Lectura del sensor
56   temp_c = sht1x.readTemperatureC();
57   temp_c = round(temp_c);
58
59   //Cargando los bytes en las tramas
60   payload2[0] = temp_c; //>> 8 & 0xff; // Primer byte de lectura de
        temperatura1
61   payload2[1] = temp_c ; // & 0xff; // Primer byte de lectura de
        temperatura2
62
63   Serial.println(temp_c); //Imprimir en Consola
64   digitalWrite(deshabilitarXbee, HIGH);
65   sleepSeconds(10); //Modo dormido en segundos
66
67   //envio del paquete para transmitir por el modulo de radio
68   xbee.send(zbTx);
69   Serial.println("Dato enviado"); //Imprimir consola
70   digitalWrite(deshabilitarXbee, LOW);
71
72   xbee.readPacket();
73 }
```

Mostrando el Monitor serial:

```
35
"Dato enviado"
```

Anexo B

Anexo II: Esquemas de Conexión

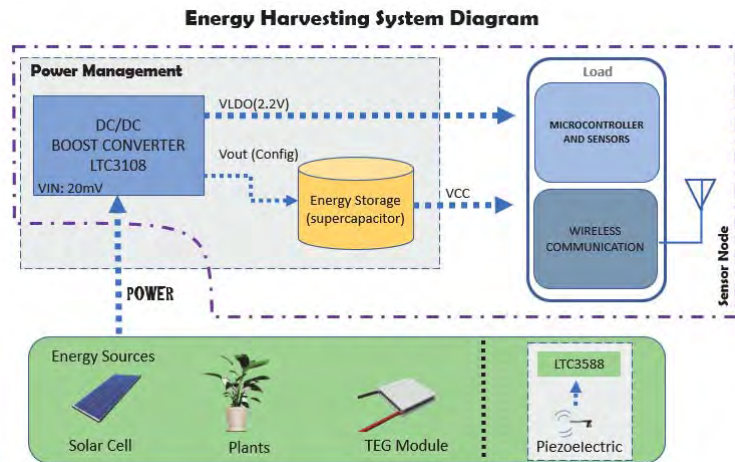


Figura B.1: Diagrama del Sistema Energy Harvesting.

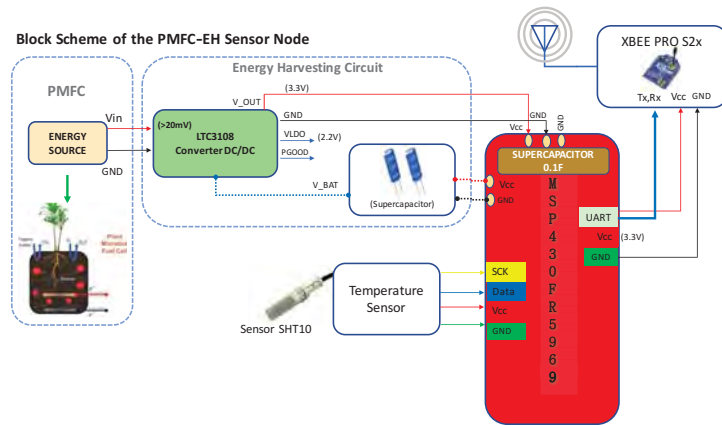


Figura B.2: Modelo del Nodo Sensor I.

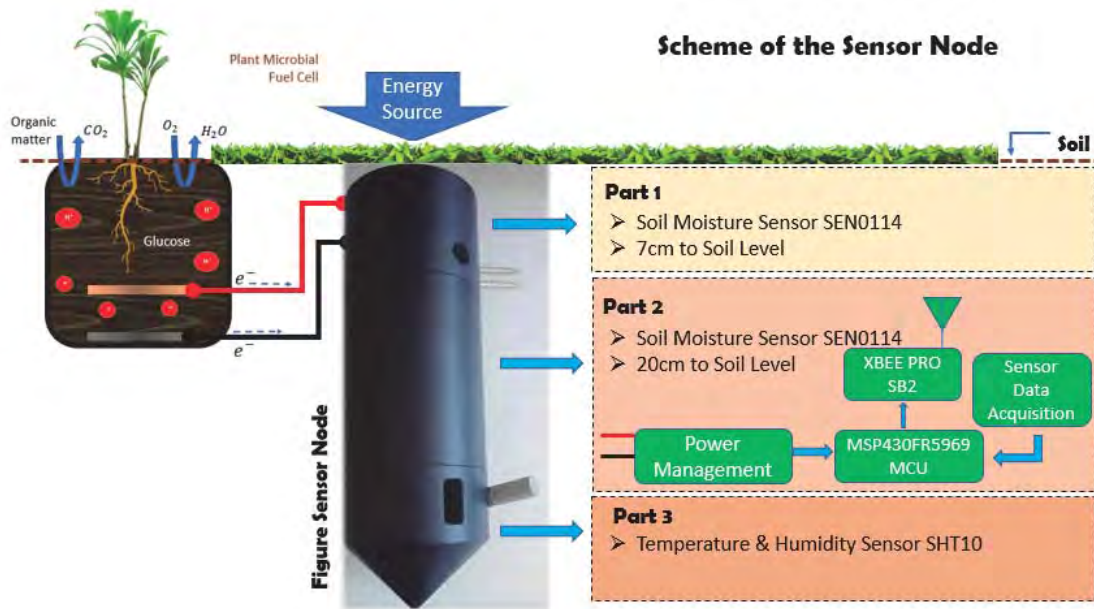


Figura B.3: Modelo del Nodo Sensor II.

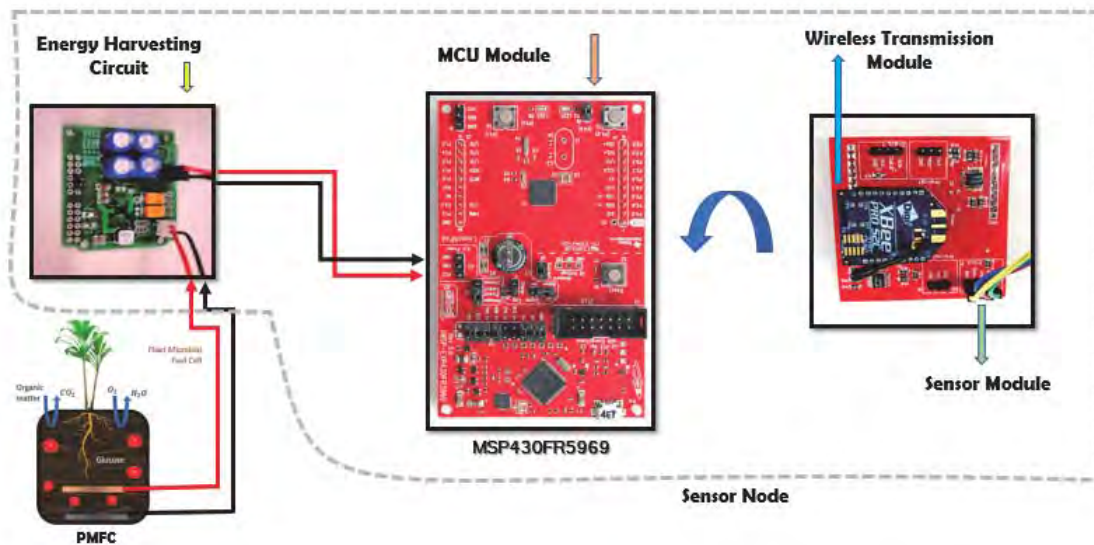


Figura B.4: Modelo del Nodo Sensor III.

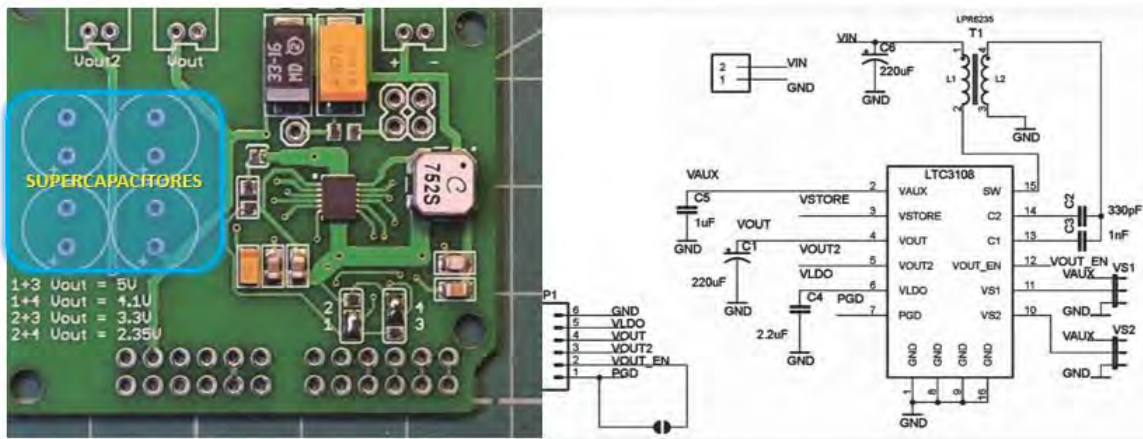


Figura B.5: Esquema de Circuito del LTC-3108.

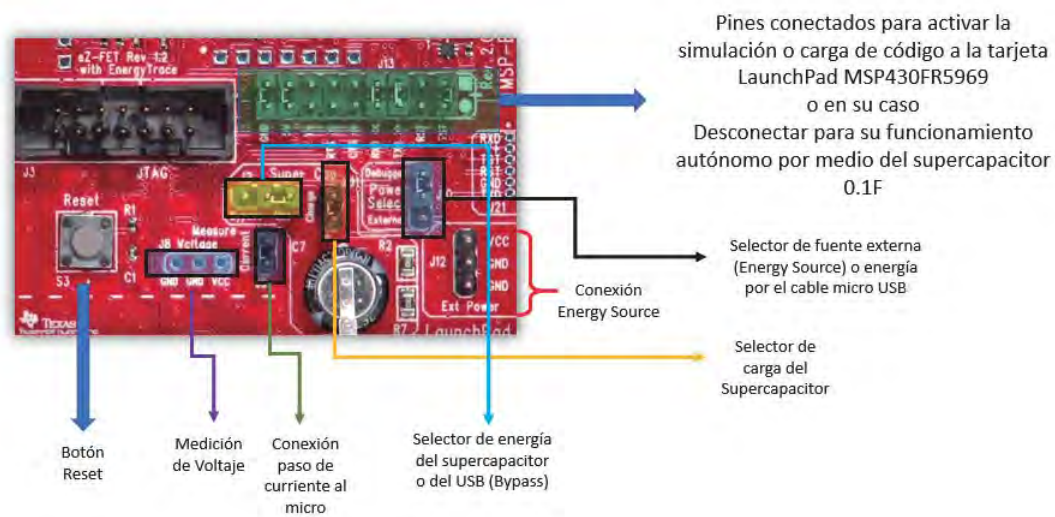


Figura B.6: Esquema de Conexión del la Launchpad.

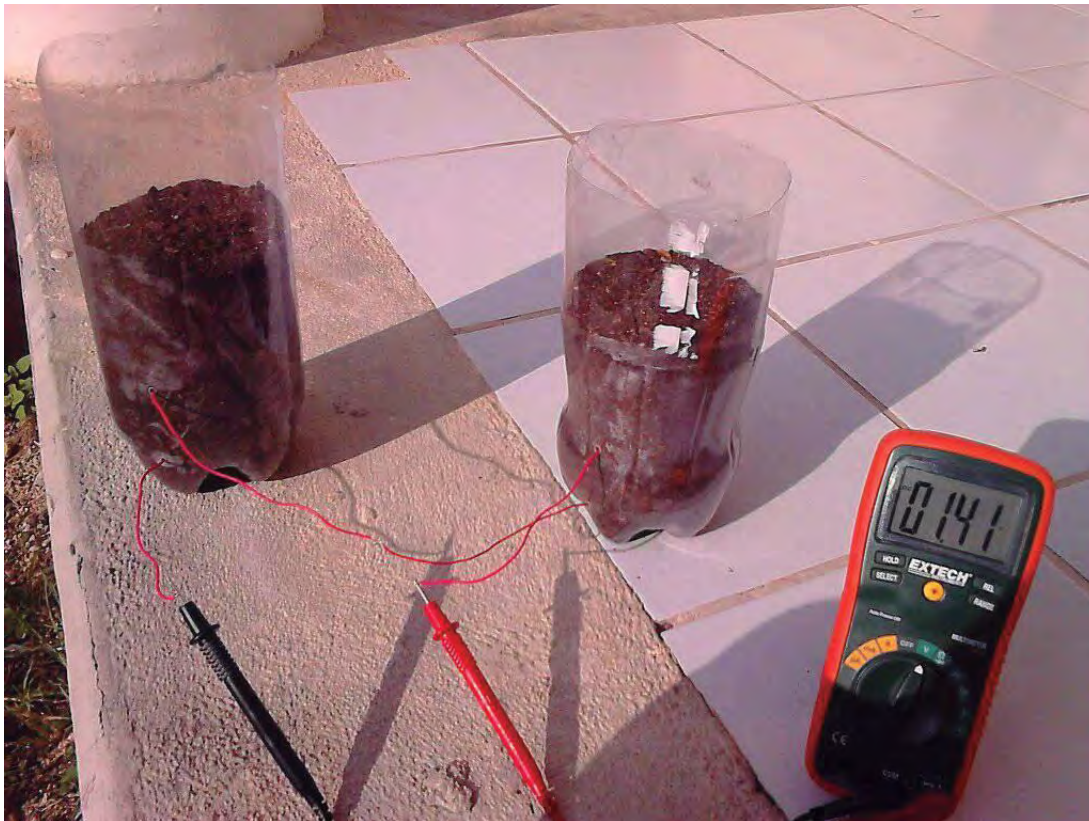


Figura B.7: Medición de voltaje en serie suelo.



Figura B.8: Diseño de planta1.



Figura B.9: Diseño de planta2.

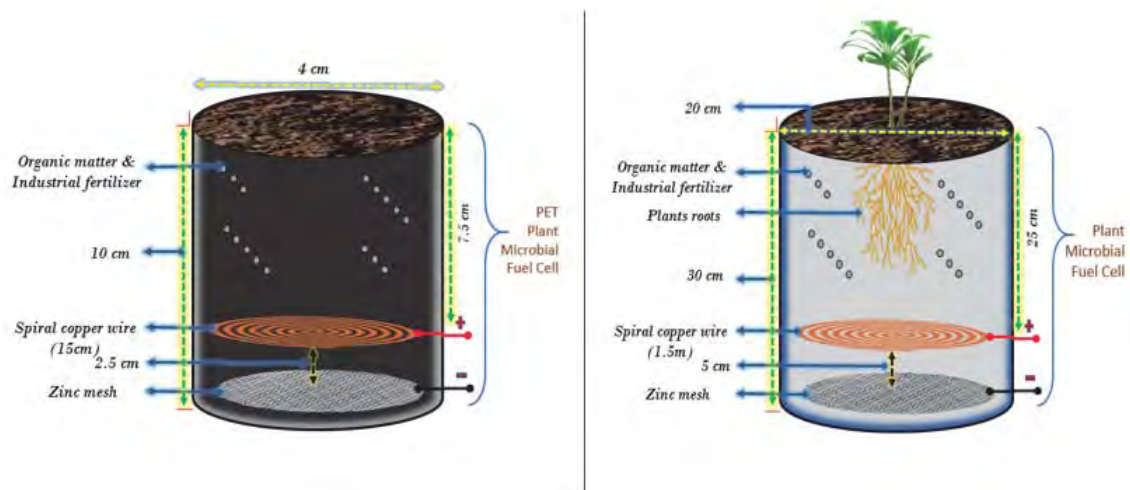
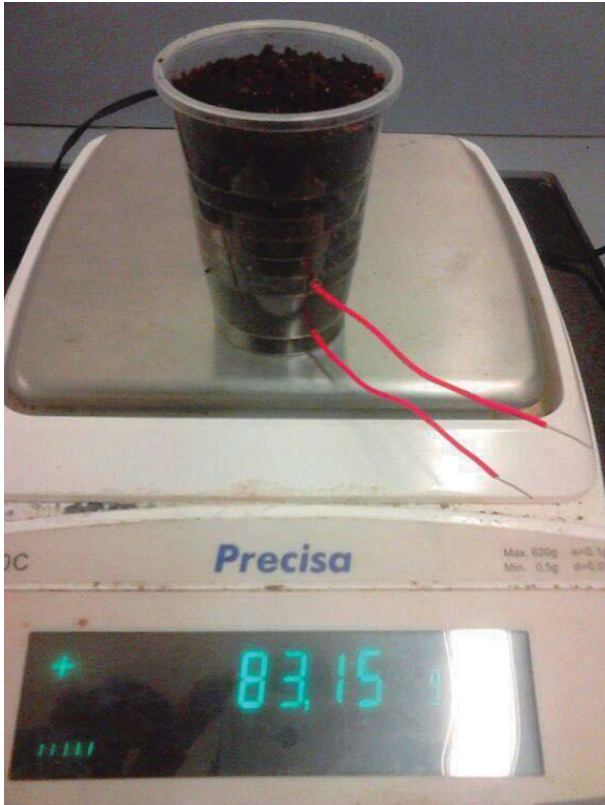


Figura B.10: Esquema para realizar las pruebas del diseño de una PMFC, a) imagen de la izquierda prueba para elegir tipo de suelo, b) imagen de la derecha, diseño del tamaño de nuestra maceta utilizando las mejores condiciones arrojadas en la prueba de suelo .



(a) Peso de suelo para despues agregar humedad o fertilizante o ambas



(b) Medición del Suelo en Paralelo

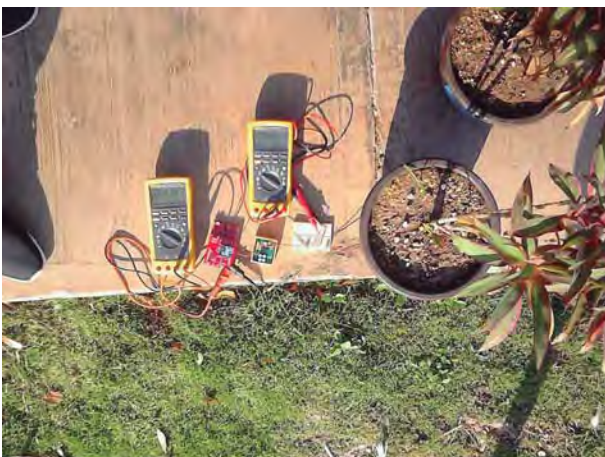
Figura B.11: Pruebas de suelo.



(a) Prueba medición de una sola planta



(b) Prueba medición de diferentes administradores de energía (por ejemplo el BQ25570)

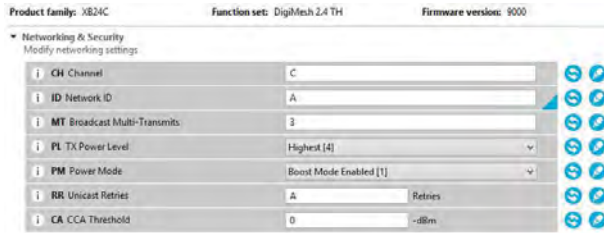


(c) Medición del prototipo en cada etapa del sistema

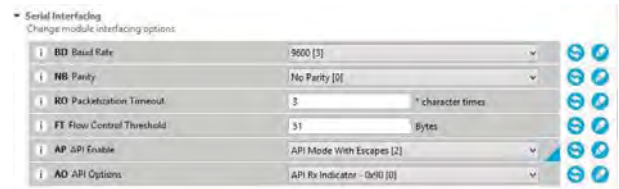


(d) Prueba Final Nodo Sensor

Figura B.12: Pruebas de implementación del sistema completo.



(a) 1



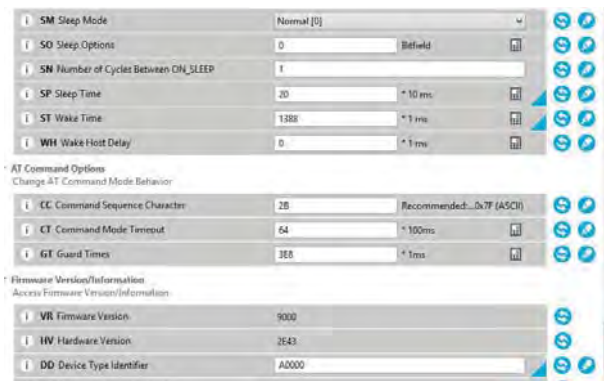
(b) 2



(c) 3



(d) 4



(e) 5

Figura B.13: Configuración Xbee modo DigiMesh.

Anexo C

Anexo III: Artículo

Plant Microbial Fuel Cells–based Energy Harvester System for Internet of Things Applications

Edith Osorio^a, Javier Vázquez Castillo^{b,*}, Mario A. Carmona Campos^b, Gliserio Romeli Barbosa Pool^b,
Guillermo Becerra^a, Alejandro Castillo Atoche^c

^aCONACYT, Universidad de Quintana Roo. Av. Ignacio Comonfort, Del Bosque, 77019, Chetumal, Q. Roo, México.

^bUniversidad de Quintana Roo. Av. Ignacio Comonfort, Del Bosque, 77019, Chetumal, Q. Roo, México.

^c Universidad Autónoma de Yucatán, Av. Industrias no Contaminantes s/n por Periferico Norte, Apdo. Postal 150, Cordemex, Mérida, Yucatán, México

Abstract

The emergence of modern technologies such as Wireless Sensor Networks (WSNs), the Internet-of-Things (IoT), and Machine-to-Machine (M2M) communications, involves the use of batteries, which pose a serious environmental risk, with billions of batteries disposed of every year. Energy Harvesting (EH) is fundamental in enabling the use of low-power electronic devices that derive their energy from external sources, such as Microbial Fuel Cells (MFC), solar power, thermal and kinetic energy, among others. Plant Microbial Fuel Cells (PMFC) are a prominent clean energy source and a step toward the development of batteryless systems for ultra-low power systems. In this paper, a PMFC-based energy harvester system is proposed for the implementation of autonomous batteryless sensor nodes with IoT and cloud-based service communication protocols. The PMFC-EH system is able to generate a maximum power point of 0.71 V, a current density flow of 5 mA cm⁻², and a power density of 3.5 mW cm⁻² with a single plant. Considering a sensor node with a current consumption of 0.35 mA, the PMFC-EH green energy system allows a power autonomy for real-time data processing of IoT-based low-power WSN systems.

Keywords: Batteryless, Energy Harvesting, IoT, Plant Microbial Fuel Cell, Wireless Sensor Network.

1. Introduction

Novel Internet-of-Things (IoT)-based wireless sensor networks (WSN) are composed of miniaturized sensor nodes distributed in an area to collect real-time data such as temperature, salinity, water stress, and humidity. Traditional IoT-based WSN systems need their batteries replaced or recharged when the stored energy is low or exhausted, and the replacement process can be difficult or even impossible. One of the main challenges of this technology is the development of an adequate energy harvesting (EH) system. In this regard, EH systems play a critical role in the fastest growing state-of-the-art electrical applications, such as IoT, smart cities, biosensors, wearable electronics, and autonomous WSNs [1].

In addition, the combination of EH-WSN and Plant Microbial Fuel Cells (PMFCs) generates a maintenance-free alternative to environmentally harmful batteries. PMFC harnesses the metabolism of micro-organisms as catalysts and uses organic matter to generate electrical energy, reaching power densities of several hundreds

*Corresponding author

Email address: jvazquez@uqroo.edu.mx (Javier Vázquez Castillo)

of $\mu\text{W cm}^{-2}$; their main advantage is that they can generate energy from organic matter in the soil as fuel [2, 3, 4].

In recent years, the use of IoT-based applications has been proposed as a solution to diverse engineering problems, such as cattle and honey bee monitoring [5, 6], automated irrigation [7], and early pest detection [8]. Efforts have been made to develop autonomous batteryless sensor nodes through EH and the implementation of MFCs [4, 9, 10, 11]. For example, a MFC power supply is presented in [9] for low-power temperature monitoring. In the design, a power management unit is proposed for low input voltage operation, showing the use of MFC-based renewable energy under a realistic operation. [10] presents an interesting floating MFC used as energy harvester for signal transmission from natural bodies of water. The design proposes a power management system based on a step-up DC/DC converter and a low-power data transmission system with Sigfox technology, while [4] employs an intelligent energy harvesting scheme for MFCs. The maximum power point tracking and voltage overshoot avoidance algorithms are implemented with the aim of providing better performances in the MFC. Finally, [11] presents a review of different techniques for designing MFCs. The effects of plants on PMFC, the role of microbes driven by soil physiochemical and biological characteristics, and engineering aspects involved in designing efficient configurations are presented in this reference. Overall, these works have focused on the implementation of low-cost and green energy systems to monitor real-time data. However, although considerable progress has already been achieved in these systems, there remain some relevant problems to solve. One of the major constraints for PMFC-EH is operating at low input voltage and at very low power completely autonomously and without a battery. For IoT-based WSN applications, the natural ambient fuel is assumed to be unlimited, and therefore, the priority is to harvest sufficient electrical energy regardless of the fuel consumption rate.

In this paper, a PMFC-EH sensor node system is proposed for implementing a batteryless design for IoT temperature measurements. A power management strategy is adopted to harvest the maximum energy from a PMFC to provide a self-autonomous wireless sensor node. The design is composed of a nano-power boost converter, a PMFC design, a Dynamic Power Management (DPM) for low-power consumption, and an ultra-low power microcontroller-based system. The ambient temperature is measured by the proposed PMFC-EH sensor node and the performance analysis is easily accessed through a friendly online user interface.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 details the design and PMFC characteristics. The implementation of the PMFC-EH is described in Section 3. The IoT sensor node prototype, DPM strategy and the measurement data analysis are also reported. Section 4 presents the experimental results of the system and the software interface. Concluding remarks are given in Section 5.

2. Plant Microbial Fuel Cell: Materials, methods and calculations

PMFC is a renewable and clean bioengineering technology based on two principles: i) rhizodeposition, or the loss of organic compounds in plant roots, and ii) electrochemical electricity generation by active bacteria via dead root degradation. Currently, researchers are focused on increasing the power output of the PMFC; this electrical parameter depends on many factors, such as substrate availability per square meter, plant growth area, distance between the anode and cathode, type of materials, and the local mix soil factors: humidity,

electrical conductivity, temperature, and pH, among others [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Therefore, it is necessary to select the components in order to design a PMFC to deliver the maximum power density as can be seen in Figure 1.

Figure 1a illustrates the proposed PMFC design with a mix of soil components, fertilizers, and a local plant typical of the southeastern region of Mexico. This power source converts the low molecular weight compounds into carbon dioxide, protons, and electrons. The PMFC is implemented with two 14 caliber electrodes, and has a transversal area of 0.021 cm^2 to measure electrical power generation. A Zinc mesh anode is placed at the bottom of the PMFC at a depth of 30 cm from ground level, and a copper spiral positioned 5 cm above the Anode serves as a cathode. Both electrodes have a circular area and a diameter of 20 cm. An external load is used to measure the PMFC potential via two copper wires connected to the electrodes.

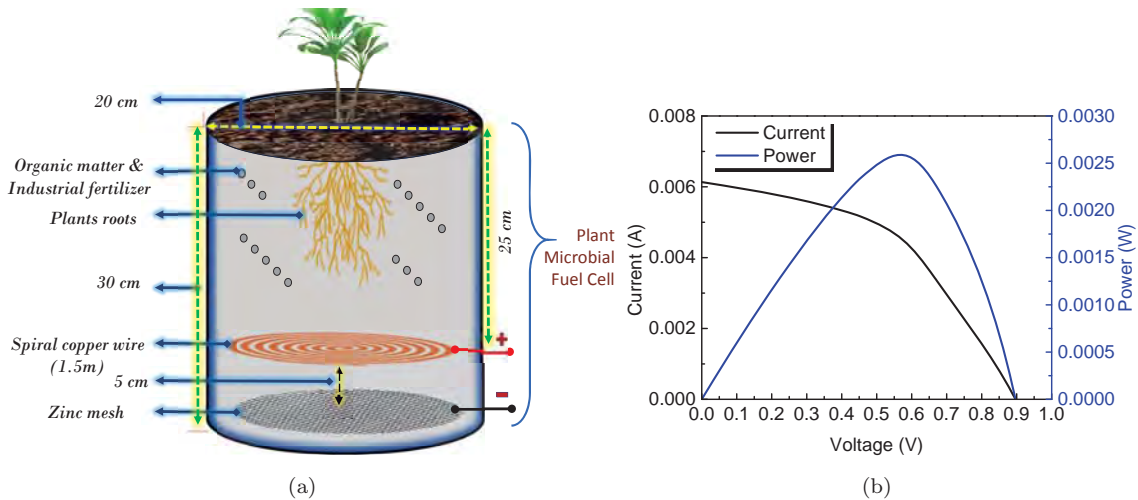


Figure 1: a) Schematic representation of the proposed PMFC in the set of experiments: PMFC used with mix soil, fertilizer and the *Cordiline Fructicosa* plant, b) Typical performance of a PMFC ($I - V$ and $P - V$ characteristic curves).

The electrical performance of the PMFC is assessed with a Metrohm Autolab potentiostat. Note that the maximum power extracted from a PMFC depends heavily on several parameters, such as microbial populations, electrode contacts, electrochemical parameters, cell temperature, and the external load resistance (R_{ext}). Power density (P_D) represents the amount of energy that the PMFC system can deliver based on its volume. This rate of energy, in Watts per square centimeters (W cm^{-2}), is expressed as follows:

$$P_D = \frac{V_{cell}^2}{A_{anode} \cdot R_{ext}}, \quad (1)$$

where V_{cell} is the measured cell potential in volts (V), and A_{anode} represents the area of the anode. The PMFC current - voltage ($I - V$) curve indicates the influence of the selected compost upon bioelectricity generation; e.g., Figure 1b illustrates the typical performance of a PMFC. From the analysis of the figure, it can be deduced that the maximum power point occurs at the optimal voltage (V_{OP}) and current density (J_{OP}), which represents the ideal PMFC operation point.

The PMFC performance is determined by analyzing cell potential, the current generation and the internal resistance. Any PMFC source has an internal resistance (R_{int}), and the maximum power is transferred to the load when R_{int} is equal to the external resistance R_{ext} [13, 14]. The internal resistance is calculated as

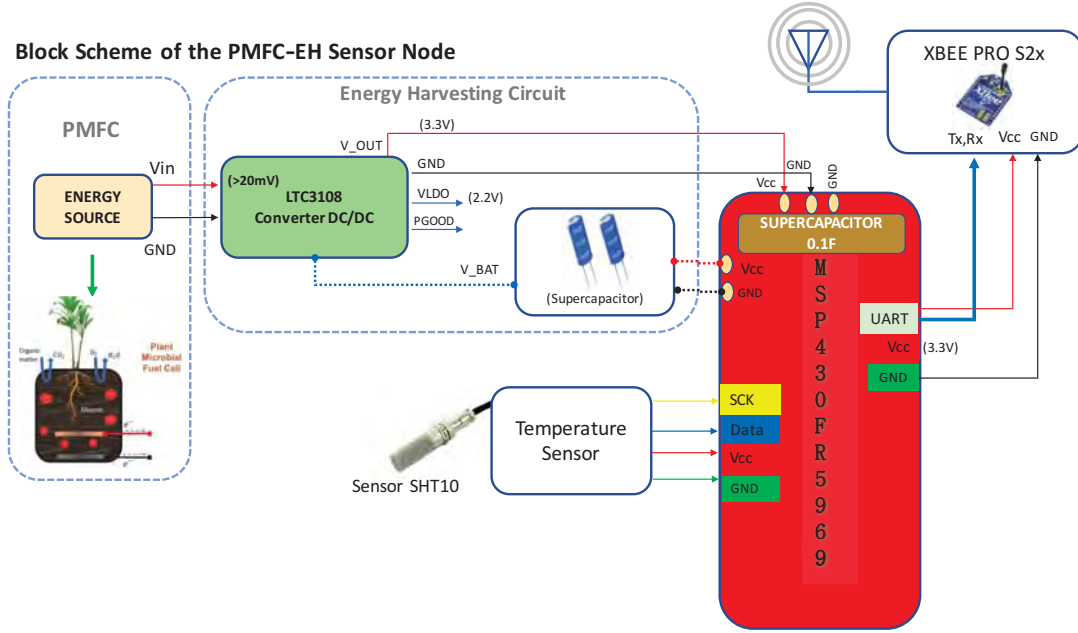


Figure 2: Conceptual PMFC-EH system for the IoT applications proposed in this paper.

follows:

$$R_{int} = \frac{V_{ocv} - V_{cell}}{i_D}, \quad (2)$$

where V_{ocv} and i_D represent the open circuit voltage and the current density ($A\ cm^{-2}$) of the PMFC, respectively. In this study, the PMFC power density analysis was carried out under natural light conditions with an average light intensity of $900\ W\ m^{-2}$ for 12 hrs per day. Solar irradiation data for the period of study were obtained using a weather station located at The Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional), in Mérida Yucatán, México (21.0213286 N,-89.6268529 W).

3. PMFC - Energy Harvesting Sensor Node

Novel IoT-based wireless sensor networks face the challenge of surpassing the limited lifespan associated with batteries. To ensure an autonomous operation of the sensor node, the energy required for sensing, processing, and communicating must be balanced with the energy harvested from the proposed PMFC.

This section describes the architecture of a PMFC-EH sensor node for IoT applications. Figure 2 shows the block diagram of the proposed electronic system for the sensor node. The system is composed of the PMFC, an energy harvester circuit, a sensor node, a microcontroller unit (MCU), and a wireless transmission module. In addition, it is necessary to implement an energy strategy to configure the PMFC-EH system for ultra-low power consumption with IoT services and cloud storage management.

3.1. Energy Harvesting Circuit

The EH subsystem is composed of the LTC3108 power management integrated circuit (IC) [20] and four 1.5 F supercapacitors. Figure 3 shows the main components of the EH subsystem. The circuit contains a

DC/DC converter that manages energy from an input voltage as low as 20 mV. The LTC3108 has a typical current consumption of less than $6\ \mu\text{A}$ and uses a MOSFET switch to form a resonant step-up oscillator using an external transformer (1:100 ratio) and a small coupling capacitor. This allows it to boost input voltages as low as 20mV-high enough to provide multiple regulated output voltages to power the IoT-based sensor node. The oscillation frequency is determined by the inductance of the secondary winding transformer and is typically in the range of 10 to 100 kHz. According to Figure 2 and Figure 3, as soon as the rectifier circuit exceeds 2.5 V, V_{BAT} is allowed to charge up the supercapacitors that depend on the input voltage and transformer turns ratio; however, the current is limited to 4.5 mA. The power management circuit is configured to deliver a regulated V_{OUT} of 3.3 V to the sensor node.

3.2. Sensor Node System

An ultra-low power sensor node architecture has been designed to perform temperature measurements in real time. The EH subsystem is adapted to the PMFC and provides the required energy to the sensor node. This architecture is composed of three sections: a) data acquisition and signal conditioning, b) a MCU, and c) wireless transmission. Figure 4 illustrates the integration of the ultra-low power sensor node design in a test field.

a) *Data acquisition and signal conditioning module:* The temperature data is acquired through the SHT10 sensor IC [21]. The SHT10 delivers a 12-bit digital output with a typical resolution of $0.01\ ^\circ\text{C}$. It can be powered from a voltage range of 2.4V to 5.5V, typically consuming 0.9 mA when in operation and a maximum of $1.5\ \mu\text{A}$ in sleep mode. The serial interface of the SHT10 is optimized for sensor readout through the I2C communication protocol.

b) *MCU module:* The selected MCU is an ultra-low power microcontroller from Texas Instruments with embedded Ferroelectric Random Access Memory (FRAM) technology. The MSP430FR5969 MCU device features 64KB of embedded FRAM, a nonvolatile memory, high endurance, and high-speed write access. It supports CPU speeds of up to 16 MHz and has integrated peripherals for communication, such as ADC and timers. The MCU also supports a wide range of voltages (1.8 V to 3.6 V) and its 16-bit RISC architecture includes the standby (LPM3) and sleep (LPM3.5) low-power modes, which have been optimized to achieve

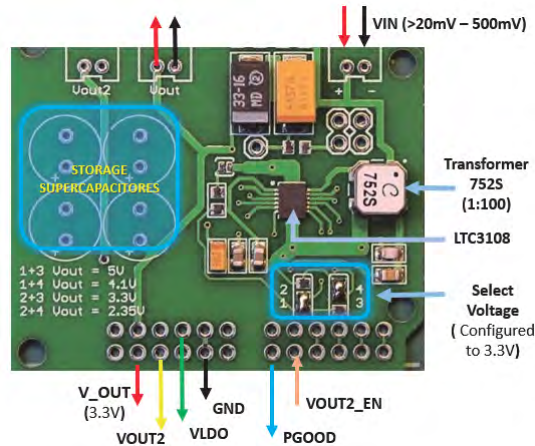


Figure 3: EH subsystem based on LTC3108 power management circuit.

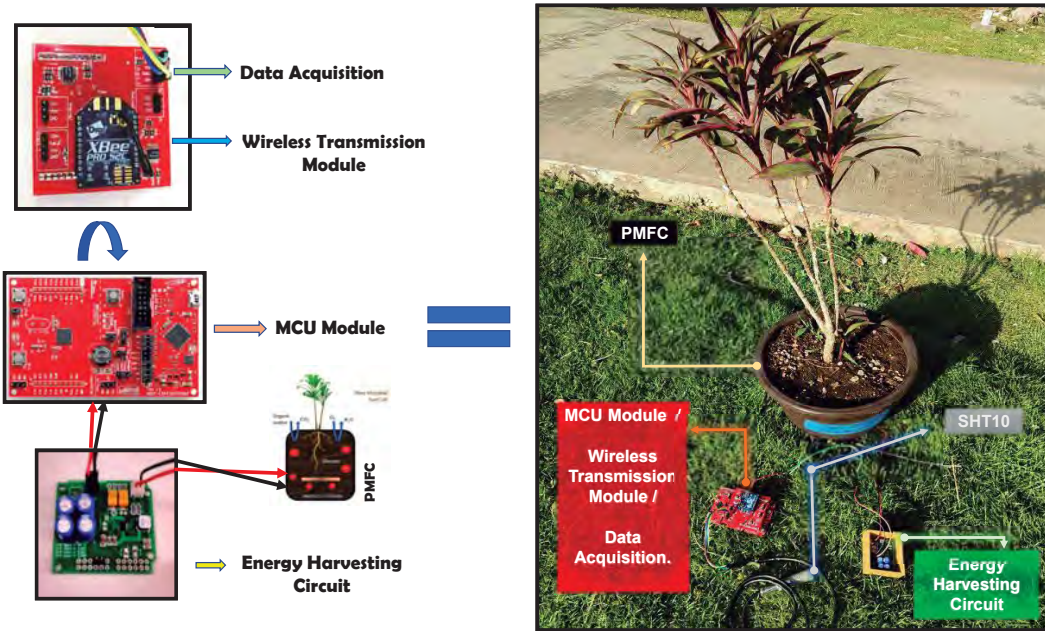


Figure 4: PMFC-EH Sensor Node.

extended battery life in energy-limited applications.

c) *Wireless transmission module*: The communication protocol for the sensor node is the IEEE 802.15.4 WPAN Zigbee. The XBee PRO S2C radio modem module is a low-cost, low-power data transceiver unit for WSN and IoT applications. This module provide wireless connectivity to end-point devices and operates with a power-down current below than $1\ \mu\text{A}$. The transmission power is $+18\text{dBm}$, which reaches distances of up to 1 mile (i.e., line-of- sight range) at a maximum data rate of 250 kbps.

The XBee module is adapted to the MSP430FR5969 MCU host device via a serial port. The XBee communicates the data with an UART protocol, through the serial pins of the MCU, as illustrated in Figure 2. ZigBee is used in WSN, and each node is configured as an end device in a star topology. The data information over the network is transmitted to the gateway, which collects sensor data, and uploads the information to the cloud.

3.3. Strategy for the Ultra-Low Sensor Node Power Consumption

DPM is a technique used to manage the power and performance of IoT-based wireless sensor networks. DPM reduces energy usage by dynamically controlling component switching in low-power modes [22]. A Scheduled Switching Mode (SSM) manages the state transitions, allowing power savings for extending sensor node life. Figure 5 shows the SSM stages from data acquisition to wireless transmission. Depending on the type of DPM-SSM stage, the node can consume different levels of battery capacity; i.e., switching from Standby to Sleep mode takes 6 ms and operates with a power down current of $65\ \mu\text{A}$. Transition times between states are also considered in the DPM model, with all values taken from device datasheets.

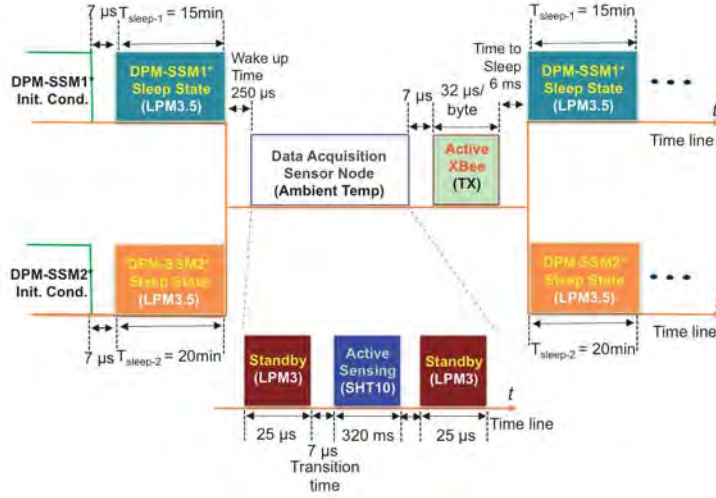


Figure 5: Dynamic Power Management Strategy for Ultra-Low Power Consumption.

In this study, two DPM-SSM stages are implemented, based on the PMFC-EH capacity and the quasi-static behavior of data temperature during the day. The strategy dynamically switches from DPM-SSM1 (from 6:01 am to 7:00 pm) to DPM-SSM2 (from 7:01 pm to 6:00 am) with sleeping periods of 15 and 20 minutes, respectively. According to Figure 5, once the sensor node system is in *Wake-up* with a transition time of $250 \mu\text{s}$, the *Standby* and the *Active-Sensing* nodes are sequentially activated for a period of 320.03 ms, with an average current consumption of 5.06 mA. The *Active XBee* is the state that consumes the most energy, with a typical current of up to 49.09 mA. Therefore, both DPM-SSM stages adopt switching to the *Sleep* state from the *Active XBee* state. These DPM-SSM strategies are carried out in order to take full advantage of the PMFC-based battery recovery effect.

3.4. Cloud Storage and IoT services

The Zigbee communications protocol is connected to a local gateway and then to the Internet, uploading the measured data to the cloud. The protocols, Message Queue Telemetry Transport (MQTT), and Representational State Transfer (REST) are used to provide low-latency, small-packet sizes and a stable communication for resource constrained devices. The bandwidth requirements are extremely low, and the nature of the protocol makes it very energy efficient [23]. REST is an architectural style that offers desirable properties, such as performance, scalability, and modifiability, enabling services to work on the Web. A service based on REST is called a RESTful service oriented data networking. The IoT-based systems provide cloud-based data storage and analysis services. When being powered-on or reset, the sensor node requests data from the attached devices every 15 or 20 minutes. In local communication between the XBee radio modems (over IEEE 802.15.4), the XBee-PRO S2 devices are configured to transmit data, and MQTT transfers the data in the form of messages from the sensor node to a gateway or server (broker). The Publish/Subscribe model used in MQTT is mapped to resource observers. PUT and GET operations on HTTP/REST are also integrated into the MQTT broker.

4. Results and discussion

In this section, the design results of the PMFC for IoT applications are analyzed.

4.1. PMFC Design

The PMFC experiment sets up a scenario for evaluating the PMFC design, considering an average load resistance of $R_{ext} = 120\Omega$. In order to ensure the presence of electrochemically active bacteria, the PMFC experiment employs diammonium phosphate in the form of an industrial fertilizer known as FERTIQUIM® [24], which has the following chemical composition: 18% Nitrogen- N , 18% Ammonium- NH_4 , 46% Phosphorus pentoxide P_2O_5 , 2.20% Soluble Sulfur S , and 10% pH in solution (level 6-7). In this sense, the PMFC experiment considers a mix of organic materials with FERTIQUIM® fertilizer at 11 : 1 (wt/wt) in dry weight and 100% humidity.

The potential required by the sensor node for processing, sensing, and communicating must be balanced with the energy harvested from the PMFC. In this regard, the power energy generated by the PMFC and the stability of the PMFC electrical parameters, such as open circuit voltage V_{ocv} , short-circuit current J_{sc} , maximum power P_{max} , and R_{int} , must be analyzed (see Figure 6).

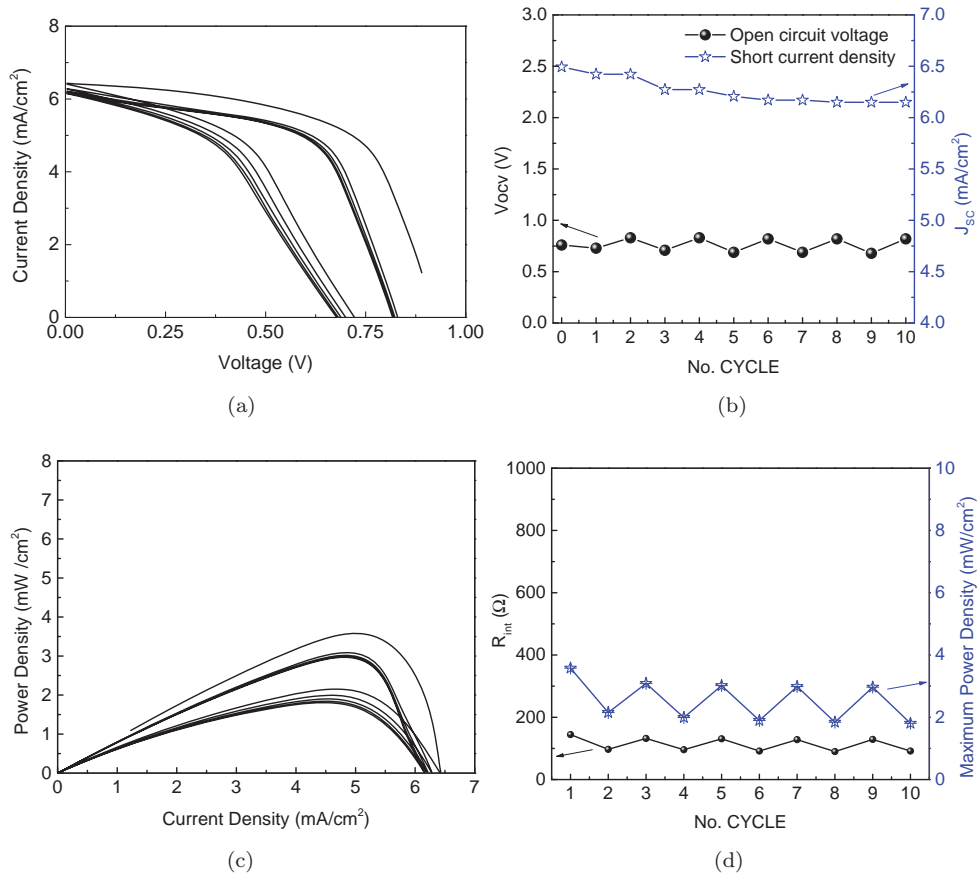


Figure 6: a) Polarization curve of PMFC when the controlled potential is maintained for ten cycles, b) Comparative analysis of the open-circuit voltage (black line) and short-circuit current (blue line) for ten cycles, c) Power curve of PMFC, and d) maximum power density (black curve) per cycle and internal resistance parameter (blue curve) per cycle.

Figure 6a shows the polarization curve of the PMFC under stress. The current density is nearly constant at low voltage, however, presents variations at high rates. This hysteresis in the polarization curve is related to the initial stabilization of electrons and protons produced by bacteria [25].

The V_{ocv} (black line) and J_{sc} (blue line) of the PMFC are illustrated in Figure 6b for different cycles. In the results, J_{sc} tends to decrease smoothly producing variations of up to 0.5 mA cm^{-2} across the cycles. V_{ocv} has variations of $0.7\text{V} - 0.8\text{V}$ at the same number of cycles. These values are similar to those reported in the state of the art [9, 14].

Figure 6c shows different P_D curves. The P_D reaches a maximum value of 3.5 mW cm^{-2} , corresponding to a J_{OP} equal to 5 mA cm^{-2} and a V_{OP} of 0.7 V . The figure analysis shows that the hysteresis is accentuated around the P_{max} density point with variations of up to 1.5 mW cm^{-2} . Similar results were presented in [17], [18]. According to the maximum power transfer theorem, maximum power is achieved when R_{ext} is equal to R_{int} [15]. Thus, R_{int} is calculated per cycle using (2), with results that oscillate between 90Ω to 150Ω . Figure 6d presents the results of the maximum power density and the PMFC internal resistance.

The maximum PMFC power transfer has also been discussed in [26], [27]. Song et al. in [26] developed a sediment microbial fuel cell (SMFC) with lower external resistances, resulting in higher anode potentials. Lyon et. al. [27] monitored a power density production with a MFC for 18 days, varying the external resistance, finding that during the initial period of higher maximum power output, two peaks appear on the polarization curve. These peaks are related to separate populations of bacteria that produce electricity. Song et al. [26] observed that power density is improved with increased external resistance, achieving a power density of 3.15 mW cm^{-2} .

4.2. Sensor Node Power Consumption: DPM Strategy.

In order to test the power consumption of the sensor node, the data acquisition, MCU, and transmission states are verified to analyze the energy consumed by data transmission from the sensor nodes to a gateway. The nodes are configured according the DPM strategy of subsection 3.3. Real-time measurements of sensor node energy consumption in each operating state were performed. Figure 7 shows the SSM1 stage of the DPM strategy for the PMFC-based EH system, and illustrates the sequence of states over time. After sleeping for 15 minutes ($T_{Sleep} = 900 \text{ sec}$), the system is woken up, and the sensing state is activated in the sensor module for a period of $T_{Sensing} = 1 \text{ ms}$. Next, the XBee state is activated for $T_{ActiveXbee} = .5 \text{ ms}$. Finally, the XBee transmission data state requires $T_{XbeeTX} = 2 \text{ ms}$.

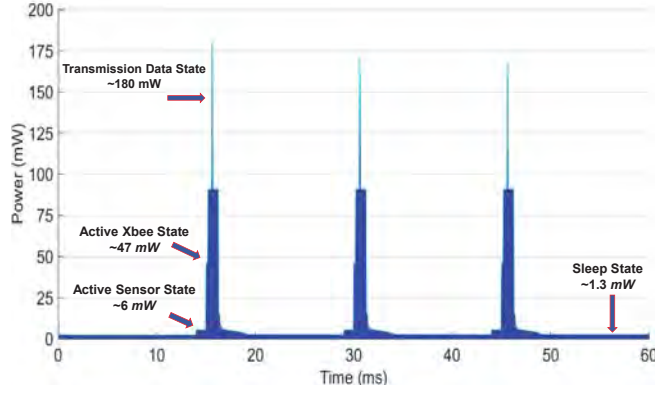


Figure 7: DPM SSM1 strategy.

Table 1 summarizes the measured power consumption results for all configuration states, corresponding to the dynamic behavior of the DPM SSM1 presented in Figure 7 and DPM SSM2.

Table 1: Power Consumption results of the PMFC-based EH system for IoT applications.

	DPM SSM2	DPM SSM1
System		
Time	2523 s	1862 s
Energy	3266 mJ	2375 mJ
Power		
Mean	1.29 mW	1.27 mW
Min	0.0 mW	0.00 mW
Max	178.8 mW	179.74 mW
Voltage		
Mean	3.58 V	3.58 V
Current		
Mean	0.36 mA	0.35 mA
Min	0.0 mA	0.00 mA
Max	49.90 mA	50.12 mA

To estimate the power consumption of the sensor node, the EnergyTrace software was used for real-time energy/power measurements designed specifically for ultra-low-power applications. EnergyTrace technology is included in Code Composer Studio version 6.0 and newer [28]. The resulting mean power consumption value is equal to 1.29 mW and 1.27 mW for the DPM SSM1 and SSM2, respectively.

The EnergyTrace yields information about energy consumption as well as the internal state of the microcontroller. These states include the ON/OFF status of the peripherals and all system clocks as well as the low power mode (LPM) currently in use.

4.3. IoT Application

A small-scale autonomous wireless sensor network for IoT applications capable of performing temperature data acquisition, cloud-based data storage services, and analysis, has been implemented as a proof of concept.

Likewise, a web-based supervision system has been developed for online presentation of the measured data. Figure 8 shows the main menu of the user interface on an Android mobile device. The main menu is composed of three main icons: the Real Time Graph, which opens a sub-window where the acquired temperature data are displayed in real-time over a period of time; the Week Graph, which displays the temperature mean by week via a new sub-window; and the icon Month Graph, which shows the mean temperature of the previous months in a new sub-window. The data are also stored in the cloud and are available for analysis via other statistical software applications.

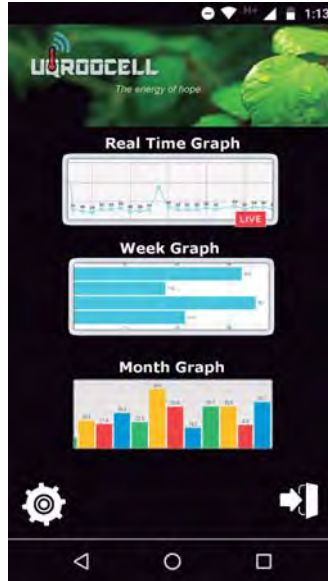


Figure 8: IoT Application: web-based supervision system.

4.4. Discussion

A well-balanced design for PMFC power generation and sensor node energy consumption is an important issue. In this regard, a PMFC design with a local plant and organic soil matter from southeastern Mexico and a dynamic power management (DPM) methodology were implemented for energy-efficient operation of the sensor node, as illustrated in Figure 5. Autonomous operation of the sensor node is achieved with a power consumption of only 1.27 mW (mean value) and a PMFC generation of up to 3.5 mW cm^{-2} . The test indicates that the temperature data transmission rate using the DPM SSM1 and SSM2 is very well supported. However, new DPM strategies can be proposed to improve the PMFC behavior when new communication protocols are required, or PMFC conditions (i.e., fertilizer and 100% of humidity) are not available.

5. Conclusions

This paper proposes a PMFC-based harvesting system for IoT applications. This solution presents an affordable design for implementing sensor nodes under the paradigm of batteryless and EH systems. Thus, a complete performance-study related to the design of the PMFC was presented, and a new PMFC-EH system was introduced and tested. The system was also configured with a DPM strategy, which allows managing the stored energy in a super capacitor unit. Finally, a web-based temperature interface was designed, which

shows the versatility of the proposal for working under the IoT application concept. The designed PMFC can provide 3.5 mW cm^{-2} with 0.7 V and 5 mA cm^{-2} . According to the field test, the PMFC-EH is able to generate enough energy for an autonomous batteryless operation of the sensor node.

Acknowledgments

This work was financed in part by SEP-CONACYT Basic Research Program: Project reference CB-241272.

References

- [1] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, M. Zorzi, Internet of things for smart cities, *IEEE Internet of Things Journal* 1 (1) (2014) 22–32.
- [2] K. Sathish-Kumar, V. Vignesh, F. Caballero-Briones, Sustainable power production from plant-mediated microbial fuel cells, in: *Sustainable Agriculture towards Food Security*, Springer, 2017, pp. 85–107.
- [3] F. L. Lobo, X. Wang, Z. J. Ren, Energy harvesting influences electrochemical performance of microbial fuel cells, *Journal of Power Sources* 356 (2017) 356–364.
- [4] M. Alaraj, M. Radenkovic, J.-D. Park, Intelligent energy harvesting scheme for microbial fuel cells: Maximum power point tracking and voltage overshoot avoidance, *Journal of Power Sources* 342 (2017) 726–732.
- [5] J. I. Huircán, C. Munoz, H. Young, L. V. Dossow, J. Bustos, G. Vivallo, M. Toneatti, Zigbee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing fields, *Computers and Electronics in Agriculture* 74 (2) (2010) 258 – 264.
- [6] W. G. Meikle, N. Holst, Application of continuous monitoring of honeybee colonies, *Apidologie* 46 (1) (2015) 10–22.
- [7] J. Gutiérrez, J. F. Villa-Medina, A. Nieto-Garibay, M. A. Porta-Gándara, Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 63 (1) (2014) 166–176.
- [8] D. K. Sreekantha, K. A. M., Agricultural crop monitoring using IOT - a study, in: *2017 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, 2017, pp. 134–139.
- [9] F. Khaled, O. Ondel, B. Allard, Microbial fuel cells as power supply of a low-power temperature sensor, *Journal of Power Sources* 306 (2016) 354–360.
- [10] A. Schievano, A. Colombo, M. Grattieri, S. P. Trasatti, A. Liberale, P. Tremolada, C. Pino, P. Cristiani, Floating microbial fuel cells as energy harvesters for signal transmission from natural water bodies, *Journal of Power Sources* 340 (2017) 80 – 88.
- [11] R. Nitisravut, R. Regmi, Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017) 81 – 89.

- [12] D. Strik, H. Hamelers, J. Snel, C. Buisman, Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell, *Int J. Energ Res* 32 (2008) 870 – 876.
- [13] N. Degrenne, F. Buret, B. Allard, P. Bevilacqua, Electrical energy generation from a large number of microbial fuel cells operating at maximum power point electrical load, *Journal of Power Sources* 205 (2012) 188 – 193.
- [14] H. Wang, J.-D. Park, Z. Jason Ren, Practical energy harvesting for microbial fuel cells: A review, *Int J. Energ Res* 49 (2015) 3267 – 3277.
- [15] R. A. Timmers, D. P. Strik, H. V. Hamelers, B. C. J.N., Characterization of the internal resistance of a plant microbial fuel cell, *Electrochimica Acta* 72 (2012) 3267 – 3277.
- [16] A. Larrosa-Guerrero, K. Scott, I. Head, F. Mateo, A. Ginesta, C. Godinez, Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells, *Fuel* 89 (2010) 3985 – 3994.
- [17] K. Wetsler, E. Sudirjo, C. J. Buisman, D. P. Strik, Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode, *Applied Energy* 137 (2015) 151–157.
- [18] M. Moqsud, J. Yoshitake, Q. S. Bushra, M. Hyodo, K. Omine, D. Strik, Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation, *Waste Management* 36 (2014) 63–69.
- [19] M. Helder, D. Strik, H. Hamelers, R. Kuijken, C. Buisman, New plant-growth medium for increased power output of the plant-microbial fuel cell, *Bioresource Technology* 104 (2012) 417–423.
- [20] L. Technology, LTC3108: ultralow voltage step-up converter and power manager, <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3108fc.pdf> (May 2018).
- [21] Adafruit, SHT10: mesh protected weather-proof temperature/humidity sensor, <https://www.adafruit.com/product/1298> (May 2018).
- [22] R. M. Passos, C. J. N. Coelho, A. A. F. Loureiro, R. A. F. Mini, Dynamic power management in wireless sensor networks: An application-driven approach, in: *Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services*, 2005, pp. 109–118.
- [23] N. Ahmed, H. Rahman, M. Hussain, A comparison of 802.11ah and 802.15.4 for IoT, *ICT Express* 2 (3) (2016) 100–102.
- [24] FertiQuim, Diammonium phosphate, http://fertiQuim.com.mx/wp-content/uploads/2016/06/fofato_diamonico.pdf (May 2018).
- [25] A. C. Sophia, S. Sreeja, Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 21 (2017) 59 – 66.
- [26] T. Song, Y. Z.S., Z. Z.W., J. H.L., Removal of organic matter in freshwater sediment by microbial fuel cells at various external resistances, *J Chem Technol Biotechnol* 85 (2010) 1489–1423.

- [27] D. Y. Lyon, F. Buret, J.-M. Vogel, Timothy M. and Monier, Is resistance futile? changing external resistance does not improve microbial fuel cell performance, *Bioelectrochemistry* 78 (2010) 2–7.
- [28] T. Instruments, MSP energytrace technology, <http://www.ti.com/tool/energytrace> (Jun. 2018).